การศึกษาการออกแบบส่วนอุ่นแท่งเหล็กด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาเหล็ก

A Study of the Design of a Slab Preheating Chamber by Flue Gas for a Reheating Furnace

กิติพงศ์ กังวานสกล* และ จิตติน แตงเที่ยง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ. พญาไท
เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
*ติดต่อ: E-mail: kitipong.j.k@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์: (662) 210-3071, เบอร์โทรสาร: (662) 674-1542

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมที่เป็นพื้นฐานสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานมากที่สุดเป็นอันดับต้นๆ และยังเป็นอุตสาหกรรมที่ส่งวัตถุดิบต่อไปให้กับอุตสาหกรรมอื่นๆ ด้วย โดยส่วนที่จะศึกษานั้นเป็นอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลายซึ่งเป็นการแปรรูปวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางคือเหล็กแท่งแบน (slab) โดยการรีดร้อนให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ก่อนการรีดร้อนนั้นจะต้องทำการอุ่นแท่งเหล็กให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 1100-1250°C โดยการป้อนเหล็กแท่งเข้าสู่เตาเผาเหล็ก (reheating furnace) การให้ความร้อนจะให้จากการเผาเชื้อเพลิงผ่านหัวเผาโดยตรงซึ่งโดยทั่วไปแล้วความร้อนที่ให้กับเตาเผาจะเกิดการสูญเสียในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสีย ถึงแม้ว่าไอเสียนั้นจะถูกนำไปใช้แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่ออุ่นอากาศขาเข้าที่ recuperator เพื่อเป็นการลดการสูญเสียลง แต่อุณหภูมิขาออกของไอเสียก็ยังมีค่าอยู่ที่ 300-500°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงอยู่ดี งานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการศึกษาโดยการจำลองสภาพให้ไอเสียที่ยังมีความร้อนหลงเหลืออยู่นั้นไหลผ่านต่อเข้าสู่ส่วนอุ่นร้อนที่ออกแบบขึ้นซึ่งจะแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียกับแท่งเหล็กที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ทำให้อุณหภูมิขาเข้าของเหล็กมีค่าสูงขึ้นเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและเชื้อเพลิงอีกทางหนึ่ง โดยตัวอย่างที่จะทำการศึกษานั้นเป็นเตาเผาเหล็กที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน ซึ่งจะมีส่วนที่ต้องคำนึงถึงคือจุดน้ำค้างกรด (acid dew point) ของไอเสีย เนื่องจากไอเสียที่มีอุณหภูมิลดลงจนถึงจุดหนึ่งจะทำให้มีสภาวะเป็นกรดขึ้น การคำนวณส่วนอุ่นร้อนที่เกิดขึ้นจึงต้องคำนึงถึงจุดน้ำค้างกรดด้วย ผลการศึกษาที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งที่ใช้เตาเผาเหล็กขนาด 275 ตัน/ชม. วัตถุดิบในการผลิตคือเหล็กแท่งแบน (Slab) และใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง พบว่าการนำไอเสียที่เหลือทิ้งจากเตาเผาเหล็กซึ่งมีอุณหภูมิขาออกอยู่ที่ 408.37°C มาอุ่น Slab ขนาดเฉลี่ย 250x1260x9240 mm หนัก 22.88 ตัน จำนวน 17 แท่ง เป็นเวลา 90 นาที จากการคำนวณสามารถเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นเหล็กได้จาก 30°C ขึ้นได้เป็น 74.11°C สามารถประหยัดพลังงานได้ 13.56 MJ/ตัน คิดเป็นจำนวนเงินที่ประหยัดได้จากการลดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 35,981 บาท/วัน

คำหลัก: การอุ่นเหล็ก/ไอเสีย/เตาเผาเหล็ก

Abstract

The iron and steel industry is one of the major industries for developing the country and is ranked as one of the highest energy consumption among all industrial sectors. It is also served as a primary industry that provides materials to secondary industries as well. This present study focuses on a slab, a product from a steelmaking process, which will be sent to a hot-rolling mill to form a final product. Before the rolling process, slab is heated to a proper temperature of 1100-1250°C by charging into a reheating furnace. Heat is generated by a combustion process from direct-fired burners. In general, heat loss from the reheating furnace occurs by several mechanisms including the flue gas loss. Although a recuperator is used to reduce heat loss by recovering some of that to preheat the

combustion air, the exit flue gas temperature is still as high as 300-500°C. This research studies the simulation of the flue gas flow with the remaining thermal energy into an additional design section for preheating the slab before charging into reheating furnace. This will result in a higher slab charging temperature and a reduction of fuel consumption. The case study is performed on a pusher-type reheating furnace using fuel oil. Another consideration includes the acid condensation of the flue gas due to the lower flue gas temperature than the acid dew point. The result from a 275-ton/hr reheating furnace shows that seventeen slabs with a size of 250x1260x9240 mm and a weight of 22.88 ton can be preheated from 30°C to 74.11°C. The preheating time is 90 minutes with the flue gas temperature of 408.37°C. The energy saving is calculated to be 17.15 MJ/ton of the slab, which can be converted to the fuel cost of 35,981 bath per day.

