การศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์

นายคณิต มานะธุระ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF ENERGY UTILIZATION IN REHEATING FURNACE USING REGENERATIVE BURNERS COMBINED WITH RECUPERATOR

Mr. Kanit Manatura

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์
โดย	นายคณิต มานะธุระ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญากรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐเดช เพื่องวรวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรานนท์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณิต มานะธุระ : การศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์. (A STUDY OF ENERGY UTILIZATION IN REHEATING FURNACE USING REGENERATIVE BURNERS COMBINED WITH RECUPERATOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล, 124 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ของโรงงานตัวอย่าง โดยทำการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพของเตาเผาและผลการประหยัดพลังงาน

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง พบว่า พลังงานความร้อนเข้าเตาเผา ประกอบด้วย ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เท่ากับ 5055 kW ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา เท่ากับ 3948.7 kW ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 784.9 kW ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เท่ากับ 439 kW ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล เท่ากับ 445.9 kW ส่วนพลังงานความร้อนที่ออกจากเตาเผาประกอบด้วย ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก เท่ากับ 7213.3 kW ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เท่ากับ 528.8 kW ความร้อนสัมผัสจากไอเสียออกจากเตาเผาไปรีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 2210.7 kW ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา เท่ากับ 42.8 kW ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด เท่ากับ 28.5 kW ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล เท่ากับ 83.2 kW ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เท่ากับ 566.3 kW สังเกตได้ว่าความร้อนของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง มีค่าเท่ากับ 528.8 kW ซึ่งน้อยมาก เมื่อเทียบกับความร้อนของไอเสียที่ออกจากรีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 1558.32 kW จึงทำให้การใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟมีประสิทธิภาพสูงกว่าหัวเผาธรรมดาที่ใช้ร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์

สรุปได้ว่าปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิต (Specific energy consumption, SEC) ของเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 1042 MJ/ton หรือ 26.2 liter/ton เมื่อเทียบเป็นปริมาณการใช้น้ำมันเตา นอกจากนี้ประสิทธิภาพของเตาเผา เท่ากับ 80.1% และผลการประหยัดพลังงานเท่ากับ 43.3% เมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาเดิมของโรงงานตัวอย่างที่ติดตั้งรีคูเพอเรเตอร์อย่างเดียว

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2552

5070231521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : REHEATING FURNACE / ENERGY SAVING / REGENERATIVE BURNER / RECUPERATOR / ENERGY BALANCE

KANIT MANATURA: A STUDY OF ENERGY UTILIZATION IN REHEATING FURNACE USING REGENERATIVE BURNERS COMBINED WITH RECUPERATOR. THESIS ADVISOR: ASST.PROF: MINGSAK TANGTRAKUL, 124 pp.

The objective of this thesis is to investigate energy utilization in reheating furnace using regenerative burners combined with recuperator. By energy balance analysis of reheating furnace case study in order to obtain furnace efficiency and energy saving.

The results from energy balance analysis of a case study indicate that total heat input into furnace are consist of heat of combustion from regenerative burner by 5055 kW, heat of combustion from ordinary burner by 3948.7 kW, sensible heat of preheated air into ordinary burner by 784.9 kW, sensible heat of combustion air into regenerative burner by 439 kW and heat of scale formation by 445.9 kW. Total heat output from furnace are consist of sensible heat of billet by 7213.3 kW, sensible heat of flue gas from regenerative burner to stack by 528.8 kW, sensible heat of flue gas from furnace into recuperator by 2210.7 kW, sensible heat of scale by 83.2 kW and others loss by 566.3 kW. From the energy balace analysis, the sensible heat of flue gas from regenerative burner to stack (528.8 kW) is considerably less than the sensible heat of flue gas from recupeartor to stack (1558.32 kW). Therefore, the regenerative burner is more efficient than the ordinary burner using with recuperator.

The reheating furnace using regenerative burners combined with recuperator consumes the specific energy consumption by 1042 MJ/ton or 26.2 liter/ton of fuel oil, the furnace efficiency is 80.1% and energy saving by 43.3% have been found when compared with the previous reheating furnace of a case study using recuperative system.

Department : Mechanical Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย สถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลหลายท่านดังนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ชี้แนะหัวข้อและแนวทางวิจัยตลอดจนคำปรึกษามากมายที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย พร้อมทั้งสนับสนุนเครื่องมือวัดต่างๆที่ใช้ในการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรัญญากรณ์ ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร. ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์ กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณโรงงานเกษมศักดิ์ เทรดดิ้ง จำกัด ที่อนุญาตให้ทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูลต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ขอกราบขอบพระคุณหน่วยวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาค้นคว้า สะสมประสบการณ์ และเอื้ออำนวยอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นอย่างสูงในการวิจัย รวมทั้ง คุณอภิสิทธิ์ บุญเกิด คุณแมนพงศ์ ตั้งตระกูล คุณตรงจิต ชวหา และเพื่อนๆนิสิตปริญญาโท ที่ช่วยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยทั้งด้านค่าใช้จ่าย และเป็นกำลังใจที่สำคัญตลอดมา ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ฏ

สัญลักษณ์และคำย่อ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์..... 3

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... 3

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 14

3.1 หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burner)..... 14

3.2 สมดุลพลังงานของเตาเผา..... 16

3.3 องค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ..... 34

3.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้..... 35

บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย..... 37

4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา..... 37

4.2 ลักษณะการทำงานของเตาเผา..... 38

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4.3 รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด..... 43
4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด..... 48

บทที่ 5 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล..... 50
5.1 ผลการคำนวณ..... 50
5.2 การวิเคราะห์ผล..... 59

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 61

รายการอ้างอิง..... 63

ภาคผนวก..... 65
ภาคผนวก ก ข้อมูลการตรวจวัด..... 66
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ..... 98
ภาคผนวก ค บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ..... 113
ค.1 การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5..... 114
ค.2 World Renewable Energy Congress 2009 – Asia..... 119

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 124

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ชื่อหัวเผาที่ใช้แทนชนิดของการเผาไหม้.....	9
3.1	มวลไหลเข้าและไหลออกจากเตาเผา.....	17
3.2	ความร้อนเข้าและออกจากเตาเผา.....	20
3.3	ความร้อนเข้าและออกของรีเจนเนอเรเตอร์.....	28
3.4	ความร้อนเข้าและออกของรีคูเพอเรเตอร์.....	31
3.5	ส่วนประกอบของก๊าซธรรมชาติโดยเฉลี่ย.....	34
3.6	คุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ.....	35
4.1	รายละเอียดข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด.....	43
5.1	รายละเอียดสมดุลมวลของเตา reheating furnace.....	50
5.2	รายละเอียดความร้อนเข้าเตา reheating furnace.....	52
5.3	รายละเอียดความร้อนออกจากเตา reheating furnace.....	52
5.4	รายละเอียดสมดุลความร้อนของ regenerator.....	55
5.5	รายละเอียดสมดุลความร้อนของ recuperator.....	57
5.6	เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการอบร้อนบิลเล็ตของเตา reheating furnace ขนาด 30 T/hr และ 15 T/hr.....	59
5.7	เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการอบร้อนบิลเล็ตระหว่างผู้ประกอบการไทยและต่างประเทศ.....	60
ก.1	ตารางบันทึกปริมาณ billet ที่ออกจากเตาเผา.....	65
ก.2	ตารางบันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิง.....	65
ก.3	ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศเข้า recuperator และ ออกจาก recuperator	66
ก.4	ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศเข้า regenerative burner.....	67
ก.5	ตารางบันทึกอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ heating zone และ soaking zone.....	69
ก.6	ตารางบันทึกความดันภายในเตาเผา.....	70
ก.7	ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียก่อนเข้า recuperator.....	70
ก.8	ตารางบันทึกอุณหภูมิและความดันของไอเสียก่อนเข้า recuperator.....	71
ก.9	ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียออกจาก recuperator.....	72

ตารางที่		หน้า
ก.10	ตารางบันทึกอุณหภูมิและความดันของไอเสียออกจาก recuperator.....	72
ก.11	ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียออกจาก regenerative burner.....	73
ก.12	ตารางบันทึกอุณหภูมิของไอเสียออกจาก regenerative burner.....	74
ก.13	ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านบน.....	75
ก.14	ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง.....	76
ก.15	ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา.....	77
ก.16	ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย.....	78
ก.17	ตารางบันทึกปริมาณ billet ที่ออกจากเตาเผา.....	79
ก.18	ตารางบันทึกอุณหภูมิของ billet.....	80
ก.19	ตารางบันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิง.....	80
ก.20	ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศเข้า recuperator และ ออกจาก recuperator	81
ก.21	ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศเข้า regenerative burner.....	83
ก.22	ตารางบันทึกอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ heating zone และ soaking zone.....	85
ก.23	ตารางบันทึกความดันภายในเตาเผา.....	86
ก.24	ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียก่อนเข้า recuperator.....	86
ก.25	ตารางบันทึกอุณหภูมิและความดันของไอเสียก่อนเข้า recuperator.....	87
ก.26	ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียออกจาก recuperator.....	88
ก.27	ตารางบันทึกอุณหภูมิและความดันของไอเสียออกจาก recuperator.....	88
ก.28	ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียออกจาก regenerative burner.....	89
ก.29	ตารางบันทึกอุณหภูมิของไอเสียออกจาก regenerative burner.....	90
ก.30	ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านบน.....	92
ก.31	ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง.....	93
ก.32	ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย.....	94
ก.33	ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา.....	95

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	กราฟแสดงเป้าหมายการใช้พลังงานและอัตราการปล่อย NOx.....	4
2.2	การเปรียบเทียบระหว่าง regenerator ชนิด ball และ honeycomb.....	5
2.3	อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้และไอเสีย ด้านเย็นของรีเจนเนอเรเตอร์ ที่ cycle time 70 วินาที.....	6
2.4	ลูกกลมเซรามิกก่อนการทำความสะอาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 -15 mm).....	7
2.5	การติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟในเตา reheating furnace.....	8
2.6	Available heat และอุณหภูมิของไอเสียจากโพรเพน.....	10
2.7	การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ center line ของเตาเผา.....	10
2.8	ลักษณะทั่วไปของหัวเผาที่ในระบบเผาไหม้อุณหภูมิสูง.....	12
2.9	ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการวัด.....	12
2.10	หัวเผา REGEMAT® (WS GmbH).....	13
3.1	การทำงานของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ.....	14
3.2	ส่วนประกอบของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ.....	14
3.3	รีเจนเนอเรเตอร์ชนิด ceramics ball.....	15
3.4	สมดุลมวลของเตาเผา.....	17
3.5	สมดุลความร้อนของเตาเผา.....	20
3.6	ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด	26
3.7	สมดุลความร้อนของ regenerator.....	28
3.8	สมดุลความร้อนของ recuperator.....	31
4.1	แผนผังองค์ประกอบระบบต่างๆของเตา reheating furnace.....	38
4.2	เตา reheating furnace.....	39
4.3	หัวเผารีเจนเนอเรทีฟติดตั้งบริเวณด้านข้างเตา reheating furnace.....	39
4.4	หัวเผารีเจนเนอเรทีฟติดตั้งกับเตาเผา.....	39
4.5	หัวเผารีเจนเนอเรทีฟด้านหน้าและด้านข้าง.....	40
4.6	รีคูเพอเรเตอร์.....	40
4.7	ช่องเปิดด้านเหล็กเข้า.....	40
4.8	ช่องเปิดด้านยิงเหล็ก.....	41

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่		หน้า
4.9	ช่องเปิดด้านเหล็กออก	41
4.10	Combustion air blower	41
4.11	Induced draft fan	42
4.12	Dilution fan	42
4.13	Billet ที่ได้จากการอบ (reheating)	42
4.14	แสดงตำแหน่งการตรวจวัดองค์ประกอบไอเสียและอุณหภูมิ	43
4.15	มาตรวัดอัตราการบริโภคเชื้อเพลิง	45
4.16	การวัดไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	45
4.17	การวัดไอเสียที่ออกจากรีคูเพอเรเตอร์	45
4.18	จอแสดงอุณหภูมิอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ (รูปซ้าย)	46
4.19	จอแสดงอุณหภูมิอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ (รูปขวา)	46
4.20	จอแสดงอุณหภูมิอากาศหลังจากการ preheat ที่รีคูเพอเรเตอร์ (จอขวาสุด)	46
4.21	อุณหภูมิภายในเตาเผาในส่วน heating zone (จอซ้ายสุด)	47
4.22	อุณหภูมิภายในเตาเผาในส่วน soaking zone (จอซ้ายสุด)	47
4.23	การตรวจวัดอุณหภูมิของผิวเตา	47
4.24	อุปกรณ์บันทึกข้อมูล	48
4.25	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิไอเสีย	48
4.26	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยรังสีอินฟราเรด	49
4.27	เครื่องวัดองค์ประกอบไอเสีย	49
5.1	Diagram สมดุลมวลของเตา reheating furnace	51
5.2	Sankey diagram ของเตา reheating furnace	53
5.3	บริเวณหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่ทำการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน	55
5.4	Diagram แสดงสมดุลพลังงานของ regenerator	56
5.5	รีคูเพอเรเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน	57
5.6	Diagram ของ recuperator	58
ก.1	ตำแหน่งหัวเผารีเจนเนอรเทีฟ	68
ก.2	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านบน	75
ก.3	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านด้านหน้าและหลัง	76
ก.4	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านขวา	77

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่		หน้า
ก.5	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านซ้าย.....	78
ก.6	ตำแหน่งหัวเผารีเจนเนอรเทีฟ.....	84
ก.7	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านบน.....	91
ก.8	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านหน้าและหลัง.....	93
ก.9	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านซ้าย.....	94
ก.10	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านขวา.....	95

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
a_{th}	อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อหนึ่งโมลของเชื้อเพลิงทางทฤษฎี	$kmol_{O2}/kmol_{fuel}$
$A_{opening}$	พื้นที่ของช่องเปิดทั้งหมด	m^2
A_{wall}	พื้นที่ผิวภายนอกของเตาเผา	m^2
AF_{actual}	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง	kg_{air}/kg_{fuel}
AF_{stoic}	อัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎี	kg_{air}/kg_{fuel}
$\overline{c}_{P,CO_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	kJ/kmol.K
$\overline{c}_{P,H_2O}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	kJ/kmol.K
$\overline{c}_{P,O_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน	kJ/kmol.K
$\overline{c}_{P,N_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน	kJ/kmol.K
C_{billet}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก	kJ/kg.K
C_{scale}	ค่าความจุความร้อนของสเกล	kJ/kg.K
C_t	ตัวปรับแก้ในส่วนของเวลาในการเปิดปิดของช่องเปิด	-
HV_{scale}	ค่าความร้อนที่คายออกจากการเปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์	kJ/kg_{scale}
h_m	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ย	$W/m^2.K$
LHV	ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำของเชื้อเพลิง	MJ/Nm^3
$\dot{m}_{air,regen}$	อัตราไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	kg/s
$\dot{m}_{billet}$	อัตราการผลิตของเหล็กที่ออกจากเตาเผา	kg/s
$\dot{m}_{flue,recup}$	อัตราไหลของไอเสียจากเตาเผาไปสู่รีคูเพอเรเตอร์	kg/s
$\dot{m}_{flue,stack}$	อัตราไหลของไอเสียจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง	kg/s
$\dot{m}_{fuel,burner}$	อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผา	kg/s
$\dot{m}_{fuel,regen}$	อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	kg/s
$\dot{m}_{preheatair,burner}$	อัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา	kg/s
$\dot{m}_{N_2,air}$	อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	kg/s
$\dot{m}_{O_2,air}$	อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	kg/s
$\dot{m}_{CO_2,flue,stack}$	อัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย	kg/s

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\dot{m}_{H_2O,flue,stack}$	อัตราไหลของไอน้ำในไอเสีย	kg/s
$\dot{m}_{O_2,flue,stack}$	อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในไอเสีย	kg/s
$\dot{m}_{N_2,flue,stack}$	อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในไอเสีย	kg/s
$\dot{Q}_{air,RG}$	ความร้อนสัมผัสของอากาศเข้า regenerator	kW
$\dot{Q}_{billet,sen}$	ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	kW
$\dot{Q}_{comb,burner}$	ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา	kW
$\dot{Q}_{comb,regen}$	ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	kW
$\dot{Q}_{flue,fur,RG}$	ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้า regenerator	kW
$\dot{Q}_{flue,RG,stack}$	ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจาก regenerator	kW
$\dot{Q}_{flue,recup}$	ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์	kW
$\dot{Q}_{flue,stack}$	ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ stack	kW
$\dot{Q}_L$	ความร้อนสูญเสียภายใน regenerator	kW
$\dot{Q}_{opening}$	ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี	kW
$\dot{Q}_{other,furnace}$	ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	kW
$\dot{Q}_{preheat,RG}$	ความร้อนสัมผัสของอากาศ preheat ที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟเข้าเตาเผา	kW
$\dot{Q}_{preheat,recup}$	ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการ preheat อากาศที่รีคูเพอเรเตอร์	kW
$\dot{Q}_{scale,form}$	ความร้อนจากการก่อตัวสเกล	kW
$\dot{Q}_{scale,sen}$	ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล	kW
$\dot{Q}_{wall}$	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา	kW
$T_{air,regen}$	อุณหภูมิของอากาศก่อนภายนอกก่อนเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	K
T_{amb}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรอบเตาเผา	K
$T_{billet,in}$	อุณหภูมิของเหล็กที่เข้าสู่เตาเผา	K
$T_{billet,out}$	อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา	K
$T_{flue,fur,RG}$	อุณหภูมิของไอเสียเข้า regenerator	K
$T_{flue,recup}$	อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์	K

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$T_{flue,stack}$	อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง	K
$T_{furnace}$	อุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก	K
$T_{preheat,RG}$	อุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการ preheat ที่ regenrator	K
$T_{preheat,recup}$	อุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการ preheat ที่ recuperator	K
$T_{scale,out}$	อุณหภูมิของสเกลที่ออกจากเตาเผา	K
$T_{scale,in}$	อุณหภูมิของสเกลที่เข้าเตาเผา	K
T_{wall}	อุณหภูมิที่ผิวเตาเผาบริเวณภายนอก	K
%scale	ร้อยละของสเกลที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณ billet ที่ผลิต	-
$\dot{\forall}_{fuel,burner}$	ปริมาตรการบริโภคเชื้อเพลิงของหัวเผาต่อหน่วยเวลา	m^3/s
$\dot{\forall}_{fuel,regen}$	ปริมาตรการบริโภคเชื้อเพลิงของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟต่อหน่วยเวลา	m^3/s
ρ_{fuel}	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	kg/m^3
$\varepsilon_{opening}$	ตัวปรับแก้รูปร่างของช่องเปิด	-
ε_{wall}	ค่า Emissivity ของผนังเตาเผา	-
$\eta_{furnace}$	ประสิทธิภาพของเตาเผา	%
$\eta_{recovery}$	อัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่	%
η_{ta}	ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ	%
σ	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์มันน์	$W/m^2.K^4$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

จากสภาวะปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงที่นำมาใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนมีราคาสูงและผันผวนขึ้นลงตามสภาวะทางเศรษฐกิจ โดยประเทศต่างๆทั่วโลกต่างให้ความสำคัญต่อการใช้พลังงานซึ่งเป็นต้นทุนการผลิต ซึ่งอุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้พลังงานจำนวนมาก อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กสามารถแบ่งได้ 3 ขั้น คือ อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น ขั้นกลาง และขั้นปลาย โดยอุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น เป็นอุตสาหกรรมเหล็กถลุง (pig iron) และเหล็กพรุน (sponge iron) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นกระบวนการเริ่มต้นของอุตสาหกรรมเหล็กที่มีความสำคัญอย่างมากต่อศักยภาพในการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กและอุตสาหกรรมที่ต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางเป็นขั้นที่นำผลิตภัณฑ์จากการผลิตเหล็กขั้นต้นทั้งที่เป็นของเหลวและของแข็งรวมถึงเศษเหล็ก (scrap) มาหลอมปรับปรุงคุณสมบัติและส่วนผสมทางเคมีให้ได้เป็นเหล็กกล้า (steelmaking) สำหรับประเทศไทย ผู้ผลิตขั้นกลางจะผลิตด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าหรือเตาอินดักชั่นโดยใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต นอกจากการผลิตเหล็กกล้าแล้วอุตสาหกรรมขั้นกลางนี้ยังรวมถึงการหล่อเหล็กกล้าให้เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่มีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ เหล็กแท่งยาว (billet) เหล็กแท่งแบน (slab) และเหล็กแท่งใหญ่ (bloom) โดยเหล็กแท่งยาวจะนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กเส้น เหล็กลวด และเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน สำหรับการผลิตเหล็กแท่งแบนจะต้องใช้ระดับเทคโนโลยีที่สูงกว่าการผลิตเหล็กแท่งยาวและจะเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนเท่านั้น ส่วนเหล็กแท่งใหญ่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อนขนาดใหญ่

อุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลายเป็นขั้นของการแปรรูปผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การรีดร้อน การรีดเย็น การเคลือบผิว การผลิตท่อเหล็ก การตีเหล็กขึ้นรูป ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เหล็กเส้น เหล็กลวด เหล็กแผ่นรีดร้อน เหล็กแผ่นรีดเย็น เหล็กแผ่นเคลือบ เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน เป็นต้น ซึ่งจะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทางการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆที่ต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น

สำหรับกระบวนการอบเหล็ก (reheating) นั้น มีอุปกรณ์หลักที่ใช้ได้แก่ เตาเผาเหล็ก (reheating furnace) ซึ่งพลังงานหลักที่ใช้ คือ พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติ เพื่อให้ความร้อนแก่ชิ้นเหล็กแท่งแบบต่างๆ (billet, bloom & slab) โดยทั่วไปอุณหภูมิของเตาจะอยู่ที่ประมาณ 1,100-1,250 °C ก่อนจะนำเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปต่อไป

ในกระบวนการอบเหล็กนั้นจะแบ่งอย่างกว้างๆ เป็น 3 ส่วนคือส่วน preheating ส่วน heating และส่วน soaking

ในส่วน preheating นั้น ชิ้นเหล็กแท่งจะถูกอุ่นให้ร้อน (preheat) โดยการนำเอาความร้อนที่สวนทางกับไอเสียร้อน สำหรับส่วน heating นั้นจะเป็นส่วนที่ให้ความร้อนหลักแก่ชิ้นเหล็กแท่งจนกระทั่งมีอุณหภูมิตามที่ต้องการ หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกส่งไปยังส่วน soaking ซึ่งจะทำหน้าที่ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นเหล็กแท่งต่อไปเพื่อให้อุณหภูมิของชิ้นเหล็กแท่งมีค่าคงที่ตลอดทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งในปัจจุบันคาดว่าอุตสาหกรรมเหล็กไทยมีการใช้พลังงานเท่ากับ 939 ktoe [1] สำหรับการผลิตเหล็กในแต่ละปี ซึ่งถือว่าเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานของประเทศที่ใช้พลังงานสูงเป็นอันดับต้นๆ และ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้รับการปรับปรุงพัฒนา ไม่เพียงแต่การพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ของอุตสาหกรรมเหล็กเท่านั้นที่จะก่อให้เกิดผลกระทบเชิงบวกกับภาพรวมการใช้พลังงานของประเทศ แต่ยังรวมถึงความจำเป็นที่ต้องมีอุตสาหกรรมเหล็กเพื่อเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานหลักในการพัฒนาอุตสาหกรรมปลายน้ำต่างๆ ที่เป็นอุตสาหกรรมยุทธศาสตร์หลักของประเทศ เช่น อุตสาหกรรมการก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า

เตา reheating furnace ที่ใช้อบ billet หรือ slab ที่ใช้ในประเทศไทยนั้น มีการนำไอเสียร้อนปล่อยทิ้งด้วยการอุ่นอากาศที่ใช้เผาไหม้ให้ร้อนขึ้นโดยผ่าน recuperator ซึ่งได้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงสุดเพียง 300 °C หรือมี temperature efficiency เพียง 30%

การนำเทคโนโลยี regenerative burner มาใช้แทนหัวเผาและ recuperator เดิม สามารถอุ่นอากาศได้สูงถึง 1,000 °C มีประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิสูงถึง 90% จะช่วยประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับการใช้ recuperator ได้ 10-20 % [2] ในขบวนการอบเหล็ก (reheating)

ซึ่งหลักการทำงานของ regenerative burner โดยทั่วไปประกอบด้วย regenerator ทำหน้าที่สะสมความร้อนโดยมีวัตถุบรรจุอยู่ภายในเช่น alumina ball ส่วน switching valves มีหน้าที่สลับทิศการไหลของไอเสียร้อนและอากาศที่ใช้เผาไหม้ ไอเสียที่ออกจากการเผาไหม้ของหัวเผาจะผ่าน regenerator อยู่ในหัวเผาอีกตัวหนึ่ง ซึ่งไอเสียร้อนจะถ่ายเทความร้อนสัมผัสให้ alumina ball และความร้อนจากการสะสมจะถูกถ่ายเทให้แก่อากาศที่จะใช้ในการเผาไหม้ในหัวเผาตัวหนึ่ง regenerative burner โดยทั่วไปจะเหมาะสำหรับในการติดตั้งในเตาที่มีการใช้พลังงานตั้งแต่ 500 kW ขึ้นไป สำหรับเตาที่มีการใช้พลังงานน้อยจะมีปัญหาสำคัญอยู่สองประการ คือปัญหาเรื่องการหาพื้นที่ในการติดตั้ง ราคาของอุปกรณ์และระบบค่อนข้างสูงทำให้ระยะเวลาในการคืนทุนช้า

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการใช้พลังงานของเตาเผาที่มีการใช้ regenerative burner ควบคู่กับ recuperator

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาเตา reheating furnace ที่มีการติดตั้ง regenerative burner และ recuperator ร่วมกัน

2. ตรวจวัดการใช้พลังงานของเตาตัวอย่าง โดยการตรวจวัดประกอบด้วย การใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก พลังงานที่สูญเสียไปกับไอเสีย การสูญเสียพลังงานในรูปแบบอื่นๆและปริมาณความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับ regenerative burner

2. ดำเนินการตรวจวัดเตาเผา reheating furnace ที่ใช้ regenerative burner ร่วมกับ recuperator เพื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงาน

3. ศึกษาและวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผา reheating furnace ที่ใช้ regenerative burner ร่วมกับ recuperator

4. คำนวณประสิทธิภาพเตาเผาและการนำความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์

5. วิเคราะห์และสรุปผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีข้อมูลการใช้พลังงานของเตา reheating furnace ที่ใช้ regenerative burner ร่วมกับ recuperator เพื่อใช้เป็นแนวทางการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเตา reheating furnace

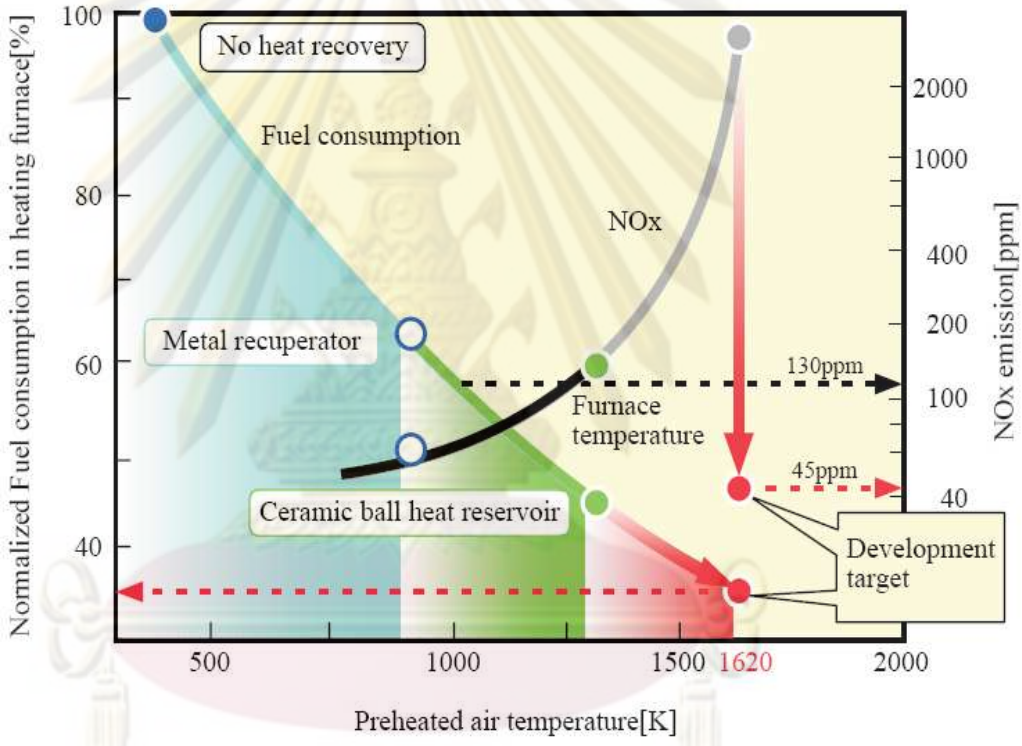
2. สามารถนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดเป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตา reheating furnace ต่อไป

3. เพื่อเป็นกรณีศึกษาสำหรับการอนุรักษ์พลังงานในเตา reheating furnace ที่ใช้ regenerative burner ร่วมกับ recuperator

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hasegawa et al (2000) [2] กล่าวถึงการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ของเตา reheating furnace ทั่วไปซึ่งที่นิยมใช้ แบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบรวมศูนย์และแบบกระจาย โดยแบบรวมศูนย์ เป็นแบบที่นิยมใช้ในปัจจุบันโดยอากาศจะถูกด้วยก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ภายในรีคูปเปอเรเตอร์โลหะ และนำอากาศที่ได้รับ ความร้อนไปใช้ในการเผาไหม้ต่อไป โดยอุณหภูมิของอากาศนี้ถูกอุ่นมีค่าสูงสุด 900 K ที่อุณหภูมิของเตา 1620 K

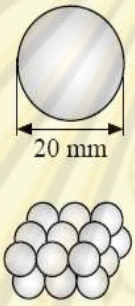


รูปที่ 2.1 กราฟแสดงเป้าหมายการใช้พลังงานและอัตราการปล่อย NOx [2]

ส่วนแบบกระจาย ใช้การสลับทิศทางของสวิตช์ควบคุมกับหัวเผารีเจนเนอเรทีพโดยใช้รีเจนเนอเรเตอร์ชนิดลูกกลมเซรามิกเป็นตัวสะสมความร้อน เมื่อเปรียบเทียบระบบการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ทั้งสองพบว่า แบบกระจายมีอุณหภูมิของอากาศอุ่นประมาณ 1300 K ซึ่งสูงกว่าแบบศูนย์กลาง อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของรีเจนเนอเรเตอร์ชนิดลูกกลมเซรามิก ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่น้อย (เมื่อเทียบกับชนิดรังผึ้ง) ทำให้ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศเผาไหม้ได้ใกล้เคียง 1620 K ซึ่งก็คืออุณหภูมิของเตา นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องปริมาณ NOx ที่

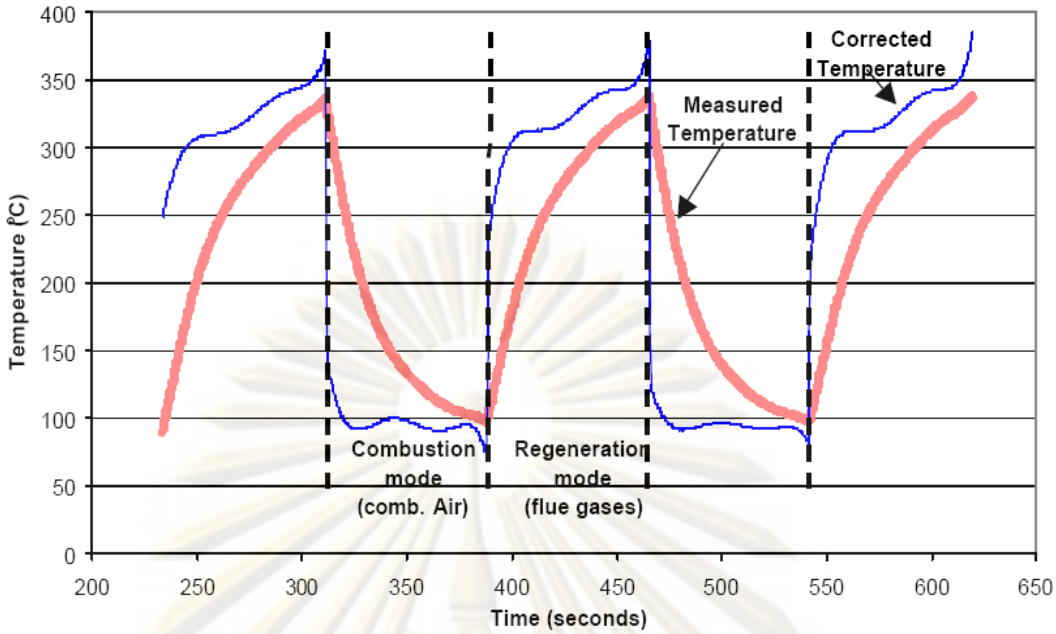
สูงเกินไป อันเกิดจากอุณหภูมิของเปลวไฟที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ทำให้ Hasegawa et al พัฒนาเทคโนโลยีที่ให้ความเหมาะสมระหว่างการนำความร้อนมาใช้ใหม่และการเผาไหม้โดยอัตราการปล่อย NOx ต่ำที่สุด ดังรูปที่ 2.1

