

การศึกษาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในรีเจเนอเรเตอร์แบบโครงอิฐทนไฟ

A Study on Optimum Time Cycle of a Fireclay Brick Regenerator

มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล¹ จิรชนม์ เสรีวิชยสวัสดิ์² มโนสิทธิ์ แจ่งจบ³

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ 10330

โทร 218-6642 โทรสาร 218-6642 E-mail : fmemtt@eng.chula.ac.th, irachon@hotmail.com, manosit@hotmail.com

Mingsak Tangtakul¹ Jirachon Sereewichayasawad² Manosit Jangjob³

Department of Mechanical Engineering , Faculty of Engineering , Chulalongkorn University

Bangkok 10330 , Thailand

Tel : 218-6642 , Fax : 218-6642 E-mail : fmemtt@eng.chula.ac.th, irachon@hotmail.com, manosit@hotmail.com

บทคัดย่อ

การหาวัฏจักรการนำความร้อนที่เหมาะสมในรีเจเนอเรเตอร์สามารถทำให้ได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ (heat recovery) มากขึ้น ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เข้ามาแก้ปัญหาการนำความร้อนสถานะไม่อยู่ตัวในหนึ่งมิติโดยจะใช้ lumped heat transfer coefficient ในการช่วยจำลองการนำความร้อนในทิศตั้งฉากกับการไหลซึ่งข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการปรับลดเวลาที่ใช้ในการสลับคาบการไหลให้เหมาะสมจะทำให้มีปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มากขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจาก ช่องทางการไหลก่อนที่จะถึงปากทางเข้า และช่องทางการไหลหลังทางออกของรีเจเนอเรเตอร์ใช้วัสดุสะสมความร้อน ทำให้ก๊าซเสียถูกดูดความร้อนก่อนที่จะไหลมาถึงปากช่องทางเข้า (Heating period) หรือ อากาศดีถูกให้ความร้อนก่อนที่จะไหลมาถึงปากช่องทางเข้า (Cooling period)

ผลและบทสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้ถูกส่งไปเพื่อปรับปรุงวัฏจักรเวลาการทำงานของรีเจเนอเรเตอร์ ที่โรงงานไทยแลนด์สเมลติงแอนด์รีไฟน์ม็อด (ไทยซาร์โก) จังหวัดภูเก็ต จากการใช้งานได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ สามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงได้จริง

Abstract

A studying on optimum time cycle of a fireclay brick regenerator will be getting the most heat recovery. Mathematical model is used to calculate one dimensional transient conduction problem. Lumped heat transfer coefficient is used to simplify conduction in direction perpendicular of flow. Experimental result

is used to compare with numerical result. The result is shown that the time cycle is reduced, which can get more heat recovery than the time cycle is 30 minutes. Main error is Geometric of Regenerator which was enclosed by wall before entrance and after exit terminal. Because of walls made from the same materials as heat storage unit. From this results, exhaust gas is cool down because of heat convection to enclosure wall before it reaches the inlet of heat storage unit (hot period) or fresh air is heated up because of heat convection from enclosure wall before it reaches the inlet of heat storage unit (cold period).

In conclusion, This research was sending to the factory to improve time cycle of thermal regenerator at Thailand smelting and refining (Thaisarco) Phuket. Operating result is satisfaction. Its can reduce oil consumption.

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A	Heat transfer surface area	m^2
c	Specific heat at constant pressure	$kJ/kg\ K$
$\bar{h}$	Modified heat transfer coefficient	$W/m^2\ K$
k	Thermal conductivity	$W/m\ K$
L	Length of unit	m
M	Total mass of storage material	kg
m_f	Mass of fluid in storage channels	kg
$\dot{m}_f$	Mass rate of flow	kg/s
P	Duration of period for regenerator	s
T	Nondimensional temperature	-
t	Temperature	$^{\circ}C, K$
x	Axial coordinate	m

Greek

η	Nondimensional time	-
η_{REG}	Thermal ratio , dimensionless	-
Λ	Reduced length ($\frac{\bar{h}A}{\dot{m}_f c_f}$)	-
ξ	Nondimensional axial distance	-
Π	Reduced period , dimensionless	-
τ	Time	s

Subscripts

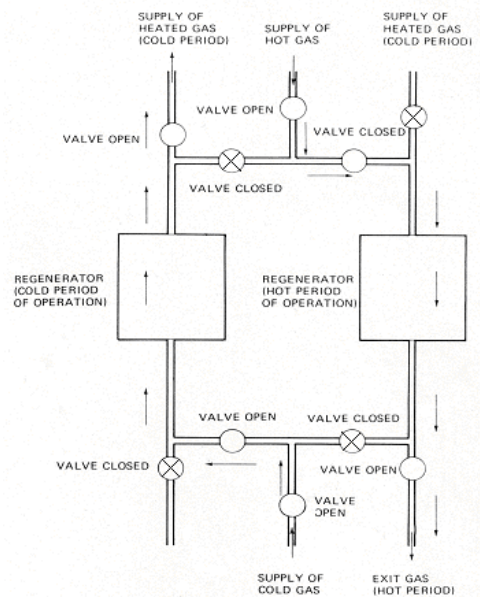
1	Heating Period
2	Cooling Period
f	Fluid
fi	Fluid at entrance to unit
fo	Fluid at exit of one unit
m	Storage material