Keywords: Slab Preheating/Flue Gas/Reheating Furnace

1. บทนำ

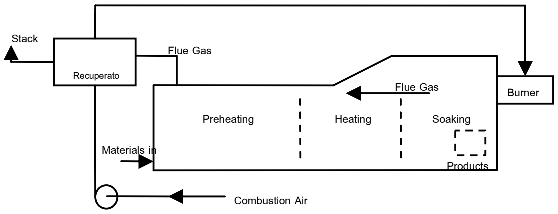
อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่เป็นพื้นฐานสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่ผลิตวัตถุดิบเพื่อส่งต่อให้กับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง อุตสาหกรรมก่อสร้าง ฯลฯ เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานสูงมากอันดับต้นๆ ของประเทศและของโลก การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของอุตสาหกรรมเหล็กจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะจะช่วยประหยัดพลังงานและการใช้เชื้อเพลิงได้ เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงในตลาดโลกนั้นมีค่าสูงขึ้นทุกวันเพราะทรัพยากรที่มีจำกัด อุตสาหกรรมเหล็กนั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น อุตสาหหรรมเหล็กขั้นกลาง และอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย ซึ่งส่วนที่จะศึกษานั้นเป็นส่วนของอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลายที่เป็นการแปรรูปวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางคือ เหล็กแท่งต่างๆ ให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปต่อไป มีอุปกรณ์หลักที่สำคัญคือเตาเผาเหล็กที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงให้ความร้อนแก่ชิ้นเหล็กจนมีอุณหภูมิ 1100-1300°C ก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการต่างๆ เพื่อแปรรูปต่อไป โดยที่การให้ความร้อนแก่แท่งเหล็กนั้นจะเป็นการให้ความร้อนผ่านหัวเผาโดยตรงก่อให้เกิดไอเสียขึ้นในกระบวนการผลิต ไอเสียที่เกิดขึ้นนั้นมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 800°C หลังออกจากเตาเผาเหล็ก การจะปล่อยทิ้งไปนั้นถือเป็นการสูญเสียพลังงานอย่างมหาศาล จึงนิยมนำไอเสียที่ได้นั้นไปอุ่นอากาศขาเข้าสู่เตาเผาโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านอุปกรณ์ที่ชื่อ recuperator เสียก่อนแล้วปล่อยทิ้ง แต่จากการสังเกตจาก โครงการการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก[1] และ W.H. Chen และคณะ (2005) [2] พบว่าอุณหภูมิไอเสียหลังออกจาก recuperator แล้วยังมีอุณหภูมิที่สูงอยู่พอสมควรที่ 300-500°C สามารถที่จะนำมาใช้ทำประโยชน์ได้เพิ่มเติม จึงมีแนวความคิดที่จะนำไอเสียนั้นมาอุ่นแท่งเหล็กก่อนจะนำเข้าสู่เตาเผาเหล็กเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่ง

จากการศึกษาของ Minxing และคณะ (2010) [3] ศึกษาพบว่า Bi ของเหล็กแท่งยาว (billet) อยู่ที่ 0.03 (< 0.1) ทำให้สามารถใช้ lump capacitance method ในการคำนวณการเพิ่มของอุณหภูมิชิ้นเหล็กได้ และจากการคำนวณ เพื่อที่จะทำให้เหล็กมีอุณหภูมิจาก 2.7°C ขึ้นไปถึง 315°C จะใช้เวลา 1.48 ชั่วโมง ด้วยไอเสียอุณหภูมิ 815°C จะสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 278.12 kJ/kg ประหยัดเงินได้ถึงปีละ $215,086 นอกจากนี้ M.Shamanian และ A.Najafizadeh (2004) [4] นั้นพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นเหล็กก่อนนำเข้าเตาเผาทุกๆ 100°C จะช่วยประหยัดพลังงานได้ประมาณ 80-120 kJ/kg สำหรับเหล็กแท่งแบน (slab) การศึกษานี้จึงจะใช้แนวทางนี้ในการวิเคราะห์ถึงอุปกรณ์การอุ่นเหล็กด้วยความร้อนทิ้งจากไอเสีย โดยมีวัตถุประสงค์คือนำข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อมาคำนวณสมดุลความร้อนและวิเคราะห์การประหยัดพลังงานเมื่อจำลองการอุ่นเหล็กร้อนด้วยไอเสีย

2. เตาเผาเหล็กและการคำนวณ

เตาเผาเหล็กที่จะนำมาทำการศึกษาในของการวิจัยครั้งนี้นั้นเป็นเตาเผาเหล็กของโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งซึ่งมีขนาด 275 ตันต่อชั่วโมง และใช้น้ำมันเตาเป็น

เชื้อเพลิงในการผลิต ตัวเตาเผาเป็นแบบ walking heart-type ภายในเตาแบ่งออกเป็น 3 โซนคือ preheating heating และ soaking เตาเผาทำงานตลอด 24 ชั่วโมง เก็บข้อมูลจากเดือนพฤศจิกายน 2554 เลือกวันที่มีการผลิตสูงที่สุดคือ 200.2 ตัน/ชม. คิดเป็น 72.8% ของกำลังการผลิตมาเฉลี่ยข้อมูลเพื่อทำการคำนวณ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเป็น slab มีขนาดเฉลี่ยคือ 250x1260x9240 มม. น้ำหนัก 22880 กก.