Hasegawa et al ได้เลือกรีเจนเนอเรเตอร์ชนิดรังผึ้งซึ่งมีข้อดีกว่ารีเจนเนอเรเตอร์ชนิดลูกกลมเซรามิกคือ มีพื้นผิวสัมผัสจำเพาะเป็น 6 เท่าของชนิดลูกกลมเซรามิก และมีน้ำหนักเพียง 1/10 ของชนิดลูกกลมเซรามิก โดยมีส่วนเวลาในการสลับทิศของวาล์วที่เหมาะสม คือ 30 วินาที ดังรูปที่ 2.2

	Ball type	Honeycomb type	
Media shape			Optimum heat transfer characteristics and durability ensured by a combination of shape, mesh, thickness and segmentation
Relative weight per surface area	~10	1 (base)	Compact configuration
Specific surface area	~240m^2/m^3	~1340m^2/m^3	High heat recovery rate
Switching time	~120s	~30s	Small fluctuations in preheated air temperature

รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบ regenerator ระหว่างชนิดลูกกลมเซรามิก และชนิดรังผึ้ง [2]

เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยการปล่อย NOx ต่ำ Hasegawa et al ใช้วิธีการการเผาไหม้เป็นลำดับขั้นของเชื้อเพลิงร่วมกับอากาศที่เจือจาง รวมทั้งเทคนิคการเผาไหม้โดยอาศัยการหมุนวนของไอเสียมาผสมกับอากาศที่ใช้เผาไหม้ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนมีความเข้มข้นลดลง ส่งผลให้อัตราการปล่อย NOx ต่ำลงเช่นกัน



รูปที่ 2.3 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้และไอเสีย ด้านเย็นของรีเจนเนอเรเตอร์ ที่ cycle time 70 วินาที [3]

Nabil Rafidi และ Wlodzimiez Blasiak (2003) [3] (รูปที่ 2.3) ศึกษาถึงพารามิเตอร์เชิงประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบหัวเผารีเจนเนอเรทีพรอบสูง (HRS) ชนิดลูกกลมเซรามิก โดยทำการวัดอุณหภูมิของอากาศเผาไหม้และไอเสียที่เคลื่อนที่เข้าและออกผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ โดยนำค่าดังกล่าวมาวิเคราะห์สมดุลพลังงาน ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ และอัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่ โดยประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ (temperature efficiency, η_{ta}) คำนวณได้จาก

$$\eta_{ta} = \frac{T_{preheat,RG} - T_{air,RG}}{T_{flue,RG,stack} - T_{air,RG}} \qquad (2.1)$$

เมื่อ $T_{preheat,RG}$ คือ อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้ที่ได้รับการอุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ก่อนเข้าสู่เตาเผา (°C)

$T_{air,RG}$ คือ อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ (°C)

$T_{flue,RG,stack}$ คือ อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากรีเจนเนอเรตอร์ไปสู่ปล่อง (°C)

และอัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่ (heat recovery rate, $\eta_{recovery}$) คำนวณได้จาก

$$\eta_{recovery} = \frac{\dot{Q}_{preheat,RG} - \dot{Q}_{air,RG}}{\dot{Q}_{flue,RG}} \quad (2.2)$$

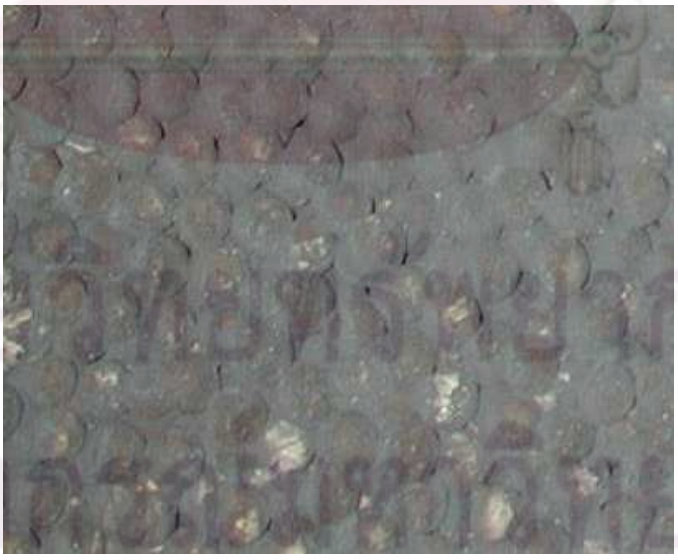
เมื่อ $\dot{Q}_{preheat,RG}$ คือ ความร้อนของอากาศเผาไหม้ที่ได้รับการอุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ก่อนเข้าสู่เตาเผา (kW)

$\dot{Q}_{air,RG}$ คือ ความร้อนของอากาศก่อนเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ (kW)

$\dot{Q}_{flue,RG}$ คือ ความร้อนของไอเสียที่ออกจากรีเจนเนอเรตอร์ (kW)

โดยทำการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ และอัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่ของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ที่ cycle time ต่างๆ ได้แก่ 50, 60 และ 70 วินาที ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ที่ cycle time ที่ 60 วินาที มีประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิและประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เท่ากับ 87.7 ± 2 % และ 75.9 ± 2.3% ตามลำดับ

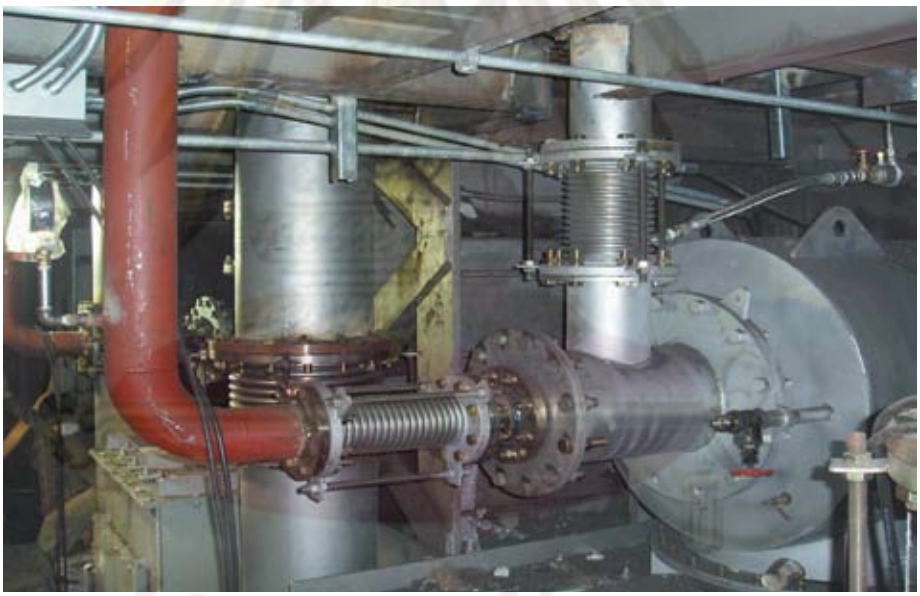
Birgitta Lindbland (2003) [4] ได้ศึกษาการบำรุงรักษาระบบการเผาไหม้ของอากาศที่ได้รับการอุ่นอุณหภูมิสูง (Highly Preheated Air Combustion) โดยทำการทดสอบหัวเผารีเจนเนอเรทีฟซึ่งติดตั้งบริเวณ preheating zone จำนวน 1 คู่ ในเตา reheating furnace ขนาด 300 ตัน/ชั่วโมง ชนิด walking beam ที่ SSAB Tunnplat, Borlange ประเทศสวีเดน



รูปที่ 2.4 ลูกกลมเซรามิกก่อนการทำความสะอาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 -15 mm) [4]

ผลจากการทดสอบ พบว่า ในระยะเวลามากกว่า 1 ปี โดยไม่มีการทำความสะอาดรีเจนเนอเรเตอร์ ชนิดลูกกลมเซรามิกภายในหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ พบว่าไม่มีผลกระทบต่อค่าเชิงประสิทธิภาพทางความร้อนหลักๆ ได้แก่ อัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่และประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ และเมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานกับระบบเตา reheating furnace เดิมที่ติดตั้งเพียงรีคูเพอเรเตอร์ พบว่า หัวเผารีเจนเนอเรทีฟสามารถประหยัดพลังงานมากกว่า 12 %

S.J.O'Corner et al (2005) [5] ศึกษาการใช้พลังงานของเตา reheating furnace ชนิด walking beam โดยติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟจำนวน 4 คู่ แทนหัวเผาธรรมดาที่ส่วนล่างของ preheating zone ในโรงงาน INI เมือง Incheon ประเทศเกาหลีใต้ พบว่า สามารถลดการใช้พลังงานประมาณ 8.8 – 12.3% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเตา reheating furnace เดิมที่ติดตั้งเพียงรีคูเพอเรเตอร์ กล่าวได้ว่าการทำงานของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟช่วยให้เตา reheating furnace นี้มีการใช้พลังงานในโซนทำความร้อนอื่นๆ (heating zone และ soaking zone) มีการใช้น้อยลง



รูปที่ 2.5 การติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟในเตา reheating furnace [5]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Krishnamurthy et al [6] ได้ศึกษาถึงเทคโนโลยีการเผาไหม้อากาศที่อุณหภูมิสูง การศึกษาของ Krishnamurthy et al ได้เสนอเทคโนโลยีในการเผาไหม้ ดังต่อไปนี้

1. Oxy-fuel เป็นการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้ ลักษณะการเผาไหม้ชนิดนี้ เกิดการทำปฏิกริยาเคมีที่รวดเร็ว มีอุณหภูมิของเปลวไฟสูงสุดที่สูง (high flame peak temperature) และสามารถมองเห็นเปลวไฟได้ ปัญหาของการเผาไหม้ชนิดนี้ คือ การเกิดความเสียหายของอิฐทนไฟ การกระจายตัวของความร้อนไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะอิทธิพลจากการรั่วของอากาศเข้าไปในระบบการเผาไหม้ทำให้เกิดการปล่อย NOx ปริมาณมาก

2. Flameless Oxy-fuel เป็นการเผาไหม้ที่ใช้การหมุนวนก๊าซเสียภายในห้องเผาไหม้ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนลดลง โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ลักษณะการเผาไหม้ชนิดนี้จะปราศจากเปลวไฟ อุณหภูมิของเปลวไฟที่ต่ำและบริเวณการทำปฏิกริยาของเปลวไฟที่กว้าง

3. Air Combustion (AC)-conventional เป็นการเผาไหม้โดยการใช้อากาศที่ได้รับการอุ่นจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดรีคูเพอเรเตอร์ โดยความร้อนที่ได้ (available heat) จากกระบวนการนี้มีไม่มากนัก

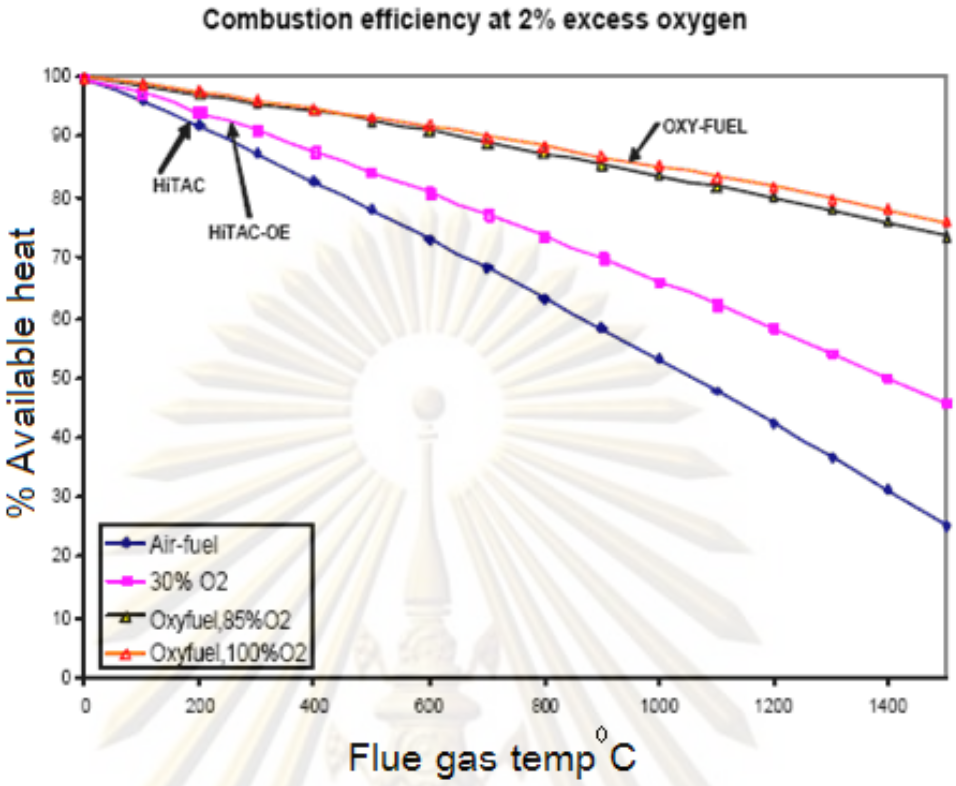
4. High Temperature Air combustion (HiTAC) หรือ Flameless oxidation (FLOX®) ใช้หลักการในการทำความร้อนของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จากก๊าซเสียโดยใช้ regenerator ที่มีประสิทธิภาพสูง ร่วมกับเทคนิคการหมุนวนของก๊าซเสียภายในห้องเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนที่เจือจาง

นอกจากนี้ Krishnamurthy et al ได้ทำการทดลองโดยกำหนดให้หัวเผาดังตาราง 2.1 แทนชนิดของการเผาไหม้ โดยศึกษาลักษณะของแต่ละเทคโนโลยีการเผาไหม้ ได้แก่ Available heat, Temperature in flame

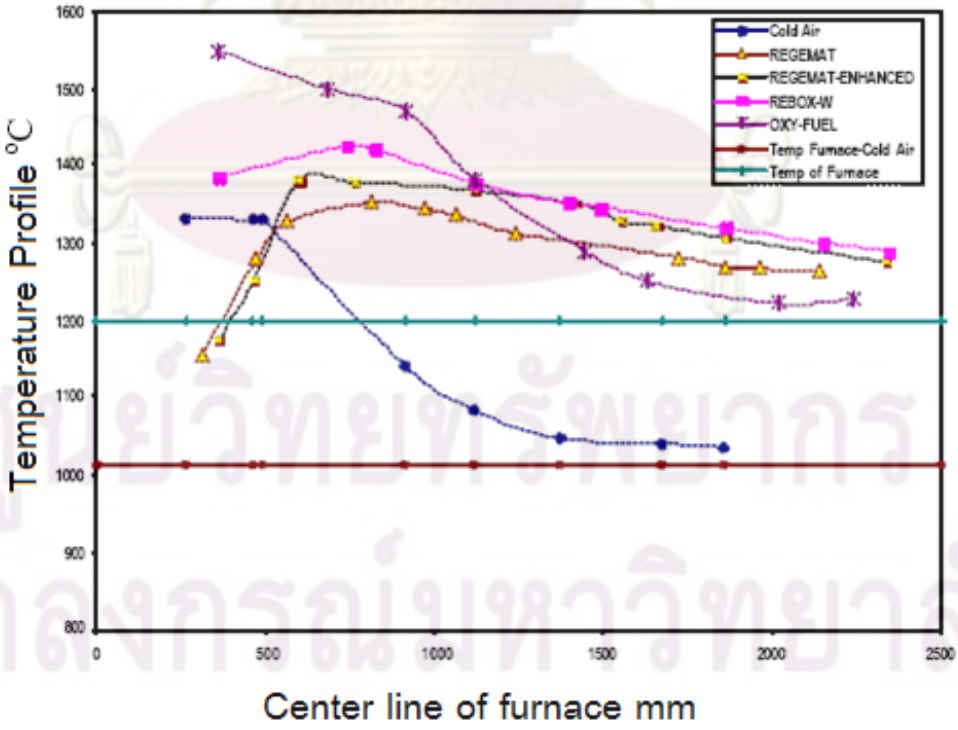
ตาราง 2.1 ชื่อหัวเผาที่ใช้แทนชนิดของการเผาไหม้

Type of combustion	Burner
Flameless Oxy-fuel	REBOX-W
Oxy-fuel	Oxy-Fuel
HiTAC	REGEMAT
HiTAC-OE	REGEMAT-Enhanced
Air Combustion (AC)-conventional	Cold air

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 Available heat และอุณหภูมิของไอเสียจากโพรเพน[6]



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณ center line ของเตาเผา [6]

จากรูปที่ 2.6 แสดง %Available heat ของเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดเซอร์หรือ oxy fuel (O_2 = 85%, 100%) กับเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยใช้อากาศหรือ HiTAC, HiTAC-OE (O_2 = 21%, 30%) โดย Available heat คือค่าผลต่างระหว่างความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมดกับความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย พบว่า ค่า available heat ของเทคโนโลยีการเผาไหม้ชนิด oxy fuel มีค่าสูงกว่าเทคโนโลยีการเผาไหม้ชนิด HiTAC และ HiTAC-OE ที่อุณหภูมิของไอเสียเดียวกัน

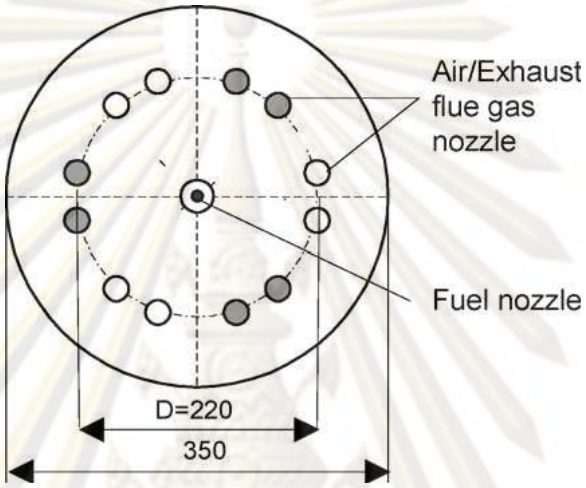
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในช่วงที่อุณหภูมิไอเสียไม่สูงมากนัก (0-400 °C) ซึ่งเป็นอุณหภูมิของไอเสียที่ปล่อยออกมาจากระบบการทำความร้อนที่มีการนำความร้อนมาใช้ใหม่ (heat recovery) ความแตกต่างของ available heat ของเทคโนโลยีการเผาไหม้ชนิด HiTAC และ HiTAC-OE กับเทคโนโลยีการเผาไหม้ชนิด oxy fuel มีค่าไม่ต่างกันมากนัก จึงสามารถเลือกอุปกรณ์ทำความร้อนได้ทั้งชนิด oxy fuel และ HiTAC ได้ตามความเหมาะสม

รูปที่ 2.7 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ center line ของเตาเผา พบว่า อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดของ REGEMAT และ REGEMAT-Enhanced ที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าREBOX-W เนื่องจากการออกแบบเชิงพลศาสตร์ที่ดีโดยใช้โมเมนตัมของหัวฉีดที่มีความเร็วสูงของ REGEMAT และ REBOX-W ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาเผามีความสม่ำเสมอ

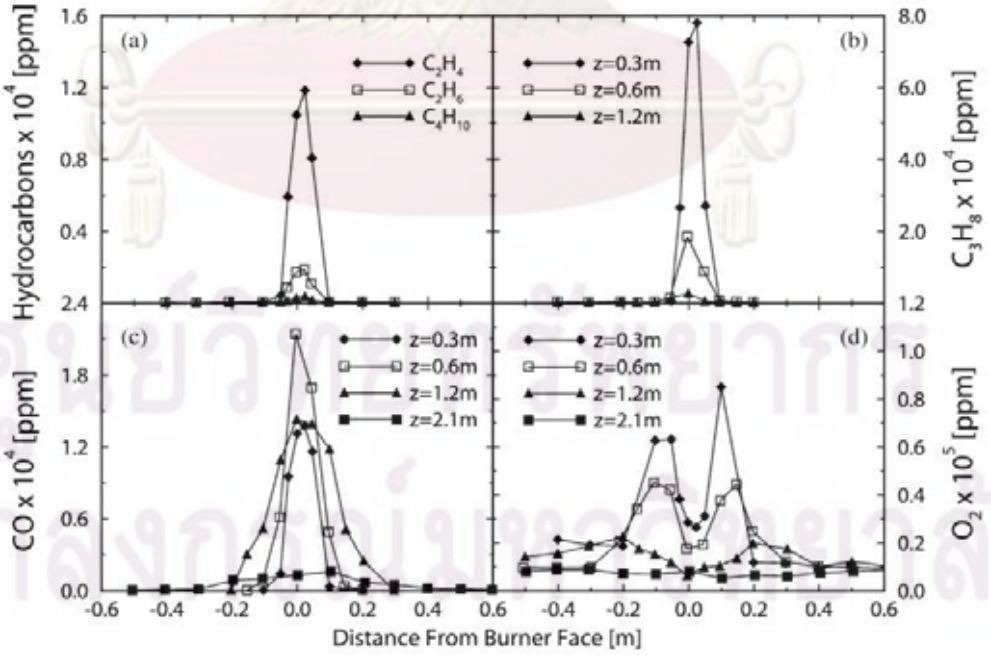
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Blasiak et al (2004) [7] ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภายของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้โดยใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง (ซึ่งประกอบด้วย C_2H_6, C_3H_8 และ C_4H_{10}) ในระบบการเผาไหม้อากาศที่อุณหภูมิสูง (HiTAC) โดยใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ (รูปที่ 2.8)

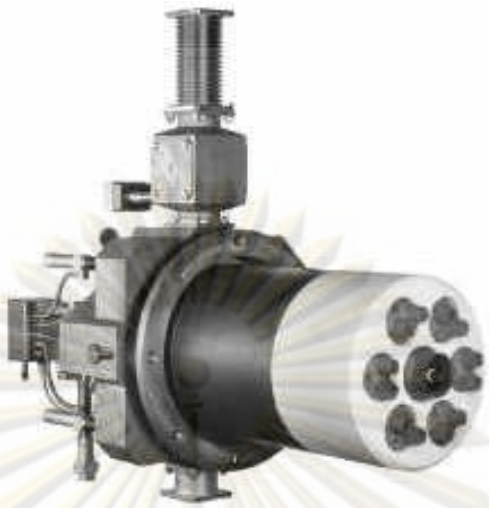
จากการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นสูงสุดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการเผาไหม้โดยหัวเผารีเจนเนอเรทีฟเกิดบริเวณ Fuel nozzle ที่ส่วนกลางของหัวเผาและก๊าซออกซิเจนเกิดสูงสุดที่ Air/Exhaust flue gas nozzle บริเวณรอบๆหัวเผา (รูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.8 ลักษณะทั่วไปของหัวเผาที่ในระบบเผาไหม้อุณหภูมิสูง [7]



รูปที่ 2.9 ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการวัด [7]



รูปที่ 2.10 หัวเผา REGEMAT® (WS GmbH) [8]

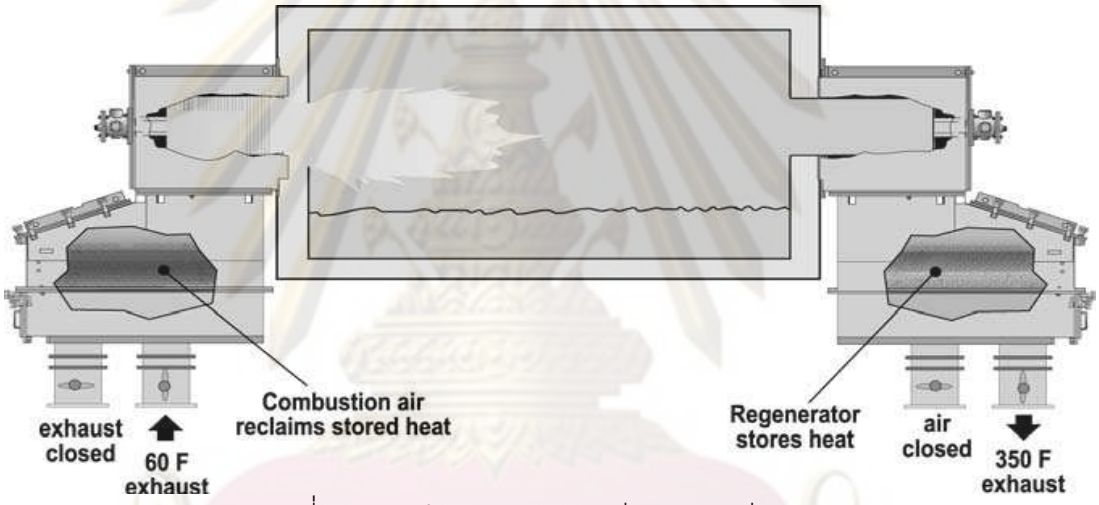
Joachim G. W. [8] เสนอเทคโนโลยีของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่ใช้เพียงหัวเผาเดียว (self regenerative burner) สำหรับใช้ในบริเวณพื้นที่จำกัด โดยรวมเอา switching valve และ regenerator ไว้ในชุดเดียว (compact unit) ทำให้สามารถประหยัดพลังงานกว่าระบบของหัวเผาที่ใช้อากาศเย็น ประมาณ 50%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

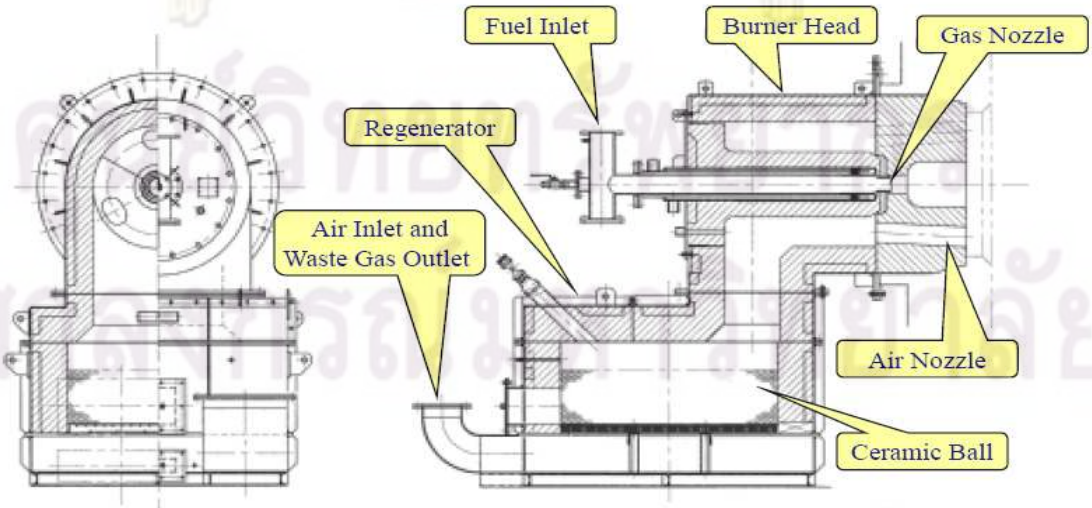
บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 **หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ** (Regenerative burner)

หัวเผารีเจนเนอเรทีฟเป็นระบบการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียไปสู่อากาศเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดพลังงานมากชนิดหนึ่ง การหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียไปสู่อากาศเผาไหม้กระทำโดยการสลับทิศการไหลของอากาศเผาไหม้อย่างเป็นจังหวะ โดยใช้วาล์วสลับทิศการไหล(Switching valve) โดยความร้อนจากไอเสียจะถูกถ่ายเทให้อากาศเผาไหม้ผ่านทางรีเจนเนอเรเตอร์ ก่อนถูกระบายออกสู่นอกเตาเผา รูปที่ 3.1 แสดงหลักการทำงานของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ และรูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ



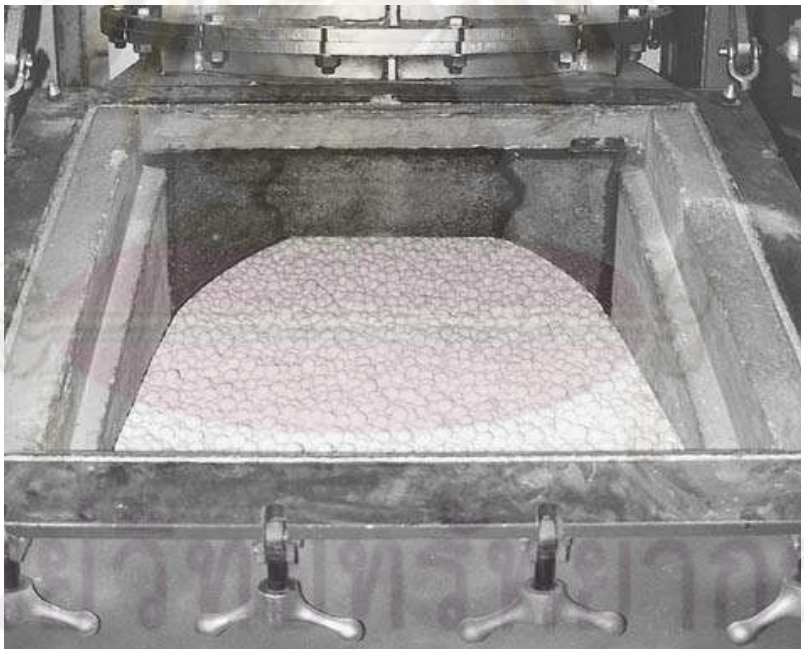
รูปที่ 3.1 การทำงานของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ [11]



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ [11]

รูปที่ 3.3 แสดง รีเจนเนอเรเตอร์ชนิด ceramics ball ซึ่งทำหน้าที่สะสมความร้อนของไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ เพื่อถ่ายเทความร้อนที่สะสมไว้แก่อากาศเผาไหม้ ทำให้อากาศเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ดีขึ้น โดยทั่วไปรีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้กับหัวเผารีเจนเนอเรทีฟมี 2 ประเภท ได้แก่ ชนิด ceramic ball และ honeycomb

สำหรับอุตสาหกรรมเหล็ก โดยทั่วไปนิยมใช้ รีเจนเนอเรเตอร์ชนิด honeycomb เนื่องจากมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนและพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนต่อน้ำหนักมากกว่าชนิด ceramic ball อย่างไรก็ตามรีเจนเนอเรเตอร์ชนิด honeycomb ยังมีข้อด้อยอยู่ที่ราคาค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับชนิด ceramic ball และการซ่อมบำรุงที่ยุ่งยากกว่า(ต้องเปลี่ยนทั้งชุดเมื่อเกิดการเสียหาย) นอกจากนี้ cycle time ที่ใช้กับรีจนเนอเรเตอร์ชนิด honeycomb ต่ำกว่าชนิด ceramic ball ทำให้ reversing valve ทำงานมากกว่ามีโอกาสเกิดความเสียหายสูง การซ่อมบำรุงก็มากขึ้นด้วย ดังนั้นรีเจนเนอเรเตอร์ ชนิด ceramic ball จึงถูกเลือกใช้ เนื่องจากมีราคาถูกที่ถูกกว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สามารถยอมรับได้ และการซ่อมบำรุงที่สะดวกกว่า กล่าวคือ สามารถทำความสะอาด ceramic ball ได้ง่าย



รูปที่ 3.3 รีเจนเนอเรเตอร์ชนิด ceramics ball [11]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 **สมดุลพลังงานของเตาเผา**

การศึกษาสมดุลพลังงานคือการศึกษาสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาโดยละเอียด ทำให้ทราบถึงพลังงานที่เข้าและออกจากเตาเผา นำไปสู่การปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา การศึกษาสมดุลพลังงานต้องอาศัยกฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ในการพิจารณา โดยกำหนดให้เตาเผาคือปริมาตรควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และการทำงานของเตาเผามีการทำงานอย่างต่อเนื่อง