Superscripts

'	Heating period for regenerator
"	Cooling period for regenerator

1.บทนำ

การถลุงแร่ดีบุกมีการปล่อยก๊าซเสียอุณหภูมิสูง $1350^{\circ}C$ ซึ่งการนำความร้อนกลับมาใช้ต้องอาศัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถทนอุณหภูมิสูงและทนฝุ่นละอองได้ดี Thermal Regenerator หรือ Regenerative Heat Exchanger ซึ่งสามารถทนต่อสภาพดังกล่าวได้ จึงถูกนำมาใช้งานเพื่อถ่ายเทพลังงานความร้อนจากก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงมาสะสมในโครงอิฐทนไฟ (Checkerwork of Fireclay Brick) ใน Regenerator



รูปที่ 1 Fixed two-bed regenerator system (Frank W. Schmidt and A. John Willmott,1981)

เมื่อก๊าซเสียหลังจากใช้ในการเผาไหม้ไหลผ่าน Regenerator เป็นเวลาหนึ่งสัปดาห์จึงสลับให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไหลผ่าน ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยโครงอิฐทนไฟจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ กับ ก๊าซเสีย หากอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงเท่าใดก็จะประหยัดเชื้อเพลิงได้มากเท่านั้น การจะทำให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงมากขึ้นนั้น เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อกระบวนการทำงานของเตาหลอมและเงินลงทุนที่ต้องใช้ การศึกษาเรื่องการปรับเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวน้อยและสามารถทำได้สะดวกที่สุด รวมทั้งไม่ต้องใช้เงินลงทุนใดๆเพิ่มเติม จึงมีการศึกษาวิจัยทางด้านเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ในการทำให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้เมื่อผ่าน Regenerator มีอุณหภูมิสูงมากที่สุด หรือ ให้ได้ก๊าซเสียหลังจากการเผาไหม้เมื่อผ่าน Regenerator มีอุณหภูมิต่ำมากที่สุด เพื่อให้มีปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ (heat recovery) มากที่สุด

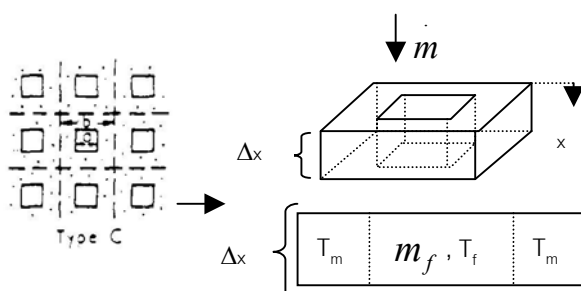
2.ทฤษฎีบท

Regenerator ที่ทำการวิจัย เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งกับเตาหลอมดีบุก ของโรงงาน ไทยแลนด์สเมลต์ติ้งแอนดีรีไฟนิง จำกัด (ไทยชาร์โก้) จังหวัดภูเก็ต ทุกพื้นผิวใน Regenerator ประกอบขึ้นจากอิฐทนไฟก่อเรียงเป็นรูปปล้องไฟสี่เหลี่ยมรวมทั้งผนังที่ล้อมรอบ อิฐทนไฟจะทำหน้าที่สะสมและถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิดที่ไหลผ่าน

A.J. WILLMOTT (1964) [1] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟและ fluid ที่ไหลผ่านใน Regenerator โดยใช้วิธีจำลองแบบจากบทความของ LAMBERTSON แต่มีการประยุกต์เอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์เพิ่มเติม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มาจากการคำนวณเป็นรอบๆ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (equilibrium)

อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้และก๊าซเสียจะไหลผ่านโครงอิฐทนไฟ โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. ไม่คำนึงถึงผลจากการนำความร้อนของอิฐทนไฟและ fluid ในทิศทางการไหลของ fluid
2. ไม่คำนึงถึงผลจากการผสมกันของ fluid เก่าที่คงเหลืออยู่ใน Regenerator กับ fluid ใหม่ที่เข้ามาแทนที่ในทิศทางตรงกันข้ามเมื่อเริ่มสลับทิศการไหล (reversal)
3. ในแต่ละ Period อัตราการไหลโดยมวลของ fluid ทั้ง 2 ชนิด ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
4. อุณหภูมิของอากาศและก๊าซเสียที่ไหลเข้า regenerator คงที่ ทั้ง 2 Period (heating / cooling)
5. การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับอิฐทนไฟสามารถแทนได้ด้วยเทอมของ Overall Heat Transfer Coefficient ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของ fluid และอุณหภูมิเฉลี่ยของโครงอิฐทนไฟ
6. สมบัติการถ่ายเทความร้อน คุณสมบัติทางความร้อนของอิฐทนไฟ และ fluid ไม่เปลี่ยนแปลงในแต่ละ period และยังมีค่าเท่ากันในทุกส่วนของ regenerator ใน period นั้นๆ
7. ไม่คำนึงถึงความร้อนที่ถ่ายเทออกทางด้านข้าง, ด้านบนและด้านล่างของ storage unit
8. ของไหลมีความเร็วคงที่ และ เป็น uniform flow
9. อุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟและ fluid เปลี่ยนแปลงเป็นแบบ linear เทียบกับเวลา