รูปที่ 1 ลักษณะของเตาเผาเหล็ก

พลังงานที่ใส่ให้กับเตาเผาเหล็กจะเป็นพลังงานความร้อนที่มาจากเชื้อเพลิงคือ น้ำมันเตา ซึ่งปกติแล้วนั้นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อออกซิเจนกับเชื้อเพลิงผสมกันด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมเรียกว่า ปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์ทางทฤษฎี (stoichiometric combustion) ซึ่งออกซิเจนที่นำมาเผาไหม้ในส่วนนี้นั้นส่วนใหญ่จะมาจากอากาศซึ่งมีส่วนผสมคือไนโตรเจน (79%) และออกซิเจน (21%) อาจจะมีบางครั้งที่มีการเพิ่มส่วนผสมของออกซิเจนเข้าไปเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า แต่ส่วนใหญ่แล้วจะใช้อากาศ ซึ่งค่าทางทฤษฎีที่แสดงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเรียกว่า อัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎีสามารถเขียนได้เป็นสมการ

$$AF_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right) = 12.16\frac{kg_{air}}{kg_{fuel}} \qquad (1)$$

แต่ในทางปฏิบัตินั้นการที่จะผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้ทั่วถึงกันด้วยอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยาก จึงมักมีการใส่อากาศเข้าไปเพิ่มในการเผาไหม้เพื่อให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับอากาศได้ดีและเผาไหม้ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อากาศที่ใส่เกินเข้าไปนี้จะเรียกว่าอากาศส่วนเกิน (excess air)

สำหรับน้ำมันเตานั้นสามารถจำแนกส่วนผสมของน้ำมันเตาและคุณสมบัติได้ตามตารางที่ 1 และ 2 [1]

ตารางที่ 1 ตารางแสดงองค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาเฉลี่ย

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก
C	86.4
H	11.6
S	2.0

ตารางที่ 2 ตารางแสดงคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันเตา

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
มวลโมเลกุล	5.32	kg/kmol
ความถ่วงจำเพาะ	0.964	-
ความจุความร้อนจำเพาะ	1.884	kJ/kg-K
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	43069.63	kJ/kg
AF Stoic	10.47	Nm^3/kg
AF Stoic	12.16	kg_{air}/kg_{fuel}
n_{stoic}	0.5402	$kmol_{O2}/kmol_{fuel}$

นำข้อมูลที่ได้มาเขียนเป็นสมการสมดุลเคมีได้ตามสมการที่ 2 เพื่อสามารถนำมาหาสารผสมของไอเสียและปริมาณอากาศที่ใส่เข้าไปในการเผาไหม้ได้จากการวัดปริมาณออกซิเจนในไอเสียได้

$$\begin{aligned} & C_{0.3638}H_{0.6131}S_{0.0033} + n_{stoic}\lambda\left[O_2 + 3.76N_2\right] \\ & \rightarrow 0.3836CO_2 + 0.0033SO_2 + 0.3065H_2O \qquad (2) \\ & + n_{stoic}\left[\lambda - 1\right]O_2 + n_{stoic}\lambda\left[3.76N_2\right] \end{aligned}$$

ค่า λ เป็นสัดส่วนที่เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางปฏิบัติต่ออัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี สามารถนำสมการที่ 2 มาคำนวณจาก $\%O_2$ ในไอเสียซึ่งวัดก่อนออกสู่ stack ซึ่งจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยโมลแบบเปียก (wet basis) ตามสมการที่ 3

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{(\lambda - 1)n_{stoic}}{0.6934 + (\lambda - 1)n_{stoic} + 3.76n_{stoic}} \qquad (3)$$

ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการใหม่ให้เหมาะกับการใช้งานจะได้เป็น

$$\lambda = \frac{0.5402 + 0.153\left(\frac{\%O_2}{100}\right)}{0.5402 - 2.571\left(\frac{\%O_2}{100}\right)} \qquad (4)$$

3. สมดุลมวลและสมดุลความร้อน

ข้อมูลที่นำมาคำนวณสมดุลมวลและสมดุลความร้อนเป็นค่าที่เก็บมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นค่าที่โรงงานอุตสาหกรรมบันทึกไว้

เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาจะมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สมดุลมวลของเตาเผาเหล็ก

การคำนวณสมดุลมวลของเตาเผาเหล็กจะประกอบด้วยมวลของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่เตาเผาเหล็กซึ่งเป็นข้อมูลที่ถูกวัดโดยตรง มวลของอากาศที่ไหลเข้าสู่เตาเผาเหล็กได้จากการวัดประมาณ %O_2 ในไอเสียและคำนวณกลับจากสมการที่ 2-4 และมวลของไอเสียที่ไหลออกจากเตาเผาเหล็กเป็นผลที่ได้จากการรวมมวลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ไหลเข้าสู่เตาเผาเหล็ก โดยมีสมมติฐานที่ว่าเตาเผาอยู่ในสภาวะคงที่และไอเสียหรืออากาศที่รั่วนั้นมีค่าน้อยมากได้เป็นตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางแสดงสมดุลมวลของเตาเผาเหล็ก