3.2.1 **สมดุลมวลของเตาเผา**

พิจารณาปริมาตรควบคุมสำหรับระบบที่มีการถ่ายเทระหว่างมวลกับสิ่งแวดล้อม สามารถนิยามด้วยกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) ดังนี้

[มวลไหลเข้าปริมาตรควบคุมทั้งหมด] - [มวลไหลออกจากปริมาตรควบคุมทั้งหมด]
= [การเปลี่ยนแปลงสุทธิของมวลภายในปริมาตรควบคุม]

$$\text{หรือ} \quad \sum m_i - \sum m_o = \Delta m_{CV} \tag{3.1}$$

เมื่อพิจารณาสมการเชิงอัตรา

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o = \frac{dm_{CV}}{dt} \tag{3.2}$$

สำหรับกรณีศึกษานี้จะพิจารณาระบบในสภาวะคงตัว (Steady state) หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลสุทธิภายในปริมาตรควบคุม ($dm_{CV}/dt = 0$) ดังนั้น จากกฎการอนุรักษ์มวลจะได้

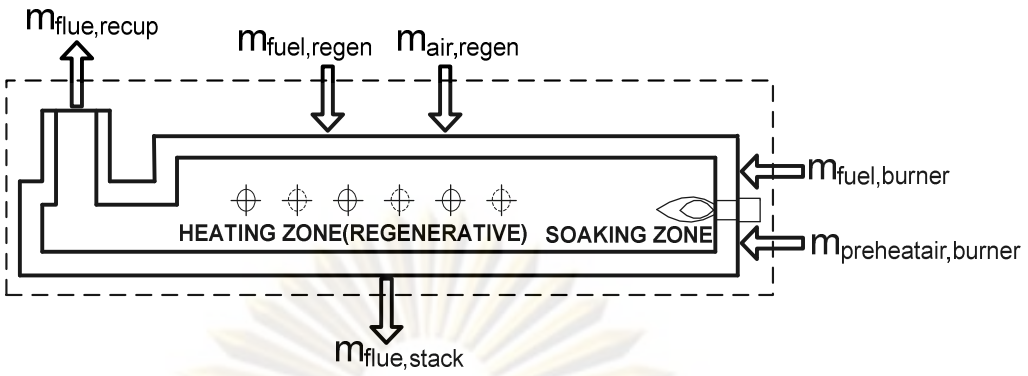
$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o = \frac{dm_{CV}}{dt} = 0 \tag{3.3}$$

เมื่อพิจารณาเตาเผาเหล็กเป็นปริมาตรควบคุมจะสามารถคำนวณหาสมดุลมวลของเตาเผาดังสมการต่อไปนี้

[อัตรามวลไหลเข้าสู่เตาเผาเหล็ก] = [อัตรามวลไหลออกจากเตาเผาเหล็ก]

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \tag{3.4}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 สมดุลมวลของเตาเผา

ตารางที่ 3.1 มวลไหลเข้าและไหลออกจากเตาเผา

มวลไหลเข้าสู่เตาเผา	มวลไหลออกจากเตาเผา
1) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ 2) อัตราไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ 3) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผา 4) อัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา	1) อัตราไหลของไอเสียออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง 2) อัตราไหลของไอเสียจากเตาเผาไปสู่รีคูเพอเรเตอร์

มวลไหลเข้าสู่เตาเผา

1) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ($\dot{m}_{fuel,regen}$) สามารถหาได้จากการอ่านค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟจากมาตรวัด โดยทั่วไปจะติดตั้งมาพร้อมกับระบบจ่ายเชื้อเพลิง จากนั้นก็จับเวลาที่ใช้ในการบริโภคเชื้อเพลิงดังกล่าว อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟสามารถหาได้จาก

$$\dot{m}_{fuel,regen} = \rho_{fuel} \dot{\forall}_{fuel,regen} \quad (3.5)$$

โดย ρ_{fuel} คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m^3)

$\dot{\forall}_{fuel,regen}$ คือ ปริมาตรการบริโภคเชื้อเพลิงของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟต่อหน่วยเวลา (m^3/s)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) อัตราไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

อัตราไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ($\dot{m}_{air,regen}$) คำนวณได้จากการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนในไอเสีย ($\%O_2$) จากนั้นนำไปหาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (AF_{actual}) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเผาไหม้ อัตราไหลของอากาศเผาไหม้จะสามารถหาได้จาก

$$\dot{m}_{air,regen} = AF_{actual} \times \dot{m}_{fuel,regen} \tag{3.6}$$

เมื่อ AF_{actual} คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (kg_{air}/kg_{fuel})

3) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผา

อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผา ($\dot{m}_{fuel,burner}$) สามารถหาค่าดังกล่าวได้ เช่นเดียวกับการหาค่าอัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ($\dot{m}_{fuel,regen}$) ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{m}_{fuel,burner} = \rho_{fuel} \dot{\forall}_{fuel,burner} \tag{3.7}$$

เมื่อ $\dot{\forall}_{fuel,burner}$ คือ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหัวเผาต่อหน่วยเวลา (m^3/s)

4) อัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา

อัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา($\dot{m}_{preheatair,burner}$) สามารถหาค่าดังกล่าวได้เช่นเดียวกับการหาค่าอัตราไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

$$\dot{m}_{preheatair,burner} = AF_{actual} \times \dot{m}_{fuel,burner} \tag{3.8}$$

มวลไหลออกจากเตาเผา

1) อัตราไหลของไอเสียจากเตาเผาไปสู่รีคูเพอเรเตอร์

อัตราไหลของไอเสียจากเตาเผาไปสู่รีคูเพอเรเตอร์ ($\dot{m}_{flue,recup}$) หาได้จากผลรวมของอัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผา ($\dot{m}_{fuel,burner}$) และอัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา ($\dot{m}_{preheatair,burner}$)

$$\dot{m}_{flue,recup} = \dot{m}_{fuel,burner} + \dot{m}_{preheatair,burner} \tag{3.9}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) อัตราไหลของไอเสียจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง (stack)

อัตราไหลของไอเสียจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง ($\dot{m}_{flue,reg,stack}$) หาได้จากผลรวมของอัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ($\dot{m}_{fuel,regen}$) และอัตราไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ($\dot{m}_{air,regen}$)

$$\dot{m}_{flue,reg,stack} = \dot{m}_{fuel,regen} + \dot{m}_{air,regen} \tag{3.10}$$

3.2.2 **สมดุลความร้อนของเตาเผา**

พิจารณาปริมาตรควบคุมสำหรับระบบที่มีการถ่ายเทระหว่างมวลกับสิ่งแวดล้อม ทำให้มีพลังงานส่วนหนึ่งไหลเข้าและออกไปพร้อมกับการถ่ายเทของมวล โดยไม่มีพลังงานที่หลงเหลืออยู่เลยในระบบที่พิจารณา ซึ่งพลังงานเหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้จากกฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม โดยอาศัยหลักการของกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{CV} - W_{CV} + \Sigma E_{in} - \Sigma E_{out} = \Delta E_{CV} \tag{3.11}$$

เมื่อ Q_{CV} คือ พลังงานความร้อนสุทธิที่ข้ามผิวควบคุมของปริมาตรควบคุม

W_{CV} คือ งานสุทธิที่ข้ามผิวควบคุมของปริมาตรควบคุม

ΣE_{in} คือ พลังงานสุทธิทั้งหมดของมวลที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุม

ΣE_{out} คือ พลังงานสุทธิทั้งหมดของมวลที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม

ΔE_{CV} คือ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานสุทธิในปริมาตรควบคุม

พิจารณาในรูปสมการเชิงอัตรา

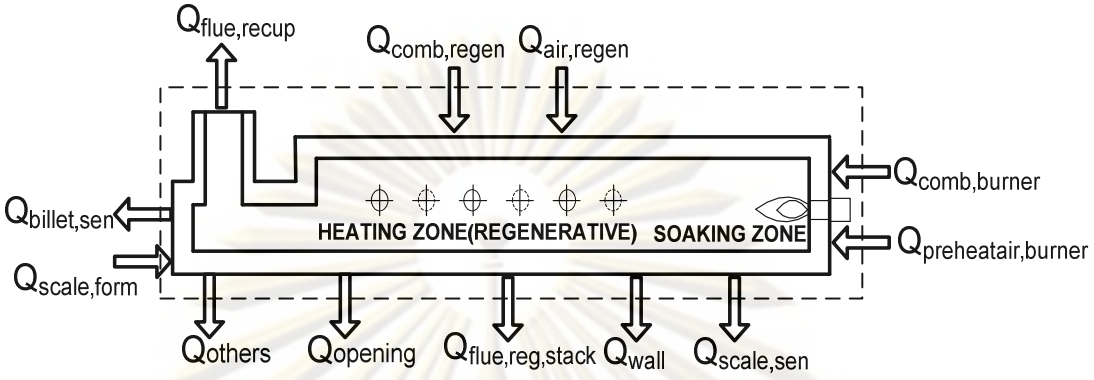
$$\dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \Sigma \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2}V_i^2 + gZ_i\right) - \Sigma \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2}V_e^2 + gZ_e\right) = \frac{dE_{CV}}{dt} \tag{3.12}$$

เนื่องจากความแตกต่างของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของระบบมีน้อยมาก สามารถพิจารณาให้เป็นศูนย์ โดยระบบที่ทำการศึกษาอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state), $\frac{dE_{CV}}{dt} = 0$ โดยกำหนดอุณหภูมิอ้างอิง (T_o) และความดันอ้างอิง (P_o) มีค่า 25 °C และ 1 atm ตามลำดับ

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) จะสามารถหาสมดุลพลังงาน (Energy Balance) ของเตาเผา ได้ดังสมการต่อไปนี้

[พลังงานเข้าสู่เตาเผา] = [พลังงานออกจากเตาเผา]

$$\Sigma \dot{E}_i = \Sigma \dot{E}_e \quad (3.13)$$



รูปที่ 3.5 สมดุลความร้อนของเตาเผา

ตารางที่ 3.2 ความร้อนเข้าและออกจากเตาเผา

ความร้อนเข้าสู่เตาเผา	ความร้อนออกจากเตาเผา
1) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ 2) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา 3) ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ 4) ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์เข้าหัวเผา 5) ความร้อนในออกไซด์ของเหล็ก	1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก 2) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง 3) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปสู่รีคูเพอเรเตอร์ 4) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล 5) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา 6) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด 7) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เช่น ช่องเปิดหลังคาและพื้น เป็นต้น

โดยรายละเอียดของความร้อนที่เข้าและออกจากเตาเผา มีดังต่อไปนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความร้อนเข้าสู่เตาเผา

1) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ($\dot{Q}_{comb,regen}$) เป็นความร้อนหลักของเตาเผาที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงบริเวณหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ได้จากหัวเผารีเจน-เนอเรทีฟ สามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{comb,regen} = \dot{\forall}_{fuel,regen} \times LHV \qquad (3.14)$$

เมื่อ LHV คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/Nm^3)

2) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา

ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา($\dot{Q}_{comb,burner}$) เป็นความร้อนของเตาเผาที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงบริเวณหัวเผาเพื่อให้ความร้อนแก่เหล็ก นับเป็นความร้อนรองจากความร้อนที่เกิดจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

$$\dot{Q}_{comb,burner} = \dot{\forall}_{fuel,burner} \times LHV \qquad (3.15)$$

3) ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

$$\dot{Q}_{air,regen} = \sum \frac{\dot{m}_{air,regen}}{M_{air,regen}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,regen}} \overline{c}_{P,air,regen} dT \right) \qquad (3.16)$$

พิจารณาองค์ประกอบของอากาศให้มีเพียงก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจน จะได้ว่า

$$\dot{Q}_{air,regen} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,regen}} \overline{c}_{P,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,regen}} \overline{c}_{P,N_2} dT \right) \qquad (3.17)$$

เมื่อ $\dot{m}_{O_2,air}$ คือ อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (kg/s)

$\dot{m}_{N_2,air}$ คือ อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (kg/s)

M_{O_2} คือ มวลโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเท่ากับ 31.99 (kg/kmol)

M_{N_2} คือ มวลโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 28.013 (kg/kmol)

$\overline{c}_{P,N_2}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน มีค่าโดยประมาณเท่ากับ

$28.90 - 0.1571\times10^{-2}T + 0.8081\times10^{-5}T^2 - 2.873\times10^{-9}T^3$ (kJ/kmol.K)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\overline{c}_{P,O_2}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน มีค่าโดยประมาณเท่ากับ

$25.48 + 1.520\times10^{-2}T - 0.7155\times10^{-5}T^2 + 1.312\times10^{-9}T^3$ (kJ/kmol.K)

$T_{air,regen}$ คือ อุณหภูมิของอากาศก่อนภายนอกก่อนเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ (K)

4) ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการ preheat อากาศที่รีคูเพอเรเตอร์

ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการ preheat อากาศที่รีคูเพอเรเตอร์ ($\dot{Q}_{preheat,recup}$) เป็นความร้อนที่ช่วยให้อากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้มีความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนความร้อนจากไอเสียที่ออกจากเตาเผากับอากาศเผาไหม้ที่รีคูเพอเรเตอร์

$$\dot{Q}_{preheat,recup} = \sum \frac{\dot{m}_{preheat,recup}}{M_{preheat,recup}} \left(\int_{T_0}^{T_{preheat,recup}} \overline{c}_{P,preheat,recup}\, dT \right) \qquad (3.18)$$

พิจารณาองค์ประกอบของอากาศให้มีเพียงก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจน จะได้ว่า

$$\dot{Q}_{preheat,recup} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{preheat,recup}} \overline{c}_{P,O_2}\, dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{preheat,recup}} \overline{c}_{P,N_2}\, dT \right) \qquad (3.19)$$

เมื่อ $T_{preheat,recup}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการ preheat ที่ recuperator (K)

5) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล

ความร้อนจากการก่อตัวสเกล($\dot{Q}_{scale,form}$) เป็นพลังงานความร้อนที่เกิดจากกระบวนการคายความร้อนของสเกล ซึ่งการก่อตัวของสเกลเกิดจากการรวมตัวของหล็กกับออกซิเจนภายในอากาศกลายเป็นเหล็กออกไซด์ โดย $\dot{Q}_{scale,form}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{scale,form} = \dot{m}_{billet} \left(\frac{\%scale}{100} \right) HV_{scale} \qquad (3.20)$$

เมื่อ $\dot{m}_{billet}$ คือ อัตราการผลิตของเหล็กที่ออกจากเตาเผา (kg/s)

%scale คือ ร้อยละของสเกลที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณ billet ที่ผลิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HV_{scale} คือ ค่าความร้อนที่คายออกจากการเปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์ มีค่า 5,161 kJ/kg_{scale}

ความร้อนออกจากเตาเผา

1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก

ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก($\dot{Q}_{billet,sen}$) เป็นพลังงานความร้อนที่ใช้งานจริง ซึ่งเหล็กสามารถกักเก็บได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟและหัวเผาธรรมดา โดยจะทำให้อุณหภูมิของเหล็กสูงขึ้นตามค่าที่ต้องการเพื่อให้ง่ายต่อการรีด ค่า $\dot{Q}_{billet,sen}$ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\dot{Q}_{billet,sen} = \dot{m}_{billet} C_{billet} (T_{billet,out} - T_{billet,in}) \quad (3.21)$$

เมื่อ C_{billet} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก มีค่าเท่ากับ 0.78 (kJ/kg.K)

$T_{billet,out}$ คือ อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา (K)

$T_{billet,in}$ คือ อุณหภูมิของเหล็กที่เข้าสู่เตาเผา (K)

2) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง

ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง ($\dot{Q}_{flue,stack}$) เป็นความร้อนของไอเสียที่ได้จากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ความร้อนทิ้งส่วนนี้จะนำออกผ่านปล่องสู่บรรยากาศภายนอก

$$\dot{Q}_{flue,stack} = \dot{m}_{flue,stack} (h_{flue,stack} - h_0) \quad (3.22)$$

หรือ

$$\dot{Q}_{flue,stack} = \sum \frac{\dot{m}_j}{M_j} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \overline{c}_{P,j} dT \right) \quad (3.23)$$

เมื่อพิจารณาจากกรณีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะประกอบด้วย CO_2, H_2O, O_2 และ N_2 ซึ่งสามารถเขียนสมการในแต่ละองค์ประกอบของก๊าซดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{flue,stack} = \frac{\dot{m}_{CO_2,flue,stack}}{M_{CO_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \overline{c}_{P,CO_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{H_2O,flue,stack}}{M_{H_2O}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \overline{c}_{P,H_2O}\,dT\right)$$
$$+ \frac{\dot{m}_{O_2,flue,stack}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,flue,stack}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right) \qquad (3.24)$$

เมื่อ subscript j คือ ก๊าซแต่ละชนิดใน flue gas

$\dot{m}_{CO_2,flue,stack}$ คือ อัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย (kg/s)

$\dot{m}_{H_2O,flue,stack}$ คือ อัตราไหลของไอน้ำในไอเสีย (kg/s)

$\dot{m}_{O_2,flue,stack}$ คือ อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในไอเสีย (kg/s)

$\dot{m}_{N_2,flue,stack}$ คือ อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในไอเสีย (kg/s)

M_{CO_2} คือ มวลโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 44.01(kg/kmol)

M_{H_2O} คือ มวลโมเลกุลของไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 18.015 (kg/kmol)

M_{O_2} คือ มวลโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเท่ากับ 31.999 (kg/kmol)

M_{N_2} คือ มวลโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 28.013 (kg/kmol)

$\overline{c}_{P,CO_2}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คำนวณได้จาก

$22.26 + 5.981\times10^{-2}T - 3.501\times10^{-5}T^2 + 7.469\times10^{-9}T^3$ (kJ/kmol.K)

$\overline{c}_{P,H_2O}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ คำนวณได้จาก

$32.24 + 0.1923\times10^{-2}T + 1.055\times10^{-5}T^2 - 3.595\times10^{-9}T^3$ (kJ/kmol.K)

$\overline{c}_{P,O_2}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คำนวณได้จาก

$25.48 + 1.520\times10^{-2}T - 0.7155\times10^{-5}T^2 + 1.312\times10^{-9}T^3$ (kJ/kmol.K)

$\overline{c}_{P,N_2}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ คำนวณได้จาก

$28.90 + 0.1571\times10^{-2}T + 0.8081\times10^{-5}T^2 - 2.873\times10^{-9}T^3$ (kJ/kmol.K)

$T_{flue,stack}$ คือ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง (K)

3) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์

ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์ ($\dot{Q}_{flue,recup}$) เป็นความร้อนที่ออกไปกับไอเสีย เนื่องจากความร้อนส่วนนี้ยังมีค่าสูงอยู่ความร้อนส่วนนี้จึงนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนรีคูเพอเรเตอร์ ค่า $\dot{Q}_{flue,recup}$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{flue,recup} = \frac{\dot{m}_{CO_2,flue,recup}}{M_{CO_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup}} \overline{c}_{P,CO_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{H_2O,flue,recup}}{M_{H_2O}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup}} \overline{c}_{P,H_2O}\,dT\right)$$
$$+ \frac{\dot{m}_{O_2,flue,recup}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,flue,recup}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right) \quad (3.25)$$

เมื่อ $T_{flue,recup}$ คือ อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์ (K)

4) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล

ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล($\dot{Q}_{scale,sen}$) เป็นพลังงานความร้อนที่สเกลสามารถเก็บกักได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในลักษณะเดียวกันกับเหล็ก $\dot{Q}_{scale,sen}$ โดย สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{scale,sen} = \dot{m}_{billet}\left(\frac{\%scale}{100}\right)C_{scale}(T_{scale,out} - T_{scale,in}) \quad (3.26)$$

เมื่อ C_{scale} คือ ค่าความจุความร้อนของสเกล มีค่าเท่ากับ 0.9 (kJ/kg.K)

$T_{scale,out}$ คือ อุณหภูมิของสเกลที่ออกจากเตาเผา (K)

$T_{scale,in}$ คือ อุณหภูมิของสเกลที่เข้าเตาเผา (K)

5) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา($\dot{Q}_{wall}$) เป็นพลังงานความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนตามธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อน แล้วถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อม โดย $\dot{Q}_{wall}$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{wall} = h_m A_{wall}(T_{wall} - T_{amb}) + \varepsilon_{wall}\sigma A_{wall}(T_{wall}^4 - T_{amb}^4) \quad (3.27)$$

เมื่อ h_m คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2.K$)

A_{wall} คือ พื้นที่ผิวภายนอกของเตาเผา (m^2)

T_{wall} คือ อุณหภูมิที่ผิวเตาเผาบริเวณภายนอก (K)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรอบเตาเผา (K)

ε_{wall} คือ ค่า Emissivity ของผนังเตาเผา มีค่า 0.4

σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์มันน์ มีค่า 5.67×10^{-8} ($W/m^2.K^4$)

6) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี ($\dot{Q}_{opening}$)

ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี เป็นความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีผ่านช่องเปิดต่างๆของเตาเผา โดยความร้อนดังกล่าวขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิด เวลาในการเปิดและอุณหภูมิในเตาเผา $\dot{Q}_{opening}$ สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

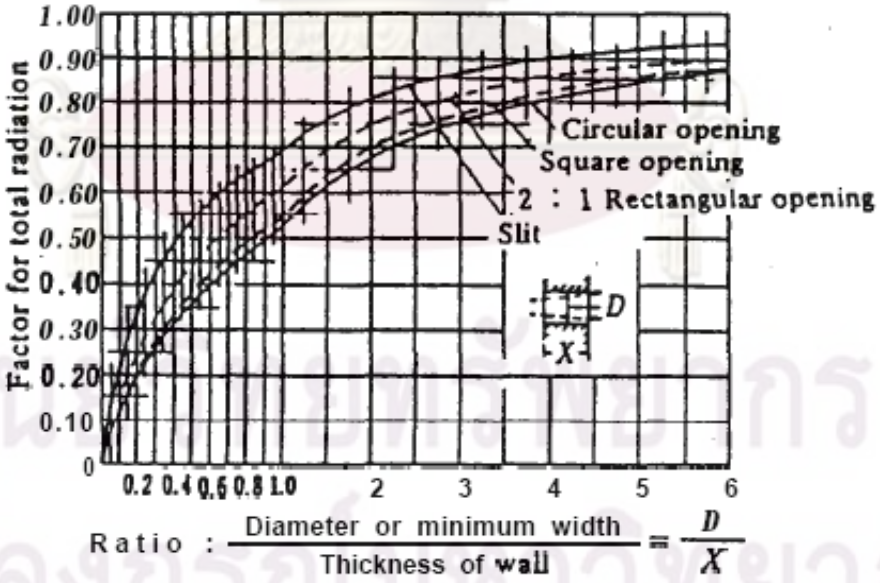
$$\dot{Q}_{opening} = C_t \varepsilon_{opening} \sigma A_{opening} (T^4_{furnace} - T^4_{amb}) \quad (3.28)$$

เมื่อ C_t คือ ตัวปรับแก้ในส่วนของเวลาในการเปิดปิดของช่องเปิด

$\varepsilon_{opening}$ คือ ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด (Factor for total radiation) หาได้จากรูปที่ 3.6

$A_{opening}$ คือ พื้นที่ของช่องเปิดทั้งหมด (m^2)

$T_{furnace}$ คือ อุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก (K)



รูปที่ 3.6 ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด [9]

7) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

ความร้อนสูญเสียอื่นๆ($\dot{Q}_{other,furnace}$) เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่ไม่สามารถหาค่าได้ เช่น ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหลังคาและพื้นเตา เป็นต้น จากหลักการอนุรักษ์พลังงานสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\dot{Q}_{other,furnace} = (\dot{Q}_{comb,regen} + \dot{Q}_{comb,burner} + \dot{Q}_{air,regen} + \dot{Q}_{preheated,air} + \dot{Q}_{scale,form}) - (\dot{Q}_{billet,sen} + \dot{Q}_{flue,stack} + \dot{Q}_{flue,recup} + \dot{Q}_{scale,sen} + \dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{opening}) \quad (3.29)$$

3.2.6 ประสิทธิภาพของเตาเผา (Furnace efficient, $\eta_{furnace}$)

ประสิทธิภาพของเตาเผาคือ อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป โดยพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ในที่นี้คือความร้อนที่เข้าสู่เหล็ก ($\dot{Q}_{billet,sen}$) เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ส่วนพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป คือ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ($\dot{Q}_{comb}$) สามารถคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผา ได้ดังนี้

$$\eta_{furnace} = \frac{\dot{Q}_{billet,sen}}{\dot{Q}_{comb,regen} + \dot{Q}_{comb,burner}} \times 100\% \quad (3.30)$$

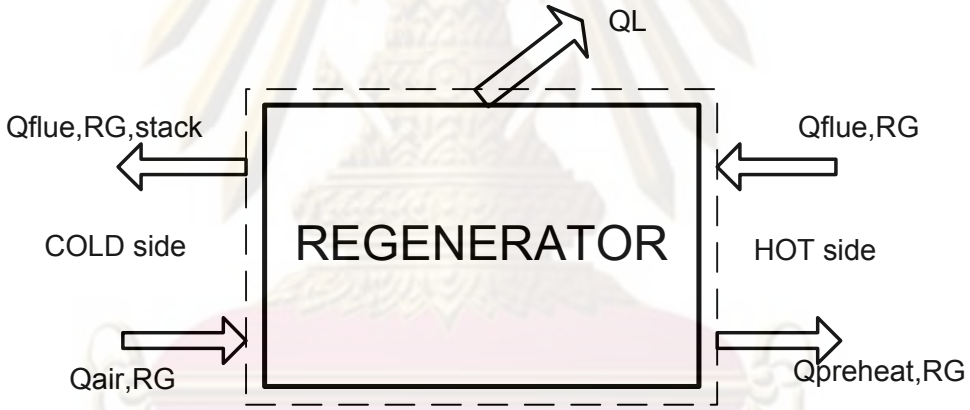
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3 **สมดุลความร้อนของ** regenerator

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม เมื่อพิจารณา regenerator เป็นปริมาตรควบคุมและระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดยอาศัยหลักการอนุรักษ์ของพลังงาน (Conservation of energy) จะสามารถคำนวณหาสมดุลความร้อนของ regenerator ดังรายละเอียด ต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ความร้อนเข้าและออกของรีเจนเนอเรเตอร์

ความร้อนเข้าสู่ regenerator	ความร้อนออกจาก regenerator
1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้า regenerator 2) ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า regenerator	1) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออก regenerator 2) ความร้อนสัมผัสของอากาศ preheat ที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟเข้าเตาเผา 3) ความร้อนสูญเสียภายใน regenerator



รูปที่ 3.7 สมดุลความร้อนของ regenerator

ความร้อนเข้าสู่ Regenerator (RG)

1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้า regenerator ($\dot{Q}_{flue,fur,RG}$)

ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้า regenerator เป็นความร้อนที่เกิดจากความร้อนสัมผัสของไอเสียภายในเตาเผา และความร้อนดังกล่าวถูกถ่ายทอดสู่ regenerator เพื่อให้ความร้อนแก่อากาศเผาไหม้ที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟเมื่อถึงเวลา switching สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{flue,fur,RG} = \frac{\dot{m}_{CO_2,flue,fur,RG}}{M_{CO_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,fur,RG}} \overline{c}_{P,CO_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{H_2O,flue,fur,RG}}{M_{H_2O}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,fur,RG}} \overline{c}_{P,H_2O}\,dT\right)$$
$$+ \frac{\dot{m}_{O_2,flue,fur,RG}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,fur,RG}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,flue,fur,RG}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,fur,RG}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right) \quad (3.31)$$

$T_{flue,fur,RG}$คือ อุณหภูมิของไอเสียเข้าที่ออกจากเตาเข้า regenerator (K)

2) ความร้อนสัมผัสของอากาศเข้า regenerator ($\dot{Q}_{air,RG}$)

ความร้อนสัมผัสของอากาศเข้า regenerator เป็นความร้อนสัมผัสที่ได้จากอากาศภายนอกที่ถูก combustion air blower ดูดเข้ามาเพื่อใช้ในการเผาไหม้ที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ มีค่าเท่ากับ ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

$$\dot{Q}_{air,RG} = \dot{Q}_{air,regen} \quad (3.32)$$

ความร้อนออกจาก Regenerator

1) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจาก regenerator ($\dot{Q}_{flue,RG,stack}$)

ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจาก regenerator เป็นความร้อนที่เหลือทิ้งจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง อากาศเย็นขาเข้าที่ต้องการ preheat และไอเสียที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาที่ regenerator ความร้อนดังกล่าวจะถูกระบายด้วยพัดลมออกไปยังปล่องไฟสู่บรรยากาศภายนอก ในที่นี้

$$\dot{Q}_{flue,RG,stack} = \dot{Q}_{flue,stack} \quad (3.33)$$

2) ความร้อนสัมผัสของอากาศ preheat ที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟเข้าเตาเผา ($\dot{Q}_{preheat,RG}$)

ความร้อนสัมผัสของอากาศ preheat ที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟเข้าเตาเผาเป็นพลังงานความร้อนของอากาศที่ผ่านการ preheat จาก regenerator

$$\dot{Q}_{preheat,RG} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{preheat,RG}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{preheat,RG}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right) \quad (3.34)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ $T_{preheat,RG}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการ preheat ที่ regenrator (K)

3) ความร้อนสูญเสียภายใน regenerator ($\dot{Q}_L$)

ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ในที่นี้ส่วนมากเป็นความร้อนสูญเสียผ่านผนังของ regenerator สามารถหาค่าได้จากสมดุลความร้อนภายใน regenerator ดังนี้

$$\dot{Q}_L = (\dot{Q}_{flue,RG} + \dot{Q}_{air,RG}) - (\dot{Q}_{preheat,RG} + \dot{Q}_{flue,RG,stack}) \quad (3.35)$$

3.2.4 **ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ** (temperature efficiency, η_{ta}) (Hasegawa et al, 1997)
คือ ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพทางความร้อนของ regenerator ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศเผาไหม้กับไอเสีย

$$\eta_{ta} = \frac{T_{preheat,RG} - T_{air,RG}}{T_{flue,RG,stack} - T_{air,RG}} \quad (3.36)$$

3.2.5 **อัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่** (heat recovery rate), (Hasegawa et al, 1997)
คือ ค่าที่ความสามารถของรีเจนเนอเรเตอร์ในการนำความร้อนที่สูญเสียออกจากเตาเผามา preheat อากาศเผาไหม้ที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เพื่อใช้ในการเผาไหม้ต่อไป

$$\eta_{recovery} = \frac{\dot{Q}_{preheat,RG} - \dot{Q}_{air,RG}}{\dot{Q}_{flue,RG}} \quad (3.37)$$

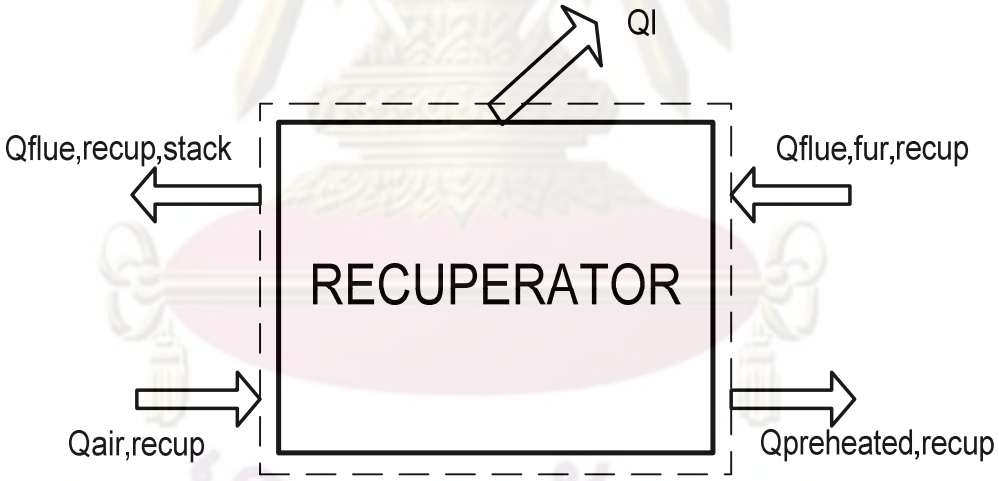
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.6 **สมดุลความร้อนของ** recuperator

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม เมื่อพิจารณา recuperator เป็นปริมาตรควบคุมและระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดยอาศัยหลักการอนุรักษ์ของพลังงาน (Conservation of energy) จะสามารถคำนวณหาสมดุลความร้อนของ recuperator ดังรายละเอียด ต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 ความร้อนเข้าและออกของ recuperator