รูปที่ 2 แสดง control volume ของโครงอิฐทนไฟ

จากสมมติฐานที่กล่าวมาจึงเลือกใช้ control volume โดยพิจารณาจากรูปที่ 2 เป็นภาพตัดขวางใดๆของ regenerator ซึ่งแบ่งช่องการไหลของ fluid เป็น element เล็กๆขนาดเท่ากันให้มีความสมมาตรตามแนวเส้นประ (ไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านเส้นประ) ส่วนที่กั้นระหว่างช่องต่างๆคือเนื้ออิฐทนไฟ โดย a คือความกว้างของช่องการไหลของ fluid รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ b คือความกว้างของ element รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความลึก Δx เมตร เมื่อ Regenerator มีความยาว L เมตรจะมีจำนวน Control Volume รวม $L / \Delta x$ elements ต่อ 1 ช่องการไหล

1. สมการสมดุลความร้อนของของไหล คือ สมการเชิงอนุพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับก๊าซเสียจากการเผาไหม้ (heating period) หรืออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ (cooling period) กับ อัตราการถ่ายเทและสะสมความร้อน ในก๊าซเสียจากการเผาไหม้หรืออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ เมื่อ L ในสมการ 1 คือความยาวของ element ที่พิจารณา (Frank W. Schmidt and A. John Willmott, 1981)

$$\bar{h}A(t_m - t_f) = m_f c_f L \frac{\partial t_f}{\partial x} + m_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \tau} \quad (1)$$

โดย $\bar{h}$ คือ Modified heat transfer Coefficient (W/m² K)

x คือ ระยะความยาวของโครงอิฐทนไฟ โดยวัดไปในทิศทางเดียวกันกับการไหลของ fluid ใน Period นั้นๆ (m)

2. สมการสมดุลความร้อนของของแข็ง คือ สมการเชิงอนุพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับก๊าซเสียจากการเผาไหม้ (heating period) หรืออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ (cooling period) กับ อัตราการถ่ายเทและสะสมความร้อนในโครงอิฐทนไฟ

$$\bar{h}A(t_f - t_m) = M_m c_m \frac{\partial t_m}{\partial \tau} \quad (2)$$

โดย M_m คือ มวลของ storage channel (kg)

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงแปลงสมการ 1 และ 2 ให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ (dimensionless variable) โดยกำหนดพารามิเตอร์ไร้มิติ (dimensionless parameter) ดังนี้ (Frank W. Schmidt and A. John Willmott, 1981)

$$\xi = \frac{\bar{h}Ax}{m_f c_f L} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\bar{h}A}{M_m c_m} \left(\tau - \frac{m_f x}{m_f L} \right) \quad (4)$$

และตัวแปรไร้มิตินี้

$$T_f = \frac{t_f' - t_{fi}''}{t_{fi}' - t_{fi}''} \quad \text{ตัวแปรไร้มิติของของไหล} \quad (5)$$

$$T_m = \frac{t_m' - t_{fi}''}{t_{fi}' - t_{fi}''} \quad \text{ตัวแปรไร้มิติของแข็ง} \quad (6)$$

จากสมการ 3,4,5 และ 6 จะได้สมการ 1 และ 2 อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติคือ

$$\frac{\partial T_f}{\partial \xi} = T_m - T_f \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial \eta} = T_f - T_m \quad (8)$$

นอกจากนี้พารามิเตอร์ไร้มิติในสมการ 3 และ 4 ยังทำให้เกิด Dimensionless Groups อีก 2 กลุ่มดังนี้

เมื่อ $x = L$ และ $\tau = P$ จะได้

$$\Lambda = \frac{\bar{h}A}{m_f c_f} = \text{“ Reduced Length ”} \quad (9)$$

$$\Pi = \frac{\bar{h}A}{M_m c_m} \left(P - \frac{m_f}{m_f} \right) \text{“ Reduced Period ”} \quad (10)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ 7 และ 8 เมื่อใช้การประมาณค่าอินทิกรัลก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟกับก๊าซเสียจากการเผาไหม้หรืออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ที่เวลาใดๆซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ โดยสมการเชิงอนุพันธ์ทั้ง 2 สมการมีเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขคือ

1. อุณหภูมิของอากาศและก๊าซเสียที่ไหลเข้า regenerator คงที่ทั้ง 2 Period (heating / cooling)
2. อุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่ตำแหน่งเดียวกันเมื่อสิ้นสุด period ใดๆ (heating/cooling Period) จะเท่ากับกับเมื่อเริ่มต้น period ถัดไป