Input	kg/s	Output	Kg/s
1.อัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง	1.82	1.อัตราการไหลของไอเสีย	26.34
2.อัตราการไหลของอากาศ	24.52		
รวม	26.34	รวม	26.34

3.2 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

การคำนวณสมดุลความร้อนนั้นจะตั้งสมมติฐานให้เตาเผาอยู่ในสภาวะคงที่มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4 ตารางแสดงสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

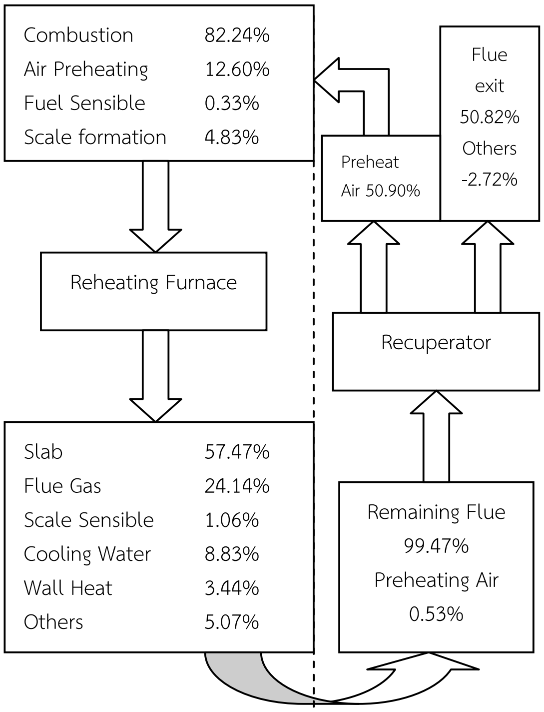
Input	kW	%	Output	kW	%
1.ความร้อนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้	78,204	82.24	1.ความร้อนสัมผัสเข้าสู่เหล็ก	54,643	57.47
2.ความร้อนจากการอุ่นอากาศ	11,977	12.60	2.ความร้อนสัมผัสของไอเสีย	22,953	24.14
3.ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล	4,592	4.83	3.ความร้อนสัมผัสเข้าสู่สเกล	1,009	1.06
4.ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า	314	0.33	4.ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น	8,396	8.83
			5.ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	3,268	3.44
			6.ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	4,818	5.07
รวม	95,087	100	รวม	95,087	100

3.3 สมดุลความร้อนของ recuperator

ในส่วนของ recuperator ก็จะมีการตั้งสมมติฐานแบบเดียวกันกับเตาเผาเหล็ก รายละเอียดของพลังงานความร้อนที่ไหลเข้าและออกจาก recuperator คือ

ตารางที่ 5 ตารางแสดงสมดุลความร้อนของrecuperator

Input	kW	%	Output	kW	%
1.ความร้อนของไอเสียที่ไหลเข้า	22,953	99.47	1.ความร้อนของไอเสียที่ไหลออก	11,727	50.82
2.ความร้อนของอากาศที่ไหลเข้า	123	0.53	2.ความร้อนของอากาศที่ไหลออก	11,977	51.90
			4.ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	-628	-2.72
รวม	23,076	100	รวม	23,076	100

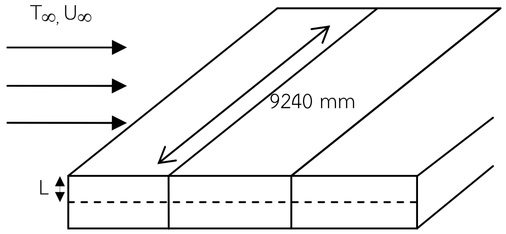


รูปที่ 2 แสดงสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กและ recuperator

4. ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณ

สำหรับการคำนวณของอุปกรณ์อุ่นเหล็กนั้นมีอยู่ 2 ส่วนคือการคำนวณในส่วนของการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอเสียกับ slab และการคำนวณเกี่ยวกับจุดน้ำค้างกรดของไอเสียเนื่องจากสารผสมในไอเสียของน้ำมันเตาจะมีกำมะถันเป็นส่วนประกอบด้วย

ชิ้นเหล็กจะถูกนำไปวางในห้องที่จะนำไอเสียผ่านเข้าไปผ่านแท่งเหล็กที่ถูกเรียงไว้ตามรูปที่ 3 และให้ความร้อนทั้งสองด้าน



รูปที่ 3 การผ่านไอเสียเข้าสู่ slab preheating zone

การถ่ายเทความร้อนระหว่างไอเสียกับ slab นั้นจะใช้การคำนวณด้วย lump capacitance method ซึ่งเป็นการเพิ่มของอุณหภูมิของวัตถุที่ถูกนำไปวางในระบบการพาความร้อน

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\left(\frac{hA_s}{\rho VC}\right)t} \qquad (5)$$

โดย T และ T_i คืออุณหภูมิสุดท้ายและเริ่มต้นของเหล็ก T_∞ คือ อุณหภูมิของไอเสีย h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของไอเสีย A_s คือพื้นที่สัมผัสระหว่างเหล็กกับไอเสีย ρ คือความหนาแน่นของเหล็ก V คือปริมาตรของเหล็ก C คือความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก และ t คือเวลาเป็นวินาที โดยสามารถคำนวณการถ่ายเทความร้อนได้ตามสมการที่ 6

$$Q = (\rho VC)(T_i - T_\infty)\left[1 - e^{-\left(\frac{hA_s}{\rho VC}\right)t}\right] \qquad (6)$$