ความร้อนเข้าสู่ recuperator	ความร้อนออกจาก recuperator
1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้า recuperator 2) ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า recuperator	1) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออก recuperator 2) ความร้อนสัมผัสของอากาศ preheat จาก recuperator เข้าเตาเผา 3) ความร้อนสูญเสียภายใน recuperator



รูปที่ 3.8 สมดุลความร้อนของ recuperator

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความร้อนเข้าสู่ Recuperator

1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้า recuperator ($\dot{Q}_{flue,fur,recup}$)

ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้า recuperator เป็นความร้อนที่เกิดจากความร้อนสัมผัสของไอเสียภายในเตาเผาเข้าสู่ recuperator ไอเสียในส่วนนี้มีความร้อนค่อนข้างสูงจึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{flue,fur,recup} = \frac{\dot{m}_{CO_2,flue,fur,recup}}{M_{CO_2}}\left(\int_{T_0}^{Tflue,fur,recup} \overline{c}_{P,CO_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{H_2O,flue,fur,recup}}{M_{H_2O}}\left(\int_{T_0}^{Tflue,fur,recup} \overline{c}_{P,H_2O}\,dT\right)$$

$$+ \frac{\dot{m}_{O_2,flue,fur,recup}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,fur,recup}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,flue,fur,recup}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,fur,recup}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right) \quad (3.38)$$

$T_{flue,fur,recup}$ คือ อุณหภูมิของไอเสียเข้าที่ออกจากเตาเข้า recuperator (K)

2) ความร้อนสัมผัสของอากาศเข้า recuperator ($\dot{Q}_{air,recup}$)

ความร้อนสัมผัสของอากาศเข้า recuperator เป็นความร้อนสัมผัสที่ได้จากอากาศภายนอกที่ถูก combustion air blower ดูดเข้ามาเพื่อรับความร้อนจากไอเสียภายในเตาเผาที่ recuperator

$$\dot{Q}_{air,recup} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{air,recup}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{air,recup}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right) \quad (3.39)$$

ความร้อนออกจาก Recuperator

1) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจาก recuperator ($\dot{Q}_{flue,recup,stack}$)

ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจาก recuperator ไปปล่อง เป็นความร้อนที่เหลือทิ้งจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศภายนอกเข้า recuperator และไอเสียภายในเตาเผาเข้า recuperator ความร้อนดังกล่าวจะถูกระบายด้วยพัดลมออกไปยังปล่องไฟสู่บรรยากาศภายนอก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\dot{Q}_{flue,recup,stack} = \frac{\dot{m}_{CO_2,flue,recup,stack}}{M_{CO_2}}\left(\int_{T_0}^{Tflue,recup,stack} \overline{c}_{P,CO_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{H_2O,flue,recup,stack}}{M_{H_2O}}\left(\int_{T_0}^{Tflue,recup,stack} \overline{c}_{P,H_2O}dT\right)$$
$$+ \frac{\dot{m}_{O_2,flue,recup,stack}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup,stack}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,flue,recup,stack}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup,stack}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right) \quad (3.40)$$

2) ความร้อนสัมผัสของอากาศ preheat ที่ recuperator เข้าเตาเผา ($\dot{Q}_{preheat,recup}$)

$$\dot{Q}_{preheat,recup} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{preheat,recup}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{preheat,recup}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right) \quad (3.41)$$

เมื่อ $T_{preheat,recup}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการ preheat ที่ recuperator (K)

3) ความร้อนสูญเสียภายใน recuperator ($\dot{Q}_l$)

ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เช่น ความร้อนสูญเสียผ่านผนังของ recuperator สามารถหาค่าได้จากสมดุลความร้อนภายใน recuperator ดังนี้

$$\dot{Q}_l = (\dot{Q}_{flue,fur,recup} + \dot{Q}_{air,recup}) - (\dot{Q}_{preheat,recup} + \dot{Q}_{flue,recup,stack}) \quad (3.42)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 องค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สำหรับงานวิจัยนี้คือ ก๊าซธรรมชาติ ส่วนประกอบของก๊าซธรรมชาติประกอบด้วยส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible) ส่วนใหญ่เป็นประเภท alkane มีสูตรทางเคมีคือ C_nH_{2n+2} ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง โดยส่วนมากประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นหลักซึ่งมีค่าประมาณ 70% ขึ้นไป และส่วนที่ไม่เผาไหม้ (Non-combustible หรือ Inert) ได้แก่ CO_2, N_2 โดยปริมาณก๊าซดังกล่าวจะแปรผันตามแหล่งก๊าซธรรมชาติแต่ละแห่ง ในที่นี้ได้อ้างอิงข้อมูลก๊าซธรรมชาติจากสถานีก๊าซธรรมชาติราชบุรี ดังตาราง 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบของก๊าซธรรมชาติโดยเฉลี่ย [14]

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยปริมาตร
CH_4	72.64
C_2H_6	3.54
C_3H_8	1.05
C_4H_{10}	0.45
C_5H_{12}	0.14
C_6H_{14}	0.079
CO_2	6.13
N_2	16.00

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนเชื้อเพลิงของก๊าซธรรมชาติ สำหรับการคำนวณโดยทั่วไปมักใช้ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง ซึ่งอ้างอิงค่ามาตรฐานที่ 25°C, 1 atm ซึ่ง ณ สถานะดังกล่าวไอน้ำที่อยู่ในก๊าซเสียจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ก่อให้เกิดค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอน้ำเป็นของเหลวขึ้น ในความเป็นจริงอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง (500-800°C) ทำให้ไอน้ำที่อยู่ภายในไอเสียยังคงมีสถานะเป็นก๊าซเช่นเดิม ดังนั้น ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ควรใช้ในการคำนวณควรเป็น ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ ดังตาราง 3.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ [14]

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
มวลโมเลกุล	20.74	kg/kmol
ความถ่วงจำเพาะ	0.72	-
ความร้อนสูงของเชื้อเพลิง	31.67	MJ/Nm^3
ความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	26.37	MJ/Nm^3

3.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงและอากาศ ทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ โดยวิเคราะห์จากสมการการเผาไหม้ขององค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในการเผาไหม้กับอากาศที่ใช้เผาไหม้ ภายใต้เงื่อนไขของการเผาไหม้ที่สมบูณ์

เริ่มด้วยการเผาไหม้ที่เป็นไปตามทฤษฎี ดังสมการต่อไปนี้

$$(0.7264CH_4 + 0.0354C_2H_6 + 0.0105C_3H_8 + 0.0045C_4H_{10} + 0.0014C_5H_{12} + 0.00079C_6H_{14} + 0.0613CO_2 + 0.16N_2) + a_{th}(O_2+3.76N_2)$$
$$\longrightarrow 0.858CO_2 + 0.0613CO_2 + 1.637H_2O + a_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2 \quad (3.43)$$

โดย a_{th} คือ อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อหนึ่งโมลของก๊าซธรรมชาติทางทฤษฎี และเมื่อทำการหาสมดุลของโมลออกซิเจน จะได้ค่า $a_{th} = 1.68\ kmol_{O2}/kmol_{fuel}$ โดยเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีแล้วจะมีค่า

$$AF_{stoic} = 16.96\ kg_{air}/kg_{fuel}$$

สมการ (3.38) เป็นสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงตามทฤษฎี ในทางปฏิบัติปริมาณอากาศที่ใช้จะมีปริมาณสูงกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี สมการ (3.38) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$(0.7264CH_4 + 0.0354C_2H_6 + 0.0105C_3H_8 + 0.0045C_4H_{10} + 0.0014C_5H_{12} + 0.00079C_6H_{14} + 0.0613CO_2 + 0.16N_2) + ma_{th}(O_2+3.76N_2) \longrightarrow$$
$$0.858CO_2 + 0.0613CO_2 + 1.637H_2O + (m-1)\,a_{th}O_2 + ma_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2 \quad (3.44)$$

เมื่อ m คือ อัตราส่วนของอากาศเกิน(air ratio)

จากสมการ (3.39) พบว่าปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมากับผลิตภัณฑ์ (ก๊าซไอเสีย) มีค่าเท่ากับ (m-1) $a_{th}O_2$ ในการตรวจวัดจริงสามารถวัดปริมาณออกซิเจนดังกล่าวด้วยเครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซไอเสีย (Flue gas analyzer) ในรูปของอัตราส่วนร้อยละในรูปแบบของ dry-basis หมายถึง ก๊าซไอเสียจะปราศจากไอน้ำและความชื้นปะปนภายในเครื่องมือวัดก่อนเครื่องทำการวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้สามารถแปลงเป็นอัตราส่วนอากาศ (m) ดังนี้

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{(m-1)a_{th}}{0.858 + 0.0613 + (m-1)a_{th} + 3.76ma_{th} + 0.16}$$

สามารถเขียนค่า m ในรูปของ $\%O_2$ และแทนค่า $a_{th} = 1.68$ ได้ดังสมการ

$$m = \frac{1.68 - 0.6\left(\frac{\%O_2}{100}\right)}{1.68 - 8\left(\frac{\%O_2}{100}\right)} \qquad (3.45)$$

นอกจากนี้ สามารถหาอัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ (Actual air-fuel ratio) จากความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$AF_{actual} = m \cdot AF_{stoic} \qquad (3.46)$$

โดย AF_{stoic} คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (kg_{air}/ kg_{fuel})

AF_{actual} คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางปฏิบัติ (kg_{air}/ kg_{fuel})

เมื่อทราบค่า AF_{actual} นำไปสู่การคำนวณสมดุลมวลดังหัวข้อที่ 3.2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจะถูกใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผาต่อไป งานวิจัยนี้จะกล่าวถึง เตาเผาของโรงงานตัวอย่างที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ด้วยคำว่า เตาเผา

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดการใช้พลังงานของเตาเผาตัวอย่าง ทางโรงงานได้มีการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์แก่เตาเผาเหล็กขนาด 30 ตัน/ชั่วโมง สำหรับรายละเอียดของบทนี้จะนำเสนอข้อมูลของเตาเผาเบื้องต้น ข้อมูลที่ทำการตรวจวัด รูปแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเตาเผา และอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผาที่ศึกษา

1) เตาเผาชนิดผลักดัน (pusher type) ขนาด 30 ตัน/ชั่วโมง (รูปที่ 4.2)

2) เตาเผาประกอบด้วย 3 โซน ได้แก่ preheating zone, heating zone และ soaking zone

3) เตาเผามีความกว้าง 5.5 m ความยาว 19 m และสูง 4 m

4) ส่วน heating zone ติดตั้งติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟจำนวน 3 คู่ (6 หัว) ขนาดประมาณ 2326 kW/คู่ (รูปที่ 4.3-4.5)

5) ส่วน soaking zone มีการติดตั้งหัวเผาธรรมดาจำนวน 4 หัว ขนาด 872 kW/หัว (มีรีคูเพอเรเตอร์สำหรับอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังรูปที่ 4.6)

6) วัตถุดิบ คือ เหล็กแท่งยาว (billet) ขนาด 120 mm x 120 mm ยาวประมาณ 4 m มีน้ำหนัก 444.4 กิโลกรัม/แท่ง (รูปที่ 4.13)

7) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีดเหล็ก คือ เหล็กเส้น (round bar) และเหล็กข้ออ้อย (deformed bar)

7) เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ คือ ก๊าซธรรมชาติ

8) อุณหภูมิในเตาเผามีค่าประมาณ 900 – 1200 °C โดยขึ้นอยู่กับ zone การใช้ความร้อน

9) ผนังด้านข้างของเตาเผา ประกอบด้วย พลาสติก, อิฐฉนวน (Insulating brick B-2, B-4) และ กระดานฉนวน (Insulating board)

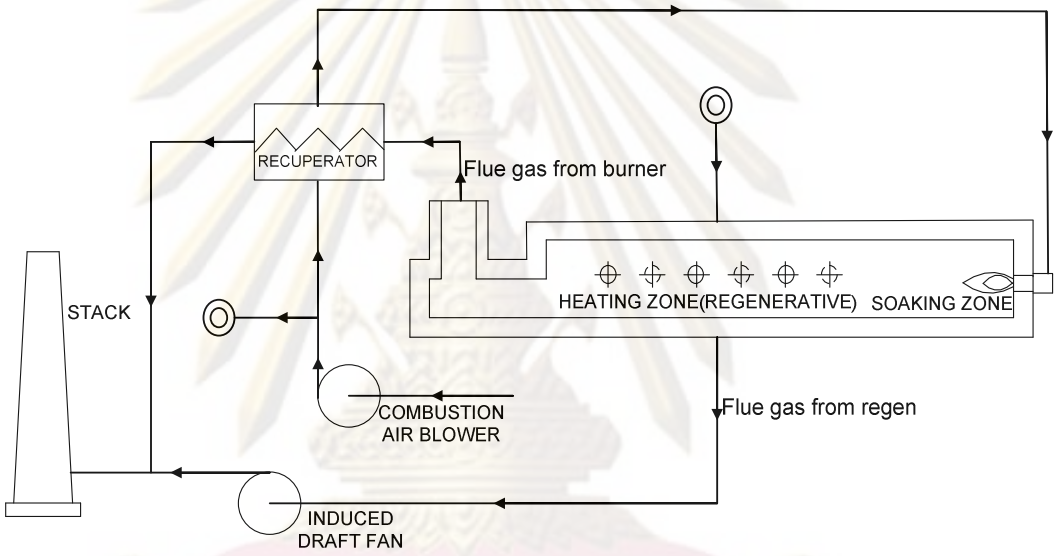
10) เตาเผามี Combustion air blower ขนาด 200 Nm^3/min โดยมีมอเตอร์ขนาด 65 kW ใช้ในการดูดอากาศเพื่อใช้สำหรับเผาไหม้ที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟและหัวเผาธรรมดา (รูปที่ 4.10)

11) เตาเผามี Induced draft fan ขนาด 300 m^3/min โดยมีมอเตอร์ขนาด 75 kW ใช้ดูดไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ในส่วนของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟออกไปทางปล่อง (รูปที่ 4.11)

12) เตาเผามี recuperator ใช้สำหรับอุ่นอากาศเผาไหม้โดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอเสียที่ออกจากเตาเผา ก่อนไหลเข้าสู่ burner เพื่อใช้ในการเผาไหม้ต่อไป

13) ไอเสียที่แลกเปลี่ยนความแล้วออกจาก recuperator จะไหลออกทางปล่องสู่บรรยากาศภายนอก

ระบบต่างๆของเตาเผาที่กล่าวมา แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังองค์ประกอบระบบต่างๆของเตา reheating furnace

4.2 ลักษณะการทำงานของเตา

สามารถแบ่งช่วงการทำงานเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1) ช่วงทำงานปกติ

วันธรรมดา (จันทร์-ศุกร์) 22.00 – 10.00 น.

วันเสาร์ – อาทิตย์ และวันหยุดนักขัตฤกษ์ เดินเตา 24 ชม.

2) ช่วงหยุดเตา วันธรรมดา 10.00 – 21.00 น. เพื่อหลบ Peak (ค่าไฟแบบ TOU)

3) ช่วงเร่งเตา วันธรรมดา 21.00 – 22.00 น. เพื่อทำอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.2 เตา reheating furnace

รูปที่ 4.3 หัวเผารีเจนเนอเรทีฟติดตั้งบริเวณด้านข้างเตา reheating furnace

รูปที่ 4.4 หัวเผารีเจนเนอเรทีฟติดตั้งกับเตาเผา

รูปที่ 4.5 หัวเผารีเจนเนอเรทีฟด้านหน้าและด้านข้าง

รูปที่ 4.6 รีคูเพอเรเตอร์

รูปที่ 4.7 ช่องเปิดด้านเหล็กเข้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.8 ช่องเปิดด้านยิงเหล็ก

รูปที่ 4.9 ช่องเปิดด้านเหล็กออก

รูปที่ 4.10 Combustion air blower

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

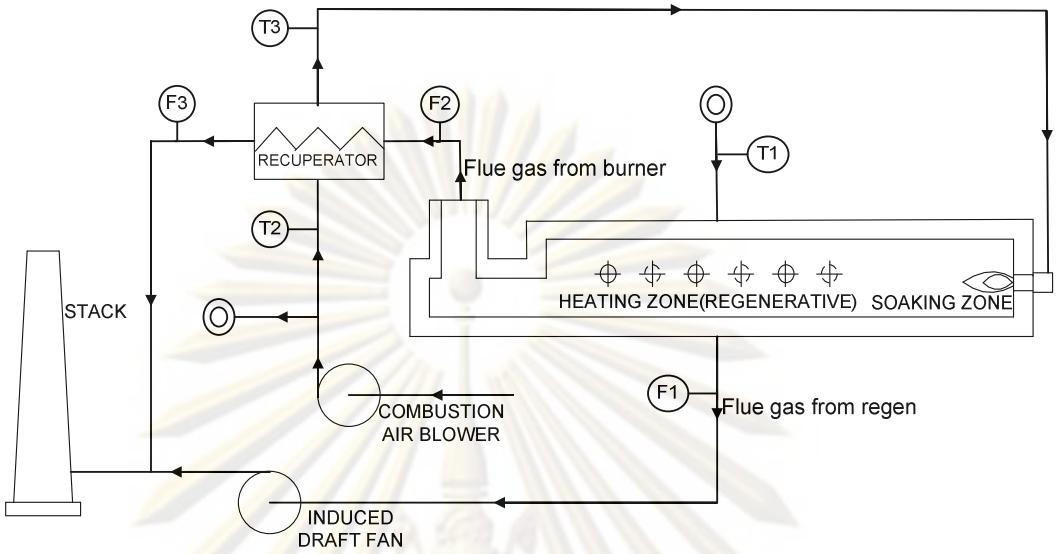
รูปที่ 4.11 Induced draft fan

รูปที่ 4.12 Dilution fan

รูปที่ 4.13 Billet ที่ได้จากการอบ(reheating)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด



รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งการตรวจวัดองค์ประกอบไอเสียและอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งการตรวจวัดองค์ประกอบไอเสียและอุณหภูมิ โดยใช้ประกอบกับรายละเอียดของข้อมูลที่ตรวจวัด ดังนี้

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดข้อมูลที่ตรวจวัด

ข้อมูลตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวแปร
1) อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงของเตาเผา	อ่านจากมาตรวัดเชื้อเพลิง โดยค่าที่อ่านอยู่ในรูปของปริมาตรต่อเวลา (รูปที่ 4.15)	$\dot{\forall}_{fuel,regen}$ $\dot{\forall}_{fuel,burner}$
2) องค์ประกอบไอเสียที่ออกจากเตาเผา	ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer) (รูปที่ 4.16 และ 4.17)	$\%O_{2,reg}$ $\%O_{2,recup}$
3) อุณหภูมิอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	อ่านจากจอแสดงผล โดยรับสัญญาณจาก thermocouple type R (รูปที่ 4.17)	$T_{air,regen}$
4) อุณหภูมิอากาศ preheat ที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	อ่านจากจอแสดงผล โดยรับสัญญาณจาก thermocouple type R (รูปที่ 4.19)	$T_{preheat,reg}$

ข้อมูลตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวแปร
5) อุณหภูมิของไอเสียจากเตาเผาเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	อ่านจากจอแสดงผล โดยการตรวจวัดอุณหภูมิไอเสียจากเตาเผาก่อนเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	$T_{flue,fur,reg}$
6) อุณหภูมิของไอเสียจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟสู่ปล่อง	ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer) ซึ่งสามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้ (รูปที่ 4.16)	$T_{flue,reg,stack}$
7) อุณหภูมิอากาศหลังจากการ preheat ที่รีคูเพอเรเตอร์	อ่านจากจอแสดงผลที่ห้องควบคุมในส่วน soaking zone (รูปที่ 4.20)	$T_{preheat,recup}$
8) อุณหภูมิของไอเสียจากเตาสู่รีคูเพอเรเตอร์	อ่านจากจอแสดงผล โดยการตรวจวัดอุณหภูมิไอเสียจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator	$T_{flue,fur,recup}$
9) อุณหภูมิของไอเสียจากรีคูเพอเรเตอร์ไปสู่ปล่อง	ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer) ซึ่งสามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้ (รูปที่ 4.17)	$T_{recup,stack}$
10) อุณหภูมิภายในเตาเผา	อ่านจากจอแสดงผลที่เตา โดยค่าที่ได้จากการตรวจวัดเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละโซน (รูปที่ 4.21 และ 4.22)	$T_{fur,heating}$ $T_{fur,soaking}$
11) อุณหภูมิของผิวเตา	ตรวจวัดเครื่องวัด Infrared Thermometer)	T_{wall}
12) อุณหภูมิอากาศภายนอก	ตรวจวัดด้วย thermocouple	T_{amb}
13) อัตราการผลิตเหล็ก	นับจำนวนแท่งของ billet ที่ออกจากเตา	$\dot{m}_{billet}$
14) ขนาดของเตาเผาและช่องเปิดต่างๆ	อ่านค่าจากแบบโครงสร้างของเตาและทำการวัดที่บริเวณเตาจริง	A_{wall} , $A_{opening}$
15) ความดันภายในเตาเผา	อ่านจากจอแสดงผลที่เตา โดยค่าที่ได้จากเป็นค่าความดันแต่ละโซน	$P_{heating}$ $P_{soaking}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

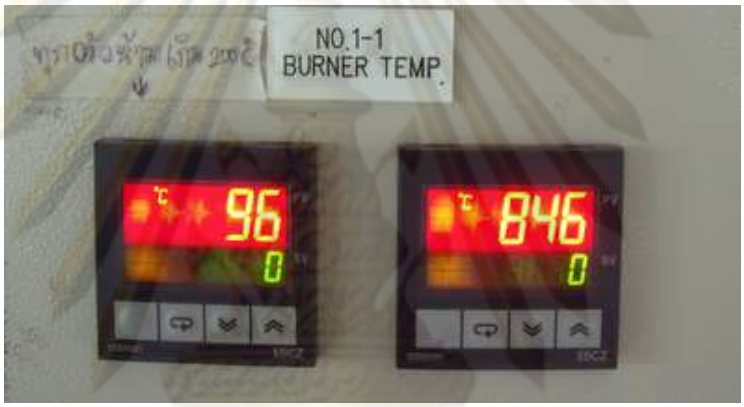
รูปที่ 4.15 มาตรวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิง

รูปที่ 4.16 การวัดไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

รูปที่ 4.17 การวัดไอเสียที่ออกจากรีคูเพอเรเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.18 จอแสดงอุณหภูมิอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ (รูปซ้าย)



รูปที่ 4.19 จอแสดงอุณหภูมิอากาศ preheat ก่อนเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ (รูปขวา)

รูปที่ 4.20 จอแสดงอุณหภูมิอากาศหลังจากการ preheat ที่รีคูเพอเรเตอร์ (จอขวาสุด)

รูปที่ 4.21 อุณหภูมิภายในเตาเผาในส่วน heating zone (จอซ้ายสุด)

รูปที่ 4.22 อุณหภูมิภายในเตาเผาในส่วน soaking zone (จอซ้ายสุด)

รูปที่ 4.23 การตรวจวัดอุณหภูมิของผิวเตา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

4.4.1 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data logger)

อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัด มีทั้งแบบ Analog และ Digital สามารถใช้ร่วมกับ sensor หลายรูปแบบ เช่นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิไอเสีย (Thermocouple) มีลักษณะสำคัญคือ มีช่องรับสัญญาณ Analog และ Digital จำนวน 8 และ 4 ช่อง ตามลำดับ สามารถอ่านค่าข้อมูลทาง PC computer โดยต่อกับโมดูล RS-232 Port หรือผ่าน Modem โดยมี software ช่วยในการอ่าน ซึ่งข้อมูลที่อ่านสามารถไปใช้กับ Program บน Window อื่น ๆ เช่น MS Excel, MS Word

รูปที่ 4.24 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

4.4.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิไอเสีย (Thermocouple)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิไอเสีย ที่ใช้คือ Thermocouple type K มีลักษณะเป็นโพรบหุ้มด้วย ceramic ยาว 1 m เส้นผ่านศูนย์กลางยาว 1.6 mm และมีช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 1,400 °C โดยมีสายส่งสัญญาณถึงอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

รูปที่ 4.25 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิไอเสีย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยรังสีอินฟราเรด (Infrared Thermometer)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยรังสีอินฟราเรด ในที่นี้ คือ Fluke 561 HVAC PRO มีลักษณะสำคัญ ได้แก่ IR Thermometer สำหรับการวัดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วและบริเวณที่เข้าถึงได้ลำบาก โดยมีขอบเขตการวัดของอุณหภูมิอยู่ที่ -40 – 550 °C มีรายละเอียดในการแสดงผลอยู่ที่ 0.1 °C

รูปที่ 4.26 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยรังสีอินฟราเรด

4.4.4 เครื่องวัดองค์ประกอบไอเสีย (Flue gas analyzer)

เครื่องวัดองค์ประกอบไอเสียที่ใช้ คือ testo 327-2 ประกอบด้วย Analysis box ใช้วิเคราะห์ปริมาณ O_2, CO จากการตรวจวัด และ Flue gas probe มีความยาวประมาณ 300 mm, เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm โดยเครื่องจะทำการวัดปริมาณ O_2, CO แสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยโมลแบบแห้ง (dry basis) ที่ความละเอียดในการแสดงผล 1 ppm ภายในมีเครื่องดูดความชื้นก่อนทำการวิเคราะห์ โดยขอบเขตของอุณหภูมิไอเสียอยู่ในช่วง -40 ถึง 600 °C ที่ความละเอียดในการแสดงผลอุณหภูมิอยู่ที่ 0.1 °C

รูปที่ 4.27 เครื่องวัดองค์ประกอบไอเสีย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

สำหรับบทนี้จะนำเสนอผลการคำนวณและการวิเคราะห์ในรูปแบบของสมดุลมวล สมดุลความร้อนของเตา Reheating furnace ที่ติดตั้งทั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์เชิงประสิทธิภาพอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ประสิทธิภาพของเตาเผา ประสิทธิผลของรีเจนเนอเรเตอร์ อัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่ของรีเจนเนอเรเตอร์ ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิของรีเจนเนอเรเตอร์ ประสิทธิผลของรีคูเปอเรเตอร์ ผลการประหยัดพลังงานของเตาเผาเมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาเดิมที่ใช้เพียงรีคูเพอเรเตอร์ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานในการอบ billet ของผู้ประกอบไทย ญี่ปุ่น และเยอรมนี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 ผลการคำนวณ

5.1.1 สมดุลมวลของเตา reheating furnace

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดสมดุลมวลของเตา reheating furnace

Input	kg/s	%	Output	kg/s	%
1) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	0.17	2.31	1) อัตราไหลของไอเสียออกจากหัวเผารีเจน-เนอเรทีฟไปสู่ปล่อง	4.01	55.74
2) อัตราไหลของอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจน-เนอเรทีฟ	3.84	53.43	2) อัตราไหลของไอเสียออกจากเตาเผาเข้าสู่รีคูเพอเรเตอร์	3.18	44.26
3) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผา	0.13	1.80			
4) อัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา	3.05	42.45			
Total mass input	7.19	100.00	Total mass output	7.19	100.00

ข้อมูลจากตารางที่ 5.1 สามารถเขียน diagram แสดงสมดุลมวลของเตา reheating furnace ดังนี้

รูปที่ 5.1 Diagram สมดุลมวลของเตา reheating furnace

ผลการคำนวณสมดุลมวลของเตาเผา จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่า มวลที่ไหลเข้าระบบ (ระบบ ในที่นี้คือ เตา reheating furnace ที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์) มีค่าเท่ากับ 7.19 kg/s หรือคิดเป็น 100% โดยแบ่งมวลที่ไหลเข้าระบบเป็น 4 ส่วน ดังนี้ อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เท่ากับ 0.17 kg/s คิดเป็น 2.31%, อัตราไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เท่ากับ 3.84 kg/s คิดเป็น 53.43%, อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผา เท่ากับ 0.13 kg/s คิดเป็น 1.8% และอัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา เท่ากับ 3.05 kg/s คิดเป็น 42.45%

สำหรับมวลที่ไหลออกจากระบบประกอบด้วย 2 ส่วนคือ อัตราไหลของไอเสียออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง (stack) เท่ากับ 4.01 kg/s หรือคิดเป็น 55.74% และอัตราไหลของไอเสียออกจากเตาเผาเข้าสู่รีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 3.18 kg/s หรือคิดเป็น 44.26%

ทั้งนี้สังเกตได้ว่า อัตราไหลของเชื้อเพลิง (ก๊าซธรรมชาติ) และอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สำหรับหัวเผารีเจนเนอเรทีฟมีค่าถึง 55.74% หรือกว่าครึ่งหนึ่งของอัตราไหลทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ เนื่องจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟมีความสามารถในการให้ความร้อน (Heat capacity) ที่สูงกว่าหัวเผาธรรมดา พลังงานความร้อนที่ได้จากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟนับเป็นพลังงานความร้อนหลักที่ใช้ในการเผาไหม้ของเตา reheating furnace ที่ศึกษานี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2 สมดุลความร้อนของเตา reheating furnace

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดความร้อนเข้าเตา reheating furnace

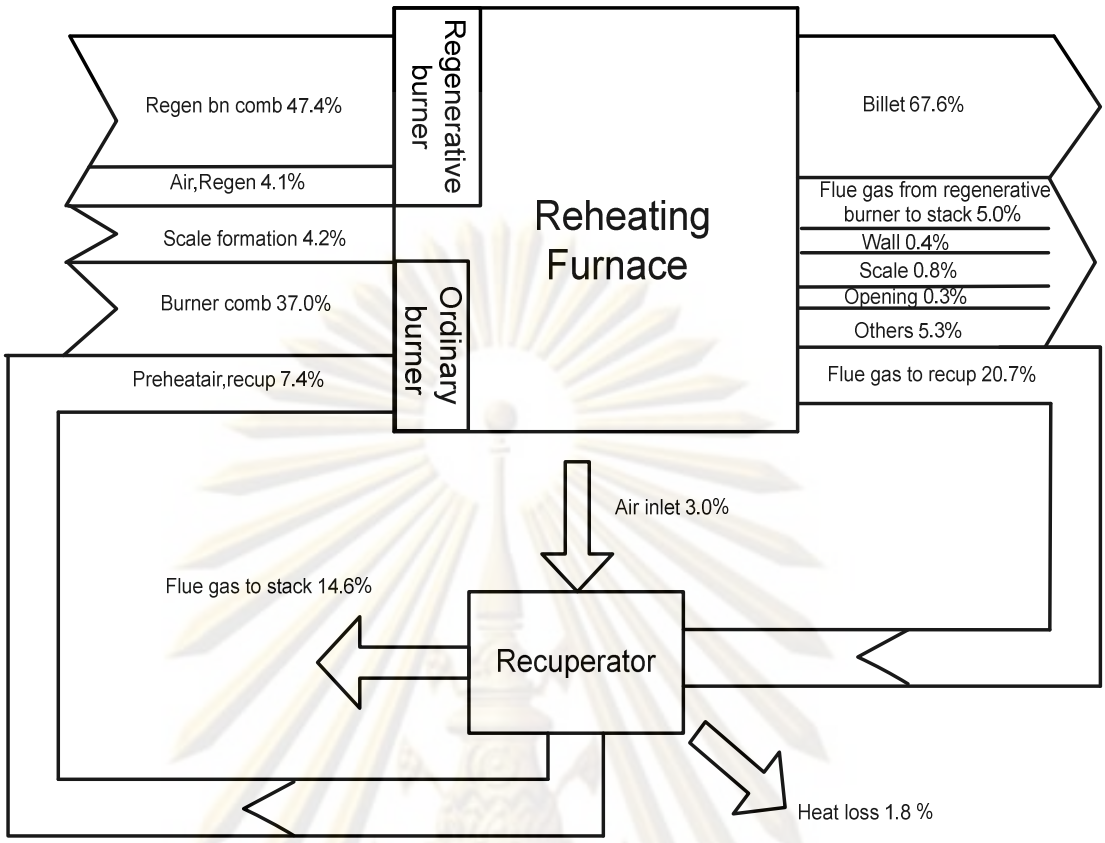
Input zone	kW	MJ/ton	%
1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	5055.0	585.0	47.4
2) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา	3948.7	457.0	37.0
3) ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์	784.9	90.8	7.4
4) ความร้อนสัมผัสของอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	439.0	50.8	4.1
5) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล	445.9	51.6	4.2
Total heat input	10673.5	1235.3	100.0