เมื่อทราบค่าเริ่มต้นต่างๆจากการวัดก็จะหา temperature distribution ของอากาศ และ ก๊าซเสีย รวมทั้งอิฐทนไฟ ในแต่ละ period ของ regenerator ได้

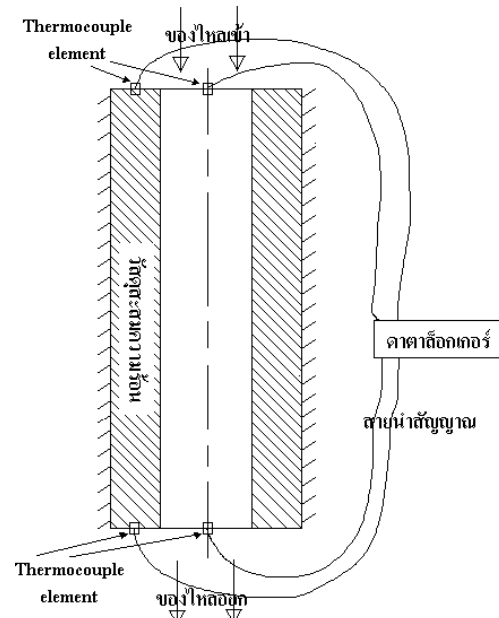
3.การทดลอง

ข้อมูลต่างๆที่ต้องตรวจวัดและรวบรวมเพื่อเปรียบเทียบและใช้ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

1. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอ้างอิง (สิ่งแวดล้อม)
2. อุณหภูมิอากาศและอิฐทนไฟ ณ ตำแหน่งทางเข้าช่องการไหลของโครงอิฐทนไฟในช่วง cooling period
3. อุณหภูมิอากาศและอิฐทนไฟ ณ ตำแหน่งทางออกช่องการไหลของโครงอิฐทนไฟในช่วง cooling period

4. อุณหภูมิก๊าซเสียและอิฐทนไฟ ณ ตำแหน่งทางเข้าช่องการไหลของโครงอิฐทนไฟในช่วงheating period
5. อุณหภูมิก๊าซเสียและอิฐทนไฟ ณ ตำแหน่งทางออกช่องการไหลของโครงอิฐทนไฟในช่วง heating period
6. เวลาที่ใช้ในแต่ละ period (มีค่าเท่ากัน)
7. อัตราการไหลของอากาศโดยปริมาตร
8. อัตราการไหลโดยมวลและอุณหภูมิของน้ำมันเชื้อเพลิง
9. Flue Gas Analysis (องค์ประกอบของก๊าซเสีย)

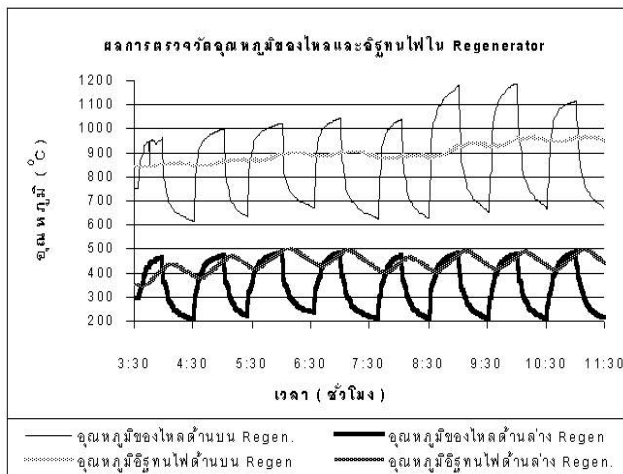
เมื่อได้ข้อมูลต่างๆจากการตรวจวัดแล้ว จึงนำข้อมูลเหล่านั้นมาใส่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองการถ่ายเทความร้อนใน Regenerator โดยแสดงการกระจายของอุณหภูมิอากาศหรือก๊าซเสียกับโครงอิฐทนไฟ ที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ ใน 1 วัฏจักรการถ่ายเทความร้อน (heating period + cooling period) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด และ เวลาที่ใช้ใน 1 วัฏจักร ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพทางความร้อนของ Regenerator รวมทั้ง ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้สูงสุด



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดใน Regenerator

4.ผลการทดลองและวิเคราะห์

เนื่องจากการตรวจวัดอุณหภูมิที่มีค่าสูงๆ การแผ่รังสีความร้อนจะมีผลต่อเครื่องมือวัดซึ่งทำให้อุณหภูมิของไหลที่วัดได้ใน Heating period และ cooling period จะมีค่าต่ำและสูงกว่าความเป็นจริงตามลำดับจึงทำการชดเชยในส่วนนี้รวมไปด้วย

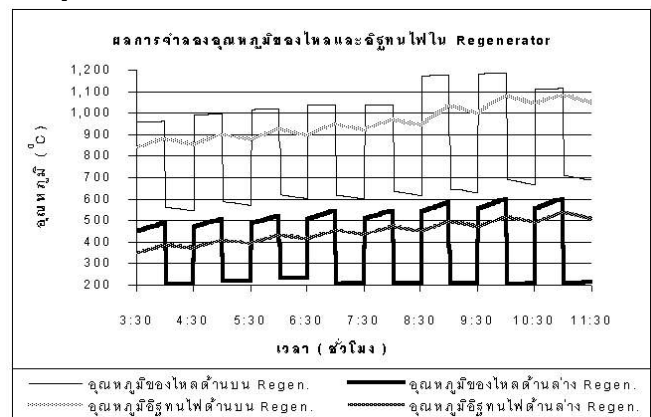


รูปที่ 4 แสดงการกระจายอุณหภูมิของไอลและอิฐทนไฟใน Regenerator เมื่อคำนึงถึงผลจาก Radiation ที่มีต่อเครื่องมือวัด

จากรูปที่ 4 ในช่วงครึ่งชั่วโมงแรกของแต่ละชั่วโมง regenerator จะอยู่ในช่วง cooling period ก่อนแล้วตามด้วยช่วง heating period เมื่อทำงานเข้าสู่ครึ่งชั่วโมงถัดไปของแต่ละชั่วโมง ในช่วง 2 – 3 ชั่วโมงแรกของรอบการถลุง จะมีการปิดพัดลมเป็นพักๆ เพื่อใส่แร่และกวาดเตา ทำให้การเผาไหม้ในช่วงนี้ไม่ต่อเนื่อง ตลอดจนการกลับทิศการไหลของอากาศหรือก๊าซเสียก็จะไม่เป็นระบบอย่างสม่ำเสมอทุกครึ่งชั่วโมง ดังนั้นอุณหภูมิที่วัดได้จึงไม่มีรูปแบบที่แน่นอน จนเมื่อเริ่มเข้าสู่ชั่วโมงที่ 4 จึงจะเข้าสู่กระบวนการตามปกติ เมื่อถลุงมาจนถึงชั่วโมงที่ 9 อุณหภูมิในเตาจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากแร่ที่อยู่ในเตาได้รับความร้อนจากก๊าซเสียในการเผาไหม้มาเติมที่แล้ว ความร้อนจากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับแร่และตัวเตาน้อยลง ก๊าซเสียที่ออกมาจากเตาจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น รวมทั้งมีการเร่งอุณหภูมิของเตาให้สูงจากการปรับเพิ่มปริมาณน้ำมันและอากาศในการเผาไหม้ เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีในเตาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงสุดท้ายจึงเริ่มจะเตาเพื่อนำแร่ดิบมาบริสุทธิออกมา ในช่วง cooling period ของไอลที่ด้านบน regenerator คืออากาศร้อนที่ไหลออกจาก regenerator เข้าไปช่วยเผาไหม้ในเตาถลุง ซึ่งจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอิฐทนไฟที่ด้านบน regenerator โดยในช่วงแรกอุณหภูมิอากาศวัดได้สูงกว่าอิฐทนไฟเนื่องจากอุปกรณ์วัดยังมีความร้อนสะสมอยู่ในตัว ค่าที่วัดได้จึงเบี่ยงเบนไป หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงลดลงจนต่ำกว่าอิฐทนไฟ เมื่อดูจากแนวโน้มอุณหภูมิอากาศพบว่ายังคงลดลงอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการลดลงที่ค่อนข้างมากจึงพอสรุปได้ว่าค่าที่วัดออกมายังไม่ใช่อุณหภูมิที่แท้จริงของอากาศแต่เป็นค่าที่วัดโดยรวมเอาผลจากความร้อนสะสมในอุปกรณ์วัดไว้ด้วย ในการวัดจนได้อุณหภูมิที่แท้จริงซึ่งมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าต่ำสุดนี้เล็กน้อยจะทำให้ใช้เวลาวัดเกินกว่าเวลาใน 1 period (30 นาที) จึงใช้ค่าต่ำสุดในแต่ละ period มาเฉลี่ยเป็นค่าอุณหภูมิอากาศที่ออกจาก regenerator ส่วนของไอลด้านล่าง regenerator ก็คืออากาศเช่นเดียวกันซึ่งจะไอลเข้า regenerator เพื่อรับความร้อนจากอิฐทนไฟที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ค่าที่ได้มีความเบี่ยงเบนในลักษณะเดียวกับอากาศทางด้านบน regenerator โดยก่อนหน้านี้พัดลมจะดูดอากาศภายนอกแล้วเป่าผ่านท่อฉนวนที่หุ้มภายในด้วยอิฐทนไฟซึ่งรับความร้อนมาจากก๊าซเสียที่ไอลผ่านเมื่อ

regenerator ทำงานอยู่ใน heating Period ที่แล้ว ท่อนี้จึงประพฤติตัวเสมือนเป็น regenerator ด้วย โดยความร้อนในอิฐทนไฟที่หุ้มภายในจะถ่ายเทให้กับอากาศมาตลอดทางจนอากาศมีอุณหภูมิถึง 241°C โดยเฉลี่ย ที่ปากทางเข้าด้านล่าง regenerator

ในช่วง heating period ของไอลที่ด้านบน regenerator คือ ก๊าซเสียอุณหภูมิสูงที่ไหลออกจากเตาถลุงเข้าสู่ regenerator เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับอิฐทนไฟที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยค่าที่วัดได้ในช่วงแรกมีการเบี่ยงเบนเนื่องจากอุปกรณ์วัดมีความจุความร้อนในตัวเองทำให้ต้องใช้เวลามากกว่านี้ในการวัดอุณหภูมิให้มีความแม่นยำ อุณหภูมิที่วัดได้สูงสุดคือ 1052°C โดยเฉลี่ยที่ปากทางเข้าด้านบน regenerator ส่วนของไอลด้านล่าง regenerator คือก๊าซเสียที่ไหลออกมาหลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับอิฐทนไฟแล้ว โดยอุณหภูมิของก๊าซเสียส่วนใหญ่วัดได้ต่ำกว่าอิฐทนไฟที่ด้านล่าง regenerator เนื่องจากตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิก๊าซเสียอยู่ห่างจากปากช่องการไหล ก๊าซเสียที่ออกมาอาจถ่ายเทความร้อนบางส่วนให้กับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งผลที่เกิดจากความจุความร้อนในอุปกรณ์วัดด้วย แต่อย่างไรก็ดีค่าที่วัดได้ก็เป็นค่าที่มีลักษณะเดียวกับอุณหภูมิก๊าซเสียที่ด้านบน regenerator โดยรวมแล้วจากข้อมูลที่ทำการศึกษาพบว่ากระบวนการถลุงดิบทุกในช่วงเวลาดังกล่าวยังไม่เข้าสู่ cyclic equilibrium เนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ออกจาก regenerator ระหว่าง cooling period ใดๆอยู่

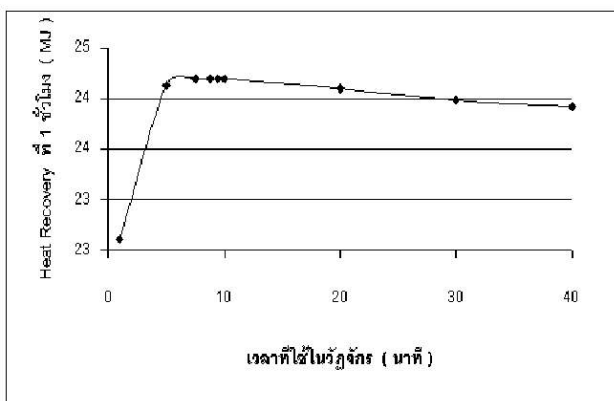


รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิต่างๆจากผลการจำลองแบบ regenerator

จากรูปที่ 5 แนวโน้มค่าอุณหภูมิจากแบบจำลองของของไอลและอิฐทนไฟใน Regenerator ทั้งสอง Period เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าที่ได้จากการวัดโดยมีสัดส่วนความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอากาศ, ก๊าซเสียรวมทั้งอิฐทนไฟในช่วง Heating และ Cooling Period คือ 8.33 %, 20 %, 10.5 %, 11 %

ค่าความคลาดเคลื่อนของอิฐทนไฟและของไอลจากการจำลองแบบมาจากการตั้งสมมติฐานที่ว่าไม่มีการนำความร้อนในทิศทางการไหลของของไอลในอิฐทนไฟ และ การประมาณการนำความร้อนในทิศทางตั้งฉากการไหลของของไอลในอิฐทนไฟ โดยเมื่อพิจารณาถึงการกระจายอุณหภูมิในอิฐทนไฟพบว่าในช่วงเริ่ม Cooling Period ที่แกนกลางของอิฐทนไฟจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ผิวด้านนอกทั้งสองด้านของอิฐทนไฟ ดังนั้นอุณหภูมิที่แกนกลางจะไม่ลดลงทันทีแต่จะเพิ่มขึ้นจากการนำความร้อนเข้าสู่แกนกลาง ก่อนที่ผิวด้านนอกของอิฐทนไฟจะมี

อุณหภูมิที่ลดลงจากนั้นอุณหภูมิที่แกนกลางจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังมีการนำความร้อนในทิศทางกลับไหล จากทางด้านบนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าด้วย ค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีผลมากเนื่องจากเมื่อพิจารณาค่าของมวลและค่าความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ จะมีค่ามากกว่ามวลและค่าความร้อนจำเพาะของของไหลมาก ปริมาณความร้อนจำนวนนี้จึงทำให้ค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนพอสมควร ในกรณีของ Heating Period ก็เช่นเดียวกัน และยังพบว่าอิฐทนไฟมีความหนาเกินไปเนื่องจากในช่วง Cooling Period อุณหภูมิของอิฐทนไฟที่วัดได้ลดลงน้อยมาก รวมทั้งตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดที่ด้านล่างอยู่ในจุดอับและอยู่ห่างจากปากช่องการไหลที่ทำการจำลอง ซึ่งทำให้ไม่ได้วัด flow การไหลของช่องการไหลตรงกลางโดยตรง โดยถ้ามีการติดตั้งเครื่องมือให้อยู่ในตำแหน่งที่เป็น down stream ทางด้านตรงข้ามจะทำให้วัดค่าอุณหภูมิได้สูงขึ้นซึ่งทำให้ความคลาดเคลื่อนลดลงด้วย



รูปที่ 6 ปริมาณ Heat Recovery ที่เวลา 1 ชั่วโมงของวัฏจักรต่างๆ

ในการพิจารณาเรื่องความร้อนนำกลับมาใช้ จากรูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ (Heat Recovery) ของ Regenerator ที่วัฏจักรต่างๆสามารถทำได้ เมื่อดำเนินเข้าสู่ Cyclic Equilibrium เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าแนวโน้มปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มีค่าต่ำสำหรับวัฏจักรที่ใช้เวลาน้อยและจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราค่อนข้างมากเมื่อใช้เวลามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจากนั้นปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้จะค่อยๆลดลงเมื่อใช้เวลามากไปกว่านี้ เมื่อเปรียบเทียบกับวัฏจักรที่ใช้เวลา 30 นาทีซึ่งมีเวลาเท่ากับวัฏจักรที่ Regenerator ดำเนินการอยู่จากการตรวจวัดจึงสรุปได้ว่าถ้าใช้เวลาในวัฏจักรให้น้อยลงก็จะได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มากขึ้นแต่ต้องไม่น้อยไปกว่าประมาณ 4 นาที ในขณะเดียวกันถ้าใช้เวลามากกว่า 30 นาทีจะได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ลดลง เนื่องจากถ้าใช้เวลาน้อยเกินไปในช่วง Heating Period โครงอิฐทนไฟจะสะสมความร้อนได้น้อยมาก และถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศในช่วง Cooling Period ได้น้อยมากเช่นกัน ในขณะที่เมื่อใช้เวลามาก ถึงแม้ว่าในช่วงแรกของ Period โครงอิฐทนไฟจะสะสมหรือถ่ายเทความร้อนได้ดีแต่เมื่อเข้าสู่ช่วงปลาย Period การถ่ายเทความร้อนจะต่ำมากถ้าเทียบกับวัฏจักรที่ใช้เวลาน้อยกว่า

ข้อมูลจากการทดลองหาปริมาณพลังงานที่ใช้งานจริง ในวัฏจักรเวลาการทำงานที่ต่างกัน

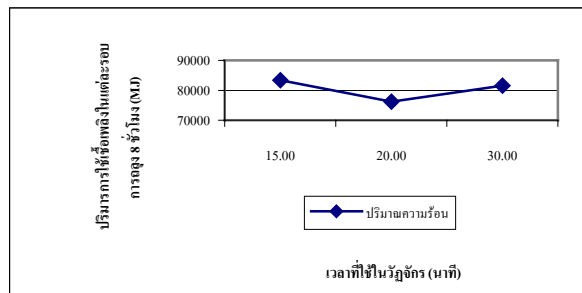
เนื่องจากการสำรวจพบว่าสามารถตรวจวัดอัตราการใช้พลังงานในเตาหลอมดีบุกของ โรงงาน ไทยแลนด์สเมลต์ติ้งแอนดีร์ฟิง จำกัด (ไทยซาร์โก) ได้โดยการวัดปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในแต่ละรอบการถลุงดีบุก (8 ชั่วโมง) ซึ่งทำการทดลองเก็บข้อมูลการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงโดยการเปลี่ยนวัฏจักรการทำงานเป็น 3 แบบ แบบละ 2 ครั้ง ดังนี้ วัฏจักรการทำงานที่ใช้เวลา 30 นาที , 20 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองตรวจวัด แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

เวลาที่ใช้ในวัฏจักร (นาท.)	ระยะเวลาในการถลุง (ชั่วโมง)	ปริมาณการใช้ น้ำมัน (ลิตร)	ปริมาณความร้อนที่ใช้ (MJ)
30	8	2000	79540.00
30	8	2100	83517.00
20	8	1960	77949.20
20	8	1870	74369.90
15	8	2150	85505.50
15	8	2040	81130.80

ตารางที่ 2 ปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่ใช้ในการถลุง ที่คาบวัฏจักรการทำงานที่ต่างกัน

เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในวัฏจักร (นาท.)	ปริมาณความร้อนที่ใช้ (MJ)
30	81528.5
20	76159.55
15	83318.15

จากตารางที่ 2 เราสามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (MJ) ในแต่ละรอบการถลุง (8 ชั่วโมง) โดยมีวัฏจักรเวลาการทำงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 7 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในแต่ละรอบการถลุง (8 ชั่วโมง) โดยมีคาบเวลาที่ใช้ในวัฏจักรที่ต่างกัน

จากรูปที่ 7 สามารถทำนายแนวโน้มของการใช้พลังงานของแต่ละวัฏจักรเวลาการทำงาน โดยจะเห็นได้ว่าที่วัฏจักรเวลา 20 นาที จะมีการใช้เชื้อเพลิงน้อยที่สุด

จากข้อมูลที่ทำการตรวจวัดเราสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ใช้ในการถลุง 1 ชั่วโมงดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการถลุงดีบุก 1 ชั่วโมง

เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในวัฏจักร (นาท.)	ปริมาณความร้อนที่ใช้ ในเวลา 1 ชั่วโมง (MJ)
30	10191.06
20	9519.94
15	10414.77

นำข้อมูลจากตารางด้านบนมาเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้นิววัฏจักร 30 นาที เพื่อหาปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ ดังตารางที่ 4 ตารางที่ 4 แสดงปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ ในเวลา 1 ชั่วโมง โดยเทียบกับวัฏจักร 30 นาที

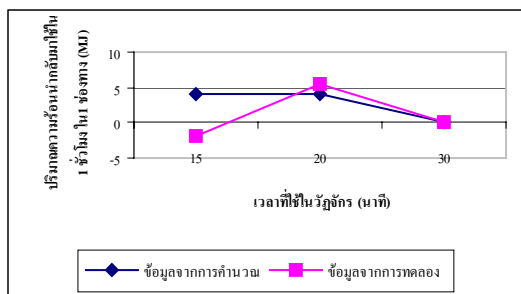
เวลาเฉลี่ยที่ใช้นิววัฏจักร (นาที)	ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ ในเวลา 1 ชั่วโมง (MJ)
30	0.00
20	671.12
15	-223.71

ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นการไหลใน 120 ช่องทาง แต่ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณเป็นการไหลใน 1 ช่องทาง จึงทำการคำนวณค่าปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ที่ได้จากการทดลอง เป็นต่อ 1 ช่องทาง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข แสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ในเวลา 1 ชั่วโมงของ 1 ช่องทางการไหล

เวลาเฉลี่ยที่ใช้นิววัฏจักร (นาที)	ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ ในเวลา 1 ชั่วโมง (MJ)	
	ข้อมูลจากการคำนวณ	ข้อมูลจากการทดลอง
30	0	0
20	4.00	5.59
15	4.10	-1.86

จากข้อมูลในตารางสามารถแสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบข้อมูล ดังนี้



รูปที่ 8 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและการทดลองปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ ใน 1 ช่องการไหล เทียบกับวัฏจักร 30 นาที

จากกราฟจะเห็นว่า แนวโน้มของผลการตรวจวัดเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข คือ เมื่อทำการปรับลดเวลาของวัฏจักรลง จากเดิมซึ่งใช้เวลาของวัฏจักร 30 นาที มาเป็นวัฏจักร 20 และ 15 นาที ตามลำดับ จะสามารถลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงลงได้ ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เนื่องจาก ปัจจุบันทางโรงงานยังใช้การสลับช่วงการไหล (hot period $\longrightarrow$ cold period) หรือ (cold period $\longrightarrow$ hot period) โดยใช้มือ ซึ่งทำให้เวลาสลับช่วงการไหลยังคลาดเคลื่อน รวมทั้งการใส่หัวเผาก็ยังใส่ด้วยมือ ทำให้

ปริมาณน้ำมันที่ใส่ในแต่ละรอบวัฏจักรยังไม่แน่นอน นอกนั้นเป็นปัจจัยที่ขึ้นกับการผลิตเอง เช่น ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการถลุง ปัจจัยของรูปร่างของตัว รีเจนเนอเรเตอร์เอง เช่น ผนังของเตาช่วงก่อนช่องทางเข้าและทางออก ช่องทางการไหล ซึ่งใช้อิฐทนไฟชนิดเดียวกันกับช่องทางการไหล ทำให้เกิดการสะสมความร้อนและถ่ายเทความร้อนกับของไหลก่อนเข้าช่องทางการไหล

5.สรุป

ผลการวิจัยครั้งนี้สามารถใช้เป็นแนวทางพื้นฐานในการประหยัดพลังงานของ Regenerator ซึ่งทำให้ได้ปริมาณความร้อนนำกลับมาใช้มากขึ้นและยังเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนด้วย

6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน และ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ โรงงานไทยแลนด์สเมลต์ติ้งแอนด์รีไฟน์ (Thai-Sarco) ที่อำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Willmott A.J. 1964. Digital Computer Simulation of A Thermal Regenerator. Int.J. Heat Mass Transfer. 7: 1291-1303.
- [2] Incropera F.P. and Dewitt D.P. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th ed. New York: John Wiley & Sons.
- [3] Schmidt F.W. and Willmott A.J. 1981. Thermal Energy Storage and Regeneration. New York: McGraw-Hill.
- [4] Hottel H.C. 1954. Radiant-Heat Transmission. Heat Transmission. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- [5] Schofield J., Butterfield P. and Young P.A. 1961. Hot blast stoves. Journal of the Iron and Steel Institute. 199: 229 – 240.
- [6] Schofield J., Butterfield P. and Young P.A. 1963. Hot blast stoves : part 2. Journal of the Iron and Steel Institute. 201: 497 – 508.
- [7] Fishenden M. and Saunders O.A.. An Introduction to Heat transfer. New York: McGraw-Hill.
- [8] Cheremisinoff N.P. and Cheremisinoff P.N.. Heat Transfer Equipment. New York: McGraw-Hill.
- [9] Cengel Y.A.. Heat Transfer A Practical Approach. International ed. New York: McGraw-Hill.