สมการที่ 5 นี้มีเงื่อนไขในการใช้เนื่องจากความสามารถในการนำความร้อนของสารแต่ละชนิดไม่เท่ากันจึงมีการนิยามตัวแปรไร้มิติขึ้นมาเปรียบเทียบคือ Bi (Biot number) = hL/k จะต้องมีค่าไม่เกิน 0.1 โดยที่ L คือระยะจากกึ่งกลางจนถึงขอบของแท่งเหล็กในด้านความหนาและ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็ก เมื่อ $Bi < 0.1$ จะให้ความหมายว่าความสามารถในการนำความร้อนของวัตถุมีค่ามากกว่าที่ไอเสียพาความร้อนเข้าสู่วัตถุมาก ทำให้สามารถประมาณได้ว่าอุณหภูมิในจุดต่างๆ ของชิ้นเหล็กมีค่าเท่ากัน สามารถใช้สมการ lump capacitance method ได้ ซึ่งหาก Bi มีค่ามากกว่า 0.1 แล้วจะต้องใช้สมการแม่นตรงเพื่อหาอุณภูมิที่จุดต่างๆ ของแท่งเหล็กแทน

สิ่งที่ต้องทราบในการคำนวณต่อไปคือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของไอเสียซึ่งเป็นค่าที่ต้องคำนวณตามลักษณะการไหลและรูปร่างของวัตถุที่ไหลผ่าน จากรูปที่ 2 การเรียงตัวของ slab ในทิศทางขวางการไหล จะทำให้มีลักษณะเป็น flat plate ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจะอยู่กับ Re (Reynolds number) = $\rho U_\infty x/\mu$ เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ U_∞ คือความเร็วการไหลของไอเสีย x คือระยะจากจุดเริ่มต้นของการไหลผ่าน flat plate และ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดพลศาสตร์ของไอเสีย เมื่อ Slab มีขนาด 0.25x1.26x9.24 ม. ออกแบบให้ช่องการไหลมีขนาด 1x10 ม. จากข้อมูลสมดุลมวลที่ได้อัตราการไหลของไอเสียคือ 26.34 kg/s หรือ 34.23 m^3/s ทำให้ความเร็วของไอเสียที่ไหลผ่านคือ 3.423 m/s Re เมื่อไหลผ่าน slab ในตอนแรกการคำนวณจะต้องเป็นการไหลแบบราบเรียบ เมื่อถึงจุดเปลี่ยนการไหลจะต้องใช้การคำนวณเฉลี่ยระหว่างราบเรียบกับปั่นป่วน และสุดท้ายจะเป็นการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนไปจนสุดแผ่น จากสมการที่ 7

$$\bar{h}_L = \frac{1}{x_2 - x_1}\left(\int_{x_1}^{x_2} h_{local}\,dx\right) \qquad (7)$$

สามารถหา h_{local} ได้จากการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแผ่นราบ [5] สำหรับการไหลแบบราบเรียบตามสมการที่ 8

$$h = \frac{k_f}{x} 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \qquad (8)$$

และการไหลแบบปั่นป่วนตามสมการที่ 9

$$h = \frac{k_f}{x} 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \qquad (9)$$

เมื่อนำสมการที่ 8 และ 9 มาคำนวณตามสมการที่ 7 และจัดรูปจะได้ตามสมการที่ 10-12

$$h = \frac{k_f}{x_2 - x_1} 0.664 \left(Re_{x2}^{1/2} - Re_{x1}^{1/2} \right) Pr^{1/3} \quad (10)$$

$$h = \frac{k_f}{x_2 - x_1} \begin{bmatrix} 0.664 \left(Re_{xc}^{1/2} - Re_{x1}^{1/2} \right) \\ + 0.037 \left(Re_{x2}^{4/5} - Re_{xc}^{4/5} \right) \end{bmatrix} Pr^{1/3} \quad (11)$$

$$h = \frac{k_f}{x_2 - x_1} 0.037 \left(Re_{x2}^{4/5} - Re_{x1}^{4/5} \right) Pr^{1/3} \quad (12)$$

เมื่อ k_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของไอเสีย Pr คือตัวเลขแพรนเทิลของไอเสีย x_2 และ x_1 เป็นจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น x_c คือ จุดเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปยังการไหลแบบปั่นป่วนที่ $Re_{xc} = 5x10^5$ โดยสมการที่ 10-12 จะเป็นการคำนวณที่เฉลี่ยในแต่ละแผ่น เมื่อเปลี่ยนคำนวณชิ้นเหล็กที่ต่างกันก็จะมีค่า Re ที่ต่างกันทำให้ค่าสัมประสิทธ์การพาความร้อนของไอเสียสำหรับการคำนวณในแท่งเหล็กแต่ละแท่งมีค่าไม่เท่ากัน สำหรับการอุ่นเหล็กในครั้งนี้จะเป็นการอุ่นเหล็กแบบ batch คืออุ่นเป็นรอบๆ ไปและนำเหล็กออกมาวางทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติเพื่อรอการผลิตต่อไป อุณหภูมิของเหล็กที่ถูกวางในบรรยากาศปกตินั้นจะใช้สมการที่ 11 [4] เพื่อมาคำนวณการสูญเสียอุณหภูมิของชิ้นเหล็ก

$$T = \left(T_o - T_{os} \right) e^{\left[-0.0530 \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{nH} \right) \tau^{0.848} \right]} + T_{os} \quad (13)$$