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดความร้อนออกจากเตา reheating furnace

Output zone	kW	MJ/ton	%
1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	7213.3	834.8	67.6
2) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	528.8	61.2	5.0
3) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์	2210.7	255.8	20.7
4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา	42.8	5.0	0.4
5) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	28.5	3.3	0.3
6) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล	83.2	9.6	0.8
7) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	566.3	65.5	5.3
Total heat output	10673.5	1235.3	100.0

ข้อมูลจากตารางที่ 5.2 และ 5.3 สามารถนำมาเขียน Sankey diagram เพื่อความสะดวกในการศึกษาสมดุลพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 Sankey diagram ของเตา reheating furnace

จากรูปที่ 5.2 พบว่า ความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่เตาเผา มีค่าเท่ากับ 10673.5 kW หรือคิดเป็น 100% ของความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาทั้งหมด โดยความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาประกอบด้วย 5 ส่วน คือ ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เท่ากับ 5055 kW หรือคิดเป็น 47.4% ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผาธรรมดา (ordinary burner) มีค่าเท่ากับ 3948.7 kW หรือคิดเป็น 37.0% ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 784.9 kW หรือคิดเป็น 7.4% ความร้อนสัมผัสของอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เท่ากับ 439 kW คิดเป็น 4.1% และความร้อนจากการก่อตัวของสเกล เท่ากับ 445.9 kW หรือคิดเป็น 4.2%

ส่วนความร้อนที่ออกจากเตาเผา ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่ billet มีค่าเท่ากับ 7213.3 kW หรือคิดเป็น 67.6% และความร้อนที่เตาเผาสูญเสียในรูปแบบต่างๆ สามารถแยกย่อยได้เป็น ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เท่ากับ 528.8 kW คิดเป็น 5% ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไปรีคูเพอเรเตอร์ 2210.7 kW คิดเป็น 20.7% ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา เท่ากับ 42.8 kW คิดเป็น 0.4% ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด เท่ากับ 28.5 kW คิดเป็น 0.3% ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล 83.2 kW คิด

เป็น 0.8% ความร้อนสูญเสียอื่นๆซึ่งไม่สามารถคำนวณได้ เช่น หลังคา พื้น ท่อ เป็นต้น เท่ากับ 566.3 kW คิดเป็น 5.3%

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของเตาเผามีค่าเท่ากับ 80.1% หมายความว่า พลังงานความร้อนที่ป้อนให้เตาเผา 100 ส่วน สามารถให้ความร้อนแก่ชิ้นงานถึง 80 ส่วนที่เหลือเป็นพลังงานที่สูญเสีย ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ความร้อนสูญเสียในส่วนที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ และความร้อนสูญเสียในส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากมีอุณหภูมิโดยความร้อนที่สูญเสียของไอเสียไปสู่รีคูเพอเรเตอร์เป็นความร้อนที่อยู่ในส่วนนี้

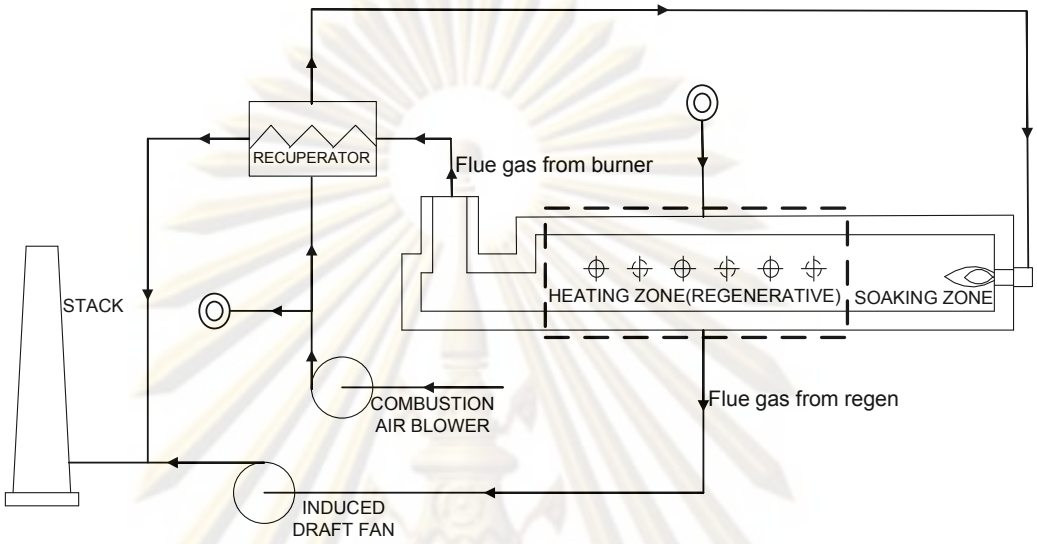
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่องนั้นมีค่าน้อยมาก ซึ่งคิดเป็น 5% ของความร้อนที่ออกจากเตาเผาทั้งหมด ในขณะที่ความร้อนสูญเสียของไอเสียที่ออกจากหัวเผาธรรมดา คิดเป็น 20.7% ของความร้อนที่ออกจากเตาเผาทั้งหมด หรือคิดเป็น 4 เท่าของความร้อนสูญเสียของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง จึงกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟมีค่าสูงกว่าหัวเผาธรรมดา

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตา Reheating furnace ที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ ทำให้เราทราบถึงภาพรวมของพลังงานเข้าและออกจากระบบ ส่วนที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นส่วนของการนำความร้อนมาใช้ใหม่โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ regenerator และ recuperator

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.3 สมดุลความร้อนของรีเจนเนอเรเตอร์

พิจารณาสมดุลความร้อนของรีเจนเนอเรเตอร์ภายในหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ในระบบการทำงานของเตาเผา แสดงดังรูปข้างล่าง

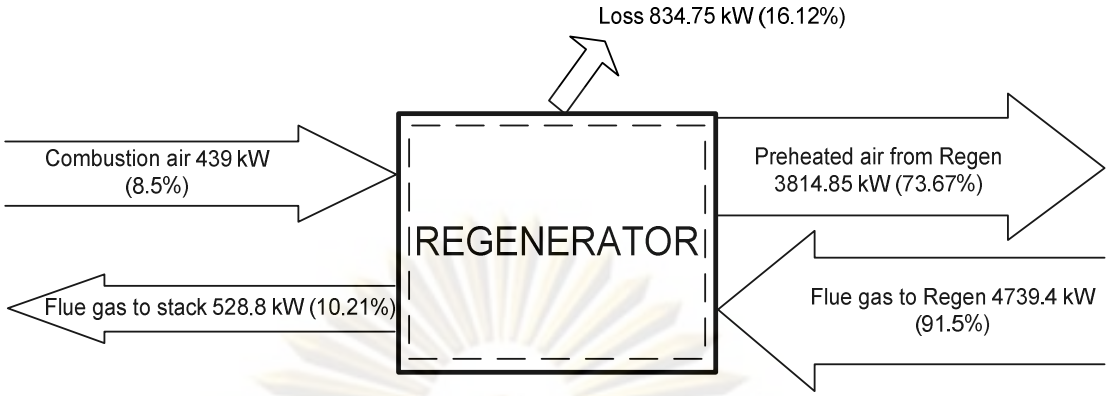


รูปที่ 5.3 บริเวณหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่ทำการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน

ตารางที่ 5.4 รายละเอียดสมดุลความร้อนของ regenerator

Input zone	kW	%	Output zone	kW	%
1) ความร้อนสัมผัสของอากาศเข้ารีเจนเนอเรเตอร์	439.00	8.5	1) ความร้อนสัมผัสของอากาศอุ่นเข้าเตาเผา	3814.85	73.67
2) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้ารีเจนเนอเรเตอร์	4739.40	91.5	2) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกสู่ปล่อง	528.80	10.21
			3) ความร้อนสูญเสียภายในรีเจนเนอเรเตอร์	834.75	16.12
Total heat input	5178.40	100.0	Total heat output	5178.40	100.0
Heat recovery rate = 71.23%					
Temperature efficiency = 91.74%					

ข้อมูลจากตาราง ที่ 5.4 สามารถนำมาเขียน diagram ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 5.4 Diagram แสดงสมดุลพลังงานของ regenerator

จากรูปที่ 5.4 พบว่า ความร้อนที่เข้ารีเจนเนอเรเตอร์ทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 5178.40 kW โดยประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ความร้อนสัมผัสของอากาศเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ คิดเป็น 8.5% และความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ คิดเป็น 91.5% ส่วนความร้อนที่ออกจากรีเจนเนอเรเตอร์ ประกอบด้วย ความร้อนสัมผัสของอากาศที่อุ่นโดยรีเจนเนอเรเตอร์เข้าเตาเผา คิดเป็น 73.67% ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกสู่ปล่อง คิดเป็น 4.95% และความร้อนสูญเสียภายในรีเจนเนอเรเตอร์ คิดเป็น 4.82%

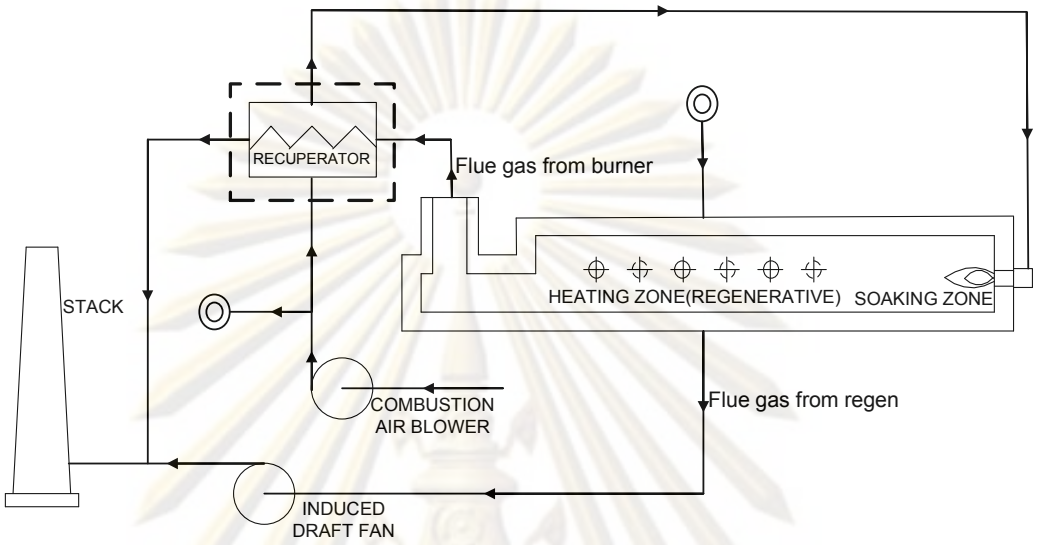
เมื่อพิจารณาความร้อนสัมผัสของอากาศที่อุ่นโดยรีเจนเนอเรเตอร์เข้าเตาเผา ซึ่งคิดเป็น 73.67% ของความร้อนที่ออกจากรีเจนเนอเรเตอร์ทั้งหมด ค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟในการอุ่นอากาศเผาไหม้โดยใช้ ceramics ball จนมีอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในเตาเผา ส่งผลให้สามารถประหยัดพลังงานในการให้ความร้อนแก่อากาศเผาไหม้ก่อนเข้าสู่กระบวนการการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังทำให้ความร้อนที่สูญเสียของไอเสียจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟออกสู่ปล่องมีค่าน้อย ซึ่งคิดเป็น 5% ของความร้อนที่ออกจากรีเจนเนอเรเตอร์ทั้งหมด เนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ปล่อยออกมามีค่าน้อย (~140 °C)

อย่างไรก็ตาม ความร้อนสูญเสียจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟยังคงมีค่าที่สูงกว่าความร้อนที่สูญเสียของไอเสียจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟออกสู่ปล่องเล็กน้อย โดยส่วนหนึ่งเกิดจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านผนังของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

จากการคำนวณอัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่ของรีเจนเนอเรเตอร์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 71.23% หมายถึง ความร้อนของไอเสียปล่อยทิ้งจากเตาเผาเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ทั้งหมด 100 ส่วน สามารถนำความร้อนมาอุ่นอากาศเผาไหม้ (นำกลับมาใช้ใหม่) ได้ถึง 71 ส่วน ส่วนที่เหลือเป็นความร้อนของไอเสียที่ปล่องทิ้งสู่บรรยากาศภายนอก

5.1.4 สมดุลความร้อนของรีคูเพอเรเตอร์

พิจารณาสมดุลความร้อนของรีคูเพอเรเตอร์ภายในระบบการทำงานของเตาเผา แสดงดังรูปข้างล่างดังนี้

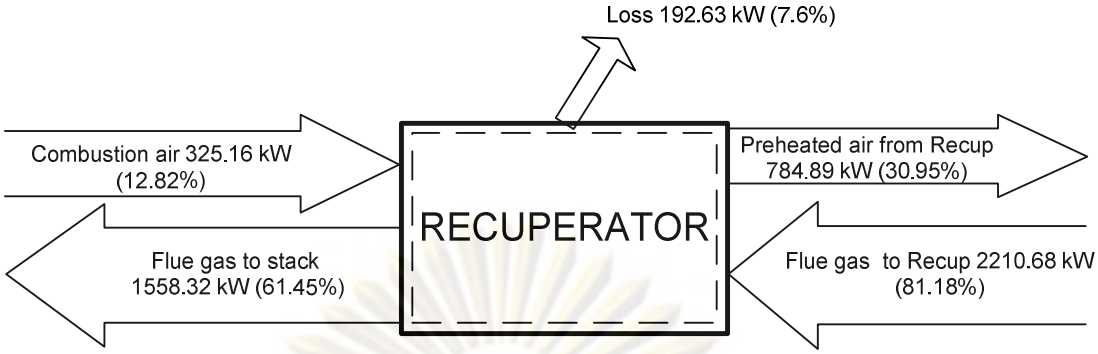


รูปที่ 5.5 รีคูเพอเรเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน

ตารางที่ 5.5 รายละเอียดสมดุลความร้อนของ recuperator

Input zone	kW	%	Output zone	kW	%
1) ความร้อนสัมผัสของอากาศภายนอกเข้ารีคูเพอเรเตอร์	325.16	12.82	1) ความร้อนสัมผัสของอากาศอุ่นที่รีคูเพอเรเตอร์เข้าเตาเผา	784.89	30.95
2) ความร้อนสัมผัสของไอเสียเข้ารีคูเพอเรเตอร์	2210.68	81.18	2) ความร้อนสัมผัสไอสียออกรีคูเพอเรเตอร์ไปสู่ปล่อง	1558.32	61.45
			3) ความร้อนสูญเสียภายในรีคูเพอเรเตอร์	192.63	7.6
Total heat input	2535.84	100.0	Total heat output	2535.84	100.0
Heat recovery rate = 20.80%					

ข้อมูลจากตาราง ที่ 5.5 สามารถนำมาเขียน diagram ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 Diagram ของ recuperator

จากรูปที่ 5.6 พบว่า ความร้อนทั้งหมดที่เข้ารีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 2535.84 kW ซึ่งประกอบด้วย ความร้อนสัมผัสของอากาศภายนอกเข้ารีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 325.16 kW คิดเป็น 12.82% ความร้อนสัมผัสของไอเสียเข้ารีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 2210.68 kW คิดเป็น 81.18% ส่วนความร้อนที่ออกจากรีคูเพอเรเตอร์ ประกอบด้วย ความร้อนสัมผัสของอากาศอุ่นที่รีคูเพอเรเตอร์เข้าเตาเผา มีค่าเท่ากับ 784.89 kW หรือคิดเป็น 30.95% โดยความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากรีคูเพอเรเตอร์ไปสู่ปล่อง มีค่า 1558.32 kW หรือคิดเป็น 61.45% และความร้อนสูญเสียจากรีคูเพอเรเตอร์มีค่า 192.63 kW หรือคิดเป็น 7.6%

อัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่ (Heat recovery rate) ของรีคูเพอเรเตอร์ มีค่าเพียง 20.80% หมายถึง ความร้อนจากไอเสียเข้าสู่ recuperator 100 ส่วน สามารถอุ่นอากาศเผาไหม้ได้เพียง 20 ส่วน ส่วนที่เหลือเป็นความร้อนของไอเสียที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศภายนอกโดยไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 การวิเคราะห์ผล

ปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิต (Specific Energy Consumption, SEC) ของเตา reheating furnace ที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ขนาด 30 ตัน/ชั่วโมง สามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิตของเตา reheating furnace เดิมที่ติดตั้งเพียงรีคูเพอเรเตอร์ ขนาด 15 ตัน/ชั่วโมง นอกจากนี้ค่าปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิตสามารถนำไปคำนวณหาผลการประหยัดพลังงาน และใช้เปรียบเทียบค่าปริมาณการใช้พลังงานของเตา reheating furnace ในระดับนานาชาติได้ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการอบร้อนบิลเล็ตของเตา reheating furnace ขนาด 30 T/hr และ 15 T/hr

Item	Unit	30 T/hr	15 T/hr
Specific Energy Consumption	MJ/ton	1042.0	1836.3
	liter/ton	26.2	46.2
	MMBTU/ton	0.99	1.74
	Nm^3/ton	28.0	49.3

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าปริมาณการใช้พลังงานของเตา reheating furnace ที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ มีค่าเท่ากับ 1042 MJ/ton เมื่อแปลงเป็นค่าการใช้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง(น้ำมันเตา) และก๊าซธรรมชาติ พบว่า ค่าปริมาณการใช้พลังงานของเตา reheating furnace ที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ มีค่าเท่ากับ 26.2 liter/ton และ 28 Nm^3/ton ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาเป็นผลการประหยัดพลังงานของเตา reheating furnace ที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ คิดเป็น 43.3% เมื่อเทียบจากค่าปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิตของเตา reheating furnace เดิมที่ใช้เพียงรีคูเพอเรเตอร์ มีค่าเท่ากับ 1836.3 MJ/ton

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการอบร้อนบิลเล็ตระหว่างผู้ประกอบการไทยและต่างประเทศ

ประเทศ	พลังงานที่ใช้เฉลี่ยในการอบบิลเล็ต (MJ/ton)
ไทย (case study)	1,042
ไทย	1,538*/ 1,630**
ญี่ปุ่น (Tokyo Steel)	1,500
เยอรมนี (hot charging)***, (BSW)	969

หมายเหตุ: * เป็นการใช้เชื้อเพลิงในการอบบิลเล็ตของโรงเหล็กที่มีเตาหลอม

** เป็นการใช้เชื้อเพลิงในการอบบิลเล็ตของโรงเหล็กที่ไม่มีเตาหลอม

*** hot charging เป็นการนำบิลเล็ตจากการหล่อซึ่งยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่เข้าในเตาอบ ดังนั้นปริมาณพลังงานที่ใช้จึงต่ำกว่าการอบบิลเล็ตจากที่อุณหภูมิห้อง

ที่มา : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย; 2547

ตารางที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการอบร้อน billet จากกรณีศึกษา (case study) เทียบกับผู้ประกอบการไทยและต่างประเทศ โดยค่าปริมาณการใช้พลังงานของเตา reheating furnace ที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย มีค่าเท่ากับ 1042 MJ/ton ซึ่งมีการใช้พลังงานที่ต่ำกว่าโรงงานเหล็กที่มีและไม่มีเตาหลอมของผู้ประกอบการไทย นอกจากนี้ยังมีการใช้พลังงานที่น้อยกว่าโรงงานเหล็ก Tokyo steel ของญี่ปุ่น ซึ่งมีการใช้พลังงานประมาณ 1500 MJ/ton แต่จะสูงกว่าโรงงานเหล็ก BSW ซึ่งใช้พลังงานอยู่ 969 MJ/ton ของเยอรมันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผู้ผลิตเหล็กของประเทศเยอรมนีใช้เหล็กแท่งที่มีอุณหภูมิสูง 345 °C (จากเครื่องหล่อ) ประมาณร้อยละ 46 ป้อนเข้าเตาเผาเพื่อลดการใช้พลังงานความร้อน (ระบบ hot charge) ซึ่งลักษณะ layout ของโรงงานเหล็กไทยจะไม่เอื้ออำนวยต่อการผลิตในลักษณะเดียวกับประเทศเยอรมนี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ดังรายละเอียดที่กล่าวมาจากบทที่ 1-5 ได้มีการอภิปรายพร้อมกับแสดงผลการวิจัยประกอบการวิเคราะห์ผล สำหรับบทนี้จะเป็นการสรุปผลโดยรวม พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะสำหรับการขยายผลการศึกษาต่อไปในอนาคต

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ โดยเตาเผามีขนาด 30 ตัน/ชั่วโมง สำหรับให้ความร้อนแก่ billet ขนาด 120 mm x 120 mm ยาว 4000 mm การวิเคราะห์เริ่มจากการศึกษาสมดุลมวล และสมดุลพลังงานทางทฤษฎี จากนั้นได้ทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากโรงงานตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์การใช้พลังงานและผลการประหยัดพลังงานของเตาเผาที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์

ผลสรุปจากการวิจัย มีดังนี้

1. ผลการประหยัดพลังงานของเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ มีค่าเท่ากับ 43.3% เมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาเดิมซึ่งติดตั้งเพียงรีคูเพอเรเตอร์
2. ปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิต (Specific Energy Consumption,SEC) ของเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ มีค่าเท่ากับ 1042 MJ/ton
3. ปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิต (Specific Energy Consumption,SEC) ของเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ เมื่อคิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง(น้ำมันเตา) และก๊าซธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 26.2 liter/ton และ 28 Nm^3/ton ตามลำดับ
4. ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ จากกรณีศึกษา มีค่าเท่ากับ 80.1%
5. อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้ที่ได้รับการอุ่นแล้วจากรีเจนเนอเรเตอร์ คือ 931.77 °C
6. พลังงานความร้อนที่สูญเสียทางไอเสียจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง คิดเป็น 5% (528.8 kW) ของพลังงานความร้อนที่ออกจากเตาเผาทั้งหมด ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเตาเผาที่ใช้หัวเผาธรรมดาร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์

7. พลังงานความร้อนที่เข้าสู่เหล็กแท่งยาว (billet) คิดเป็น 67.6% (7213.3 kW) ของพลังงานความร้อนที่ออกจากเตาเผาทั้งหมด
8. อัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่ของรีเจนเนอเรเตอร์ เท่ากับ 71.23% และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของรีเจนเนอเรเตอร์ เท่ากับ 91.74%
9. อัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่ของรีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 20.80%

6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป

1. จากการตรวจวัดข้อมูลของเตาเผา พบว่า มีข้อมูลบางส่วนที่ทำการตรวจวัดได้ยาก เช่น การตรวจวัดอุณหภูมิบริเวณหลังคาเตาเผา เนื่องจากมีความร้อนค่อนข้างสูงและมีท่อขนาดใหญ่จำนวนมาก

2. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ แบบ pusher type ซึ่งงานวิจัยในอนาคตสามารถทำการศึกษาเตาเผารูปแบบอื่น เช่น เตาเผาเหล็กชนิด walking beam เป็นต้น

3. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเตาเผาเหล็กใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติ ซึ่งงานวิจัยในอนาคตสามารถทำการศึกษากับเชื้อเพลิงชนิดอื่นได้ เช่น น้ำมันเตา เป็นต้น

4. ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่ออำนวยความสะดวกต่อการคำนวณสมดุลพลังงาน เช่น โปรแกรม Visual basics เป็นต้น

5. ควรมีการศึกษาพฤติกรรมของรีเจนเนอเรเตอร์ภายในหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ในสภาวะ transient โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานของรีเจนเนอเรเตอร์ มาประยุกต์เป็น mathematics model เพื่อทำนายพฤติกรรมของรีเจนเนอเรเตอร์ พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณประกอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] โครงการการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่างๆ (SEC), (โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก), สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

[2] Hasegawa, T., Environmentally Compatible Regenerative Combustion Heating System, Proc. 2nd International Seminar on High Temperature air Combustion, Stockholm, Sweden, January 17-18, 2000.

[3] Rafidi,N. , Blasiak ,W., Performance measurements of a ball type high-cycle regenerative burner system(HRS) at SSAB TUNNPLAT AB, Forskningsuppgift nr 51046, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2003

[4] Lindbland, B., Performance of reheating furnaces euipped with highly preheated air, Forskningsuppgift nr 51046, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2003

[5] O'Corner, S., Kondziela, J., Yoo In., Kim Byung Gi., Regenerative burners in the INI large structural mill furnace, Iron and Steel Technology, Korea, May, 2006

[6] Krishnamurthy,N., Blasiak, W., Lugnet, A., Development of High Temperature Air and Oxy-Fuel combustion technologies for minimized CO_2 and NOx emissions in Industrial Heating , The Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE)", Hua Hin, Thailand, 2004

[7] Blasiak,W., Yang, W., Rafidi, N., Physical properties of a LPG flame with high-temperature air on a regenerative burner, Combust. Flame, 136 (2004) 567–569.

[8] Wuenning J. G., Regenerative Burners for Heat Treating Furnaces, 8th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 25 - 28 March 2008, Vilamoura, Portugal, 2008

[9] National Certificate Examination for Energy Managers and Energy Auditors, Guide Book 4: Energy Performance Assessment for Equipment and Utility systems, Chapter 2: Furnaces, National Productivity Council of India, 2006.

[10] Trinks, W., Mawhinney, M. H., Shannon, R. A., Reed, R. J., Garvey, J. R., Industrial Furnaces (6th edition), John Wiley & Sons Inc., 2004.

[11] Charles E., Baukal, Jr. Industrial burner handbook, ISBN 0-8493-1386-4, CRC PRESS, 2004.

[12] Turns S. An Introduction to combustion (2nd edition), McGraw-Hill,Singapore, 2006.

[13] Zengel, Y.A. and Boles, M.A, Thermodynamics, an Engineering Approach (6th edition), McGraw-Hill,Singapore, 2007.

[14] บริษัท ปตท จำกัด (มหาชน). ข้อมูลก๊าซธรรมชาติ, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://pttinternet.pttplc.com/csc_gas/csc_ind/onlinegas/9_3.asp, 2545

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการตรวจวัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่ 1 สิงหาคม 2552

1. ข้อมูลการผลิตและสเกล

- วัตถุดิบเป็น billet ขนาด 120 x 120 mm ยาว 3.95 m น้ำหนัก 444.375 kg/แท่ง
- บันทึกปริมาณการผลิตจากจำนวน billet ที่ออกจากเตาด้วยการนับ ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ก.1 ตารางบันทึกปริมาณ billet ที่ออกจากเตาเผา

เวลา	จำนวนแท่ง	เวลา	จำนวนแท่ง
8:00	0	13:00	111
8:30	1	13:30	120
9:00	6	14:00	152
9:30	31	14:30	155
10:00	38	15:00	156
10:30	65	15:30	166
11:00	74	16:00	198
11:30	86	16:30	219
12:00	90	17:00	231
12:30	97		

- ปริมาณของสเกลได้จากข้อมูลของทางโรงงานคิดเป็นร้อยละ 3.0 ของปริมาณเหล็กที่รีดออกจากเตา ค่าดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยที่ทางโรงงานเก็บข้อมูลไว้

2. ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติ
- บันทึกอัตราการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งอ่านจากจอแสดงผลในห้องควบคุม โดยแสดงค่าที่ได้ในตารางต่อไปนี้

ตาราง ก.2 ตารางบันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

เวลา	Heating (Nm^3/hr)	Soaking (Nm^3/hr)
8:00	624	1385
8:30	718	1545
9:00	801	1756
9:30	880	1984

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา	Heating (Nm^3/hr)	Soaking (Nm^3/hr)
10:00	945	2165
10:30	1035	2409
11:00	1092	2531
11:30	1349	2758
13:00	1814	3336
13:30	2088	3627
14:00	2206	3641
14:30	2279	3864
15:00	2279	3902
15:30	2325	4165
16:00	2422	4414

3. ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

- อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมประมาณ 38.63 °C

ตาราง ก.3 ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศเข้า recuperator และ ออกจาก recuperator

อุณหภูมิ		
เวลา	**อากาศออกจาก** Comb air blower(°C)	**อากาศออกจาก** recuperator (°C)
9:00	50.1	245.4
10:00	51.2	235.2
11:00	50.7	239.4
14:00	51.2	227.3
15:00	53.4	231.5
16:00	53.1	223.2
17:00	53.5	232.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

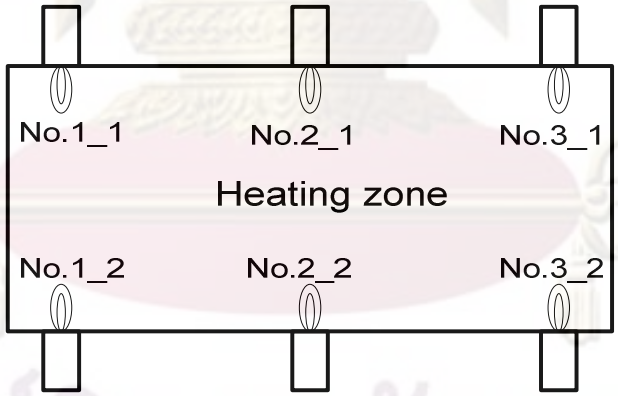
ตาราง ก.4 ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศเข้า regenerative burner

	1_1		2_1		3_1		1_2		2_2		3_2	
	Tin	Tout	Tin	Tout	Tin	Tout	Tin	Tout	Tin	Tout	Tin	Tout
เวลา	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
8:00	75.0	614.0	75.0	638.0	70.0	669.0	78.0	619.0	61.0	625.0	93.0	702.0
8:30	76.0	607.0	71.0	610.0	70.0	664.0	69.0	584.0	65.0	615.0	79.0	653.0
9:00	70.0	614.0	70.0	630.0	68.0	678.0	68.0	609.0	64.0	634.0	79.0	697.0
9:30	82.0	674.0	71.0	690.0	74.0	733.0	74.0	720.0	67.0	711.0	89.0	796.0
10:00	80.0	648.0	70.0	675.0	74.0	714.0	73.0	669.0	66.0	691.0	87.0	780.0
10:30	77.0	641.0	73.0	663.0	75.0	730.0	72.0	644.0	74.0	699.0	79.0	732.0
11:00	104.0	628.0	62.0	599.0	112.0	761.0	63.0	541.0	101.0	643.0	84.0	736.0
11:30	105.0	841.0	90.0	822.0	108.0	932.0	86.0	800.0	106.0	863.0	107.0	887.0
12:30	112.0	844.0	97.0	850.0	108.0	932.0	94.0	814.0	100.0	867.0	112.0	890.0
13:00	92.0	680.0	95.0	700.0	95.0	767.0	92.0	665.0	88.0	710.0	106.0	737.0
13:30	90.0	804.0	138.0	844.0	91.0	923.0	115.0	800.0	102.0	866.0	122.0	865.0
14:00	114.0	829.0	103.0	861.0	101.0	902.0	108.0	861.0	86.0	855.0	131.0	883.0
14:30	94.0	710.0	99.0	734.0	93.0	785.0	95.0	705.0	86.0	736.0	108.0	752.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา	1_1		2_1		3_1		1_2		2_2		3_2	
	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)
15:00	94.0	659.0	99.0	681.0	93.0	729.0	93.0	655.0	87.0	685.0	107.0	703.0
15:30	155.0	751.0	94.0	732.0	144.0	842.0	91.0	708.0	137.0	786.0	104.0	820.0
16:00	87.0	728.0	148.0	743.0	84.0	144.0	163.0	760.0	86.0	791.0	141.0	865.0
16:30	115.0	830.0	102.0	863.0	103.0	905.0	106.0	867.0	92.0	860.0	134.0	883.0
17:00	104.0	708.0	109.0	740.0	93.0	759.0	105.0	705.0	96.0	746.0	128.0	728.0

- Tin คือ อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้า regenerator
- Tout คือ อุณหภูมิของอากาศออกจาก regenerator



รูปที่ ก.1 ตำแหน่งหัวเผารีเจนเนอเรเทีฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ข้อมูลอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

- บันทึกอุณหภูมิภายในเตาเผา โดยอ่านจากจอแสดงผลที่เตา แสดงค่าที่ได้ในตารางถัดไป

ตาราง ก.5 ตารางบันทึกอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ heating zone และ soaking zone

เวลา	Heating Zone (°C)	Soaking Zone (°C)
8:00	945.6	1147.3
8:30	951.9	1150.0
9:00	984.8	1169.0
9:30	972.4	1169.4
10:00	972.8	1188.0
10:30	902.6	1110.4
11:00	917.9	1102.7
11:30	982.3	1181.1
12:00	980.5	1183.7
12:30	820.4	1009.3
13:00	843.1	993.6
13:30	975.7	1101.8
14:00	966.9	1100.4
14:30	878.1	1050.3
15:00	891.6	1090.3
15:30	946.8	1159.3
16:00	948.1	1174.3
16:30	946.7	1178.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.6 ตารางบันทึกความดันภายในเตาเผา