เมื่อ T และ T_o คืออุณหภูมิสุดท้ายและเริ่มต้นของเหล็กแท่ง, T_{os} คืออุณหภูมิของบรรยากาศ, τ คือเวลา, H และ B คือความหนาและความกว้างของเหล็กแท่งแบน n คือจำนวนเหล็กแท่งที่วางซ้อนกัน

4.1 การคำนวณ acid dew point

การคำนวณ acid dew point ของ ไอเสียเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากสมการของน้ำมันเตานั้น สารผสมที่ออกมามีสารที่จะทำให้เกิดกรดอยู่ด้วยคือ SO_2 และ SO_3 ซึ่ง acid dew point ของ SO_3 จะมีค่าสูงกว่า จึงจะต้องมีการคำนวณ acid dew point ของสารผสม ซึ่งเป็นไปตามสมการ V.B Correlation [6] (Verhoff และ Banchero) สำหรับการประมาณค่า acid dew point ของ SO_3 โดยให้ปริมาณการเปลี่ยนแปลงจาก SO_2 เป็น SO_3 อยู่ที่ค่าสูงสุดคือ 5% [7]

$$\frac{1000}{T_{Dew}} = 2.276 - 0.0294 \ln(P_{H_2O}) - 0.0.0858 \ln(P_{SO_3}) + 0.0062 \ln(P_{H_2O}) \ln(P_{SO_3}) \quad (14)$$

เมื่อ T_{DEW} เป็นอุณหภูมิของ Acid dew point หน่วยเป็น K และ ความดันทั้งหมดหน่วยเป็น mmHg

5. ผลการคำนวณ

จากการเก็บข้อมูลที่ได้ในเดือนพฤศจิกายน 2554 เลือกวันที่มีการผลิตสูงที่สุด ได้ข้อมูลดังนี้ อุณหภูมิไอเสียเฉลี่ยเป็น 408.37°C %O_2 เฉลี่ยเป็น 0.9883% เมื่อนำมาคำนวณจากสมการที่ 4 แล้วจะได้ λ = 1.0534 เมื่อนำกลับไปคำนวณสารผสมของไอเสียในสมการที่ 2 โดยที่แปลง SO_2 ไปเป็น SO_3จำนวน 5% จะได้เป็น

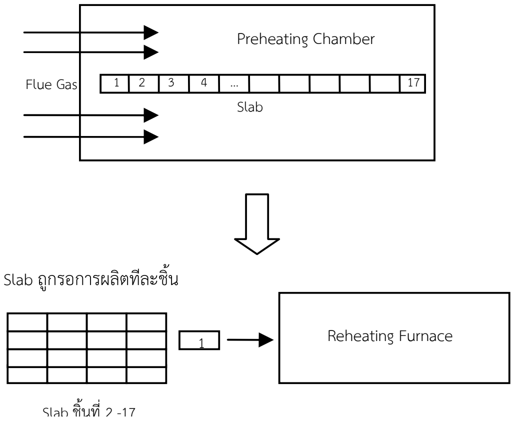
ตารางที่ 6 แสดงสัดส่วนโมลและความดันย่อยของสารผสมในไอเสีย

สาร	สัดส่วน mole	% mole	ความดันย่อย (mmHg)
CO_2	0.3836	14.2155	108.0274
SO_2	0.0003135	0.1162	0.8828
H_2O	0.3065	11.3583	86.3128
O_2	0.02667	0.9883	7.5105
N_2	1.9784	73.3156	557.1328
SO_3	0.000165	0.0061	0.04647

เมื่อนำความดันย่อยจากตารางที่ 6 มาคำนวณตามสมการที่ 14 จะได้อุณหภูมิ acid dew point เป็น 157.25°C นั่นคืออุณหภูมิของไอเสียเมื่อผ่านส่วนอุ่นร้อนแล้วจะต้องมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่านี้นั่นเองเพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายกับชิ้นเหล็กและระบบ

จากข้อมูลที่ได้มาจะใช้ชิ้นเหล็กที่จะถูกผลิตใน 2 ชั่วโมงถัดไปมาอุ่นเสียก่อนและเวียนไปเป็นรอบๆ เพื่อให้การผลิตมีความต่อเนื่องจึงเลือกให้ทำการอุ่นด้วยเวลา 90 นาที และใช้เวลาอีก 30 นาทีเพื่อนำเหล็กเข้าและออกจากส่วนอุ่นร้อนนี้ เหล็กที่ถูกนำออกไปจะต้องถูกนำไปวางไว้เพื่อรอการผลิตต่อไป ชุดการผลิตที่นำมาคำนวณจะเป็นการผลิตตั้งแต่ 0.00 น. ถึง 2.00 น. ของวันที่ทำการคำนวณ ผลการคำนวณที่ได้จากสมการที่ 5-6 และ 10-12 ได้โดยเหล็กแต่ละชิ้นมีความกว้าง 1.26 เมตร สามารถคำนวณ Re ของแต่ละชิ้นเพื่อนำไปหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและอุณหภูมิของเหล็ก ตาม