เวลา	ความดัน (Pa)	เวลา	ความดัน (Pa)
8:00	16.3	13:00	16.6
8:30	16.5	13:30	16.9
9:00	16.5	14:00	16.6
9:30	16.4	14:30	16.0
10:00	16.3	15:00	15.9
10:30	16.9	15:30	16.5
11:00	16.6	16:00	17.4
11:30	18.3	16:30	17.3

5. ข้อมูลไอเสีย

- ตรวจวัดองค์ประกอบของไอเสีย โดยใช้ Flue gas analyzer บริเวณก่อนเข้า recuperator แสดงค่าที่ได้ดังตารางถัดไป
- ค่า CO_2 และ EFFG ได้จากการคำนวณของเครื่องมือตรวจวัด

ตาราง ก.7 ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	O_2(%)	CO_2(%)	CO(ppm)	EFFG(%)
8:30	10.8	5.78	21	53.5
9:00	9.0	6.79	16	57.7
9:30	6.3	8.34	2	62.7
10:00	6.3	8.32	6	61.0
10:30	6.0	8.10	2	62.6
11:00	6.1	8.34	3	62.4
13:30	7.8	7.46	2	585.0
14:00	8.8	6.86	6	56.6
14:30	6.8	8.07	0	63.4
15:30	11.2	5.53	3	56.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา	O_2(%)	CO_2(%)	CO(ppm)	EFFG(%)
16:00	6.3	8.37	1	63.5
16:30	7.5	7.65	4	60.9
17:00	5.4	8.85	5	63.6

- บันทึกอุณหภูมิและความดันไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator โดยใช้ Flue gas analyzer แสดงค่าที่ได้ในตารางถัดไป

ตาราง ก.8 ตารางบันทึกอุณหภูมิและความดันของไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	อุณหภูมิ (ºC)	Pressure(mbar)
8:30	565.5	-0.18
9:00	571.0	-0.19
9:30	576.5	-0.19
10:00	609.9	-0.09
10:30	570.0	-0.14
11:00	573.0	-0.11
13:30	606.3	-0.12
14:00	599.6	-0.08
14:30	554.9	-0.03
15:30	503.2	0.05
16:00	563	0.04
16:30	578.3	0.03
17:00	592.6	0.01

- ตรวจวัดองค์ประกอบของไอเสีย โดยใช้ Flue gas analyzer หลังออกจาก recuperator แสดงค่าที่ได้ดังตารางถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.9 ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	O_2(%)	CO_2(%)	CO(ppm)	EFFG(%)
8:30	11.8	5.52	2	61.6
9:00	9.6	6.48	3	66.1
9:30	5.1	9.01	2	73.7
10:00	6.5	8.51	2	70.4
10:30	6.9	7.23	3	70.1
11:00	6.3	8.32	3	71.1
13:30	12.6	4.77	4	57.7
14:00	7.0	7.89	0	74.9
14:30	8.9	5.73	5	70.2
15:30	7.2	7.82	1	75.1
16:00	7.4	7.70	0	73.5
16:30	6.5	8.20	3	73.5
17:00	6.8	8.07	2	71.0

- ค่า CO_2 และ EFFG ได้จากการคำนวณของเครื่องมือตรวจวัด
- บันทึกอุณหภูมิและความดันไอเสียที่ออกจาก recuperator โดยใช้ Flue gas analyzer แสดงค่าที่ได้ในตารางถัดไป

ตาราง ก.10 ตารางบันทึกอุณหภูมิและความดันของไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	อุณหภูมิ (◦C)	Pressure(mbar)
8:30	428.3	-0.23
9:00	416.6	0.42
9:30	376.5	-0.22
10:00	381.4	-0.42

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	Pressure(mbar)
10:30	421.2	-0.24
11:00	426.5	-2.4
13:30	423.4	-0.1
14:00	434.9	-0.31
14:30	435.0	-0.5
15:30	322.1	-0.09
16:00	349.6	-0.08
16:30	366.6	-0.11
17:00	409.6	-0.14

- ตรวจวัดองค์ประกอบของไอเสีย โดยใช้ Flue gas analyzer หลังออกจาก regenerative burner แสดงค่าที่ได้ดังตารางถัดไป

ตาราง ก.11 ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียออกจาก regenerative burner

เวลา	O_2(%)	CO_2(%)	CO(ppm)	EFFG (%)
9:00	8.9	5.7	1	86.8
9:30	8.1	11.9	0	87.2
10:00	6.5	8.2	0	84.6
10:30	7.7	7.5	0	85.6
11:00	9.4	0.9	0	74.4
11:30	9.1	1.1	4	84.2
13:30	7.2	7.0	0	82.3
14:00	11.7	5.2	0	80.2
14:30	9.4	5.8	0	81.5
15:00	7.6	7.6	1	82.4
15:30	8.1	6.3	0	83.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา	O_2(%)	CO_2(%)	CO(ppm)	EFFG(%)
16:00	8.9	6.8	0	82.3
16:30	9.1	6.7	0	81.6
17:00	8.4	7.2	2	81.7

- ค่า CO_2 และ EFFG ได้จากการคำนวณของเครื่องมือตรวจวัด
- บันทึกอุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก regenerative burner โดยใช้ Flue gas analyzer แสดงค่าที่ได้ในตารางถัดไป

ตาราง ก.12 ตารางบันทึกอุณหภูมิของไอเสียออกจาก regenerative burner

เวลา	อุณหภูมิ(°C)	เวลา	อุณหภูมิ(°C)
9:00	115.2	14:00	165.5
9:30	109.8	14:30	102.2
10:00	113.8	15:00	186.8
10:30	114.9	15:30	169.5
11:00	74.2	16:00	190.9
11:30	136	16:30	200.9
12:00	180.3	17:00	205.6

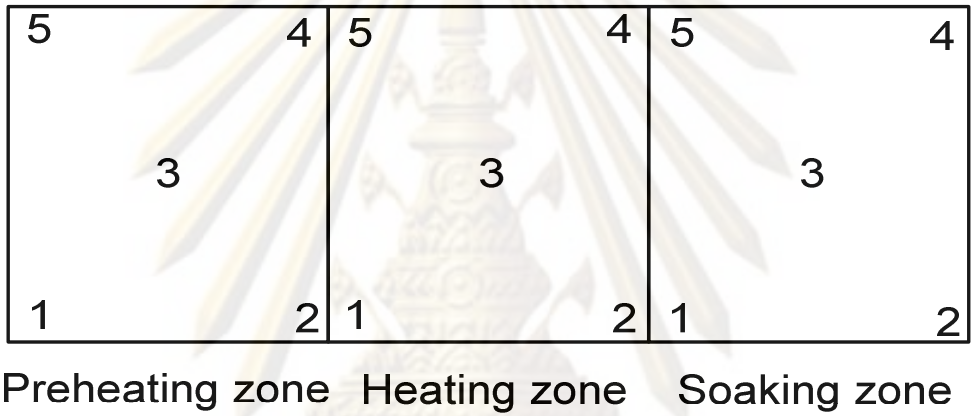
6. ข้อมูลขนาดช่องเปิดต่าง ๆ

- ขนาดของช่องเปิดด้านยิงเหล็ก จากการวัดบริเวณเตาเผา ขนาด 30 x 50 cm
- ขนาดของช่องเปิดด้านเหล็กออก จากการวัดบริเวณเตาเผา ขนาด 30 x 50 cm
- ขนาดของช่องเปิดด้าน billet เข้า จากการวัดบริเวณเตาเผา ขนาด 25 x 550 cm

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. **ข้อมูลอุณหภูมิผิวเตา**

- ตรวจวัดอุณหภูมิผิวเตา จากการใช้ Infrared thermometer วัดที่ตำแหน่งต่างๆรอบเตา ได้แก่ ผนังเตาด้านบน ผนังเตาด้านหน้า ผนังเตาด้านหลัง ผนังเตาด้านซ้าย และผนังเตาด้านขวา โดยทำการวัดแต่ละโซน โซนละ 5 ค่าดังรูปที่ ก.2 ค่าที่ตรวจวัดแสดงดังตารางถัดไป

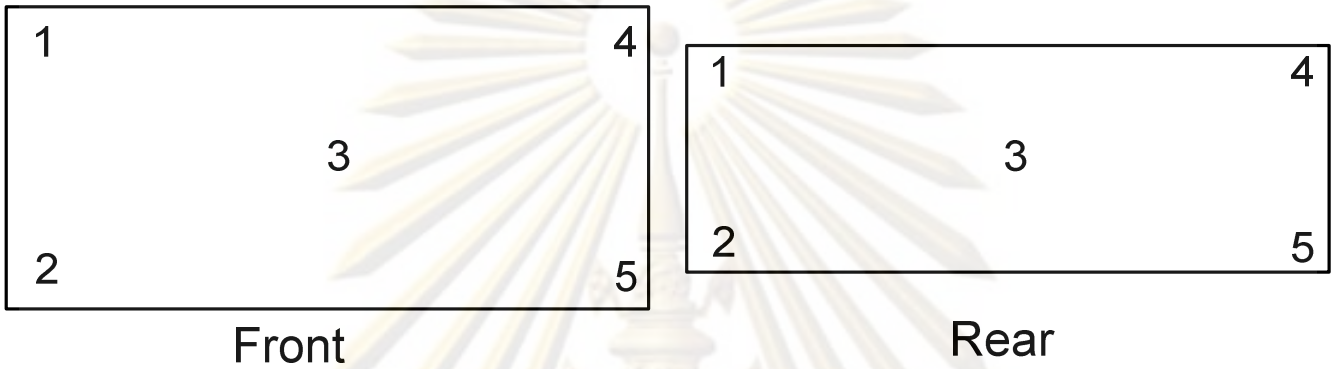


รูปที่ ก.2 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านบน

ตาราง ก.13 ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านบน

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านบน (˚C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17:00	70.7	69.9	69.5	70.6	95.8	92.9	103.3	101.6	95.6	82.4	139.9	122.6	110.1	105.0	95.0
18:00	56.4	44.1	41.5	57.4	43.2	88.9	60.9	96.3	79.5	91.5	116.6	100.6	71.7	100.4	71.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.3 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านด้านหน้าและหลัง

ตาราง ก.14 ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง

เวลา	**อุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและหลัง** (˚C)									
	ด้านหน้า					**ด้านหลัง**				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17:00	96.5	90.3	167.8	148.5	83.7	72.7	128.3	89.3	96.9	162.4
18:00	92.2	96.7	107.4	91.3	98.5	107.2	96.7	104.9	96.6	115.7

หมายเหตุ: ผนังเตาด้านหน้า คือ ผนังด้าน billet ออก (ด้านที่ติดตั้งหัวเผา)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

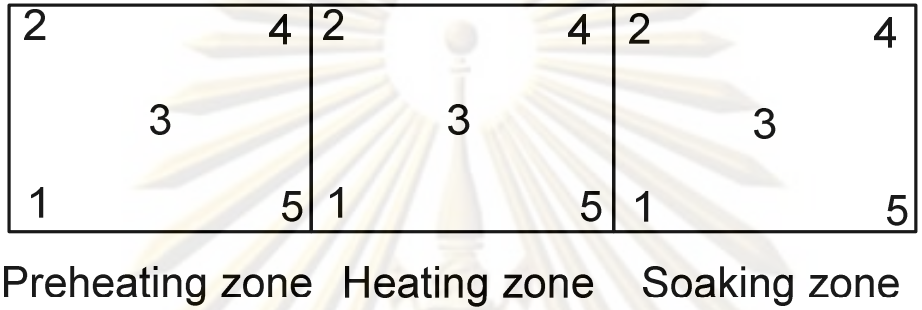
รูปที่ ก.4 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านขวา

ตาราง ก.15 ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาข้างขวา (°C)														
	Soaking Zone					Heating Zone					Preheating Zone				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17:00	90.2	63.0	108.1	77.0	62.9	82.0	80.1	111.5	85.7	67.0	62.1	55.1	51.7	53.5	45.9
18:00	108.9	71.4	99.6	54.1	41.9	98.5	93.5	118.7	96.8	131.7	111.6	95.6	115.9	95.4	92.5

หมายเหตุ: ผนังเตาด้านขวาและซ้าย สังเกตจากผนังเตาด้านหน้าเป็นหลัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.5 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านซ้าย

ตาราง ก.16 ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาข้างขวา (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
17:00	86.0	97.4	86.6	70.1	77.0	115.1	121.3	100.4	148.2	127.9	121.5	116.7	129.1	94.5	135.5
18:00	96.7	100.5	91.3	72.1	83.6	127.1	131.4	100.1	152.3	129.9	132.6	119.5	131.4	93.8	141.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่ 2 **สิงหาคม** 2552

1. **ข้อมูลการผลิตและสเกล**

- วัตถุดิบเป็น billet ขนาด 120 x 120 mm ยาว 3.95 m น้ำหนัก 444.375 kg/แท่ง
- บันทึกปริมาณการผลิตจากจำนวน billet ที่ออกจากเตาด้วยการนับ ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ก.17 ตารางบันทึกปริมาณ billetที่ออกจากเตาเผา

เวลา	จำนวนแท่งที่ออกจากเตา	เวลา	จำนวนแท่งที่ออกจากเตา
8:00	0	13:00	148
8:30	0	13:30	149
9:00	6	14:00	152
9:30	31	14:30	155
10:00	38	15:00	156
10:30	66	15:30	166
11:00	75	16:00	198
11:30	86	16:30	219
12:00	104	17:00	232
12:30	134		

- ปริมาณของสเกลได้จากข้อมูลของทางโรงงานคิดเป็นร้อยละ 3.0 ของปริมาณเหล็กที่รีดออกจากเตา ค่าดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยที่ทางโรงงานเก็บข้อมูลไว้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. **อุณหภูมิ** billet

ตาราง ก.18 ตารางบันทึกอุณหภูมิของ billet

เวลา	อุณหภูมิ(°C)	เวลา	อุณหภูมิ(°C)
9:30	1128	14:30	1116
10:00	1175	15:00	1129
10:30	1160	15:30	1119
11:00	1137	16:00	1127
11:30	1129	16:30	1129
12:00	1130	17:00	1090
12:30	1132	17:30	1111
13:00	1155	18:00	1124
13:30	1149	18:30	1130
14:00	1107	19:00	1120

3. **ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง**

- เชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติ
- บันทึกอัตราการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งอ่านจากจอแสดงผลในห้องควบคุม โดยแสดงค่าที่ได้ในตารางต่อไปนี้

ตาราง ก.19 ตารางบันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

เวลา	Heating(Nm^3/hr)	Soaking(Nm^3/hr)
8:00	4296	6319
8:15	4334	6453
8:30	4384	6569
8:45	4430	6697
9:00	4498	6855
9:15	4540	6982

เวลา	Heating(Nm^3/hr)	Soaking(Nm^3/hr)
9:30	4572	7094
9:45	4609	7241
10:00	4638	7354
10:15	4638	7413
10:30	4638	7490
10:45	4638	7586
11:00	4638	7625
11:15	4652	7754
11:30	4678	7789
11:45	4698	7820
13:00	4857	8230
13:15	5091	8358
13:30	5197	8451
13:45	5229	8486
14:00	5390	8606
14:15	5573	8756
14:30	5717	8869
14:45	5914	9019
15:00	6214	9187
15:15	6345	9245
15:30	6447	9396
15:45	6678	9552
16:00	6862	9678
16:15	6965	9755
16:30	7101	9835

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

- อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมประมาณ 38.63 °C

ตาราง ก.20 ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศเข้า recuperator และ ออกจาก recuperator

อุณหภูมิ		
เวลา	อากาศออกจาก Comb air blower (°C)	อากาศออกจาก recuperator(°C)
9:00	44.1	298.0
10:00	50.9	274.4
11:00	52	253.3
14:00	47.8	269.1
15:00	47.8	269.5
16:00	47.4	242.9
17:00	51.7	204.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

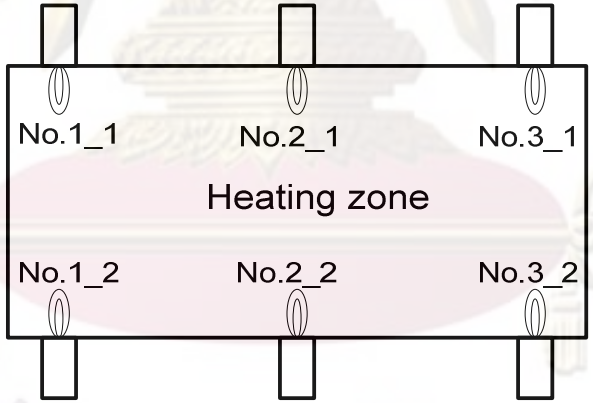
ตาราง ก.21 ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศเข้า regenerative burner

เวลา	1_1		2_1		3_1		1_2		2_2		3_2	
	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)
8:00	96.0	824.0	104	874	83	856	109	863	63	818	130	860
8:30	103.0	808.0	90	771	95	851	85	743	90	795	93	790
9:00	93.0	770.0	97	778	84	815	97	756	74	763	111	823
9:30	82.0	725.0	99	757	75	774	101	740	66	723	117	832
10:00	85.0	700.0	86	701	84	758	84	671	78	708	94	731
10:30	83.0	621.0	82	618	84	671	78	596	78	627	87	641
11:00	85.0	596.0	83	595	85	643	77	574	77	603	87	618
11:30	96.0	693.0	92	691	101	799	80	657	107	765	82	727
13:00	96.0	777.0	100	829	86	867	102	799	72	809	127	885
13:30	111.0	828.0	95	862	99	916	98	824	85	864	116	890
14:00	114	885	101	872	112	989	115	980	109	915	111	900
14:30	98	881	132	943	101	1000	112	892	107	960	114	895
15:30	103	937	145	1011	107	1046	124	955	119	1026	123	937
15:45	124	963	132	1043	112	1037	138	1000	95	1016	150	988

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา	1_1		2_1		3_1		1_2		2_2		3_2	
	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)	Tin(°C)	Tout(°C)
16:00	111	957	150	1048	106	1063	133	988	114	1049	128	971
16:15	139	927	117	964	118	1009	130	940	97	967	151	971
16:30	134	943	122	989	120	1025	127	943	123	1035	116	943

- Tin คือ อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้า regenerator
- Tout คือ อุณหภูมิของอากาศออกจาก regenerator



รูปที่ ก.6 ตำแหน่งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ข้อมูลอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

- บันทึกอุณหภูมิภายในเตาเผา โดยอ่านจากจอแสดงผลที่เตา แสดงค่าที่ได้ในตารางถัดไป

ตาราง ก.22 ตารางบันทึกอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ heating zone และ soaking zone

เวลา	Heating Zone (°C)	Soaking Zone (°C)
8:00	981.6	1064.8
8:30	1005.4	1128.9
9:00	995.0	1139.1
9:30	988.7	1176.9
10:00	997.1	1202.6
10:30	923.2	1149.4
11:00	947.2	1183.1
11:30	1014.3	1182.5
12:00	896.1	1100.0
12:30	991.8	1148.8
13:00	987.6	1179.1
13:30	1007.0	1179.9
14:00	998.3	1174.2
14:30	1002.1	1168.6
15:00	1017.5	1152.3
15:30	1054.5	1190.3
16:00	1095.8	1199.2
16:30	1050.4	1148.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.23 ตารางบันทึกความดันภายในเตาเผา

เวลา	ความดัน (Pa)	เวลา	ความดัน (Pa)
8:00	18.0	12:00	16.0
8:30	16.1	12:30	18.3
9:00	16.2	13:00	18.0
9:30	17.9	13:30	17.4
10:00	16.3	14:00	17.0
10:30	15.8	14:30	20.9
11:00	16.0	15:00	19.5
11:30	18.9		

6. ข้อมูลไอเสีย

- ตรวจวัดองค์ประกอบของไอเสีย โดยใช้ Flue gas analyzer บริเวณก่อนเข้า recuperator แสดงค่าที่ได้ดังตารางถัดไป

ตาราง ก.24 ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	O_2(%)	CO_2(%)	CO(ppm)	EFFG(%)
9:30	7.6	7.58	3	56.2
10:00	7.1	7.90	2	59.3
10:30	6.9	7.50	3	56.1
11:00	9.3	6.65	3	57.5
13:30	6.7	8.13	3	61.3
14:00	6.3	8.34	4	60.4
14:30	5.4	8.87	4	62.1
15:30	7.1	7.88	3	59.4
16:00	6.3	8.36	1	57.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา	O_2(%)	CO_2(%)	CO(ppm)	EFFG(%)
16:30	6.7	8.11	3	55.9
17:00	6.7	8.12	1	58.9

- ค่า CO_2 และ EFFG ได้จากการคำนวณของเครื่องมือตรวจวัด
- บันทึกอุณหภูมิและความดันไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator โดยใช้ Flue gas analyzer แสดงค่าที่ได้ในตารางถัดไป

ตาราง ก.25 ตารางบันทึกอุณหภูมิและความดันของไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	Pressure(mbar)
9:30	651.5	-0.07
10:00	618.3	-0.05
10:30	570.3	-0.05
11:00	569.9	-0.04
13:30	595.1	-0.01
14:00	628.1	-0.03
14:30	623.8	0.39
15:30	621.8	0.04
16:00	685.8	-0.02
16:30	699.8	0.13
17:00	643.9	0.03

- ตรวจวัดองค์ประกอบของไอเสีย โดยใช้ Flue gas analyzer หลังออกจาก recuperator แสดงค่าที่ได้ดังตารางถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.26 ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	O_2(%)	CO_2	CO(ppm)	EFFG
9:30	6.60	2.16	1	69.3
10:00	6.90	8.01	2	69
10:30	7.20	8.03	3	69
11:00	7.80	7.5	3	68.2
13:30	6.50	8.22	2	70.3
14:00	6.10	8.46	4	71.1
14:30	6.40	8.29	1	70.2
15:30	6.10	8.43	2	69
16:00	5.80	8.63	1	68.1
16:30	6.40	8.29	1	66.7
17:00	9.10	6.77	2	64.1

- ค่า CO_2 และ EFFG ได้จากการคำนวณของเครื่องมือตรวจวัด
- บันทึกอุณหภูมิและความดันไอเสียที่ออกจาก recuperator โดยใช้ Flue gas analyzer แสดงค่าที่ได้ในตารางถัดไป

ตาราง ก.27 ตารางบันทึกอุณหภูมิและความดันของไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	อุณหภูมิ (ºC)	Pressure(mbar)
9:30	439.3	-0.19
10:00	438.6	-0.19
10:30	437.1	-0.2
11:00	433.2	-0.23
13:30	427.4	-0.24

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	Pressure(mbar)
14:00	421.3	-0.18
14:30	431.7	-0.23
15:30	461.8	-0.16
16:00	486.6	-0.21
16:30	500.6	-0.21
17:00	472	-0.33

- ตรวจวัดองค์ประกอบของไอเสีย โดยใช้ Flue gas analyzer หลังออกจาก regenerative burner แสดงค่าที่ได้ดังตารางถัดไป

ตาราง ก.28 ตารางบันทึกองค์ประกอบของไอเสียออกจาก regenerative burner

เวลา	O_2(%)	CO_2(%)	CO(ppm)	EFFG(%)
9:00	8.0	7.4	0	83.1
9:30	7.9	7.4	0	83.8
10:00	4.8	9.2	0	85.1
10:30	8.6	3.5	0	86.2
11:00	9.5	2.3	0	85.2
11:30	7.3	8.4	3	81.8
13:30	7.1	8.3	4	86.1
14:00	5.9	8.6	5	82.6
14:30	6.3	8.4	5	85.1
15:00	5.6	8.8	4	81.9
15:30	6.0	8.5	3	81.4
16:00	6.9	8.0	4	84.5
16:30	6.7	8.1	4	81
17:00	9.6	8.3	1	82.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ค่า CO_2 และ EFFG ได้จากการคำนวณของเครื่องมือตรวจวัด
- บันทึกอุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก regenerative burner โดยใช้ Flue gas analyzer แสดงค่าที่ได้ในตารางถัดไป

ตาราง ก.29 ตารางบันทึกอุณหภูมิของไอเสียออกจาก regenerative burner

เวลา	อุณหภูมิ(°C)	เวลา	อุณหภูมิ(°C)
9:00	161.9	14:00	193.7
9:30	149.7	14:30	142.8
10:00	143	15:00	210.8
10:30	73.1	15:30	214.9
11:00	67.2	16:00	147.5
11:30	86.4	16:30	217.2
12:00	84.9	17:00	147.9

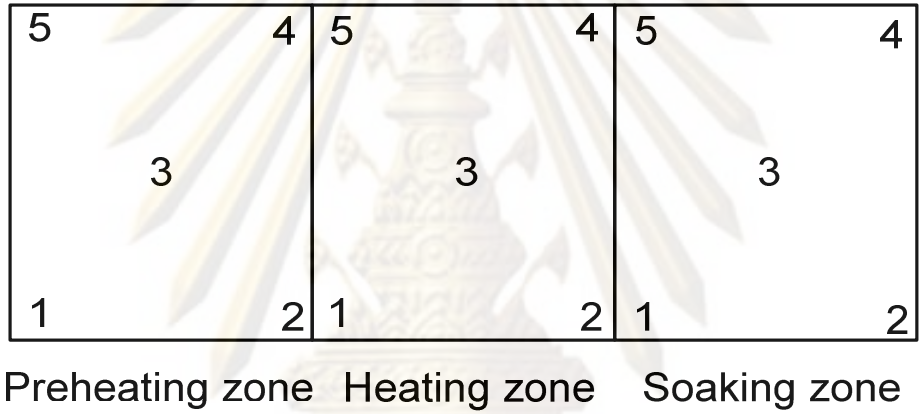
7. ข้อมูลขนาดช่องเปิดต่าง ๆ

- ขนาดของช่องเปิดด้านยิงเหล็ก จากการวัดบริเวณเตาเผา ขนาด 30 x 50 cm
- ขนาดของช่องเปิดด้านเหล็กออก จากการวัดบริเวณเตาเผา ขนาด 30 x 50 cm
- ขนาดของช่องเปิดด้าน billet เข้า จากการวัดบริเวณเตาเผา ขนาด 25 x 550 cm

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8. **ข้อมูลอุณหภูมิผิวเตา**

- ตรวจวัดอุณหภูมิผิวเตา จากการใช้ Infrared thermometer วัดที่ตำแหน่งต่างๆรอบเตา ได้แก่ ผนังเตาด้านบน ผนังเตาด้านหน้า ผนังเตาด้านหลัง ผนังเตาด้านซ้าย และผนังเตาด้านขวา โดยทำการวัดแต่ละโซน โซนละ 5 ค่า ค่าที่ตรวจวัดแสดงดังตารางถัดไป



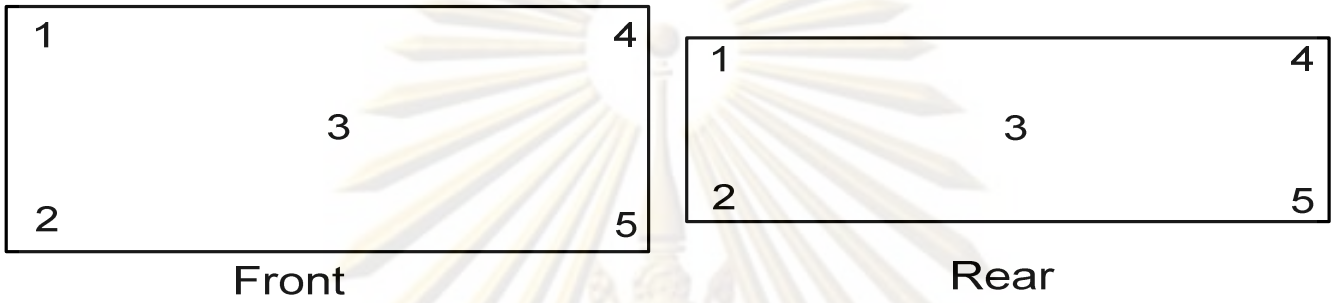
รูปที่ ก.7 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านบน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.30 ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านบน

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านบน (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
9:00	97.5	98.3	100.6	83.5	91.1	111.4	125.7	103.6	87.3	97.5	120.5	127.3	121.6	105.8	117.3
10:00	94.6	91.8	98.5	87.4	89.2	109.6	127.5	105.8	89.5	95.8	123.2	129.4	128.8	112.4	116.1
11:00	77.6	62.4	64.7	62.2	60.6	116.0	102.2	93.2	97.9	98.4	120.1	131.9	114.1	130.2	134.9
13:00	78.4	78.7	72.4	73.8	70.4	109.7	120.4	102.4	81.4	96.7	123.6	125.3	123.7	142.1	135.2
14:00	83.5	91.5	72.6	74.6	73.6	115.2	119.7	105.6	92.4	97.3	128.4	129.4	127.9	139.0	130.6
15:00	91.3	89.3	83.2	72.5	74.8	121.1	116.3	100.3	83.7	89.5	121.6	132.3	125.5	138.4	134.1
16:00	97.1	94.3	87.2	74.5	89.6	127.1	119.4	104.7	97.3	104.1	122.7	132.4	127.8	142.3	136.4
17:00	97.5	93.4	87.8	78.8	79.5	128.5	117.6	105.5	98.6	98.5	122.3	131.6	128.4	138.6	135.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

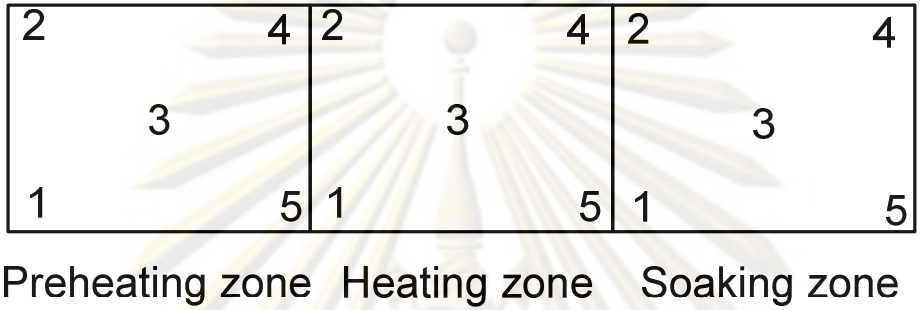


รูปที่ ก.8 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านหน้าและหลัง

ตาราง ก.31 ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและหลัง (℃)									
	ด้านหน้า					ด้านหลัง				
9:00	127.5	121.3	123.7	105.6	108.9	97.2	95.2	103.6	86.5	78.8
10:00	102.1	127.1	126.4	100.3	98.7	95.3	87.6	101.9	81.4	79.9
11:00	106.7	124.5	152.6	105.5	111.7	89.6	67.8	84.8	101.6	78.0
13:00	108.6	123.5	124.5	108.2	104.3	91.3	95.5	104.9	102.1	80.4
14:00	104.3	129.8	145.6	105.1	113.4	93.4	81.6	105.8	101.1	79.8
15:00	107.9	122.4	147.3	106.9	117.5	91.6	68.9	194.6	105.2	81.5
16:00	101.5	111.5	144.3	110.2	115.3	97.5	98.3	123.4	104.7	91.4
17:00	100.3	115.1	145.5	107.2	114.2	96.5	91.9	132.4	102.3	86.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.9 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านซ้าย

ตาราง ก.32 ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาข้างซ้าย (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
9:00	65.1	63.6	50.1	42.7	45.4	92.7	77.5	102.8	55.6	61.4	138.9	127.3	115.4	89.7	97.1
10:00	69.8	61.4	52.4	42.9	43.8	84.5	72.6	105.9	51.5	59.8	128.4	116.5	123.1	91.2	95.6
11:00	63.5	60.3	51.2	61	52.5	118.7	161.2	109.7	69.0	139.9	115.8	98.6	110.2	10.8	101.1
13:00	68.5	62.6	59.2	62.5	52.3	117.6	162.4	108.6	72.1	142.1	132.7	102.3	110.7	105.9	102.4
14:00	65.7	65.4	56.9	63.1	53.8	118.4	165.9	105.7	76.5	125.6	125.6	99.7	115.2	107.4	104.5
15:00	66.3	64.3	57.4	62.8	58.7	119.5	165.4	104.3	70.2	127.9	121.4	98.4	112.3	109.2	109.7
16:00	68.3	69.2	59.4	64.7	68.1	121.3	160.0	103.7	102.6	125.4	125.4	104.7	121.3	109.8	115.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.10 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านขวา