ตารางที่ 7 โดยใน 2 ชั่วโมงจะมีแท่งเหล็กเข้าสู่เตาจำนวนทั้งสิ้น 17 ชิ้น มีการใส่เหล็กตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 การใส่แท่งเหล็กเข้าสู่เตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 7 แสดงการคำนวณการอุ่นร้อนของแท่งเหล็ก

slab no	h (W/m^2-K)	Bi	T (°C)	Q (kW)
1	12.6037	0.0260	85.7572	278.386
2	5.2206	0.0108	54.1781	132.705
3	4.0059	0.0083	48.6942	104.283
4	3.3771	0.0070	45.8222	89.013
5	8.2843	0.0171	67.6412	198.479
6	13.0474	0.0270	87.5630	285.832
7	12.6175	0.0261	85.8137	278.621
8	12.2608	0.0253	84.3550	272.541
9	11.9572	0.0247	83.1085	267.298
10	11.6938	0.0242	82.0231	262.696
11	11.4619	0.0237	81.0641	258.603
12	11.2550	0.0233	80.2067	254.920
13	11.0688	0.0229	79.4327	251.577
14	10.8996	0.0225	78.7281	248.519
15	10.7449	0.0222	78.0822	245.703
16	10.6024	0.0219	77.4867	243.096
17	10.4706	0.0216	76.9346	240.670
รวม				3912.94

จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของชิ้นเหล็กแต่ละชิ้นที่ออกมาจะมีค่าไม่เท่ากันเนื่องการไอเสียที่ผ่านเข้าไปในระบบนั้นไหลทางเดียวทำให้เหล็กชิ้นที่อยู่ด้านหน้าจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าเหล็กที่อยู่ทางด้านหลังและ Bi ของทุกชิ้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 0.1 เพื่อให้การคำนวณด้วยสมการที่ 5 มีความถูกต้อง อุณหภูมิเฉลี่ยของ slab จะเป็น 75.11°C โดยที่อุณหภูมิแท่งเหล็กก่อนอุ่นอยู่ที่ 30°C เมื่อนำค่าความร้อนที่ได้มาเฉลี่ยด้วยเวลาที่ใส่ชิ้นเหล็กมาคำนวณจะได้รวมทั้งหมด 3912.94 kW ซึ่งเป็นความร้อนที่แท่งเหล็กได้รับจากไอเสียที่ผ่านเข้าไปในระบบ จากสมมติฐานที่ว่าระบบไม่มีการสูญเสียความร้อนใดๆ ความร้อนนี้จะเป็นความร้อนที่มาจากไอเสียทั้งหมดทำให้สามารถคำนวณอุณหภูมิขาออกของไอเสียได้ออกมาเป็น 248.99°C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมินำค้างกรดของไอเสียไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบ

เมื่อได้อุณหภูมิของชิ้นเหล็กแล้วแท่งเหล็กจะต้องถูกนำออกมารอการผลิตเป็นเวลา 30 นาทีรวมกับเวลารอใส่แท่งเหล็กแต่ละแท่ง ทำให้การใส่แท่งเหล็กแต่ละแท่งไม่เป็นไปตามอุณหภูมิที่คำนวณเอาไว้ข้างต้นต้องนำสมการที่ 13 มาคำนวณให้สัมพันธ์กับเวลาที่แท่งเหล็กเข้าไปในเตาเผาเหล็กจึงจะสามารถคำนวณการประหยัดพลังงานได้ ซึ่งเวลาของการใส่แท่งเหล็กแต่ละแท่งจะไม่เท่ากัน

ตารางที่ 8 แสดงการคำนวณพลังงานที่ประหยัดได้

Slab no	T (°C)	Time Waiting (hr)	T loading (°C)	Qsave (kJ)
1	85.7572	0.61	77.2045	468,736.68
2	54.1781	0.72	49.9649	198,249.38
3	48.6942	0.82	45.0656	149,600.24
4	45.8222	0.94	42.4281	123,410.12
5	67.6412	1.06	58.8281	286,260.27
6	87.5630	1.17	73.0100	427,085.48
7	85.8137	1.29	70.6960	404,108.29
8	84.3550	1.41	68.6929	384,216.99
9	83.1085	1.52	66.9120	366,533.01
10	82.0231	1.64	65.3208	350,732.34
11	81.0641	1.76	63.8720	336,346.72
12	80.2067	1.87	62.5483	323,202.07
13	79.4327	1.98	61.3775	311,575.98
14	78.7281	2.09	60.2914	300,791.66
15	78.0822	2.20	59.2728	290,676.07
16	77.4867	2.31	58.3221	281,236.13
17	76.9346	2.42	57.4217	272,294.83
	รวม			5,275,056.26

การใส่ slab เข้าสู่เตาเผาเหล็กสามารถทำได้ได้ 2 แบบคือเรียงจาก slab ที่อุณหภูมิสูงไปหาอุณหภูมิต่ำ และ อุณหภูมิต่ำไปอุณหภูมิสูง ซึ่งจากการคำนวณพบว่าอุณหภูมิสูงไปต่ำสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าและ

แสดงไว้ในตารางที่ 8 การประหยัดพลังงานที่ได้ใน 2 ชั่วโมงสำหรับการใส่ slab 17 แท่งเข้าสู่เตาเผาเหล็กจะอยู่ที่ 5,275,056 kJ โดยคำนวณจากพลังงานที่ลดลงจากการใส่ชิ้นเหล็กด้วยอุณหภูมิปกติของแต่ละชิ้น ซึ่งเมื่อทำเป็นอัตราส่วนต่อจำนวนเหล็กที่ผลิตจะได้ 13.56 kJ/kg จากอุณหภูมิเฉลี่ยของ slab ที่ใส่เข้าสู่เตาเผาเหล็กที่ 61.25°C ลดลงหลังจากออกจากส่วนอุ่นร้อน 13.86°C เมื่อแปลงพลังงานที่ลดได้คือ 5,275,056 kJ เป็นปริมาณน้ำมันเตาจะได้เป็น 122.48 kg หรือ 2,998 บาทในเวลา 2 ชั่วโมง หรือ 35,981 บาทในเวลา 1 วัน

6. สรุป

การศึกษาครั้งนี้ได้เป็นการนำเอาไอเสียจากเตาเผาเหล็กที่ผ่าน recuperator เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนจากอากาศขาเข้าเรียบร้อยแล้ว แต่ยังมีอุณหภูมิหลงเหลืออยู่ที่ 408.37°C มาจำลองให้ผ่าน slab ที่จะเข้าสู่เตาเผาเหล็กเพื่อให้ slab มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นการประหยัดพลังงานของเตาเผาเหล็กอีกทางหนึ่ง slab ที่ใช้คำนวณมาจากค่าเฉลี่ยมีขนาด 250x1260x9240 mm หนัก 22,880 กิโลกรัม จากข้อมูลการใส่ slab ของโรงงานใน 2 ชั่วโมงพบว่ามีการใส่ slab จำนวน 17 ชิ้น ทำการคำนวณการผ่านไอเสียสู่ slab เป็นเวลา 90 นาทีเพื่อให้มีเวลาอีก 30 นาทีในการนำ slab ชุดใหม่และเก่าเข้าและออกจากเตาเผาเหล็ก อุณหภูมิของ acid dew point ที่คำนวณได้คือ 157.25°C เป็นอุณหภูมิต่ำสุดของไอเสียที่เป็นได้หลังผ่านการอุ่นเหล็กเพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายแก่ระบบ จากการคำนวณพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นเหล็กอยู่ที่ 74.11°C หลังออกจากการอุ่น อากาศที่ไหลออกมีอุณหภูมิ 248.99°C ซึ่งยังคงมีค่าสูงกว่า acid dew point คิดเป็นพลังงานที่ไอเสียใส่ให้กับชิ้นเหล็ก 3,912.94 kW หรือ 41.7% ของค่าความร้อนที่ของไอเสียที่ออกจาก recuperator

ชิ้นเหล็กที่ถูกนำออกจากการอุ่นร้อนจะต้องนำมารอการผลิตอีกอย่างน้อย 30 นาทีสำหรับหรับ slab ชิ้นแรกที่เข้าสู่เตาและมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับ slab ชิ้นต่อไปสัมพันธ์กับการทำงานของเตาเผาเหล็ก เมื่อคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยของ slab ที่ใส่เข้าสู่เตาเผาเหล็กจริงแล้วจะอยู่ที่ 61.25°C สามารถประหยัดพลังงานได้ 5,275,056 kJ เมื่อแปลงเป็นจำนวนเงินที่ได้จากการประหยัดน้ำมันเตาแล้วจะเป็น 35,981 บาทต่อวัน ถ้าเตาเผาทำงาน 24 ชั่วโมงทุกวันตลอดปีจะประหยัดได้ 13,133,232 บาทต่อปี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่างๆ (SEC), (โครงการเกณฑ์การศึกษาการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก), กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549

[2] W.H. Chen, Y.C. Chung, J.L. Liu (2005). Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 32(5), pp. 695-706.

[3] M. Si, S. Thompson, K. Calder (2011). Energy efficiency assessment by process heating assessment and survey tool (PHAST) and easibility analysis of waste heat recovery in the reheat furnace at steel company, Renewable and Sustainable Energy Review 15 , pp. 2904-2908

[4] M. Shamanian, A. Najafizadeh (2004). Hot charge of continuously cast slabs in reheating furnaces, International Journal of ISSI, Vol.1(2004), No. 1, pp. 35-37

[5] F.P. Incropera et.al (2007). Inroduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., pp 388-390

[6] E.H. Verhoff, J.T. Banchero (1974). Predicting dew points of flue gases, Chemical Engineering Progress, Vol. 70 (1974), pp. 71-72

[7] B. ZareNezhad, A. Almanian (2011). Accurate prediction of the dew point of acidic combustion gases by using an artificial neural network model, Energy Conversion and Management 52 (2011), pp. 911-916