ตาราง ก.33 ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาข้างขวา (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
9:00	67.9	65.2	73.8	71.4	70.5	98.1	97.2	105.6	92.6	87.5	137.8	128.5	121.3	105.8	102.6
10:00	69.6	63.1	76.2	70.8	72.3	97.5	93.9	111.3	91.3	88.8	132.1	125.4	115.2	123.1	108.4
11:00	80.2	70.5	79.4	71.0	60.3	117.2	142.6	109.4	115.3	107.9	119.7	99.4	113.2	111.7	104.3
13:00	83.2	71.3	81.9	72.7	64.3	119.4	136.2	106.5	98.6	109.7	119.8	98.7	114.6	124.3	108.5
14:00	82.1	70.6	81.6	74.9	65.2	118.7	139.4	105.3	97.5	102.6	123.6	96.4	117.3	121.6	106.3
15:00	84.0	72.5	78.8	73.5	66.4	115.9	135.5	112.4	121.1	107.3	125.7	99.8	112.4	123.7	113.1
16:00	85.1	108.1	79.6	78.4	67.5	164.0	123.2	115.7	131.1	109.8	122.2	98.9	131.1	142.3	123.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.1 สรุปค่าที่ใช้ในการคำนวณสมดุลพลังงาน

ตาราง ข.1 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณ

รายละเอียด	ตัวแปร	หน่วย	ค่า
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	$V_{fuel,reg}$	m^3/s	0.192
ปริมาณออกซิเจนในไอเสียของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	$O_{2,reg}$	%	5.93
อุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการ preheat ที่ regenrator	$T_{preheat,RG}$	°C	931.77
อุณหภูมิของไอเสียเข้า regenerator	$T_{flue,fur,RG}$	°C	1003.7
อุณหภูมิของไอเสียออกจาก regenerator ไป stack	$T_{flue,reg,stack}$	°C	145.79
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหัวเผา	$V_{fuel,burner}$	m^3/s	0.15
ปริมาณออกซิเจนในไอเสียของหัวเผา	$O_{2,recup}$	%	6.2
อุณหภูมิของอากาศ preheat ที่รีคูเพอเรเตอร์เข้าเตาเผา	$T_{preheat,recup}$	°C	262.57
อุณหภูมิของไอเสียเข้ารีคูเพอเรเตอร์	$T_{flue,recup}$	°C	625.63
อัตราการผลิตของเหล็กที่ออกจากเตาเผา	m_{billet}	kg/s	8.64
ร้อยละของสเกลที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณ billet ที่ผลิต	%scale	%	1
อุณหภูมิของเหล็กที่เข้าสู่เตาเผา	$T_{billet,in}$	°C	39.08
อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา	$T_{billet,out}$	°C	1035.38
อุณหภูมิที่ผิวเตาเผาบริเวณภายนอก	T_{wall}	°C	105.1
อุณหภูมิภายในเตาเผา	$T_{furnace}$	°C	1085.23

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 การคำนวณสมดุลพลังงาน

การคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟและรีคูเพอเรเตอร์แสดงดังต่อไปนี้

1. สมดุลมวลของเตาเผา

1.1 อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ($\dot{m}_{fuel,regen}$)

- ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟเฉลี่ย 0.192 m^3/s,
- ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 0.87 kg/m^3 จะได้

$$\dot{m}_{fuel,regen} = \rho_{fuel} \dot{\forall}_{fuel,regen} = 0.192 \times 0.87 = 0.17 \text{ kg/s}$$

1.2 อัตราไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ($\dot{m}_{air,regen}$)

เริ่มคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างอากาศเกิน(m) กับเปอร์เซนต์ออกซิเจน ($\%O_2$) ดังสมการ (3.29)

$$m = \frac{1.68 - 0.6\left(\frac{\%O_2}{100}\right)}{1.68 - 8\left(\frac{\%O_2}{100}\right)}$$

- เปอร์เซนต์ออกซิเจนในก๊าซเสียที่เกิดในเตาเผาโดยเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 5.93%
- ดังนั้น จะได้ m =1.33 จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงได้

$$AF_{actual} = m \cdot AF_{stoic} \qquad \text{เมื่อ} \quad AF_{stoic} = 16.96 \ kg_{air}/kg_{fuel}$$

จะได้ค่า $AF_{actual} = 22.59$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณ $\dot{m}_{air,regen}$ ดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_{air,regen} = AF_{actual} \times \dot{m}_{fuel,regen} = 22.59 \times 0.17 = 3.84 \text{ kg/s}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผา ($\dot{m}_{fuel,burner}$)

- ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่หัวเผาเฉลี่ย 0.149 m^3/s,
- ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 0.87 kg/m^3 จากข้อมูลดังกล่าว จะได้

$$\dot{m}_{fuel,burner} = \rho_{fuel} \dot{\forall}_{fuel,burner} = 0.87 \times 0.149 = 0.13 \text{ kg/s}$$

1.4 อัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา ($\dot{m}_{preheatair,burner}$)

- เมื่อ $\%O_2 = 6.2\%$, m = 1.3875

$$\dot{m}_{preheatair,burner} = AF_{actual} \times \dot{m}_{fuel,burner} = 23.5317 \times 0.1297 = 3.05 \text{ kg/s}$$

1.5 อัตราไหลของก๊าซเสียจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ stack ($\dot{m}_{flue,stack}$)

$$\dot{m}_{flue,stack} = \dot{m}_{fuel,regen} + \dot{m}_{air,regen} = 0.17 + 3.84 = 4.01 \text{ kg/s}$$

1.6 อัตราไหลของก๊าซเสียจากเตาเผาไปสู่รีคูเพอเรเตอร์ ($\dot{m}_{flue,recup}$)

$$\dot{m}_{flue,recup} = \dot{m}_{fuel,burner} + \dot{m}_{preheatair,burner} = 0.13 + 3.05 = 3.18 \text{ kg/s}$$

2. สมดุลความร้อนของเตาเผา

2.1 ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ($\dot{Q}_{comb,regen}$)

- ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟเฉลี่ย 0.192 m^3/s
- ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำของเชื้อเพลิง เท่ากับ 26.33 MJ/Nm^3

$$\dot{Q}_{comb,regen} = \dot{\forall}_{fuel,regen} LHV = 0.1917 \times 26.33 = 5055 \text{ kW}$$

2.2 ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา ($\dot{Q}_{comb,burner}$)

- ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่หัวเผาเฉลี่ย 0.15 m^3/s,
- ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำของเชื้อเพลิง เท่ากับ 26.33 MJ/Nm^3

$$\dot{Q}_{comb,burner} = \dot{\forall}_{fuel,burner} LHV = 0.15 \times 26.33 = 3948.7 \text{ kW}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ($\dot{Q}_{air,regen}$)

- อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ($T_{air,regen}$) เฉลี่ย = 132.2 °C
- อัตราการไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เท่ากับ 3.8406 kg/s

$$\dot{Q}_{air,regen} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{air,regen}} \overline{c}_{P,O_2}\, dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{air,regen}} \overline{c}_{P,N_2}\, dT\right)$$

เริ่มจากคำนวณหา สัดส่วนโดยมวลของอากาศจากสมการการเผาไหม้

$(0.7264CH_4 + 0.0354C_2H_6 + 0.0105C_3H_8 + 0.0045C_4H_{10} + 0.0014C_5H_{12} + 0.00079C_6H_{14} + 0.0613CO_2 + 0.16N_2) + ma_{th}(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow$

$0.858CO_2 + 0.0613CO_2 + 1.637H_2O + (m-1)\, a_{th}O_2 + ma_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2$

ตาราง ข.1 สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่อยู่ในอากาศ

I	N_i ($kmol_i$)	Y_i ($kmol_i/kmol_{total}$)	M_i ($kg_i/kmol_i$)	Y_i*M_i (kg_i)	$Y_i*M_i / \sum Y_i*M_i$ (kg_i/kg_{total})
O_2	2.292	0.21	31.999	6.7225	0.2330
N_2	8.6178	0.79	28.013	22.1279	0.767
$\sum$(Air)	10.9098	1	-	28.8504	1

จาก ตาราง ข.1 เมื่อทราบสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่อยู่ในอากาศ สามารถคำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้ ดังต่อไปนี้

$\dot{m}_{O_2,air,regen} = 0.2330 \times \dot{m}_{air,regen} = 0.2330 \times 3.8406 = 0.8949$ kg/s

$\dot{m}_{N_2,air,regen} = 0.767 \times \dot{m}_{air,regen} = 0.767 \times 3.8406 = 2.9457$ kg/s

ดังนั้น ค่า $\dot{Q}_{air,regen}$ สามารถคำนวณได้ ดังนี้ โดย

$$\dot{Q}_{air,regen} = \frac{\dot{m}_{O_2,air,regen}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{air,regen}} \overline{c}_{P,O_2}\, dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air,regen}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{air,regen}} \overline{c}_{P,N_2}\, dT\right)$$

$$= \frac{0.8949}{31.999}\left(\int_{25}^{132.2} \overline{c}_{P,O_2}\, dT\right) + \frac{2.9457}{28.013}\left(\int_{25}^{132.2} \overline{c}_{P,N_2}\, dT\right)$$

$= 439.0$ kW

2.4 ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการ preheat อากาศที่รีคูเพอเรเตอร์ ($\dot{Q}_{preheat,recup}$)

- อุณหภูมิของอากาศหลังจากการอุ่นที่รีคูเพอเรเตอร์($T_{preheat,recup}$) = 262.57 °C
- อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ เท่ากับ 3.05 kg/s

$$\dot{Q}_{preheat,recup} = \frac{\dot{m}_{O_2,preheat,recup}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{preheat,recup}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,preheat,recup}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{preheat,recup}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right)$$

เริ่มจากคำนวณหา สัดส่วนโดยมวลของอากาศจากสมการการเผาไหม้

$(0.7264CH_4 + 0.0354C_2H_6 + 0.0105C_3H_8 + 0.0045C_4H_{10} + 0.0014C_5H_{12} + 0.00079C_6H_{14} + 0.0613CO_2 + 0.16N_2) + ma_{th}(O_2+3.76N_2) \longrightarrow$

$0.858CO_2 + 0.0613CO_2 + 1.637H_2O + (m-1)\,a_{th}O_2 + ma_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2$

ตาราง ข.2 สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่อยู่ในอากาศ

I	N_i ($kmol_i$)	Y_i ($kmol_i/kmol_{total}$)	M_i ($kg_i/kmol_i$)	Y_i*M_i (kg_i)	$Y_i*M_i / \sum Y_i*M_i$ (kg_i/kg_{total})
O_2	2.292	0.21	31.999	6.7225	0.2330
N_2	8.6178	0.79	28.013	22.1279	0.7670
$\sum$(Air)	10.9098	1	-	28.8504	1

จาก ตาราง ข.2 เมื่อทราบสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่อยู่ในอากาศ เราสามารถคำนวณหา อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนในอากาศที่ใช้เผาไหม้ ดังต่อไปนี้

$\dot{m}_{O_2,preheat,recup} = 0.2330 \times \dot{m}_{preheat,recup} = 0.2330 \times 3.0512 = 0.711$ kg/s

$\dot{m}_{N_2,preheat,recup} = 0.7670 \times \dot{m}_{preheat,recup} = 0.7670 \times 3.0512 = 2.3402$ kg/s

ดังนั้น ค่า $\dot{Q}_{preheat,recup}$ มีค่า

$$\dot{Q}_{preheat,recup} = \frac{\dot{m}_{O_2,preheat,recup}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{preheat,recup}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,preheat,recup}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{preheat,recup}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right)$$

$$= \frac{0.711}{31.99}\left(\int_{25}^{262.57} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{2.3402}{28.013}\left(\int_{25}^{262.57} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right)$$

$= 784.9$ kW

2.5 ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล ($\dot{Q}_{scale,form}$)

- ปริมาณการผลิตเหล็กเฉลี่ย 70 แท่ง/ชั่วโมง มีน้ำหนัก 444.375 kg/แท่ง
- มีเปอร์เซ็นต์ของสเกลเท่ากับ 1% ดังนั้น

$$\dot{Q}_{scale,form} = \dot{m}_{billet}\left(\frac{\%scale}{100}\right)HV_{scale}$$

$$= \frac{70}{3600} \times 444.375 \times \left(\frac{1}{100}\right) \times 5{,}161$$

$$= 445.9 \text{ kW}$$

2.6 ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก ($\dot{Q}_{billet,sen}$)

- ปริมาณการผลิตเหล็กเฉลี่ย 70 แท่ง/ชั่วโมง, มีน้ำหนัก 444.375 kg/แท่ง,
- อุณหภูมิของ billet ที่ออกจากเตาเท่ากับ 1109.34 °C
- อุณหภูมิของ billet ที่เข้าเตาเท่ากับ 39.075 °C

$$\dot{Q}_{billet,sen} = \dot{m}_{billet} C_{billet} (T_{billet,out} - T_{billet,in})$$

$$= \frac{70}{3600} \times 444.375 \times 0.78 \times (1109.34 - 39.075)$$

$$= 7213.3 \text{ kW}$$

2.7 ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟไปสู่ stack ($\dot{Q}_{flue,stack}$)

- ค่าของอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟเข้าสู่ stack มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 145.79°C

$$\dot{Q}_{flue,stack} = \frac{\dot{m}_{CO_2,flue,stack}}{M_{CO_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \overline{c}_{P,CO_2}\, dT\right) + \frac{\dot{m}_{H_2O,flue,stack}}{M_{H_2O}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \overline{c}_{P,H_2O}\, dT\right)$$

$$+ \frac{\dot{m}_{O_2,flue,stack}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \overline{c}_{P,O_2}\, dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,flue,stack}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \overline{c}_{P,N_2}\, dT\right)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เริ่มต้นจากการหาสัดส่วนโดมวลของก๊าซเสีย จากสมการต่อไปนี้

$(0.7264CH_4 + 0.0354C_2H_6 + 0.0105C_3H_8 + 0.0045C_4H_{10} + 0.0014C_5H_{12} + 0.00079C_6H_{14} + 0.0613CO_2 + 0.16N_2) + ma_{th}(O_2+3.76N_2) \longrightarrow$

$0.858CO_2 + 0.0613CO_2 + 1.637H_2O + (m-1)\, a_{th}O_2 + ma_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2$

ตาราง ข.3 สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่อยู่ในก๊าซเสีย

I	N_i ($kmol_i$)	Y_i ($kmol_i/kmol_{total}$)	M_i ($kg_i/kmol_i$)	Y_i*M_i (kg_i)	$Y_i*M_i / \sum Y_i*M_i$ (kg_i/kg_{total})
CO_2	0.9193	0.0770	44.01	3.3867	0.1206
H_2O	1.6370	0.1370	18.015	2.4686	0.0879
O_2	0.6120	0.0512	31.999	1.6392	0.0584
N_2	8.7778	0.7348	28.013	20.5836	0.7331
$\sum$(flue gas)	11.9461	1	-	28.0782	1

จาก ตาราง ข.3 เมื่อทราบสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่อยู่ในก๊าซเสีย เราสามารถคำนวณหา อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ออกซิเจนและไนโตรเจนได้ตามลำดับดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_{CO_2,flue,stack} = 0.1206 \times \dot{m}_{flue,stack} = 0.4833 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{H_2O,flue,stack} = 0.0879 \times \dot{m}_{flue,stack} = 0.3523 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{O_2,flue,stack} = 0.0584 \times \dot{m}_{flue,stack} = 0.2339 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{N_2,flue,stack} = 0.7331 \times \dot{m}_{flue,stack} = 2.9372 \text{ kg/s}$$

แทนค่า

$$\dot{Q}_{flue,stack} = \frac{0.4833}{44.01}\left(\int_{25}^{145.79} \overline{c}_{P,CO_2}\, dT\right) + \frac{0.3523}{18.015}\left(\int_{25}^{145.79} \overline{c}_{P,H_2O}\, dT\right) + \frac{0.2339}{31.999}\left(\int_{25}^{145.79} \overline{c}_{P,O_2}\, dT\right) + \frac{2.9372}{28.013}\left(\int_{25}^{145.79} \overline{c}_{P,N_2}\, dT\right)$$

$= 528.8$ kW

2.8 ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์ ($\dot{Q}_{flue,recup}$)

- อุณหภูมไอเสียที่เข้าสู่ recuperator มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 625.63°C

$$\dot{Q}_{flue,recup} = \frac{\dot{m}_{CO_2,flue,recup}}{M_{CO_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup}} \overline{c}_{P,CO_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{H_2O,flue,recup}}{M_{H_2O}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup}} \overline{c}_{P,H_2O}\,dT\right)$$
$$+ \frac{\dot{m}_{O_2,flue,recup}}{M_{O_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup}} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{\dot{m}_{N_2,flue,recup}}{M_{N_2}}\left(\int_{T_0}^{T_{flue,recup}} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right)$$

$$(0.7264CH_4 + 0.0354C_2H_6 + 0.0105C_3H_8 + 0.0045C_4H_{10} + 0.0014C_5H_{12} + 0.00079C_6H_{14} + 0.0613CO_2 + 0.16N_2) + ma_{th}(O_2 + 3.76N_2) \longrightarrow$$
$$0.858CO_2 + 0.0613CO_2 + 1.637H_2O + (m-1)\,a_{th}O_2 + ma_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2$$

ตาราง ข.4 สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่อยู่ในก๊าซเสีย

I	N_i ($kmol_i$)	Y_i ($kmol_i/kmol_{total}$)	M_i ($kg_i/kmol_i$)	Y_i*M_i (kg_i)	$Y_i*M_i / \sum Y_i*M_i$ (kg_i/kg_{total})
CO_2	0.9193	0.0770	44.01	3.3867	0.1206
H_2O	1.6370	0.1370	18.015	2.4686	0.0879
O_2	0.6120	0.0512	31.999	1.6392	0.0584
N_2	8.7778	0.7348	28.013	20.5836	0.7331
$\sum$(flue gas)	11.9461	1	-	28.0782	1

จาก ตาราง ข.4 เมื่อทราบสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่อยู่ในก๊าซเสีย เราสามารถคำนวณหา อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ออกซิเจนและไนโตรเจนได้ตามลำดับดังต่อไปนี้

$\dot{m}_{CO_2,flue,recup}$ = 0.1206 x $\dot{m}_{flue,recup}$ = 0.4833 kg/s

$\dot{m}_{H_2O,flue,recup}$ = 0.0879 x $\dot{m}_{flue,recup}$ = 0.3523 kg/s

$\dot{m}_{O_2,flue,recup}$ = 0.0584x $\dot{m}_{flue,recup}$ = 0.2339 kg/s

$\dot{m}_{N_2,flue,recup}$ = 0.7331x $\dot{m}_{flue,recup}$ = 2.9372 kg/s

แทนค่า

$$\dot{Q}_{flue,recup} = \frac{0.4833}{44.01}\left(\int_{25}^{625.63} \overline{c}_{P,CO_2}\,dT\right) + \frac{0.3523}{18.015}\left(\int_{25}^{625.63} \overline{c}_{P,H_2O}\,dT\right) + \frac{0.2339}{31.999}\left(\int_{25}^{625.63} \overline{c}_{P,O_2}\,dT\right) + \frac{2.9372}{28.013}\left(\int_{25}^{625.63} \overline{c}_{P,N_2}\,dT\right)$$

$$= 2210.7 \text{ kW}$$

2.9 ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล สามารถคำนวณ ได้จาก

$$\dot{Q}_{scale,sen} = \dot{m}_{billet}\left(\frac{\%scale}{100}\right)C_{scale}(T_{scale,out} - T_{scale,in})$$

$$= \frac{70}{3600} \times 444.375 \times 0.01 \times 0.9 \times (1109.34 - 39.075)$$

$$= 83.2 \text{ kW}$$

2.10 ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา หาได้จาก

$$\dot{Q}_{wall} = h_m A_{wall}(T_{wall} - T_{amb}) + \varepsilon_{wall}\sigma A_{wall}(T_{wall}^4 - T_{amb}^4)$$

1) ผนังด้านหน้าเตา

- อุณหภูมิผนังหน้าเตาเฉลี่ย 120.02 °C = 393.17 K
- พื้นที่ผนังด้านหน้าเตา เท่ากับ 5.5 x3 =16.5 m^2

ค่า h_m สามารถคำนวณจาก

$$T_f = \frac{T_{wall} + T_{amb}}{2} = \frac{120.02 + 38.63}{2} = 352.48 \text{ K}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{352.48} = 0.00284$$

ค่า Rayleigh number คำนวณได้จาก

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{wall} - T_{amb})L^3}{\alpha\nu} = \frac{9.81 \times 0.00284 \times (120.02 - 38.63) \times 3^3}{3.02 \times 10^{-5} \times 2.1 \times 10^{-5}} = 9.63 \times 10^{10}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่า Rayleigh number ที่คำนวณได้ มีลักษณะการไหลแบบ Turbulent flow ซึ่งสามารถคำนวณค่า Nusselt number ดังนี้

$$\overline{Nu_L} = \left\{ 0.825 + \frac{0.378Ra_L^{1/6}}{[1+(0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 , Ra_L > 10^9$$

$$= \left\{ 0.825 + \frac{0.378\times\left(9.63\times10^{10}\right)^{1/6}}{[1+(0.492/0.70)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 494.88$$

จากนั้นสามารถคำนวณ ค่า h_m ได้ดังนั้น

$$h_m = \frac{\overline{Nu_L}\times k}{L} = \frac{494.88\times0.0302}{3.00} = 4.98\ W/m^2.K$$

ดังนั้น $\dot{Q}_{wall1} = h_m A_{wall}(T_{wall}-T_{amb}) + \varepsilon_{wall}\sigma A_{wall}(T_{wall}^4-T_{amb}^4)$

$= 4.98 \times 16.5 \times(120.02 -38.63) + 0.4 \times5.67\times10^{-8} \times 16.5 \times(120.02^4 - 38.63^4)$

$= 6691.95 + 76.82.04 = 6768.77$ kW

2) ผนังด้านหลังเตา

- อุณหภูมิผนังหน้าเตาเฉลี่ย 102.31°C = 375.46 K
- พื้นที่ผนังด้านหลังเตา เท่ากับ 15.12 m^2

ค่า h_m สามารถคำนวณจาก

$$T_f = \frac{T_{wall}+T_{amb}}{2} = \frac{102.31 + 38.63}{2} = 343.62\ K$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{343.62} = 0.002837$$

ค่า Rayleigh number คำนวณได้จาก

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{wall}-T_{amb})L^3}{\alpha\nu} = \frac{9.81 \times 0.00291 \times (102.31-38.63) \times 1.8^3}{2.8852 \times 10^{-5} \times 2.0112 \times 10^{-5}} = 1.8271\times10^{10}$$

ค่า Rayleigh number ที่คำนวณได้ มีลักษณะการไหลแบบ Turbulent flow ซึ่งสามารถคำนวณค่า Nusselt number ดังนี้

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.378Ra_L^{1/6}}{[1+(0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 , Ra_L > 10^9$$

$$= \left\{ 0.825 + \frac{0.378 \times \left(1.8271 \times 10^{10}\right)^{1/6}}{[1+(0.492/0.6971)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 291.21$$

จากนั้นสามารถคำนวณ ค่า h_m ได้ดังนั้น

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} = \frac{291.21 \times 0.0295}{1.80} = 4.78 \ W/m^2.K$$

ดังนั้น $\dot{Q}_{wall2} = h_m A_{wall}(T_{wall} - T_{amb}) + \varepsilon_{wall} \sigma A_{wall}(T_{wall}^4 - T_{amb}^4)$

$= 4.78 \times 8.525 (102.31 - 38.63) + 0.4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 8.525 \times (102.31^4 - 38.63^4)$

$= 2595.02 + 20.76 = 2.6158$ kW

3) ผนังด้านแท่นดันเหล็กออก

- อุณหภูมิผนังหน้าเตาเฉลี่ย 101.51°C = 374.66 K
- พื้นที่ผนังด้านหน้าเตา เท่ากับ 59.4 m^2 , ความสูงผนังเตาเฉลี่ย 3 m

ค่า h_m สามารถคำนวณจาก

$$T_f = \frac{T_{wall} + T_{amb}}{2} = \frac{101.51 + 38.63}{2} = 343.22 \ K$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{343.22} = 0.002914$$

ค่า Rayleigh number คำนวณได้จาก

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{wall} - T_{amb})L^3}{\alpha\nu} = \frac{9.81 \times 0.002914 \times (101.51-38.63) \times 2.6^3}{2.879 \times 10^{-5} \times 2.0071 \times 10^{-5}} = 5.466 \times 10^{10}$$

ค่า Rayleigh number ที่คำนวณได้ มีลักษณะการไหลแบบ Turbulent flow ซึ่งสามารถคำนวณค่า Nusselt number ดังนี้

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.378Ra_L^{1/6}}{[1+(0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 , Ra_L > 10^9$$

$$= \left\{ 0.825 + \frac{0.378 \times \left(5.466 \times 10^{10}\right)^{1/6}}{[1+(0.492/0.6972)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 412.87$$

จากนั้นสามารถคำนวณ ค่า h_m ได้ดังนั้น

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} = \frac{412.87 \times 0.0295}{2.60} = 4.687\ W/m^2.K$$

ดังนั้น $\dot{Q}_{wall3} = h_m A_{wall}(T_{wall} - T_{amb}) + \varepsilon_{wall}\sigma A_{wall}(T_{wall}^4 - T_{amb}^4)$

$= 4.687 \times 59.4 \times (101.51 - 38.63) + 0.4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 59.4 \times (101.51^4 - 38.63^4)$

$= 17.4604 + 0.14 = 17.6001 kW$

4) ผนังด้านเหล็กออก

- อุณหภูมิผนังหน้าเตาเฉลี่ย 96.57°C = 369.72 K
- พื้นที่ผนังด้านหน้าเตา เท่ากับ 59.4 m^2, ความสูงผนังเตาเฉลี่ย 3 m

ค่า h_m สามารถคำนวณจาก

$$T_f = \frac{T_{wall} + T_{amb}}{2} = \frac{96.57 + 38.63}{2} = 340.75\ K$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{340.75} = 0.002935$$

ค่า Rayleigh number คำนวณได้จาก

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{wall} - T_{amb})L^3}{\alpha\nu} = \frac{9.81 \times 0.002935 \times (96.57 - 38.63) \times 2.60^3}{2.84 \times 10^{-5} \times 1.98 \times 10^{-5}} = 5.21 \times 10^{10}$$

ค่า Rayleigh number ที่คำนวณได้ มีลักษณะการไหลแบบ Turbulent flow ซึ่งสามารถคำนวณค่า Nusselt number ดังนี้

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.378 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 , Ra_L > 10^9$$

$$= \left\{ 0.825 + \frac{0.378 \times \left(5.21 \times 10^{10}\right)^{1/6}}{[1 + (0.492/0.6972)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 406.53$$

จากนั้นสามารถคำนวณ ค่า h_m ได้ดังนี้

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} = \frac{406.53 \times 0.0293}{2.60} = 4.5858\ W/m^2.K$$

ดังนั้น $\dot{Q}_{wall4} = h_m A_{wall}(T_{wall} - T_{amb}) + \varepsilon_{wall}\sigma A_{wall}(T_{wall}^4 - T_{amb}^4)$

$= 4.5858 \times 59.4 \times (96.57 - 38.63) + 0.4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 59.4 \times (96.57^4 - 38.63^4)$

$= 15.7429 + 0.1139 = 15.8568 kJ/s$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อทราบค่าความสูญเสียผ่านผนังเตาแต่ละด้าน สามารถหาค่าความสูญเสียผ่านผนังเตารวมได้ดังนี้

$$Q_{wall} = 6.7688 + 2.6158 + 17.6001 + 15.8568 = 42.8 \text{ kW}$$

2.11 ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี

$$\dot{Q}_{opening} = C_t \varepsilon_{opening} \sigma A_{opening} (T^4_{furnace} - T^4_{amb})$$

1) ช่องเปิดด้านเหล็กเข้า

- $C_t = 1$
- $\varepsilon_{opening} = 0.58$ เมื่อ (D/X = 0.25/0.419)
- อุณหภูมิภายในเตาเฉลี่ย 1358.38 K และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 311.63 K

ดังนั้น $\dot{Q}_{opening1} = 1 \times 0.58 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.901 \times (1358.38^4 - 38.63^4)/1000$

$= 17.35$ kW

2) ช่องเปิดด้านยิงเหล็ก

- $C_t = 0.39$
- $\varepsilon_{opening} = 0.61$ เมื่อ (D/X = 0.3/0.419)

ดังนั้น $\dot{Q}_{opening2} = 0.39 \times 0.61 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.15 \times (1358.38^4 - 38.63^4)/1000$

$= 6.63$ kW

3) ช่องเปิดด้านเหล็กออก

- $C_t = 0.292$
- $\varepsilon_{opening} = 0.61$ เมื่อ (D/X = 0.3/0.419)

ดังนั้น $\dot{Q}_{opening3} = 0.292 \times 0.61 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.136 \times (1358.38^4 - 38.63^4)/1000$

$= 4.49$ kW

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังช่องเปิดจากการแผ่รังสี รวม มีค่าเท่ากับ

$$\dot{Q}_{opening} = \dot{Q}_{opening1} + \dot{Q}_{opening2} + \dot{Q}_{opening3}$$

$= 17.35 + 6.63 + 4.49 = 28.5$ kW

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.12 ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

$$\dot{Q}_{other,furnace} = (\dot{Q}_{comb,regen} + \dot{Q}_{comb,burner} + \dot{Q}_{air,regen} + \dot{Q}_{preheated,air} + \dot{Q}_{scale,form})$$
$$- (\dot{Q}_{billet,sen} + \dot{Q}_{flue,stack} + \dot{Q}_{flue,recup} + \dot{Q}_{scale,sen} + \dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{opening})$$
$$= (5055 + 3948.7 + 439.0 + 784.9 + 445.9)$$
$$- (7213.3 + 528.8 + 2210.7 + 83.2 + 42.8 + 28.5)$$
$$= 566.3 \text{ kW}$$

2.13 ประสิทธิภาพของเตาเผา

$$\eta_{furnace} = \frac{\dot{Q}_{billet,sen}}{\dot{Q}_{comb,regen} + \dot{Q}_{comb,burner}} \times 100\%$$
$$= \frac{7213.3}{5055.0 + 3948.7} \times 100\%$$
$$= 80.1\ \%$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์

A Study of Energy Utilization in a Reheating Furnace Using Regenerative burners Combined with Recuperator

คณิต มานะธุระ* มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
*Email: kanitman@hotmail.com

Kanit Manatura* Mingsak Tangtrakul
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Pathum wan, Bangkok 10330
*Email: kanitman@hotmail.com

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีการใช้พลังงานสูงเป็นลำดับต้นๆ ของประเทศ เนื่องจากอุตสาหกรรมประเภทนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนมาก เพื่อทำความร้อนให้มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,100 - 1,250 °C ดังนั้น ความเข้าใจถึงการใช้พลังงานจำนวนมากของเตาเผาจะนำไปสู่การปรับปรุงพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา งานวิจัยนี้กล่าวถึงการใช้พลังงานของเตาเผาที่มีการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟและรีคูเพอเรเตอร์ร่วมกัน โดยเตาเผามีขนาด 30 ตัน/ชั่วโมง แบบ pusher type และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง สำหรับให้ความร้อนแก่เหล็กแท่งยาว ขนาด 120 มม. x 120 มม. ยาว 4000 มม ผลจากการตรวจวัดและการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน พบว่าเตาเผาที่มีการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟและรีคูเพอเรเตอร์สามารถประหยัดพลังงานมากกว่าเตาเผาที่ติดตั้งเพียงรีคูเพอเรเตอร์เพียงอย่างเดียวอยู่ประมาณ 30%

คำสำคัญ; สมดุลพลังงาน/ การประหยัดพลังงาน/ หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

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. 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 and energy balance analysis indicate that regenerative burners combined with recuperator can reduce in energy consumption approximately 30% compare with conventional recuperative system.

Keywords; Energy balance / Energy consumption / Regenerative burner

1. บทนำ

จากสภาวะปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงที่นำมาใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนมีราคาที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยไม่มีทีท่า ว่าจะหยุดหรือลดลง โดยประเทศต่างๆ ทั่วโลกต่างให้ความสำคัญของราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเพราะจะเป็นต้นทุนการผลิต ทำให้ราคาของสินค้าสูงขึ้น ไม่สามารถแข่งขันทางการค้าได้ ซึ่งอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้พลังงานความร้อนในปริมาณที่มากคืออุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานหลักในการพัฒนาอุตสาหกรรมปลายน้ำต่างๆ ที่เป็นอุตสาหกรรมยุทธศาสตร์หลักของประเทศ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น เตาเผาที่ใช้อบเหล็กแท่งยาว หรือเหล็กแท่งแบน ที่ใช้ในประเทศไทยนั้น มีการนำก๊าซร้อนปล่อยทิ้งมาใช้ในการอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ให้ร้อนขึ้นโดยผ่านรีคูเพอเรเตอร์ ซึ่งได้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงสุดเพียง 300 $^{\circ}$C หรือมีประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ เพียง 30%

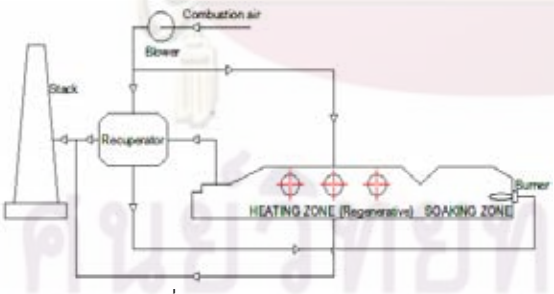
การนำเทคโนโลยี regenerative burner มาใช้แทนหัวเผาและรีคู-เพอเรเตอร์เดิม สามารถอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ได้สูงถึง 1,000 $^{\circ}$C โดยมีประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิสูงถึง 90% จะช่วยประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับการใช้รีคูเพอเรเตอร์ได้ 10 - 20 % [1] ในขบวนการการเผาเหล็ก

โดยทั่วไป regenerative burner ประกอบด้วยรีเจนเนอเรเตอร์ ทำหน้าที่สะสมความร้อนโดยมีวัตถุบรรจุอยู่ภายใน เช่น alumina ball และ switching valves หลักการทำงานของ regenerative burner คือ เมื่อก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของหัวเผาตัวหนึ่งออกมาผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ในหัวเผาอีกตัวหนึ่ง ก๊าซเสียดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนสัมผัสให้แก่ alumina ball และความร้อนที่ถูกสะสมไว้จะถ่ายเทให้แก่อากาศที่เพื่อใช้ในการเผาไหม้ในเวลาต่อมา โดยทั่วไป regenerative burner จะเหมาะสำหรับการติดตั้งในเตาที่มีการใช้พลังงานตั้งแต่ 500 kW ขึ้นไป สำหรับเตาที่มีการใช้พลังงานน้อยจะมีปัญหาสำคัญอยู่สองอย่างคือ ปัญหาเรื่องการหาพื้นที่ในการติดตั้งและราคาในการติดตั้งค่อนข้างสูงทำให้ระยะเวลาในการคืนทุนช้า แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนา regenerative burner ที่สามารถใช้กับเตาเผาขนาดเล็กได้แล้วซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 35% หรือมากกว่า [1]

2. เตาเผา (Reheating furnace)

2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา

เตาเผาขนาด 30 ตัน/ชั่วโมง แบบ pusher type ภายในเตาเผาประกอบด้วย 2 โซน คือ heating zone และ soaking zone บริเวณ heating zone ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟจำนวน 3 คู่ แต่ละคู่มีขนาด 2 MW โดยมี switching time ในการเปลี่ยนจากโหมดการเผาไหม้เป็นโหมดสะสมความร้อนคือ 30 วินาที ส่วนบริเวณ soaking zone ติดตั้งหัวเผาธรรมดา จำนวน 4 หัว แต่ละหัวมีขนาด 870 kW โดยให้ความร้อนแก่เหล็กแท่งยาว ขนาด 120 mm x 120 mm ยาว 4000 mm แต่ละชิ้นมีน้ำหนัก 440 kg เตาเผาดังกล่าวใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ แผนผังของระบบเตาเผาดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังระบบเตาเผา

2.2 ลักษณะการทำงานของเตาเผา

เตาเผามีสภาวะการทำงานแบบปกติ 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

3. องค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในรูปปริมาณร้อยละโดยปริมาตร ส่วนผสมของก๊าซธรรมชาตินั้นจะแปรเปลี่ยนตามแหล่งที่มา ในที่นี้เป็นการอ้างอิงค่าเฉลี่ยของส่วนผสมจากสถานีก๊าซธรรมชาติราชบุรี ดังตารางที่ 1 [2]

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบของก๊าซธรรมชาติโดยเฉลี่ย

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยปริมาตร
CH_4	72.6
C_2H_6	3.5
C_3H_8	1.1
C_4H_{10}	0.4
C_5H_{12}	0.2
C_6H_{14}	0.1
CO_2	6.1
N_2	16

การพิจารณาค่าความร้อนเชื้อเพลิง โดยทั่วไปมักจะนำค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงมาใช้ในการคำนวณ ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้น หมายถึงการหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สถานะอ้างอิงมาตรฐานอยู่ที่ 25 $^{\circ}C$, 1 atm ซึ่ง ณ อุณหภูมิและความดันดังกล่าวไอน้ำที่อยู่ในก๊าซเสียจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ทำให้เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากก๊าซเป็นของเหลว แต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นมีค่าสูงประมาณ 500 - 800 $^{\circ}C$ ส่งผลให้ไอน้ำที่อยู่ภายในก๊าซเสียยังคงมีสถานะเป็นก๊าซเหมือนเดิม จึงไม่เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณจึงควรเป็นค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 [2]

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. การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถนำมาเขียนสมการเผาไหม้ทางทฤษฎี(stoichiometry combustion equation) ได้ดังต่อไปนี้ [3]

$$(0.726CH_4 + 0.035C_2H_6 + 0.011C_3H_8 + 0.004C_4H_{10} + 0.002C_5H_{12} + 0.001C_6H_{14} + 0.061CO_2 + 0.16N_2) + a_{th}(O_2+3.76N_2) \rightarrow 0.861CO_2 + 0.061CO_2 + 1.64H_2O + a_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2$$

ค่า a_{th} คือ อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อหนึ่งโมลของก๊าซธรรมชาติทางทฤษฎี ซึ่งจากสมดุลจำนวนโมลของออกซิเจน จะได้ $a_{th} = 1.68\ kmol_{O2}/kmol_{fuel}$

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

$$AF_{stoic} = \dot{m}_{air}/\dot{m}_{fuel} = 16.96\ kg_{air}/kg_{fuel} \quad (1)$$

ในทางปฏิบัติปริมาณอากาศที่ใช้จะมีปริมาณสูงกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกินจะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ ดังสมการ

$$(0.726CH_4 + 0.035C_2H_6 + 0.011C_3H_8 + 0.004C_4H_{10} + 0.002C_5H_{12} + 0.001C_6H_{14} + 0.061CO_2 + 0.16N_2) + ma_{th}(O_2+3.76N_2) \rightarrow 0.861CO_2 + 0.061CO_2 + 1.64H_2O + (m-1)a_{th}O_2 + ma_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2$$

เมื่อ m คือตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน

จากสมการการเผาไหม้ข้างต้น พบว่า ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมากับผลิตภัณฑ์ (ก๊าซไอเสีย) มีค่าเท่ากับ $(m-1)a_{th}O_2$ ในกรณีตรวจวัดจริงสามารถวัดปริมาณออกซิเจนดังกล่าวด้วยเครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย (Flue gas analyzer) ค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยปริมาตรแห้ง (dry-basis) ซึ่งหมายถึงก๊าซไอเสียจะถูกดูดเอาไอน้ำและความชื้นออกทำให้มีปริมาตรแห้งก่อนที่เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะต้องแปลงไปเป็นตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน ดังสมการ

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{(m-1)a_{th}}{0.861 + 0.061 + (m-1)a_{th} + 3.76ma_{th} + 0.16} \quad (2)$$

สามารถจัดรูปเพื่อหาค่า m ได้ดังนี้

$$m = \frac{1.68 - 0.6\left(\frac{\%O_2}{100}\right)}{1.68 - 8\left(\frac{\%O_2}{100}\right)} \quad (3)$$

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

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

5.การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผา

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานเป็นการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลความร้อนในรูปแบบต่างๆ ที่เข้าสู่เตาเผาและออกจากเตาเผา ในการวิจัยนี้กำหนดให้เตาเผามีสภาวะการทำงานแบบปกติ และต่อเนื่อง กล่าวคือ ความร้อนที่เข้าสู่ตัวเตาเผาจะกลายไปเป็นความร้อนที่ออกจากตัวเตาเผาทั้งหมดโดยที่ไม่มีการสะสมอยู่ภายในเตา การวิเคราะห์สมดุลพลังงานทำให้ทราบถึงอัตราการบริโภคเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเตา และพารามิเตอร์เชิงประสิทธิภาพอื่นๆ

5.1 สมดุลมวลของเตาเผา

พิจารณาเตาเผาเป็นปริมาตรควบคุม โดยความดันภายในเตาเผามีค่าเป็นลบและการทำงานของเตาเผามีการทำงานอย่างต่อเนื่อง ในสภาวะคงที่ (Steady state) รายละเอียดของสมดุลมวลที่เข้าและออกจากเตาเผา [4] มีดังนี้

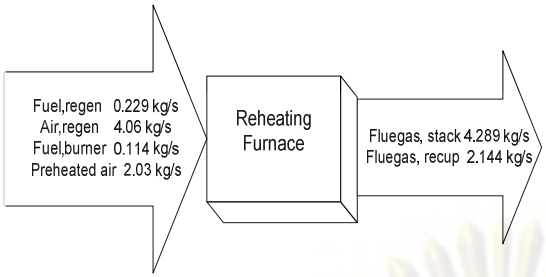
ตารางที่ 3 รายละเอียดของมวลที่ไหลเข้าสู่เตาเผา

Input	kg/s	%
1) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	0.229	3.56
2) อัตราไหลของอากาศเข้าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	4.06	63.11
3) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผา	0.114	1.78
4) อัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา	2.03	31.55
Total mass input	6.433	100

ตารางที่ 4 รายละเอียดของมวลที่ไหลออกจากเตาเผา

Output	kg/s	%
1) อัตราไหลของก๊าซเสียจากเตาเผาเข้าสู่รีคู-เพอเรเตอร์	2.144	33.33
2) อัตราไหลของก๊าซเสียจากหัวเผารีเจน-เนอเรทีฟไปสู่ stack	4.289	66.67
Total mass output	6.433	100

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น สามารถนำมาเขียน Diagram แสดงสมดุลมวลของเตาเผาที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟได้ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 สมดุลมวลของเตาเผา

5.2 สมดุลความร้อนของเตาเผา

เมื่อพิจารณาระบบการทำงานของเตาเผาแบบต่อเนื่องที่มีสภาวะการทำงานแบบปกติ หรือระบบอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน ซึ่งจะถือว่าอุณหภูมิภายในเตามีค่าเฉลี่ยที่คงที่หรือทั้งเตามีอุณหภูมิเดียวกันทั้งหมด และพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ตัวเตาจะกลายไปเป็นพลังงานความร้อนที่ออกจากตัวเตาทั้งหมดโดยไม่มีการสะสมอยู่ภายใน ซึ่งในกรณีที่ความดันภายในเตาเผามีค่าเป็นลบ จะสามารถแสดงรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจากเตาเผา ดังนี้

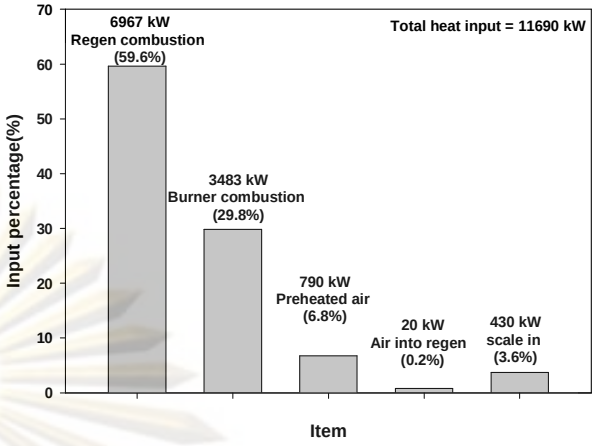
พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ
2) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา
3) ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์
4) ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าสู่รีเจนเนอเรเตอร์
5) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

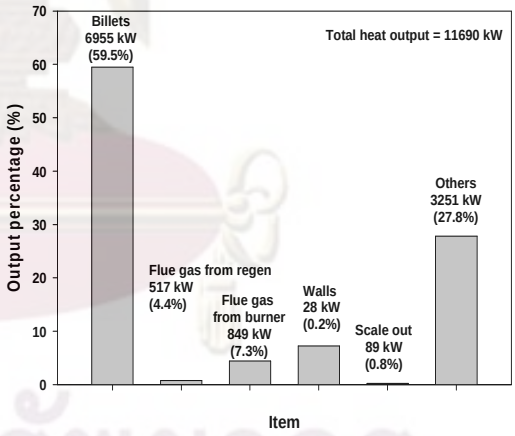
1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก
2) ความร้อนสัมผัสของก๊าซเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ
3) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์
4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา
5) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล
6) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) และความดันอ้างอิง (P_0) ไว้ที่ 25 ^{o}C และ 1 atm ตามลำดับ เพื่อให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล โดยรายละเอียดของพลังงานความร้อนที่เข้าและออกจากเตาที่ได้จากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 เปอร์เซนต์ของพลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผา

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงพลังงานความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่เตาเผาซึ่งได้แก่ พลังงานความร้อนจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟซึ่งถือเป็นพลังงานความร้อนหลัก มีค่าสูงถึง 59.6% โดยพลังงานความร้อนจากหัวเผาธรรมดามีค่ารองลงมา คือ 29.8% นอกจากนี้พลังงานความร้อนจากการอุ่นอากาศเพื่อใช้ในการเผาไหม้ พลังงานความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าสู่รีเจนเนอเรเตอร์ และพลังงานความร้อนจากการก่อตัวของสเกลมีค่า 6.8%, 0.2% และ 3.6% ตามลำดับ



รูปที่ 4 เปอร์เซนต์ของพลังงานความร้อนออกจากเตาเผา

จากรูปที่ 4 พบว่า พลังงานความร้อนที่ออกจากเตาเผาส่วนใหญ่ถูกถ่ายเทให้แก่เหล็กแท่งยาว(billets) มีค่าถึง 59.5% โดยพลังงานความร้อนในส่วนของก๊าซเสียทั้งสองโซน (heating zone และ soaking zone) มีค่ารวมกัน 11.7% โดยพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นอันได้แก่ พลังงานความร้อนสูญเสียจากผนังเตาเผา และสเกล มีค่าเพียง 1% นอกจากนี้พลังงานความร้อนสูญเสียในส่วนที่มีค่าน้อยและไม่สามารถ

คำนวณได้ เช่น ความร้อนสูญเสียจากช่องเปิดต่างๆ ความร้อนสูญเสียจากบริเวณหลังคาและพื้นของเตาเผามีค่า 27.8%

6. ประสิทธิภาพของเตาเผา (Furnace efficiency)

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

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

จากการคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผา มีค่าเท่ากับ 67% โดยความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด คือ 10450 kW และพลังงานความร้อนที่อยู่ในเหล็กแท่งยาว คือ 6955 kW

7. วิเคราะห์ผลการศึกษา

ผลจากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของ เตาเผาที่มีการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีพร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์แสดงให้เห็นความสามารถในการให้ความร้อนและการสะสมความร้อนของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟจำนวนทั้ง 3 คู่ รวมกับหัวเผาธรรมดา คือ 10450 kW ซึ่งทำให้สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงประมาณ 32% เมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาที่ใช้เพียงระบบรีคูเพอเรเตอร์อย่างเดียว โดยพิจารณาเป็นพลังงานที่บริโภคต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (specific energy consumption) ค่าดังกล่าว คือ 1254 kJ/kg ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเตาเผาที่ติดตั้งเพียงรีคูเพอเรเตอร์ คือ 1853 kJ/kg

8. สรุปผลการวิจัย

เตาเผาที่มีการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับหัวเผาชนิดธรรมดา สามารถประหยัดพลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (Specific energy consumption) ได้ 32% เมื่อเทียบกับระบบเตาเผาที่ใช้รีคูเพอเรเตอร์ โดยมีประสิทธิภาพของเตาเผา คือ 67%

9. ข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ระบบทั้งหมด พบว่า ความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศเพื่อใช้ในการเผาไหม้มีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากประสิทธิภาพของรีคูเพเรเตอร์ดังนั้น ทีมงานวิจัยจึงพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพของรีคูเพอเรเตอร์

10. เอกสารอ้างอิง

[1] 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*.

[2] PTT Public Company Limited, (2002) online gas quality, *http://pttinternet.pttplc.com/csc_gas/csc_ind/onlinegas/9_3.asp*

[3] Turns, S., (2006) *An Introduction to combustion* (2nd edition), Singapore: McGraw-Hill.

[4] Zengel, Y.A. and Boles, M.A., (2007) *Thermodynamics, an Engineering Approach* (6th edition), Singapore: McGraw-Hill.

Energy Conservation in a Reheating Furnace Using Regenerative burners Combined with Recuperator

Kanit Manatura* and Mingsak Tangtrakul

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand
* Corresponding author: kanitman@hotmail.com

Abstract: *The steel industry is one of high energy consumption industries. In order to mill steel bar into steel rod, the steel bar is heated to 1,100 - 1,250 °C. The objective of this work is to investigate energy utilization in reheating furnace using regenerative burners combined with a recuperator. The furnace capacity is 30 tonne per hour, pusher type and the natural gas is used as a fuel. Billets sizes 120 x 120 x 4000 mm are used for reheating. Waste heat recovery in a recuperator system can preheat combustion air to 300 °C due to material temperature limitations. In order that preheating combustion air temperature near furnace temperature so regenerative burner system provides for substituting that it can preheat combustion air up to 1000 °C. The results from measurements and energy balance analysis indicate that the regenerative burners combined with recuperator system consume energy approximately 30% less than conventional recuperative system*

Keywords: Energy conservation, Reheating Furnace, Regenerative burners, Burners, Energy balance

1. INTRODUCTION

At the present time, the cost of fuel using as an energy source has constantly increased due to limiting of natural resource. Each of countries around the world has realized on its higher cost because it is one of the main capital costs of production, makes their products more expensive and consequently can not compete in market. One of the industries that use a lot of heat is the steel industry. The steel industry is mainly basic in development of destination industries in which are main industry of country, such as construction, automotive and electric appliance industries. The reheating furnace use fuel for heating billets or slabs for rolling process. In Thailand have waste heat recovery in preheating combustion air by recuperator. The most of combustion air can be preheated the maximum temperature of 300 °C when the temperature efficiency only is 30%.

The application of regenerative burner technology instead of conventional burner and recuperator are able to preheat combustion air nearly 1,000 °C and the temperature efficiency up to 90%. These can save energy of 10-20% [1] compare with conventional recuperator system in reheating process. Generally, the regenerative burner consists of regenerators such as alumina, ceramic ball or honeycomb as regenerative media.The principle of regenerative burner using the regenerator that recovers the heat from the flue gas and use it to increase the temperature of combustion air. Normally, regenerative burner is suitable for installation in furnace capacity 500 kW at least. The problems of low capacity furnace are area for installation and high cost in installation that affect to slow in payback period. However, regenerative burners have been developing for applying in low capacity furnace that can save energy more than 35%.

2. METHODOLOGY

2.1 Reheating Furnace Description

A capacity of the reheating furnace is 30 tonne/hour, pusher type. It consists of 2 zones: heating zone and soaking zone. The heating zone equipped with 3 pairs of regenerative burners, capacity of each pair is 2 MW when the switching time is 30 s. The soaking zone equipped with 4 ordinary burners, capacity of each burner is 870 kW. Size of Billet is 120mm x120mm x 4000mm used for reheating, each piece is 440 kg. The diagram of the furnace system is shown as Fig. 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

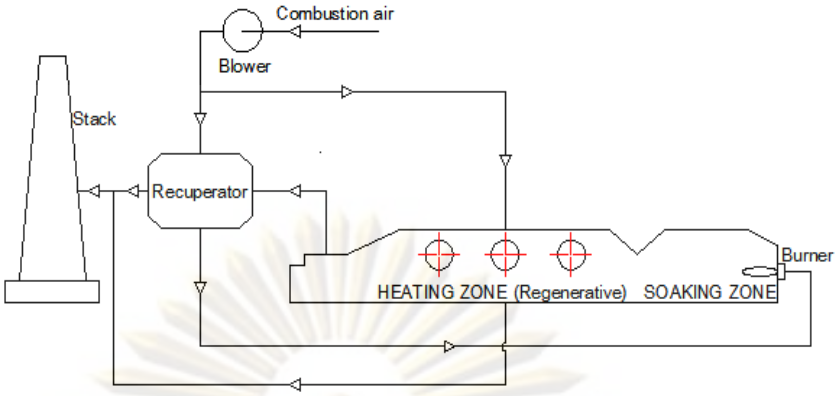


Fig .1 Diagram of a reheating furnace

2.2 Compositions and properties of fuel

Natural gas is used as fuel in this research. Mixtures of natural gas varied with resource. In this paper, Compositions are shown in volumetric percentage of natural gas from Ratchaburi gas station,Thailand [2]

Table 1 Natural gas components

COMPONENTS	PERCENT BY VOLUME
CH_4	72.6
C_2H_6	3.5
C_3H_8	1.1
C_4H_{10}	0.4
C_5H_{12}	0.2
C_6H_{14}	0.1
CO_2	6.1
N_2	16

The higher heating value the heat of combustion calculated assuming that all of the water in products has condensed to liquid is always used in calculation. However, in practical events flue gas temperature from combustion has valued in high level around 500-800 °C effect on water vapor in flue gas still old status. Moreover, it does not have latent heat value from status transferring. Therefore, the heating value have been used in calculation should be the lower heating value

Table 2 Properties of natural gas

PROPERTIES	VALUE	UNIT
Molecular weight	20.7	kg/kmol
Specific gravity	0.7	-
Higher heating value	31.7	MJ/Nm^3
Lower heating value	27.7	MJ/Nm^3

2.3 Analysis of air-fuel ratio in combustion

For hydrocarbon such as the natural gas, the stoichiometric combustion equation can be expressed as

$$(0.726CH_4 + 0.035C_2H_6 + 0.011C_3H_8 + 0.004C_4H_{10} + 0.002C_5H_{12} + 0.001C_6H_{14} + 0.061CO_2 + 0.16N_2) + a_{th}(O_2+3.76N_2)$$
$$\rightarrow 0.861CO_2 + 0.061CO_2 + 1.64H_2O + a_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2 \quad (1)$$

where a_{th} is the stoichiometry ratio of oxygen mole per natural gas mole, the number atoms on the L.H.S of the equation must exactly balance the number on the R.H.S because the combustion process does not create or destroy atoms. Solving equations for oxygen mole getting $a_{th} = 1.68\ kmol_{O_2}/kmol_{fuel}$

Stoichiometric Air-Fuel Ratio (AF_{stoic}) is necessary to achieve complete combustion of the fuel and no more. It can be written as

$$AF_{stoic} = \dot{m}_{air}/\dot{m}_{fuel} = 16.96\ \ kg_{air}/kg_{fuel} \quad (2)$$

In practical situations, more than the stoichiometric quantity the excess of oxidizer required for completely

in combustion in combustion. Eq. (1) can be rewritten as

$$(0.726CH_4 + 0.035C_2H_6 + 0.011C_3H_8 + 0.004C_4H_{10} + 0.002C_5H_{12} + 0.001C_6H_{14} + 0.061CO_2 + 0.16N_2) + ma_{th}(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.861CO_2 + 0.061CO_2 + 1.64H_2O + (m-1)\,a_{th}O_2 + ma_{th}(3.76N_2) + 0.16N_2 \quad (3)$$

where m is the correction factor of excess air

From above equations, found oxygen in excess air in products (flue gas) are equal $(m-1)a_{th}O_2$. In practice, a flue gas analyzer is used to measure it. The results from the measure are showed in percentage of dry-basis, water vapor and humidity in flue gas is blown off before the apparatus analysis. The remaining gases are then expressed as a percentage (by volume) of the total dry gas constituents - in this case CO_2, O_2, N_2. Therefore, oxygen from measurement can be adapted to correction factor of excess air as

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{(m-1)a_{th}}{0.861 + 0.061 + (m-1)a_{th} + 3.76ma_{th} + 0.16} \quad (4)$$

Eq. (4) is arranged in the form of m as

$$m = \frac{1.68 - 0.6\left(\frac{\%O_2}{100}\right)}{1.68 - 8\left(\frac{\%O_2}{100}\right)} \quad (5)$$

When knows value of m from Eq. (5) so the Actual Air-Fuel Ratio, AF_{actual} is

$$AF_{actual} = m.AF_{stoic} \quad (6)$$

2.4 Analysis of energy balance of reheating furnace

Analysis of energy balance is divided to mass and heat balance. Applying the conservation of mass and energy are staged in this research if there is no accumulation what goes into process (reheating) must come out in continuous operation by giving the reheating furnace is control volume. Energy balance analysis point out in energy consumption, furnace efficiency and others performance parameters.

2.5 Mass balance of reheating furnace

Given the furnace is valuable in negative pressure during operation. The details of mass balance are shown as Table 3 and Table 4.

Table 3 Mass flow rate in

INPUT	kg/s	%
1) Fuel flow rate inlet regenerative burners	0.2	3.1
2) Combustion air flow rate inlet regenerative burners	4.1	64.0
3) Fuel flow rate inlet burners	0.1	1.6
4) Air flow rate inlet burners	2.0	31.3
Total mass input	6.4	100

Table 4 Mass flow rate out

OUTPUT	kg/s	%
1) Flue gas flow rate into stack	4.3	67.2
2) Flue gas flow rate into recuperator	2.1	32.8
Total mass output	6.4	100

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

From above tables, it is clear for applying diagram of mass balance of a reheating furnace as Fig. 2

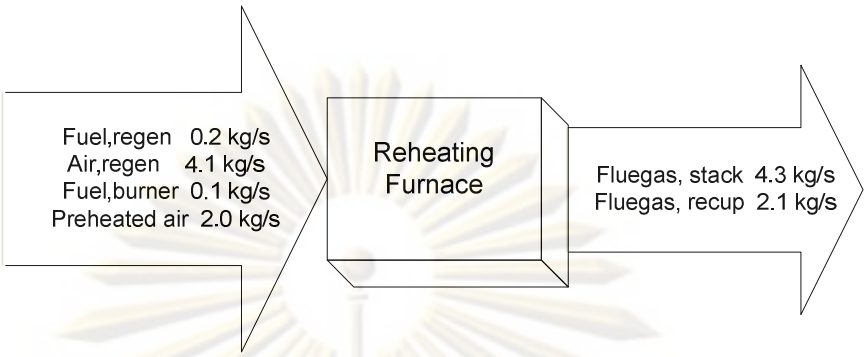


Fig. 2 Mass balance diagram for a reheating furnace

Fig.2 shows mass balance diagram leads to know about that the mass flow rate in regenerative burner system is twice to burner system according to the law of conservation of mass.

2.6 Heat balance of a reheating furnace

A steady state or thermal equilibrium is considered in a continuous steel reheating furnace. Energy balance of a reheating furnace shown as table 5.

Table 5 Energy balance of reheating furnace

HEAT INPUT	HEAT OUTPUT
1) Combustion heat of fuel at regenerative burners	1) Quantity of heat in billets
2) Combustion heat of fuel at burner	2) Sensible heat in flue gas from regenerative burners
3) Heat recovered by recuperator	3) Sensible heat in flue gas into recuperator
4) Sensible heat of fresh air	4) Heat loss from roofs and walls
5) Heat of scale formation	5) Sensible heat of scale
	6) Others loss

Imposed temperature (T_0) and pressure (P_0) are 25 °C and 1atm respectively as references in calculation, following international standard. The percent of the heat input and heat output terms are presented in Fig. 3 and 4, respectively

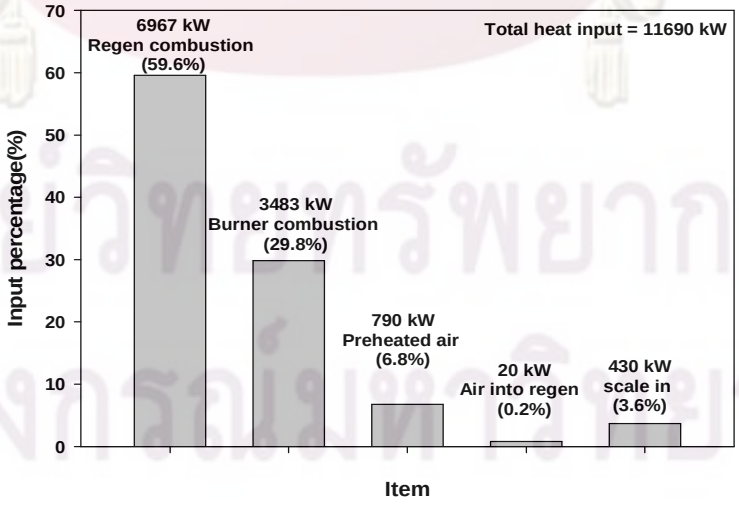


Fig. 3 Input percent of heat input

The input percent of heat input is shown in Fig. 3. Most of the heat entering to the furnace system is provided by the combustion heat of fuel at regenerative burner, which gives 59.6% of the heat input. The

second one is the combustion heat of fuel at burner contributing 29.8%. Additionally, heat in preheated air, air into regenerative burners and heat in scale are 6.8%, 0.2% and 3.6%, respectively.

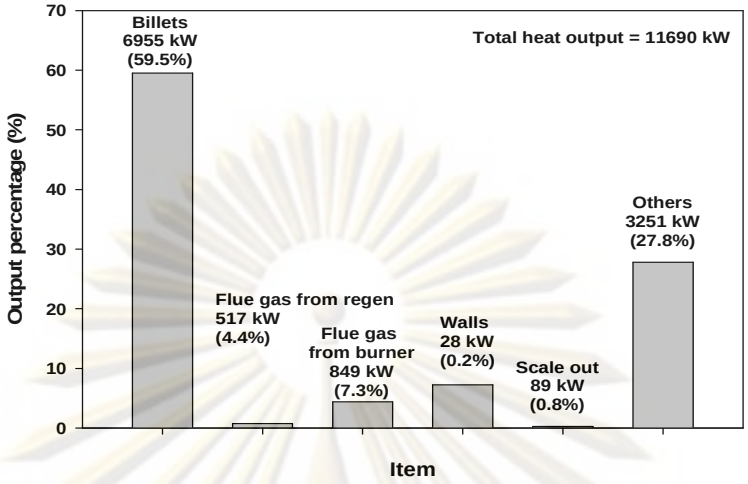


Fig. 4 Output percent of heat output

Fig .4 shows the quantity of heat in billets that is 59.5% of mostly heat input and amounts of sensible heat in flue gas of regenerative burners and burners are 11.7%. Besides, heat loss of walls, sensible heat of scale, openings and others losses are slightly aggregate of 28.8%.

2.7 Furnace efficiency

The efficiency of a furnace is the ratio of quantity of heat in billet ($\dot{Q}_{billet}$) to combustion heat of fuel ($\dot{Q}_{comb}$) is defined as

$$\eta_{furnace} = \frac{\dot{Q}_{billet}}{\dot{Q}_{comb}} \times 100\% \quad (7)$$

From calculation, the furnace efficiency is 67%. The combustion heat of fuel is 10450 kW while the quantity of heat in billet is 6955 kW.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In energy balance analysis, consumption in energy of the furnace euipped with regenerative burners and burners are 10450 kW. Moreover, the specific energy consumption in furnace euipped with regenerative burners and burners are 1254 kJ/kg which less than a recuperator system is 1853 kJ/kg. Analysis result shows 32% of energy saving when compared with the furnace that equipped with ordinary burners system.

4. CONCLUSION

Regenerative burners combined with recuperator are suitable for energy conversion and energy utilization for high temperature gas. It shows 32% of energy saving on the 67% of furnace efficiency.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the contribution of Kasemsakdi Trading CO., LTD, Thailand.

6. REFERENCES

[1] O'Connor,S.J., Konziela J., Yoo ln and Kim Byung Gi. (2006) Regenerative burner in the INI large structural mill furnace, *AIS Tech 2005 proceeding,The Iron & Steel Technology*.
[2] PTT Public Company Limited, (2002) online gas quality, http://pttinternet.pttplc.com/csc_gas/csc_ind/onlinegas/9_3.asp
[3] Turns, S., (2006) *An Introduction to combustion* (2nd edition), Singapore: McGraw-Hill.
[4] Zengel, Y.A. and Boles, M.A., (2007) *Thermodynamics, an Engineering Approach* (6th edition), Singapore: McGraw-Hill.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายคณิต มานะธุระ เกิดเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2526 ที่ จ.นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2548 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย