

การศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลดอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา



นายศุภณัฐ เจริญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF ENERGY SAVING FOR A REHEATING FURNACE
BY REDUCTION OF AIR LEAK



Mr.Supanut Charoen

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลด
อากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา

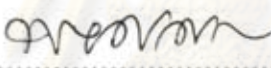
โดย นายศุภณัฐ เจริญ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล


อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเทียน

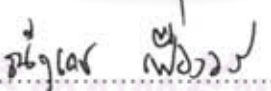
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนัทธีวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธรร จริญญากรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเทียน)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ณัฐเดช เพ็ญวงวงศ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาติต ภัคดี)

ศุภณัฐ เจริญ : การศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลดอากาศรั่ว
เข้าสู่เตาเผา. (A STUDY OF ENERGY SAVING FOR A REHEATING FURNACE BY
REDUCTION OF AIR LEAK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.จิตติน แดงเที่ยง,
126 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลด
อากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผาของโรงงานตัวอย่างแห่งหนึ่งมา
เป็นต้นแบบ เพื่อทำการศึกษасมดุลพลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผา รวมถึงพิจารณาปัญหา
การเกิดอากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผา เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาโปรแกรม
คอมพิวเตอร์ให้สามารถทำนายสมดุลพลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผา รวมถึงประเมินผลการ
ประหยัดหลังจากการปรับปรุง

ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณของอากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผา เกิดจากความดัน
ภายในเตาเผาที่มีค่าเป็นลบเมื่อเทียบความดันบรรยากาศ โดยอากาศในส่วนี้จะพาความร้อนของ
ก๊าซร้อนภายในเตาเผาออกไปพร้อมกับไอเสีย ส่งผลให้เตาเผาสูญเสียพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น
งานวิจัยชิ้นนี้จึงหาแนวทางในการปรับปรุง โดยการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา
และทำนายผลหลังจากการปรับปรุงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า พลังงานความร้อนสูญเสีย
ออกไปกับไอเสียหลังจากการปรับปรุงมีปริมาณลดลงถึง 202.83 kW ทำให้ประสิทธิภาพของ
เตาเผามีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 51.48% เป็น 53.45% ซึ่งเมื่อเทียบผลการประหยัดหลังจากการ
ปรับปรุง เตาเผาสามารถประหยัดการใช้เชื้อเพลิงได้ 15.31 ลิตรต่อชั่วโมงหรือคิดเทียบเป็น 3.69%
ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่มีอยู่เดิม ส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยชิ้นนี้
สามารถนำมาใช้กับเตาเผาอื่นที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกันได้ นอกจากนี้ผลจากการศึกษาสมดุล
พลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผา ยังนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ
เตาเผาในรูปแบบอื่นๆ ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ นิสิต.....ศุภณัฐ เจริญ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....จิตติน แดงเที่ยง.....
ปีการศึกษา.....2551.....

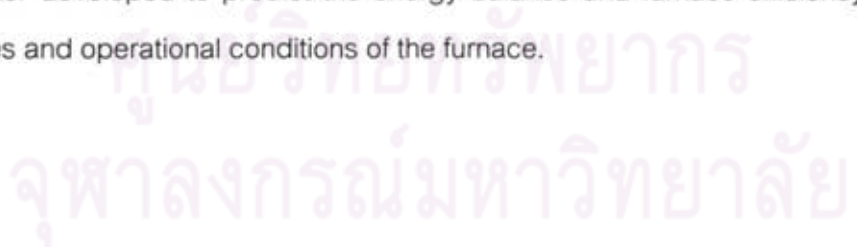
4970608021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORDS : REHEATING FURNACE / ENERGY SAVING

SUPANUT CHAROEN : A STUDY OF ENERGY SAVING FOR A REHEATING FURNACE BY REDUCTION OF AIR LEAK. ADVISOR : ASST. PROF. CHITTIN TANGTHIENG, Ph.D., 126 pp.

This thesis focuses on a study of energy saving for a reheating furnace by reduction of air leak. Field data were obtained by a reheating furnace of a selected steel factory in order to analyze the energy balance and furnace efficiency due the effect of air leak. This study includes the development of a computer program to predict the energy balance and furnace efficiency after the furnace improvement from the air leak.

The results from the field measurement indicate that the furnace pressure is negative, leading to the cold air leaking through the openings into the furnace. Therefore, this cold air will absorb heat from the combustion process and flow out through the stack. The solution plan is to install a pressure control system of furnace and reduce the air leak. From the prediction of the developed computer program, it is estimated that the energy absorb by the exhausted gas is reduced by 202.83 kW and the efficiency of furnace is increased from 51.48% to 53.45%. Consequently, the fuel consumption could be saved by 15.31 liter per hour which is equivalent to the reduction of the previous energy consumption value by 3.69%. The computer program could be farther developed to predict the energy balance and furnace efficiency of the different types and operational conditions of the furnace.



Department:..... Mechanical Engineering..... Student's signature:..... *Supanut Charoen*.....
Field of study:..... Mechanical Engineering..... Advisor's signature:..... *Chitti Tangthien*.....
Academic year:..... 2008.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านให้โอกาสที่สำคัญที่สุดแก่ข้าพเจ้าในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงท่านให้ความกรุณาถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดต่างๆ ที่มีคุณค่ายิ่ง อันเป็นแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นทำงานได้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญากรณ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาทิต ภัคดี และอาจารย์ ดร.ณัฐเดช เฟื่องวรรณศรี ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยขึ้นนี้จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา บ่า และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา อันคุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ครอบครัว ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
3.1 เตาเผาเหล็ก	10
3.2 สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กและ recuperator	11
3.3 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันเตา	26
3.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้	27
บทที่ 4 คุณลักษณะของเตาเผาที่พิจารณา	29
4.1 คุณลักษณะข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา	29
4.2 ลักษณะการทำงานของเตาเผา	30
4.3 การควบคุมการไหลของอากาศและไอเสียของเตาเผา	31

บทที่ 5 การตรวจวัดและเก็บข้อมูล	34
5.1 รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด	34
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด	36
บทที่ 6 แนวทางการวิเคราะห์ปัญหา	39
6.1 การวิเคราะห์ความดันภายในเตาเผา	39
6.2 แนวทางการวิเคราะห์ปัญหา	39
บทที่ 7 การออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์	47
7.1 การบันทึกข้อมูล	47
7.2 ขั้นตอนการคำนวณ	59
บทที่ 8 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	70
8.1 ผลการคำนวณก่อนทำการปรับปรุง	70
8.2 ผลการคำนวณหลังทำการปรับปรุง	74
8.3 ผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์	79
บทที่ 9 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	82
9.1 สรุปผลการวิจัย	82
9.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต	83
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก ข้อมูลการตรวจวัด	87
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	93
ภาคผนวก ค บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงาน แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	126

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 3.1	แสดงองค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย	26
ตารางที่ 3.2	แสดงคุณสมบัติของน้ำมันเตา	26
ตารางที่ 5.1	แสดงข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด	34
ตารางที่ 8.1	แสดงรายละเอียดสมดุลมวลของเตาเผาก่อนทำการปรับปรุง	70
ตารางที่ 8.2	แสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของเตาเผาก่อนทำการปรับปรุง	71
ตารางที่ 8.3	แสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของ recuperator ก่อนทำการปรับปรุง	72
ตารางที่ 8.4	แสดงรายละเอียดสมดุลมวลของเตาเผาหลังทำการปรับปรุง	74
ตารางที่ 8.5	แสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของเตาเผาหลังทำการปรับปรุง	76
ตารางที่ 8.6	แสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของ recuperator หลังทำการปรับปรุง	77
ตารางที่ 8.7	แสดงรายละเอียดของข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์	80
ตารางที่ ก.1	ตารางบันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	88
ตารางที่ ก.2	ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศหลังจากการอุ่นด้วยไอเสียที่ recuperator	88
ตารางที่ ก.3	ตารางบันทึกปริมาณการผลิตจากจำนวน billet ที่ออกจากเตา	89
ตารางที่ ก.4	ตารางบันทึกความดันภายในเตาเผา	89
ตารางที่ ก.5	ตารางบันทึกอุณหภูมิภายในเตาเผา	90
ตารางที่ ก.6	ตารางบันทึกอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเตาเผา ก่อนเข้าสู่ recuperator	90
ตารางที่ ก.7	ตารางบันทึกอุณหภูมิและองค์ประกอบของไอเสียที่ออกจาก recuperator	90
ตารางที่ ก.8	ตารางบันทึกอุณหภูมิผิวเตา ณ ตำแหน่งต่างๆ รอบ	91
ตารางที่ ข.1	แสดงสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ	98
ตารางที่ ข.2	แสดงสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสีย	100

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1(a) อัตราการใช้พลังงานความร้อน	4
รูปที่ 2.1(b) เวลาสำหรับการกักเก็บ Billet ไว้ภายในเตาเผา	4
รูปที่ 2.1(c) ปริมาณการใช้พลังงานความร้อน	4
รูปที่ 2.2(a) ร้อยละของพลังงานขาเข้า	5
รูปที่ 2.2(b) ร้อยละของพลังงานขาออกของเตาเผา	5
รูปที่ 2.3 สมดุลพลังงานของเตาเผาทั้งระบบ	5
รูปที่ 2.4 สมดุลพลังงานของเตาเผา	6
รูปที่ 2.5 ลักษณะการติดตั้งฉนวนของรางเลื่อนสำหรับรองรับ billet	7
รูปที่ 2.6(a) สมดุลพลังงานของเตาเผาก่อนติดตั้งฉนวน	7
รูปที่ 2.6(b) สมดุลพลังงานของเตาเผาหลังติดตั้งฉนวน	7
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงอุณหภูมิจากการเผาไหม้ในฟังก์ชันของ RBF _g และ O ₂	8
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงพลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้และ FM ในฟังก์ชันของ สัดส่วน RBF _g ภายใน fuel mixture และ O ₂	8
รูปที่ 2.9 แสดงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของสัดส่วน RBF _g ภายใน FM และ O ₂	9
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของศักยภาพของ เครื่องแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน และ O ₂	9
รูปที่ 3.1 ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด	20
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบระบบต่างๆ ของเตาเผา	30
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงลักษณะของความดันของอากาศและไอเสียที่ไหลผ่านเตาแบบ natural draft	32
รูปที่ 5.1 Digital indicator	36
รูปที่ 5.2 Thermocouple probe	36
รูปที่ 5.3 Flue gas analyzer	36
รูปที่ 5.4 Pitot tube	37
รูปที่ 5.5 Thermal imaging camera	37
รูปที่ 5.6 Digital manometer	38
รูปที่ 8.1 Diagram สมดุลมวลของเตาเผาก่อนทำการปรับปรุง	70

รูปที่		หน้า
รูปที่ 8.2	พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาก่อนทำการปรับปรุง	71
รูปที่ 8.3	พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาก่อนทำการปรับปรุง	71
รูปที่ 8.4	Diagram สมดุลความร้อนของ recuperator ก่อนทำการปรับปรุง	72
รูปที่ 8.5	Sankey diagram ของเตาเผาทั้งระบบก่อนทำการปรับปรุง	73
รูปที่ 8.6	Diagram สมดุลมวลของเตาเผาหลังทำการปรับปรุง	75
รูปที่ 8.7	พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาหลังทำการปรับปรุง	76
รูปที่ 8.8	พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาหลังทำการปรับปรุง	76
รูปที่ 8.9	Diagram สมดุลความร้อนของ recuperator หลังทำการปรับปรุง	77
รูปที่ 8.10	Sankey diagram ของเตาเผาทั้งระบบหลังทำการปรับปรุง	78
รูปที่ 8.11	การติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา.....	79

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
a_{th}	อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อหนึ่งโมลของเชื้อเพลิง	$\text{kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_{\text{fuel}}$
$A_{opening}$	พื้นที่ของช่องเปิด	m^2
A_{wall}	พื้นที่ของผิวด้านนอกของเตาเผา	m^2
AF_{actual}	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ	$\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
AF_{stoic}	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี	$\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
c_b	ตัวคูณสำหรับปรับแก้ในส่วนของอุปกรณ์หรือที่บัง	-
c_t	ตัวคูณสำหรับปรับแก้ของสัดส่วนเวลาการเปิดปิดของช่องเปิด	-
\bar{c}_{p,CO_2}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	$\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}$
\bar{c}_{p,H_2O}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	$\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}$
\bar{c}_{p,N_2}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน	$\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}$
\bar{c}_{p,O_2}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน	$\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}$
\bar{c}_{p,SO_2}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	$\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}$
C_{billet}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
C_{fuel}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
C_{scale}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสเกล	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
f_{open}	สัดส่วนของเวลาการเปิดประตูยั้งเหล็ก	-
g	อัตราเร่งของแรงโน้มถ่วง	m/s^2
$h_{air,inlet}$	ค่าเอนทาลปีของอากาศที่เข้าสู่ recuperator	kJ/kg
$h_{air,outlet}$	ค่าเอนทาลปีของอากาศที่ออกจาก recuperator	kJ/kg
$h_{air,outlet,max}$	ค่าเอนทาลปีของอากาศที่ออกจาก recuperator สูงสุด	kJ/kg
h_m	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
HV_{scale}	ค่าความร้อนที่คายออกจากการเปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์	kJ/kg
k	ค่าสภาพการนำความร้อน	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
\dot{m}_{air}	อัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	kg/s
$\dot{m}_{air,closed}$	อัตราไหลของอากาศในการเผาไหม้ ในช่วงปิดประตูยั้งเหล็ก	kg/s
$\dot{m}_{air,leak}$	อัตราไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา	kg/s
$\dot{m}_{air,open}$	อัตราไหลของอากาศในการเผาไหม้ ในช่วงเปิดประตูยั้งเหล็ก	kg/s
\dot{m}_{billet}	อัตราการผลิตของ billet ที่ออกจากเตา	kg/s

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\dot{m}_{flue, furnace}$	อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาไปยัง recuperator	kg/s
\dot{m}_{fuel}	อัตราไหลของเชื้อเพลิง	kg/s
$\dot{m}_{N_2, air}$	อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	kg/s
$\dot{m}_{O_2, air}$	อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	kg/s
$\dot{m}_{N_2, air, leak}$	อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนภายในอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา	kg/s
$\dot{m}_{O_2, air, leak}$	อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนภายในอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา	kg/s
$\dot{m}_{CO_2, flue, furnace}$	อัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในไอเสีย	kg/s
$\dot{m}_{H_2O, flue, furnace}$	อัตราไหลของไอน้ำภายในไอเสีย	kg/s
$\dot{m}_{N_2, flue, furnace}$	อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนภายในไอเสีย	kg/s
$\dot{m}_{O_2, flue, furnace}$	อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนภายในไอเสีย	kg/s
$\dot{m}_{SO_2, flue, furnace}$	อัตราไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในไอเสีย	kg/s
Nu_L	ค่า Nusselt number	-
Pr	ค่า Prandtl number	-
$\dot{Q}_{air, inlet}$	ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้าจาก recuperator	kW
$\dot{Q}_{air, leak}$	ความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา	kW
$\dot{Q}_{air, outlet}$	ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออกจาก recuperator	kW
$\dot{Q}_{air, preheat}$	ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการ preheat	kW
$\dot{Q}_{billet, sen}$	ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่ billet	kW
\dot{Q}_{comb}	ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	kW
$\dot{Q}_{flue, furnace}$	ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาไปยัง recuperator	kW
$\dot{Q}_{flue, recup}$	ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาเข้า	kW
$\dot{Q}_{flue, stack}$	ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาออก	kW
$\dot{Q}_{fuel, sen}$	ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า	kW
$\dot{Q}_{opening}$	ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี	kW
$\dot{Q}_{other, furnace}$	ความร้อนสูญเสียในส่วนอื่นๆ	kW
$\dot{Q}_{other, recup}$	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาและท่ออื่นๆ ของ recuperator	kW
$\dot{Q}_{scale, form}$	ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล	kW
$\dot{Q}_{scale, sen}$	ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล	kW
$\dot{Q}_{total, input}$	ความร้อนรวมที่เข้าสู่เตาเผา	kW
$\dot{Q}_{total, output}$	ความร้อนรวมที่ออกจากเตาเผา	kW

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
\dot{Q}_{wall}	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	kW
Ra_L	ค่า Rayleigh number	-
t_{open}	ช่วงเวลาระหว่างที่ประตูยึงเหล็กเปิด	s
t_{total}	ช่วงเวลาดั้งเดิม	s
$T_{air, preheat}$	อุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการ preheat	K
$T_{ambient}$	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	K
$T_{billet, in}$	อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา	K
$T_{billet, out}$	อุณหภูมิของเหล็กที่เข้าสู่เตาเผา	K
T_f	อุณหภูมิฟิล์ม	K
$T_{flue, furnace}$	อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย	K
$T_{flue, stack}$	อุณหภูมิของก๊าซไอเสียออกจาก recuperator	K
$T_{fuel, in}$	อุณหภูมิของเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่นด้วย heater	K
$T_{furnace}$	อุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก	K
$T_{scale, in}$	อุณหภูมิของสเกลที่เข้าสู่เตาเผา	K
$T_{scale, out}$	อุณหภูมิของสเกลที่ออกจากเตาเผา	K
T_{wall}	อุณหภูมิที่ผิวเตาด้านนอก	K
% scale	ร้อยละของสเกลที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณ billet ที่ผลิต	-
\dot{V}_{fuel}	ปริมาตรการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงต่อเวลาที่จับได้	m ³ /s
ρ_{fuel}	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	kg/m ³
α	การแพร่กระจายทางความร้อน	m ² /s
β	ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงปริมาตร	K ⁻¹
ε	ประสิทธิภาพของ recuperator	-
$\varepsilon_{opening}$	ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด	-
ε_{wall}	ค่า Emissivity ของผนังเตาด้านนอก	-
$\eta_{furnace}$	ประสิทธิภาพของเตาเผา	%
λ	ตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน	-
ν	ค่า Kinematic viscosity	m ² /s
σ	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์	W/m ² .K ⁴

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานหลักที่เชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้างและอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ทำให้ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าจึงมีการใช้พลังงานสูงเป็นลำดับต้นๆ ของประเทศ โดยอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและใช้พลังงานเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิตคือเตาเผาเหล็ก ซึ่งทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่เหล็กเพื่อทำให้เหล็กอ่อนตัวและง่ายต่อการขึ้นรูปต่อไป โดยทั่วไปอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กจะอยู่ที่ประมาณ 1,100 - 1,250 °C ซึ่งการทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงจำนวนมาก โดยพลังงานความร้อนส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำพวกน้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ ในสภาวะปัจจุบันราคาของเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้เชื้อเพลิงเป็นต้นทุนหนึ่งที่สำคัญรองมาจากต้นทุนของวัตถุดิบ ด้วยเหตุนี้การประหยัดการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงของเตาเผาจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดต้นทุนการผลิตเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับผู้ผลิตจากต่างประเทศ

การศึกษาวិธีการประหยัดการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงของเตาเผา เริ่มจากการทำความเข้าใจถึงพลังงานที่ใช้ของเตาเผา ซึ่งจะนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาเผาส่วนใหญ่เป็นการนำความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียกลับมาใช้ใหม่ และอีกส่วนหนึ่งเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาเผาโดยการลดปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกจากเตาเผา เช่น การลดความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดและผนังเตา หรือการลดความร้อนสูญเสียจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา เป็นต้น ซึ่งการลดปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกจากเตาเผานั้นเป็นการเพิ่มสัดส่วนพลังงานความร้อนให้เข้าสู่หินเหล็กมากขึ้น เป็นผลให้เตาเผามีความต้องการความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงลดลง ซึ่งถือว่าเป็นการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงวิธีหนึ่ง

การรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผาจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้สูญเสียพลังงานความร้อนออกจากเตาเผา โดยปัญหานี้เกิดขึ้นจากความดันภายในเตาเผาที่มีค่าเป็นลบเมื่อเทียบความดันบรรยากาศ ทำให้อากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องเปิดต่างๆ เป็นผลให้อากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาดังกล่าวพาความร้อนภายในเตาเผาออกไปพร้อมกับไอเสีย โดยถึงแม้ว่า

เตาเผาเกิดการรั่วของอากาศจากภายนอก แต่สัดส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ยังคงเดิม เนื่องจากบริเวณหัว burner จะเกิดแรงดันจากก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ทำให้อากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาไม่สามารถเข้าไปเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้โดยตรงหรือถ้าเกิดขึ้นก็มีปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่ส่วนใหญ่ปัญหาจากการรั่วของอากาศเข้าสู่เตาเผาจะส่งผลให้ความร้อนที่ออกไปกับไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนภายในเตาเผามีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณผิวเหล็กที่ถูกเผาไหม้รวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นเหล็กออกไซด์หรือที่เรียกว่าสเกล ซึ่งหากเหล็กเกิดสเกลมากจะทำให้ปริมาณของเนื้อเหล็กลดลง และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีดเหล็กลดลงด้วย

งานวิทยานิพนธ์นี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อทำการศึกษาค่าใช้พลังงานของเตาเผา รวมถึงสัดส่วนของพลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการรั่วของอากาศเข้าสู่เตาเผา รวมทั้งออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณสมดุลพลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผา และทำนายผลจากการรั่วของอากาศเข้าสู่เตาเผาได้ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาสมดุลพลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผา โดยเน้นความสำคัญไปที่พลังงานความร้อนสูญเสียจากการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา
2. ออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำนายปริมาณและพลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา รวมทั้งทำนายผลจากการลดปริมาณอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาเตาเผาเหล็กแบบ pusher type และใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง
2. ศึกษาระบบการทำงานของเตาเผาแบบต่อเนื่อง โดยมีลักษณะการทำงานแบบปกติหรือมีสภาวะการทำงานคงที่ (steady state)
3. ศึกษาสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผา โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดจริงจากภาคสนาม และนำข้อมูลที่ได้มาทำนายปริมาณและพลังงานความร้อนสูญเสียของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา รวมถึงการใช้พลังงานของเตาเผา

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนก่อนทำการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์
 - 1.1 ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้พลังงานของเตาเผา
 - 1.2 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและลักษณะการทำงานของเตาเผา
 - 1.3 ทำการตรวจวัดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมดุลมวล สมดุลความร้อนและประสิทธิภาพของเตาเผา
 - 1.4 วิเคราะห์สมดุลมวล สมดุลความร้อนและประสิทธิภาพของเตาเผา
 - 1.5 ศึกษาสัดส่วนของพลังงานความร้อนสูญเสียจากอากาศภายนอกที่รั่วเข้าเตาเผา
2. ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์
 - 2.1 ออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณสมดุลมวล สมดุลความร้อนและประสิทธิภาพของเตาเผา รวมถึงคำนวณปริมาณของอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา
 - 2.2 จัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เพื่อนำมาพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้สามารถทำนายผลจากการลดปริมาณของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา
3. วิเคราะห์และสรุปผล
4. รวบรวมข้อมูล และจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

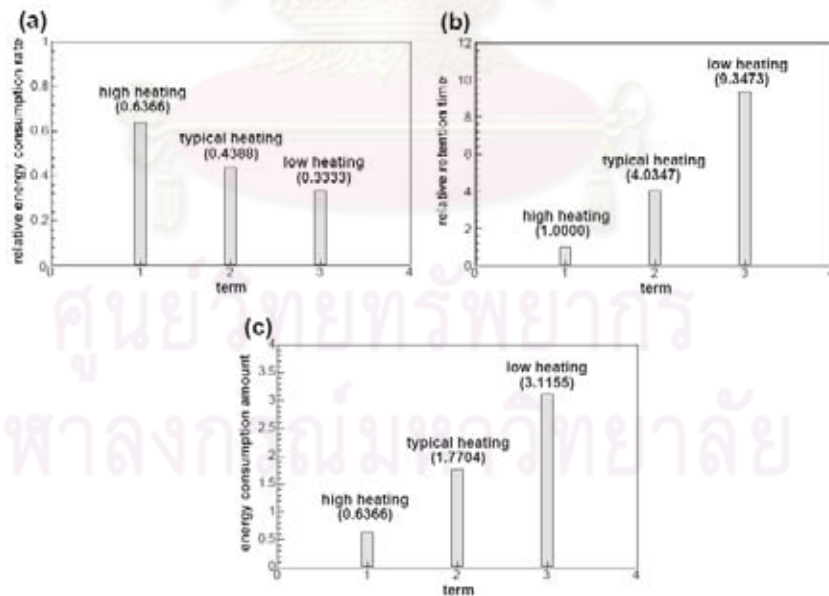
1. เพื่อเข้าใจถึงลักษณะการทำงานและสัดส่วนการใช้พลังงานของเตาเผา ซึ่งจะนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา
2. เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดจากการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผาที่มีต่อการใช้พลังงานของเตาเผา
3. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลจากการลดปริมาณของอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา รวมถึงการใช้พลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผา

บทที่ 2

เอกสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

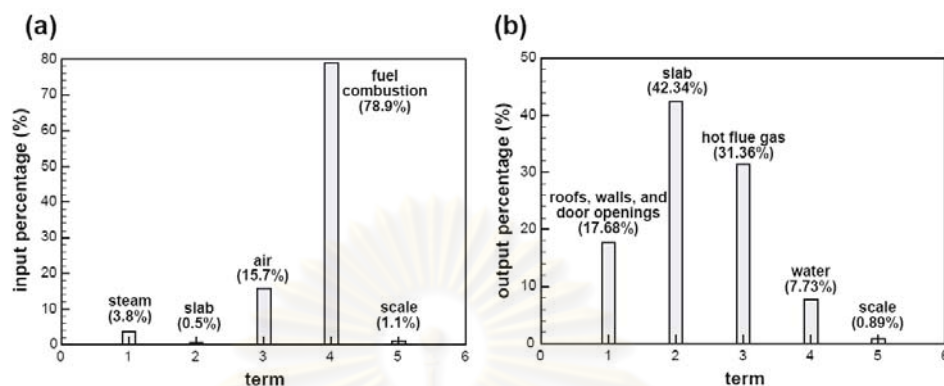
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

W.H. Chena, Y.C. Chung, J.L. Liu (2005) ได้ทำการศึกษาอัตราการใช้พลังงาน สมดุลพลังงาน และประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา โดยเตาเผามีขนาด 250 tonne/hr แต่ใช้งานจริงประมาณ 121 tonne/hr แบบ walking beam และใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ในการทำนายกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน billet เพื่อนำมาพิจารณาหาเวลาการสำหรับกักเก็บ billet ไว้ในเตาเผา (retention time) โดยทำการศึกษาอัตราการใช้พลังงานความร้อน 3 แบบ คือ high, typical, และ low heating rate ดังในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าหากเตาเผาผลิตสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีกว่า ถึงแม้ว่าอัตราการใช้พลังงานความร้อนสูงจะทำให้อัตราการสูญเสียพลังงานของเตาเผามากกว่าก็ตาม แต่เมื่อเทียบกับเวลาที่ billet จะต้องอยู่ภายในเตาเผาลดลงถือว่าความร้อนสูญเสียของเตาเผาเป็นสัดส่วนที่น้อยกว่า



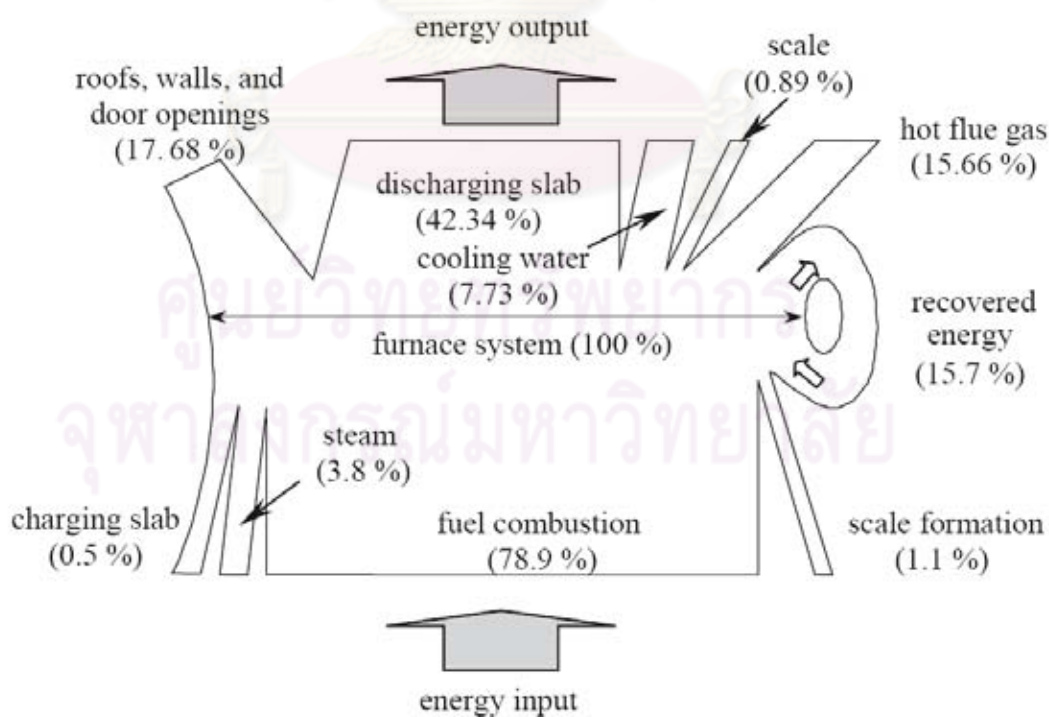
รูปที่ 2.1 (a) อัตราการใช้พลังงานความร้อน, (b) เวลาสำหรับการกักเก็บ Billet ไว้ในเตาเผา และ (c) ปริมาณการใช้พลังงานความร้อน

นอกจากนี้งานวิจัยได้ทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผา เพื่อนำมาใช้พิจารณา สมดุลพลังงานและประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผาที่มีสภาวะการทำงานคงที่ โดยรายละเอียด ของพลังงานที่เข้าและออกจากเตาเผาจะแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2



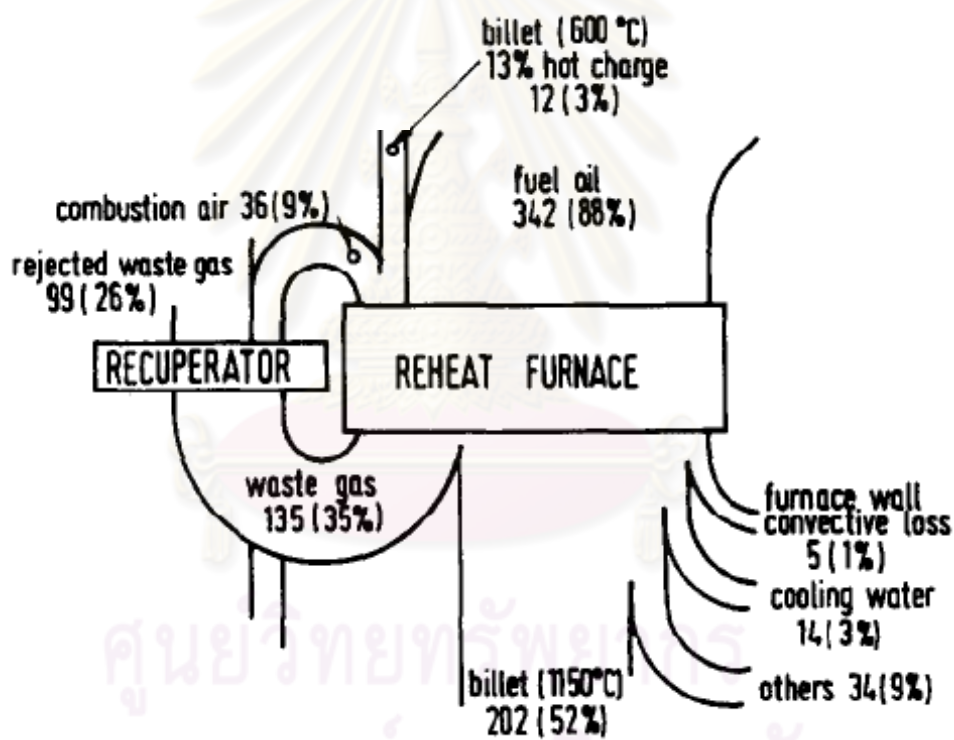
รูปที่ 2.2 ร้อยละของ (a) พลังงานขาเข้า (b) พลังงานขาออกของเตาเผา

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น เมื่อนำมาพิจารณาทั้งระบบของเตาเผาจะสามารถเขียน Sankey diagram ของเตาเผาได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 โดยประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา เท่ากับ 41.74% และเมื่อพิจารณา recuperator พบว่า ประสิทธิภาพของ heat exchange และ heat recovery มีค่าเท่ากับ 86.33% และ 47.76% ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 สมดุลพลังงานของเตาเผาทั้งระบบ

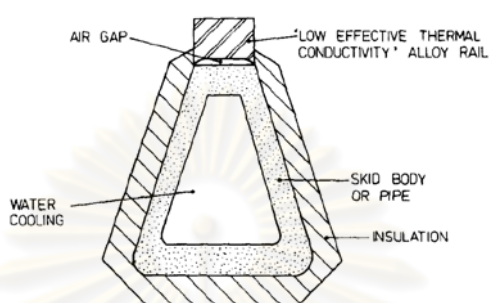
J.C. Ho, S.K. Chou, and T.T. Chandratilleke (1991) ได้ทำการศึกษาปริมาณการใช้พลังงานของโรงงานรีดเหล็กทั้งระบบ ตั้งแต่การนำวัตถุดิบมาหลอมด้วยเตาหลอมเหล็กแบบไฟฟ้า (Electric arc furnace) จากนั้นนำเหล็กมาพัดด้วยหม้อพักเหล็ก (Ladle) ก่อนที่จะนำเข้าสู่เครื่องหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous casting machines) เพื่อหล่อเหล็กให้เป็นแท่ง billet ก่อนนำเข้าสู่เตาเผา และเตาเผาจะทำการเผาเหล็กให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการสำหรับการรีดเหล็กก่อนเข้าเครื่องรีดเหล็ก (Rolling mills) โดยงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของการใช้พลังงานของเตาเผา ซึ่งเตาเผามีศักยภาพในการผลิตเฉลี่ยต่อเตาประมาณ 200,000 tonne/yr มีอัตราการใช้พลังงานประมาณ 342 kWhr/tonne และใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งการศึกษานี้จะทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูลเพื่อนำมาพิจารณาสมดุลพลังงานของเตาเผา โดยรายละเอียดต่างๆ แสดงด้วย Sankey diagram ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สมดุลพลังงานของเตาเผา

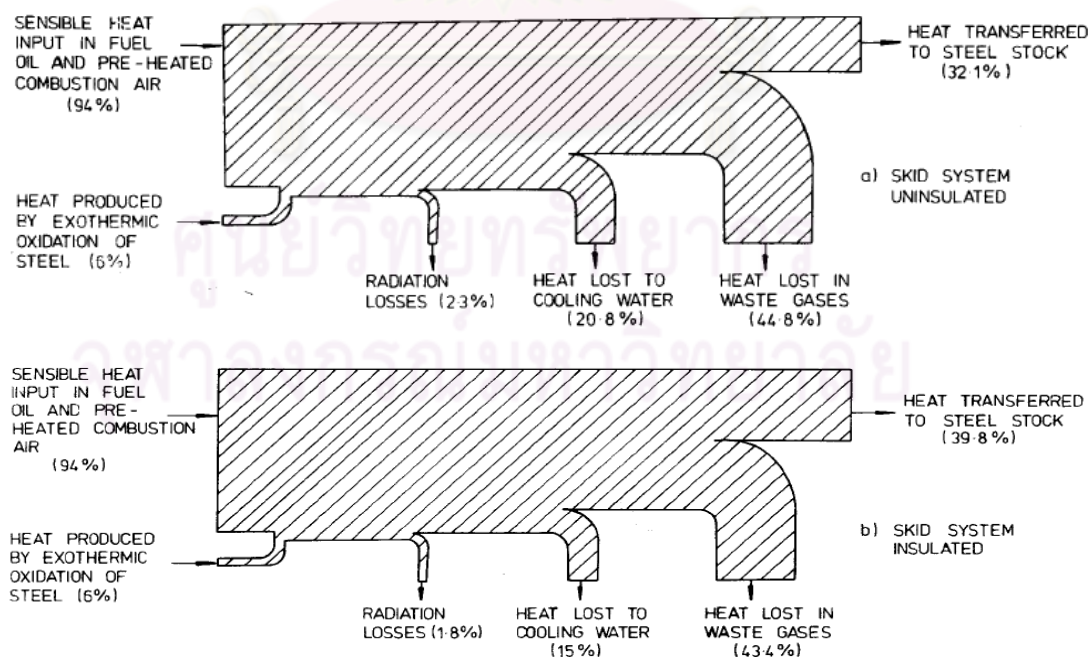
จากการพิจารณาสมดุลพลังงานของเตาเผา จะเห็นได้ว่า มีพลังงานส่วนหนึ่งได้มาจากการนำ billet ที่มีอุณหภูมิสูงเข้าสู่เตาเผา (hot charge) เนื่องจากระบบมีกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งทำให้อุณหภูมิของ billet ที่ออกจากเตาหลอมมีค่าประมาณ 600 °C ก่อนเข้าสู่เตาเผา และจากการพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา มีค่าเท่ากับ 62%

J. Ward, S. D. Probert (1975) ได้ทำการศึกษาการติดตั้งฉนวนให้กับรางเลื่อนของ billet ภายในเตาเผา เพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกไปกับรางเลื่อน งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูลของเตาเผาเบื้องต้นทั้งก่อนและหลังการติดตั้งฉนวนให้กับรางเลื่อน โดยเตาเผาที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบ pusher type ซึ่งระบายความร้อนของรางเลื่อนสำหรับรองรับ billet ด้วยน้ำ โดยมีรูปทรงและลักษณะการติดตั้งฉนวนของรางเลื่อน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5



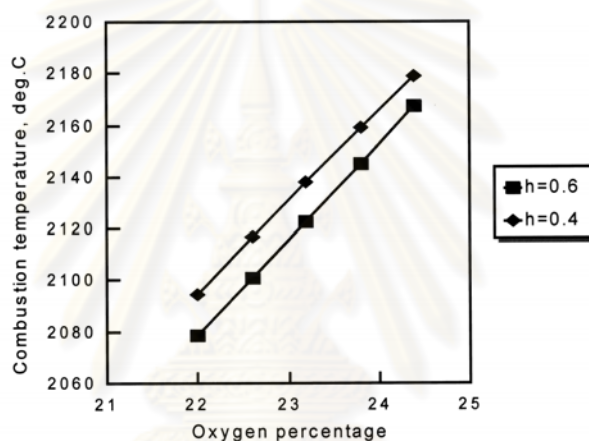
รูปที่ 2.5 ลักษณะการติดตั้งฉนวนของรางเลื่อนสำหรับรองรับ billet

จากข้อมูลเตาเผาเบื้องต้นพบว่า เตาเผาก่อนการปรับปรุงมีอัตราการใช้พลังงานประมาณ 890 kWhr/tonne และเมื่อทำการปรับปรุงมีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 693 kWhr/tonne และเมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานของเตาเผา โดยการเขียน Sankey diagram ของเตาเผาจะเห็นได้ว่าความร้อนที่สูญเสียไปกับการระบายความร้อนของรางเลื่อนด้วยน้ำมีค่าลดลง ดังรูปที่ 2.6

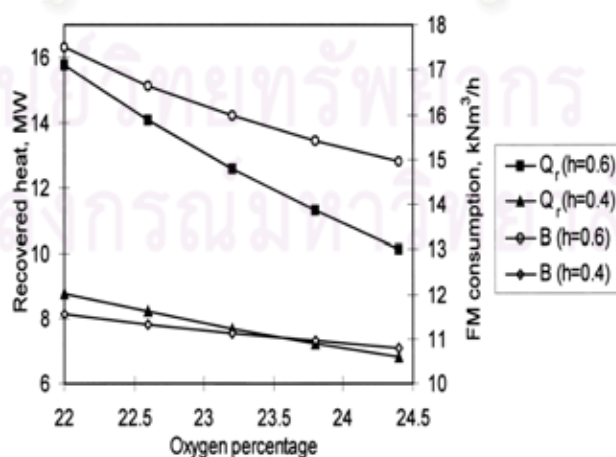


รูปที่ 2.6 สมดุลพลังงานของเตาเผา a) ก่อนติดตั้งฉนวน b) หลังติดตั้งฉนวน

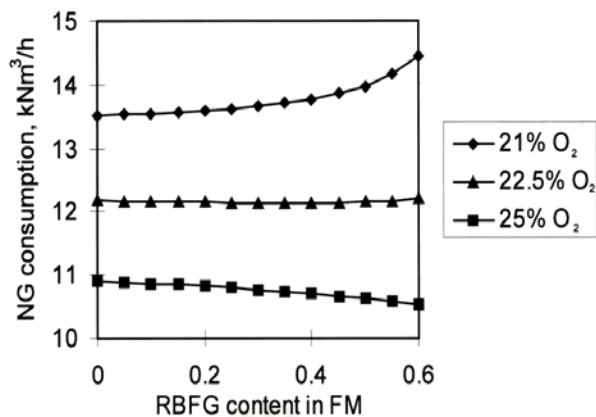
M. Bojic, M. Tomic (1998) ได้ทำการศึกษาวិธีการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง โดยการนำเอาความร้อนจากก๊าซร้อนของเตาหลอมเหล็ก (refuse blast furnace gas, RBF) มาผสมกับเชื้อเพลิง (fuel mixture, FM) และพิจารณาปริมาณของออกซิเจนที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้คือก๊าซธรรมชาติ (natural gas, NG) ซึ่งจากการศึกษาได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผา เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของออกซิเจนที่มีผลต่ออุณหภูมิจากการเผาไหม้และพลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat-recovery device, HRD) ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาที่มีการเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยต่างๆ ดังรูป 2.9 และ 2.10



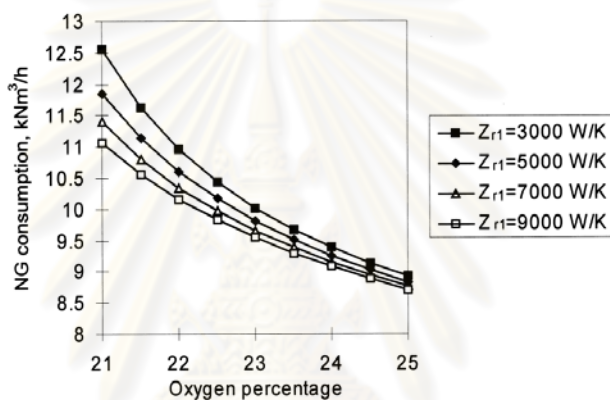
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงอุณหภูมิจากการเผาไหม้ในฟังก์ชันของ RBF และ O_2



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงพลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้และ FM ในฟังก์ชันของสัดส่วน RBF ภายใน fuel mixture และ O_2



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของสัดส่วน RFBG ภายใน FM และ O₂



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในฟังก์ชันของศักยภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน และ O₂

โดยการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของเตาเผา นี้ เพื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผา รวมถึงสัดส่วนของปริมาณพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นและพลังงานความร้อนสูญเสียในรูปแบบต่างๆ นั้น เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 เตาเผาเหล็ก (Reheating furnace)

เตาเผาเหล็กถือเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า โดยทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่เหล็กจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ $1,100 - 1,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้เหล็กง่ายต่อการรีดด้วยลูกรีดเพื่อแปรรูปไปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ ต่อไป ซึ่งพลังงานที่ใช้ของเตาเผาส่วนใหญ่เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น โดยทั่วไปเตาเผาจะแบ่งชนิดตามรูปแบบการเคลื่อนย้ายเหล็ก ซึ่งมีด้วยกัน 2 แบบ คือ

1) เตาเผาแบบผลักดัน (Pusher type) เป็นเตาเผาที่มีลักษณะการเคลื่อนย้ายเหล็กด้วยการผลักเหล็กเข้าและออกจากเตาเผา โดยเหล็กแต่ละแท่งภายในเตาเผาจะแนบติดกัน เมื่อเหล็กชิ้นใหม่ถูกผลักเข้าสู่เตาเผา ก็จะทำการผลักเหล็กที่อยู่ท้ายเตาออกจากเตาเผาไปสู่กระบวนการรีดเหล็กต่อไป

2) เตาเผาแบบคานเลื่อน (Walking beam) เป็นเตาเผาที่มีลักษณะการเคลื่อนย้ายเหล็กด้วยการเคลื่อนที่ของคานรองรับเหล็กภายในเตาเผา โดยคานเลื่อนจะทำหน้าที่ลำเลียงเหล็กเข้าและออกจากเตาเผาไปสู่กระบวนการรีดเหล็ก ซึ่งเตาเผาชนิดนี้จะมีการหล่อเย็นด้วยน้ำสำหรับคานเลื่อน

ลักษณะการทำงานของเตาเผาจะขึ้นอยู่กับการคิดอัตราค่าไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ ในที่นี้จะแบ่งลักษณะการทำงานของเตาเผาออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1) การทำงานแบบปกติ เป็นการทำงานของเตาเผาที่มีสภาวะคงที่ (Steady state) หรืออุณหภูมิภายในเตาเผาจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยมากลักษณะการทำงานของแบบนี้จะอยู่ในช่วงการคิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ off peak และ partial peak

2) การทำงานแบบหยุดเตา เป็นการทำงานของเตาเผาที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อทำความร้อนให้กับเตาเผา ทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าลดลง โดยมากลักษณะการทำงานของแบบนี้จะอยู่ในช่วงการคิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ on peak

3) การทำงานแบบเร่งเตา เป็นการทำงานของเตาเผาที่ต่อเนื่องจากการทำงานแบบหยุดเตา เนื่องจากการหยุดเตาทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องทำการเร่งเตาด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาให้มีค่าตามที่ต้องการก่อนที่เตาเผาจะเข้าสู่การทำงานแบบปกติ

3.2 สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กและ recuperator

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กและ recuperator จะพิจารณาภายใต้ข้อสมมุติฐาน ดังต่อไปนี้

1) พิจารณาระบบการทำงานของเตาเผาเหล็กแบบต่อเนื่องและมีสภาวะการทำงานแบบปกติหรือมีสภาวะสมดุลทางความร้อน (Thermal equilibrium) โดยความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาจะกลายเป็นความร้อนที่ออกจากเตาเผาทั้งหมด ซึ่งจะไม่มีการสะสมความร้อนอยู่ในเตาเผา

2) พิจารณาระบบการทำงานของเตาเผาเหล็กอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) หมายความว่า อุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กมีค่าเฉลี่ยคงที่และมีอุณหภูมิเดียวกันทั้งเตาเผา รวมทั้งอัตราการไหลของมวลไหลและอัตราของการถ่ายเทความร้อนข้ามผิวควบคุมนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม การคำนวณจำเป็นต้องพิจารณาการอนุรักษ์มวลและการอนุรักษ์พลังงานควบคู่กัน ดังต่อไปนี้

3.2.1 สมดุลมวลของเตาเผาเหล็ก

การพิจารณาปริมาตรควบคุมสำหรับระบบที่มีการถ่ายเทมวลกับสิ่งแวดล้อม จะสามารถนิยามกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) ดังสมการ

$$\begin{aligned} [\text{มวลไหลเข้าปริมาตรควบคุมทั้งหมด}] - [\text{มวลไหลออกจากปริมาตรควบคุมทั้งหมด}] \\ = [\text{การเปลี่ยนแปลงของมวลสุทธิภายในปริมาตรควบคุม}] \end{aligned}$$

$$\text{หรือ} \quad \sum m_i - \sum m_e = \Delta m_{CV} \quad (3.1)$$

พิจารณาในรูปสมการเชิงอัตรา

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e = \frac{dm_{CV}}{dt} \quad (3.2)$$

โดยการศึกษานี้พิจารณาระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) หรือไม่เปลี่ยนแปลงมวลสุทธิภายในปริมาตรควบคุม ($dm_{CV}/dt = 0$) ดังนั้นจากกฎการอนุรักษ์มวล จะได้ว่า

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e = \frac{dm_{CV}}{dt} = 0 \quad (3.3)$$

เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมคือเตาเผาเหล็ก จะสามารถคำนวณหาสมดุลมวลของเตาเผา ดังสมการต่อไปนี้

$$\sum \dot{m}_{i, \text{furnace}} = \sum \dot{m}_{e, \text{furnace}} \quad (3.4)$$

ในกรณีที่ความดันภายในเตาเผามีค่าเป็นลบ รายละเอียดของสมดุลมวลที่เข้าและออกจากเตาเผาในแต่ละส่วน มีดังนี้

มวลไหลเข้าสู่เตาเผาหลัก ประกอบด้วย

- 1) อัตราไหลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_{fuel})
- 2) อัตราไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องเปิดต่างๆ ($\dot{m}_{air,leak}$)
- 3) อัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (\dot{m}_{air})
- 4) อัตราไหลของเหล็กเข้าสู่เตาเผา ($\dot{m}_{billet,charge}$)

มวลไหลออกจากเตาเผาหลัก ประกอบด้วย

- 5) อัตราไหลของสเกลออกจากเตาเผา (\dot{m}_{scale})
- 6) อัตราไหลของเหล็กออกจากเตาเผา ($\dot{m}_{billet,discharge}$)
- 7) อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator ($\dot{m}_{flue,furnace}$)

- 1) อัตราไหลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_{fuel})

อัตราไหลของเชื้อเพลิง จะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงต่อเวลาที่จับได้ ซึ่งหากเป็นเชื้อเพลิงเหลวส่วนใหญ่จะอ่านค่าได้ในรูปของปริมาตรต่อเวลา แต่โดยทั่วไปอัตราการไหลที่นำไปใช้ในคำนวณจะเขียนอยู่ในรูปของมวลต่อเวลา ซึ่งจะคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{m}_{fuel} = \rho_{fuel} \dot{V}_{fuel} \quad (3.5)$$

เมื่อ ρ_{fuel} คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m^3)

\dot{V}_{fuel} คือปริมาตรการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงต่อเวลาที่วัดได้ (m^3/s)

- 2) อัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (\dot{m}_{air})

อัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณออกซิเจนภายในไอเสียในช่วงที่มีการปิดประตูเหล็ก เนื่องจากทำให้ปริมาณออกซิเจนที่เก็บได้จะไม่รวมกับปริมาณออกซิเจนของอากาศรั่วเข้าสู่เตา จากนั้นนำปริมาณออกซิเจนที่เก็บได้คำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (AF_{actual}) โดยรายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อ 3.4 เมื่อทราบค่า AF_{actual} จะสามารถคำนวณอัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังสมการ

$$\dot{m}_{air} = AF_{actual} \times \dot{m}_{fuel} \quad (3.6)$$

เมื่อ AF_{actual} คืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง ($\text{kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$)

3) อัตราไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ($\dot{m}_{air,leak}$)

อัตราไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา เกิดจากความดันภายในเตามีค่าเป็นลบ หากเปิดประตูยิงเหล็กทำให้อากาศจากภายนอกรั่วไหลเข้าสู่เตา โดยจะสังเกตได้จากปริมาณออกซิเจนภายในไอเสียที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนในขณะปิดประตูยิงเหล็ก ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา จะสามารถคำนวณได้จากผลต่างของอัตราการไหลของอากาศในช่วงปิดและเปิดประตูยิงเหล็ก ดังสมการ

$$\text{อัตราการไหลของอากาศในช่วงปิดประตูยิงเหล็ก} \quad ; \quad \dot{m}_{air,closed} = AF_{actual,closed} \times \dot{m}_{fuel} \quad (3.7)$$

$$\text{อัตราการไหลของอากาศในช่วงเปิดประตูยิงเหล็ก} \quad ; \quad \dot{m}_{air,open} = AF_{actual,open} \times \dot{m}_{fuel} \quad (3.8)$$

เนื่องจากเตาเผาเหล็กไม่ได้เปิดประตูยิงเหล็กตลอดเวลา แต่มีการเปิดและปิดประตูยิงเหล็กสลับกัน ทำให้จำเป็นต้องหาสัดส่วนเวลาของการเปิดประตูยิงเหล็ก (f_{open}) ดังสมการ

$$f_{open} = \frac{t_{open}}{t_{total}} \quad (3.9)$$

เมื่อ t_{open} คือระยะเวลาในช่วงที่เปิดประตูยิงเหล็ก (s)

t_{total} คือระยะเวลาทั้งหมดที่รวมทั้งปิดและเปิดประตูยิงเหล็ก (s)

ดังนั้นอัตราไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา จะสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{air,leak} = f_{open} \times (\dot{m}_{air,open} - \dot{m}_{air,closed}) \quad (3.10)$$

4) อัตราไหลของเหล็กเข้าสู่เตาเผา ($\dot{m}_{billet,charge}$)

อัตราไหลของเหล็กเข้าสู่เตาเผา จะสามารถคำนวณได้จากอัตราการผลิตเหล็กของเตาเผา และน้ำหนักของเหล็กต่อแท่ง ดังสมการ

$$\dot{m}_{billet,charge} = N_{billet} * W_{billet} / 3600 \quad (3.11)$$

เมื่อ N_{billet} คืออัตราการผลิตเหล็ก (แท่ง/ชั่วโมง)

W_{billet} คือน้ำหนักของเหล็กต่อแท่ง (kg/แท่ง)

5) อัตราไหลของสเกลออกจากเตาเผา (\dot{m}_{scale})

อัตราไหลของสเกลออกจากเตาเผา จะสามารถคำนวณได้จากร้อยละของสเกลที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณของเหล็กที่ผลิต ดังสมการ

$$\dot{m}_{scale} = \dot{m}_{billet,charge} * \left(\frac{\%scale}{100} \right) \quad (3.12)$$

เมื่อ $\%scale$ คือเปอร์เซ็นต์ของสเกลที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณของเหล็กที่ผลิต

6) อัตราไหลของเหล็กออกจากเตาเผา ($\dot{m}_{billet,discharge}$)

อัตราไหลของเหล็กออกจากเตาเผาสามารถคำนวณจากอัตราไหลของเหล็กเข้าสู่เตาเผา กับอัตราไหลของสเกลออกจากเตาเผา ดังสมการ

$$\dot{m}_{billet,discharge} = \dot{m}_{billet,charge} - \dot{m}_{scale} \quad (3.13)$$

7) อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator ($\dot{m}_{flue,furnace}$)

อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator จะสามารถหาได้จากกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) ดังสมการ

$$\dot{m}_{flue,furnace} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air} + \dot{m}_{air,leak} + \dot{m}_{billet,charge} - \dot{m}_{billet,discharge} - \dot{m}_{scale} \quad (3.14)$$

3.2.2 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

การพิจารณาปริมาตรควบคุมสำหรับระบบที่มีการถ่ายเทมวลกับสิ่งแวดล้อม ทำให้มีพลังงานส่วนหนึ่งไหลเข้าและออกไปพร้อมกับการถ่ายเทของมวล ซึ่งพลังงานเหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม โดยอาศัยหลักการของการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ดังสมการ

$$Q_{CV} - W_{CV} + \sum E_{in} - \sum E_{out} = \Delta E_{CV} \quad (3.15)$$

เมื่อ Q_{CV} คือพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ข้ามผิวควบคุมของปริมาตรควบคุม

W_{CV} คืองานทั้งหมดที่ข้ามผิวควบคุมของปริมาตรควบคุม

$\sum E_{in}$ คือพลังงานทั้งหมดของมวลที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุม

$\sum E_{out}$ คือพลังงานทั้งหมดของมวลที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม

ΔE_{CV} คือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสุทธิในปริมาตรควบคุม

พิจารณาในรูปสมการเชิงอัตรา

$$\dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + gZ_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) = \frac{dE_{CV}}{dt} \quad (3.16)$$

เมื่อพิจารณาปริมาณควบคุมคือเตาเผาเหล็กและระบบของเตาเผาอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) สามารถคำนวณสมดุลพลังงาน (Energy balance) ของเตาเผา ดังสมการต่อไปนี้

$$[\text{พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก}] = [\text{พลังงานความร้อนไหลออกจากเตาเผาเหล็ก}]$$

$$\sum \dot{Q}_i = \sum \dot{Q}_e \quad (3.17)$$

ในกรณีที่ความดันภายในเตาเผามีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ และมีสภาวะการทำงานแบบปกติ โดยรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจากเตาเผา มีดังนี้

พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง
- 2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า
- 3) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล
- 4) ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการอุ่นอากาศที่ recuperator
- 5) ความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- 6) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก
- 7) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator
- 8) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล
- 9) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี
- 10) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา
- 11) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เช่น หลังคาและพื้น เป็นต้น

โดยการคำนวณพลังงานความร้อนของแต่ละตัวมีการกำหนดค่าอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) และความดันอ้างอิง (P_0) ไว้ที่ 25°C และ 1 atm ตามลำดับ การกำหนดเพื่อให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล

1) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (\dot{Q}_{comb})

ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นพลังงานความร้อนหลักของเตาเผาที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีไปเป็นพลังงานทางความร้อน ซึ่งโดยมากจะสามารถคำนวณหาได้จากอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงกับค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง (High heating value, HHV) โดยค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงจะพิจารณาน้ำที่ได้จากการเผาไหม้อยู่ในสภาวะ

ของเหลว แต่ในทางปฏิบัติอุณหภูมิของไอเสี่ยจะสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ทำให้น้ำที่มีอยู่ในไอเสี่ยมีสถานะเป็นก๊าซ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (Low heating value, LHV) มาใช้ในการคำนวณ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{V}_{fuel} LHV \quad (3.18)$$

เมื่อ \dot{V}_{fuel} คือปริมาตรการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงต่อเวลาที่วัดได้ (liter/s)
 LHV คือค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (MJ/liter)

2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า ($\dot{Q}_{fuel, sen}$)

ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงด้วย heater ก่อนจะป้อนเข้าสู่ burner โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิง และสามารถทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นละอองฝอยได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้น้ำมันเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับอากาศได้ดีขึ้น โดย $\dot{Q}_{fuel, sen}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{fuel, sen} = \rho_{fuel} \dot{V}_{fuel} C_{fuel} (T_{fuel, in} - T_0) \quad (3.19)$$

เมื่อ ρ_{fuel} คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/liter)
 \dot{V}_{fuel} คือปริมาตรการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงต่อเวลาที่วัดได้ (liter/s)
 C_{fuel} คือความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 1.884 (kJ/kg-K)
 $T_{fuel, in}$ คืออุณหภูมิของเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่นด้วย heater (K)
 T_0 คืออุณหภูมิอ้างอิง (K)

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

ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล เป็นพลังงานความร้อนที่เกิดจากกระบวนการคายความร้อนของสเกล ซึ่งการก่อตัวของสเกลเกิดจากการรวมตัวของเหล็กกับออกซิเจนภายในอากาศ กลายเป็นเหล็กออกไซด์ โดย $\dot{Q}_{scale, form}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{scale, form} = \dot{m}_{scale} HV_{scale} \quad (3.20)$$

เมื่อ \dot{m}_{billet} คืออัตราการผลิตของเหล็กที่ออกจากเตา (kg/s)
 $\% scale$ คือร้อยละของสเกลที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณ billet ที่ผลิต
 HV_{scale} คือค่าความร้อนที่คายออกจากการเปลี่ยนเหล็กและออกซิเจนไปเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งมีค่า 5,161 kJ/kg_{scale}

4) ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการอุ่นอากาศที่ recuperator ($\dot{Q}_{air,preheat}$)

ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการ preheat อากาศที่ recuperator เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการ preheat อากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าสู่ burner ซึ่งความร้อนส่วนนี้ได้มาจากการนำความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียกลับมาใช้ใหม่ด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือ recuperator โดย $\dot{Q}_{air,preheat}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{air,preheat} = \dot{m}_{air} (h_{air,preheat} - h_0) \quad (3.21)$$

หรือ

$$\dot{Q}_{air,preheat} = \sum \frac{\dot{m}_{air}}{M_{air}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,preheat}} \bar{c}_{p,air} dT \right) \quad (3.22)$$

พิจารณาองค์ประกอบของอากาศให้มีเพียงก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจน จะได้ว่า

$$\dot{Q}_{air,preheat} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,preheat}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,preheat}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \quad (3.23)$$

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

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

M_{O_2} คือมวลโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเท่ากับ 31.999 (kg/kmol)

M_{N_2} คือมวลโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 28.013 (kg/kmol)

\bar{c}_{p,O_2} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน โดยอยู่ในรูปสมการ
 $25.48 + 1.52 \times 10^{-2} T - 0.7155 \times 10^{-5} T^2 + 1.312 \times 10^{-9} T^3$.

\bar{c}_{p,N_2} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน โดยอยู่ในรูปสมการ
 $28.90 - 0.1571 \times 10^{-2} T + 0.8081 \times 10^{-5} T^2 - 2.873 \times 10^{-9} T^3$.

$T_{air,preheat}$ คืออุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการ preheat (K)

5) ความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ($\dot{Q}_{air,leak}$)

ความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศภายนอกกับอุณหภูมิข้างใน โดยการรั่วของอากาศเข้าสู่เตาเผาเกิดจากความดันภายในเตาเผาต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่ง $\dot{Q}_{air,leak}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{air,leak} = \frac{\dot{m}_{O_2,air,leak}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air,leak}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \quad (3.24)$$

เมื่อ $\dot{m}_{O_2,air,leak}$ คืออัตราไหลของก๊าซออกซิเจนจากอากาศภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผา (kg/s)
 $\dot{m}_{N_2,air,leak}$ คืออัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนจากอากาศภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผา (kg/s)
 $T_{ambient}$ คืออุณหภูมิของอากาศภายนอกเตา ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (K)

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

ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก เป็นพลังงานความร้อนที่เหล็กสามารถกักเก็บได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของเหล็กสูงขึ้นก่อนเข้าสู่กระบวนการรีดเหล็กต่อไป เพื่อให้ง่ายต่อการรีดเหล็ก โดย $\dot{Q}_{billet, sen}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{billet, sen} = \dot{m}_{billet} C_{billet} (T_{billet, out} - T_{billet, in}) \quad (3.25)$$

เมื่อ \dot{m}_{billet} คืออัตราการผลิตของเหล็กที่ออกจากเตา (kg/s)
 C_{billet} คือความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก มีค่าเท่ากับ 0.78 (kJ/kg.K)
 $T_{billet, out}$ คืออุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา โดยทั่วไปจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาประมาณ 50 องศาเซลเซียส (°C)
 $T_{billet, in}$ คืออุณหภูมิของเหล็กที่เข้าสู่เตาเผา โดยจะประมาณให้เท่ากับอุณหภูมิของอากาศนอกเตา (K)

7) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator ($\dot{Q}_{flue, furnace}$)

ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator เป็นพลังงานความร้อนที่ออกไปกับไอเสีย ซึ่งพลังงานความร้อนส่วนนี้จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ recuperator เนื่องจากพลังงานความร้อนส่วนนี้ยังมีค่าสูงอยู่ โดย $\dot{Q}_{flue, furnace}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{flue, furnace} = \dot{m}_{flue, furnace} (h_{flue, furnace} - h_0) \quad (3.26)$$

หรือ

$$\dot{Q}_{flue, furnace} = \sum \frac{\dot{m}_{flue, furnace}}{M_{flue, furnace}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, flue, furnace} dT \right) \quad (3.27)$$

จากการพิจารณาผลิตภัณฑ์ของสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา ประกอบด้วย CO_2 , H_2O , SO_2 , O_2 และ N_2 ซึ่งจะสามารถเขียนสมการในแต่ละองค์ประกอบของก๊าซ ดังสมการต่อไปนี้

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

$$\begin{aligned}
& + \frac{\dot{m}_{SO_2, flue, furnace}}{M_{SO_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, SO_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{O_2, flue, furnace}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, O_2} dT \right) \\
& + \frac{\dot{m}_{N_2, flue, furnace}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, N_2} dT \right) \quad (3.28)
\end{aligned}$$

เมื่อ	$\dot{m}_{CO_2, flue, furnace}$	คืออัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในไอเสีย (kg/s)
	$\dot{m}_{H_2O, flue, furnace}$	คืออัตราไหลของไอน้ำภายในไอเสีย (kg/s)
	$\dot{m}_{SO_2, flue, furnace}$	คืออัตราไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในไอเสีย (kg/s)
	$\dot{m}_{O_2, flue, furnace}$	คืออัตราไหลของก๊าซออกซิเจนภายในไอเสีย (kg/s)
	$\dot{m}_{N_2, flue, furnace}$	คืออัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนภายในไอเสีย (kg/s)
	M_{CO_2}	คือมวลโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 44.01 (kg/kmol)
	M_{H_2O}	คือมวลโมเลกุลของไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 18.015 (kg/kmol)
	M_{SO_2}	คือมวลโมเลกุลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 64.063 (kg/kmol)
	M_{N_2}	คือมวลโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 28.013 (kg/kmol)
	\bar{c}_{p, CO_2}	คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รูปสมการคือ $22.26 + 5.981 \times 10^{-2} T - 3.501 \times 10^{-5} T^2 + 7.469 \times 10^{-9} T^3$.
	\bar{c}_{p, H_2O}	คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ รูปสมการคือ $32.24 + 0.1923 \times 10^{-2} T + 1.055 \times 10^{-5} T^2 - 3.595 \times 10^{-9} T^3$.
	\bar{c}_{p, SO_2}	คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ รูปสมการคือ $25.78 + 5.795 \times 10^{-2} T - 3.812 \times 10^{-5} T^2 + 8.612 \times 10^{-9} T^3$.
	$T_{flue, furnace}$	คืออุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (K)

8) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล ($\dot{Q}_{scale, sen}$)

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

$$\dot{Q}_{scale, sen} = \dot{m}_{scale} C_{scale} (T_{scale, out} - T_{scale, in}) \quad (3.29)$$

เมื่อ	C_{scale}	คือความจุความร้อนจำเพาะของสเกล มีค่าเท่ากับ 0.90 (kJ/kg.K)
	$T_{scale, out}$	คืออุณหภูมิของสเกลที่ออกจากเตาเผา โดยประมาณให้เท่ากับอุณหภูมิของ billet ที่ออกจากเตาเผา (K)

$T_{scale,in}$ คืออุณหภูมิของสเกลที่เข้าสู่เตาเผา โดยประมาณให้เท่ากับอุณหภูมิของ billet ที่เข้าสู่เตาเผา (K)

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

ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด โดยปริมาณของพลังงานความร้อนสูญเสียขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิดและอุณหภูมิภายในเตาเผา โดย $\dot{Q}_{opening}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{opening} = C_t C_b \epsilon_{opening} \sigma A_{opening} (T_{furnace}^4 - T_{ambient}^4) \tag{3.30}$$

เมื่อ C_t คือตัวคูณสำหรับปรับแก้ในส่วนของสัดส่วนเวลาในการเปิดปิดของช่องเปิดที่มีผลต่อการแผ่รังสีความร้อน

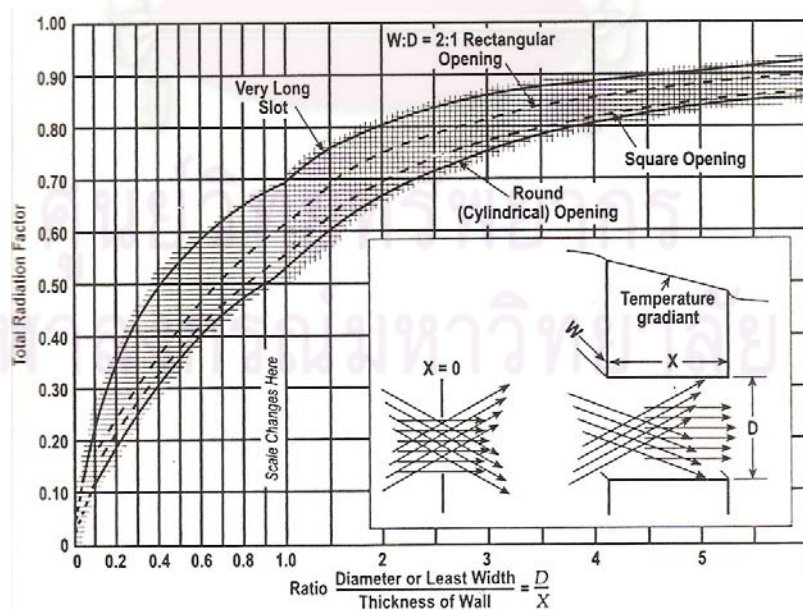
C_b คือตัวคูณสำหรับปรับแก้ในส่วนของอุปกรณ์หรือที่บัง ซึ่งคิดตามสัดส่วนของพื้นที่ของที่บังต่อพื้นที่ช่องเปิดทั้งหมด

$\epsilon_{opening}$ คือค่า Effective emissivity ของช่องเปิด สามารถหาได้จากรูปที่ 3.1

σ คือค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} (W/m².K⁴)

$A_{opening}$ คือพื้นที่ของช่องเปิด (m²)

$T_{furnace}$ คืออุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก (K)



รูปที่ 3.1 ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด ($\epsilon_{opening}$)

(Bureau of Energy Efficiency,2006)

10) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา (\dot{Q}_{wall})

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการนำความร้อนจากภายในเตาเผาผ่านผนังของเตาไปสู่ผิวเตาด้านนอก จากนั้นความร้อนบริเวณผิวเตาด้านนอกจะถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม โดยการพาความร้อนตามธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่ง \dot{Q}_{wall} สามารถหาได้จากการวัดอุณหภูมิของผิวเตาด้านนอก ดังสมการ

$$\dot{Q}_{wall} = h_m A_{wall} (T_{wall} - T_{ambient}) + \varepsilon_{wall} \sigma A_{wall} (T_{wall}^4 - T_{ambient}^4) \quad (3.31)$$

เมื่อ h_m คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$)
 A_{wall} คือพื้นที่ของผิวด้านนอกของเตา (m^2)
 T_{wall} คืออุณหภูมิที่ผิวเตาด้านนอก (K)
 ε_{wall} คือค่า Emissivity ของผนังเตาเผา มีค่าประมาณ 0.9

พิจารณาการพาความร้อนตามธรรมชาติของการไหลแบบราบเรียบบนแผ่นระนาบแนวดิ่ง

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} \quad (3.32)$$

โดยค่า Nusselt number จะขึ้นกับลักษณะการไหลของของไหล

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} ; 10^{-1} < Ra_L < 10^9, \text{ Laminar flow} \quad (3.33)$$

$$\overline{Nu}_L^{1/2} = 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} ; 10^9 < Ra_L < 10^{12}, \text{ Turbulent flow} \quad (3.34)$$

โดยค่า Rayleigh number สามารถหาได้จาก

$$Ra_L = \frac{g \beta L^3 (T_{wall} - T_{ambient})}{\nu \alpha} \quad (3.35)$$

โดยที่

$$\beta = 1/T_f ; T_f = \frac{(T_{wall} + T_{ambient})}{2} \quad (3.36)$$

เมื่อ \overline{Nu}_L คือค่า Nusselt number เฉลี่ย
 L คือความสูงของเตาเผา (m)
 Ra_L คือค่า Rayleigh number

- g คืออัตราค่าการเร่งของแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ $0.98 \text{ (m/s}^2\text{)}$
- β คือค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงปริมาตร (K^{-1})
- T_f คืออุณหภูมิฟิล์มโดยประมาณ (K)
- k คือค่าสภาพการนำความร้อน (W/m.K) โดยเขียนอยู่ในรูปสมการ
 $(-0.0027T_f^2 + 9.3957T_f + 51.4286) \times 10^{-5}$
- Pr คือค่า Prandtl number โดยเขียนอยู่ในรูปสมการ
 $(0.0005T_f^2 - 0.5035T_f + 815.8571) \times 10^{-3}$
- ν คือค่า Kinematic viscosity (m^2/s) โดยเขียนอยู่ในรูปสมการ
 $(0.0097T_f^2 + 3.6976T_f - 387.5714) \times 10^{-8}$
- α คือการแพร่กระจายทางความร้อน (m^2/s) โดยเขียนอยู่ในรูปสมการ
 $(0.0146T_f^2 + 5.3893T_f - 678.5714) \times 10^{-8}$

11) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ($\dot{Q}_{other, furnace}$)

ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่ไม่สามารถหาค่าได้ เช่น ความร้อนสูญเสียผ่านหลังคาและพื้นเตา เป็นต้น จึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อหาสมดุลพลังงาน (Energy balance) ของเตาเผา ดังสมการ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{other, furnace} = & (\dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel, sen} + \dot{Q}_{scale, form} + \dot{Q}_{air, preheat} + \dot{Q}_{air, leak}) \\ & - (\dot{Q}_{billet, sen} + \dot{Q}_{flue, furnace} + \dot{Q}_{scale, sen} + \dot{Q}_{opening} + \dot{Q}_{wall}) \end{aligned} \quad (3.37)$$

3.2.3 ประสิทธิภาพของเตาเผา (Furnace efficiency)

ประสิทธิภาพของเตาเผา ($\eta_{furnace}$) คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป ในกรณีนี้พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์คือความร้อนที่เข้าสู่เหล็ก ($\dot{Q}_{billet, sen}$) ส่วนพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปคือความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (\dot{Q}_{comb}) รวมกับพลังงานความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า ($\dot{Q}_{fuel, sen}$) โดยสามารถคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผา ดังสมการ

$$Furnace \ efficiency = \frac{\dot{Q}_{billet, sen}}{\dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel, sen}} \times 100\% \quad (3.38)$$

3.2.4 สมดุลมวลของ recuperator

เนื่องด้วย recuperator เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียที่ออกจากเตาเผา กับอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมคือ recuperator จะสามารถแสดง รายละเอียดของสมดุลมวลที่เข้าและออกจาก recuperator ดังต่อไปนี้

มวลไหลเข้าสู่ recuperator ประกอบด้วย

- 1) อัตราไหลของไอเสียเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{flue,recup}$)
- 2) อัตราไหลของอากาศเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{air,inlet}$)

มวลไหลออกจาก recuperator ประกอบด้วย

- 3) อัตราไหลของไอเสียที่ออกจาก recuperator ไปสู่ปล่องไอเสีย ($\dot{m}_{flue,stack}$)
- 4) อัตราไหลของอากาศออกจาก recuperator ($\dot{m}_{air,outlet}$)

- 1) อัตราไหลของไอเสียเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{flue,recup}$)

อัตราไหลของไอเสียเข้าสู่ recuperator เป็นอัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผา เพื่อใช้ในการอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (3.14) โดยหากพิจารณาว่าไม่มีการรั่วไหลของไอเสียออกสู่ภายนอกบริเวณท่อส่งไอเสียระหว่างเตาเผา กับ recuperator จะสามารถหา $\dot{m}_{flue,recup}$ ได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{flue,recup} = \dot{m}_{flue,furnace} \quad (3.39)$$

- 2) อัตราไหลของอากาศเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{air,inlet}$)

อัตราไหลของอากาศเข้าสู่ recuperator เป็นอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงก่อนทำการอุ่นด้วยไอเสีย ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (3.6) โดยหากไม่มีการรั่วไหลของอากาศบริเวณ recuperator และท่อส่งอากาศ โดยจะสามารถหา $\dot{m}_{air,inlet}$ ได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{air,inlet} = \dot{m}_{air,preheat} \quad (3.40)$$

- 3) อัตราไหลของไอเสียที่ออกจาก recuperator ไปสู่ปล่องไอเสีย ($\dot{m}_{flue,stack}$)

อัตราไหลของไอเสียที่ออกจาก recuperator ไปสู่ปล่องไอเสียจะมีค่าเท่ากับอัตราไหลของไอเสียเข้าสู่ recuperator เมื่อพิจารณาว่าไม่มีการรั่วไหลของไอเสียบริเวณ recuperator และท่อส่งไอเสีย รวมทั้งไม่มีการผสมกันของไอเสียกับอากาศในระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะสามารถหา $\dot{m}_{flue,stack}$ ได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{flue,stack} = \dot{m}_{flue,recup} \quad (3.41)$$

4) อัตราไหลของอากาศออกจาก recuperator ($\dot{m}_{air,outlet}$)

อัตราไหลของอากาศออกจาก recuperator เป็นอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงหลังจากการอุ่น ซึ่งหากไม่มีการรั่วของอากาศบริเวณ recuperator และท่อส่งอากาศระหว่าง recuperator กับเตาเผา จะสามารถหา $\dot{m}_{air,outlet}$ ได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{air,outlet} = \dot{m}_{air,inlet} \quad (3.42)$$

3.2.5 สมดุลความร้อนของ recuperator

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมคือ recuperator และมีระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) สามารถคำนวณหาสมดุลความร้อนของ recuperator ได้โดยรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจาก recuperator มีดังนี้

พลังงานความร้อนเข้าสู่ recuperator ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้า
- 2) ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า

พลังงานความร้อนออกจาก recuperator ประกอบด้วย

- 3) ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาออก
- 4) ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออก
- 5) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้า ($\dot{Q}_{flue,recup}$)

ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้าเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาและเข้าสู่ recuperator โดยทั่วไปหากไม่มีการรั่วของท่อส่งไอเสียระหว่างเตาเผากับ recuperator โดย $\dot{Q}_{flue,recup}$ จะสามารถประมาณให้เท่ากับ $\dot{Q}_{flue,furnace}$ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{flue,recup} = \dot{Q}_{flue,furnace} \quad (3.43)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{flue,furnace}$ คือความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผา (W)

2) ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า ($\dot{Q}_{air,inlet}$)

ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า เป็นพลังงานความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศภายนอกกับอุณหภูมิอ้างอิง โดย $\dot{Q}_{air,inlet}$ จะสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{air,inlet} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,inlet}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,inlet}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \quad (3.44)$$

- เมื่อ $\dot{m}_{O_2,air}$ คืออัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (kg/s)
 $\dot{m}_{N_2,air}$ คืออัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (kg/s)
 $T_{air,inlet}$ คืออุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการ preheat (K)

3) ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาออก ($\dot{Q}_{flue,stack}$)

ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาออก เป็นพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากไอเสียที่ออกจาก recuperator หลังจากการแลกเปลี่ยนความร้อนของไอเสียกับอากาศ จากนั้นทำการระบายไอเสียไปยังปล่องสูบบรรยากาศ และหากไม่มีการรั่วของ recuperator จะสามารถประมาณค่า $\dot{m}_{flue,stack}$ มีค่าเท่ากับ $\dot{m}_{flue,furnace}$ โดย $\dot{Q}_{flue,stack}$ จะสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{flue,stack} &= \frac{\dot{m}_{CO_2,flue,stack}}{M_{CO_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,CO_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{H_2O,flue,stack}}{M_{H_2O}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,H_2O} dT \right) \\ &+ \frac{\dot{m}_{SO_2,flue,stack}}{M_{SO_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,SO_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{O_2,flue,stack}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) \\ &+ \frac{\dot{m}_{N_2,flue,stack}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \end{aligned} \quad (3.45)$$

- เมื่อ $\dot{m}_{CO_2,flue,stack}$ คืออัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในไอเสีย (kg/s)
 $\dot{m}_{H_2O,flue,stack}$ คืออัตราไหลของไอน้ำภายในไอเสีย (kg/s)
 $\dot{m}_{SO_2,flue,stack}$ คืออัตราไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในไอเสีย (kg/s)
 $\dot{m}_{O_2,flue,stack}$ คืออัตราไหลของก๊าซออกซิเจนภายในไอเสีย (kg/s)
 $\dot{m}_{N_2,flue,stack}$ คืออัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนภายในไอเสีย (kg/s)
 $T_{flue,stack}$ คืออุณหภูมิของก๊าซไอเสียออกจาก recuperator (K)

4) ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออก ($\dot{Q}_{air,outlet}$)

ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออก เป็นพลังงานความร้อนจากการอุ่นอากาศด้วยไอเสียที่ recuperator เพื่อใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดย $\dot{Q}_{air,outlet}$ จะประมาณให้เท่ากับ $\dot{Q}_{air,preheat}$ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{air,outlet} = \dot{Q}_{air,preheat} \quad (3.46)$$

5) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ($\dot{Q}_{other,recup}$)

ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่ไม่สามารถหาค่าได้เช่น ความร้อนสูญเสียผ่านผนัง เป็นต้น จึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อหาสมดุลพลังงาน (Energy balance) ของ recuperator ดังสมการ

$$\dot{Q}_{other,recup} = \dot{Q}_{flue,recup} + \dot{Q}_{air,inlet} - \dot{Q}_{flue,stack} - \dot{Q}_{air,outlet} \quad (3.47)$$

3.2.6 ประสิทธิภาพของ recuperator (Effectiveness, ε)

ประสิทธิภาพของ recuperator (ε) คือสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ได้จริงต่อพลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้ได้สูงสุด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{q_{recup,act}}{q_{recup,max}} = \frac{h_{air,outlet} - h_{air,inlet}}{h_{air,outlet,max} - h_{air,inlet}} \quad (3.48)$$

เมื่อ	$q_{recup,act}$	คืออัตราการถ่ายเทความร้อนของ recuperator จริง (kJ/kg)
	$q_{recup,max}$	คืออัตราการถ่ายเทความร้อนของ recuperator สูงสุด (kJ/kg)
	$h_{air,outlet}$	คือค่าเอนทาลปีของอากาศที่ออกจาก recuperator (kJ/kg)
	$h_{air,inlet}$	คือค่าเอนทาลปีของอากาศที่เข้าสู่ recuperator (kJ/kg)
	$h_{air,outlet,max}$	คือค่าเอนทาลปีของอากาศที่ออกจาก recuperator สูงสุด (kJ/kg)

3.3 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันเตา

น้ำมันเตาเป็นผลิตภัณฑ์จากน้ำมันดิบ โดยส่วนมากจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และมีกำมะถันผสมอยู่บ้างเล็กน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ซึ่งองค์ประกอบของน้ำมันเตาที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุต่างๆ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงองค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก
C	86.4
H	11.6
S	2.0

องค์ประกอบของน้ำมันเตาในรูปของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก จะสามารถจำแนกเป็นสัดส่วนจำนวนโมลของแต่ละธาตุ โดยน้ำมันเตาจำนวน 1 kmol ประกอบด้วย $C = 0.3836$ kmol, $H = 0.6131$ kmol และ $S = 0.0033$ kmol

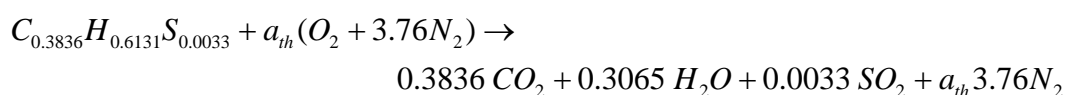
การพิจารณาค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันเตา โดยทั่วไปมักจะนำค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงมาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง นั้นหมายถึงการหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงจะถูกกำหนดสถานะอ้างอิงของสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงไว้ โดยสถานะอ้างอิงมาตรฐานจะอยู่ที่ 25°C , 1 atm ซึ่ง ณ อุณหภูมิและความดันดังกล่าวไอน้ำที่อยู่ในไอเสียจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ทำให้เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากก๊าซเป็นของเหลว แต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิของไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นมีค่าสูงประมาณ $500 - 800^{\circ}\text{C}$ ส่งผลให้ไอน้ำที่อยู่ภายในไอเสียยังคงมีสถานะเป็นก๊าซเหมือนเดิม จึงไม่เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของไอน้ำ ดังนั้นค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณจึงควรเป็นค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ ดังแสดงไว้ในตาราง

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำมันเตา

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
มวลโมเลกุล	5.33	kg/kmol
ความถ่วงจำเพาะ	0.96	-
ความจุความร้อนจำเพาะ	1.884	kJ/kg-K
ความร้อนเชื้อเพลิงสูง	42.1	MJ/liter
ความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ	39.6	MJ/liter

3.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

องค์ประกอบของน้ำมันเตาดังที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาเขียนสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎี ดังสมการ

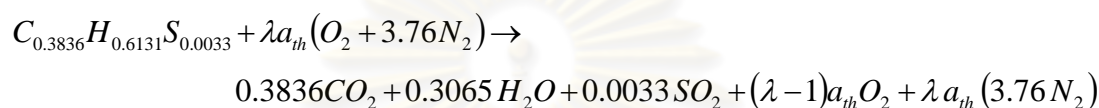


เมื่อ a_{th} คือ จำนวนโมลของออกซิเจนที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kmol ทางทฤษฎี ซึ่งจากการคำนวณหาสมดุลของสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงทางทฤษฎีข้างต้น จะได้ว่า a_{th} มีค่า

เท่ากับ $0.54015 \text{ kmol}_{O_2}/\text{kmol}_{\text{fuel}}$ ซึ่งนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (stoichiometric air-fuel ratio, AF_{stoic}) ดังสมการ

$$AF_{\text{stoic}} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\dot{m}_{\text{fuel}}} = \frac{0.54015 \times (31.999 + 3.76 \times 28.013)}{(0.3836 \times 12.01) + (0.6131 \times 1.008) + (0.0033 \times 32.066)} = 13.92 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$$

สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎีเขียนขึ้นภายใต้เงื่อนไขการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วปริมาณอากาศที่ใช้จะสูงกว่าปริมาณอากาศที่ใช้ในทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกินสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ ดังนี้



เมื่อ λ คือตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยหากพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ จะเห็นได้ว่ามีปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมากับไอเสีย เท่ากับ $(\lambda - 1)a_{th}O_2$ ซึ่งในทางปฏิบัติจะสามารถวัดได้จากเครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer) อยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยโมล แต่เนื่องจากเครื่องมือวัดจะทำการวัดปริมาณออกซิเจนในลักษณะ dry basis ซึ่งหมายถึงไอเสียจะถูกดึงเอาไอน้ำและความชื้นออกไปก่อนจะทำการวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะต้องแปลงไปเป็นตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน ดังสมการ

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{SO_2} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{(\lambda - 1)a_{th}}{0.3836 + 0.0033 + (\lambda - 1)a_{th} + 3.76\lambda a_{th}} \quad (3.49)$$

โดยสามารถเขียนค่า λ อยู่ในรูปของ $\%O_2$ เมื่อ a_{th} มีค่าเท่ากับ 0.54015 ได้ดังสมการ

$$\lambda = \frac{0.54015 - 0.153 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{0.54015 - 2.571 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.50)$$

เมื่อทราบค่า λ จะสามารถนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (actual air-fuel ratio, AF_{actual}) ดังสมการ

$$AF_{\text{actual}} = \lambda AF_{\text{stoic}} \quad (3.51)$$

บทที่ 4

คุณลักษณะของเตาเผาที่พิจารณา

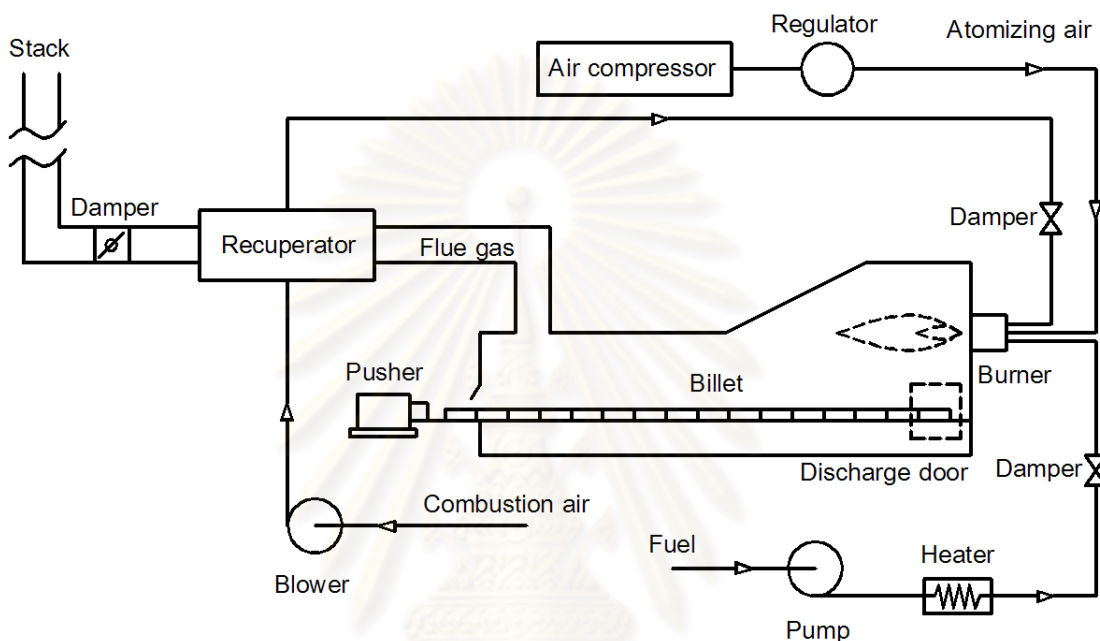
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมมูลพลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผา เพื่อทำนายปริมาณและพลังงานความร้อนสูญเสียของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา รวมถึงหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา โดยการลดปริมาณของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ซึ่งงานวิจัยนี้ได้หยิบเอาข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผาของโรงงานตัวอย่างแห่งหนึ่งมาเป็นต้นแบบเพื่อทำการศึกษา โดยมีรายละเอียดของคุณลักษณะต่างๆ ของเตาเผา ดังต่อไปนี้

4.1 คุณลักษณะข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา

- 1) เตาเผา มีขนาด 12 tonne/hr แบบ pusher type
- 2) เตาเผา มีอายุการใช้งานตั้งแต่ปี 2545 - ปัจจุบัน
- 3) ใช้น้ำมันเตาชนิด C เป็นเชื้อเพลิง
- 4) คิดอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOD (Time of Day) หรือคิดตามความต้องการการใช้ไฟฟ้า ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลาต่อวัน โดยตั้งแต่วเวลา 08.00 - 18.30 น. คิดอัตราค่าไฟฟ้าอยู่ในช่วง partial peak และตั้งแต่วเวลา 18.30 - 21.30 น. คิดอัตราค่าไฟฟ้าอยู่ในช่วง on peak สิ้นสุดท้ายตั้งแต่วเวลา 21.30 - 08.00 น. จะคิดอัตราค่าไฟฟ้าอยู่ในช่วง off peak
- 5) วัตถุดิบเป็น billet ขนาด 60 x 60 mm จนถึง 120 x 120 mm และมีความยาว 6 m แต่เนื่องจากช่องทางเข้าของเตาเผา มีความยาวประมาณ 2.6 m จึงจำเป็นต้องตัด billet ให้ได้ความยาวตามต้องการ ซึ่งมีความยาวไม่เกิน 2.5 m โดย billet แต่ละแท่งจะใช้เวลาอยู่ในเตาเผา (Residence time) ประมาณ 2 ชม.
- 6) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีดเหล็ก คือ เหล็กเส้นและเหล็กรูปพรรณ
- 7) เตาเผา มี heater ใช้สำหรับการอุ่นเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดความชื้นของเชื้อเพลิง ทำให้เชื้อเพลิงเป็นละอองฝอยได้ดีขึ้น
- 8) เตาเผา มี combustion air blower ใช้ในการดูดอากาศ เพื่อใช้สำหรับการเผาไหม้ โดยจะมี damper คอยควบคุมการไหลของอากาศให้เหมาะสมกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้
- 9) เตาเผา นำเอาอากาศอัดที่ได้จากเครื่องอัดอากาศ (air compressor) ซึ่งเป็นอากาศอัดที่ใช้ร่วมกับอากาศอัดในส่วนอื่นๆ ของโรงงาน โดยจะมี regulator คอยควบคุมความดันของ air compressor อีกที ซึ่งอากาศอัดส่วนนี้จะนำมาใช้ในการทำให้เชื้อเพลิงเป็นละอองฝอย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ หรือเรียกว่า atomizing air

- 10) เตาเผาที่มี recuperator ใช้สำหรับนำความร้อนที่เหลือทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ ด้วยการอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ก่อนจะไหลเข้าสู่ burner เพื่อทำการเผาไหม้กับเชื้อเพลิง
- 11) ไอเสียจากการเผาไหม้จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศผ่านทางปล่องไอเสียเป็นแบบ natural draft โดยจะอาศัยแรงลอยตัวของไอเสียร้อนตามธรรมชาติไหลออกทางปล่องไอเสีย

ระบบต่างๆ ของเตาเผาดังกล่าวมาข้างต้น จะแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบระบบต่างๆ ของเตาเผา

4.2 ลักษณะการทำงานของเตาเผา

เตาเผาอยู่ในช่วงสภาวะการทำงานแบบปกติ ตั้งแต่ช่วงเวลา 22.00 – 18.30 น. ของทุกวัน โดยคิดอัตราค่าไฟฟ้าเป็นแบบ TOD ในช่วง off peak และ patial peak จากนั้นจะทำการหยุดเตาในช่วงเวลาตั้งแต่ 18.30 – 21.00 น. เนื่องจากอัตราค่าไฟฟ้าในช่วงเวลานี้มีราคาแพง เพราะคิดอัตราค่าไฟฟ้าอยู่ในช่วง on peak เมื่อผ่านช่วงนี้ไปจะทำการเร่งเตาตั้งแต่เวลา 21.00 - 22.00 น. เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาให้มีค่าตามต้องการก่อนเตาเผาจะเข้าสู่สภาวะการทำงานแบบปกติ โดยจากการสอบถามพบว่าเนื่องจากเตามีขนาดเล็ก (ประมาณ 12 ตัน/ชม.) ดังนั้นจึงใช้เวลาในการเร่งเตาเพียงแค่ 1 ชั่วโมง นอกจากนี้หากมีการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต้องเปลี่ยนลูกรีดในกระบวนการรีดจะทำการในช่วงเวลาหยุดและเร่งเตาตั้งแต่ 18.30 – 22.00 น. ไปพร้อมกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาลักษณะการทำงานของเตาเผาทั้งหมด จะเห็นได้ว่าลักษณะการทำงานของเตาเผาส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสภาวะการทำงานแบบปกติ

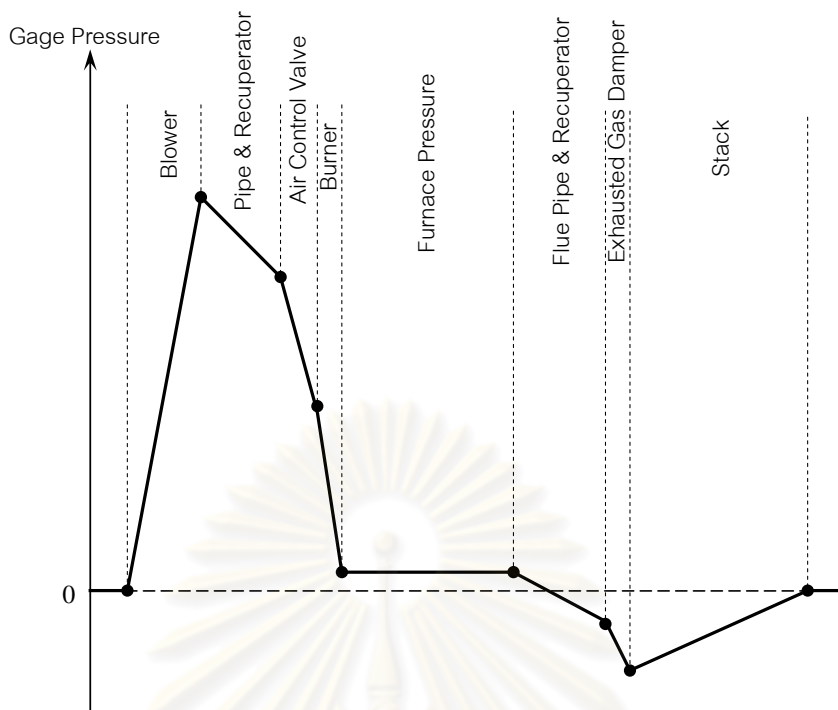
4.3 การควบคุมการไหลของอากาศและไอเสียของเตาเผา

การไหลของอากาศเข้าสู่เตาเผามาจากสองส่วน คือ อากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้กับเชื้อเพลิง (combustion air) และอากาศที่ใช้สำหรับทำเชื้อเพลิงให้เป็นละอองฝอย (atomizing air) ในส่วนของไอเสีย (exhausted gas) ที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้จะอาศัยแรงลอยตัวของไอเสียไหลออกทางปล่องไอเสีย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 โดยเตาเผาที่พิจารณานั้นส่วนใหญ่มีการควบคุมการไหลของอากาศและไอเสียเป็นแบบ manual ซึ่งจะมีรายละเอียดของการควบคุมการไหลของอากาศและไอเสีย ดังต่อไปนี้

1) **Combustion air** จะเริ่มจาก combustion air blower ถูกขับด้วยมอเตอร์ขนาด 25 hp ทำหน้าที่ในการดูดอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ โดยมี inlet guide vane ตรงช่องดูดอากาศเข้าคอยควบคุมอัตราไหลของอากาศและทำให้ลักษณะการไหลของอากาศเป็นแบบหมุนวน เพื่อให้พลังงานจลน์บางส่วน of อากาศเปลี่ยนไปเป็นโมเมนตัมเชิงมุม ส่งผลให้มอเตอร์ใช้กำลังน้อยลง ซึ่งเตาเผาที่ทำการศึกษารับ inlet guide vane ไว้ที่ตำแหน่งเดิมตลอด แต่จะมี damper ควบคุมแบบ manual คอยทำหน้าที่ปรับสัดส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงให้เหมาะสมตามสภาวะการทำงาน of เตาเผาและอุณหภูมิภายในเตาเผา

2) **Atomizing air** เริ่มจากเครื่องอัดอากาศทำหน้าที่อัดอากาศที่ใช้สำหรับทำเชื้อเพลิงเป็นละอองฝอยก่อนทำการเผาไหม้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยเครื่องอัดอากาศจะมี regulator คอยควบคุมความดันที่ใช้ในการอัดอากาศ ซึ่งความดันที่ใช้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 7 bar

3) **Exhausted gas** จะไหลผ่าน exhausted gas damper ที่มีการควบคุมแบบ manual ก่อนไหลออกสู่ปล่องไอเสีย โดย exhausted gas damper จะทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของไอเสียให้สอดคล้องกับค่าความดันภายในเตาเผา ซึ่งในระหว่างการทำงาน of เตาเผา นี้ พบว่า exhausted gas damper จะตั้งไว้ที่ตำแหน่งเดิมเสมอ เมื่อความดันภายในเตาเผาเปลี่ยนแปลง จึงไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมให้ความดันภายในเตาเผา มีค่าคงที่ได้ โดยหากอัตราการไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผา มีปริมาณน้อยกว่าอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงที่เข้าสู่เตาเผา จะทำให้ความดันภายในเตาเผา มีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ ซึ่งส่งผลให้ก๊าซร้อนและเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงรั่วออกทางช่องเปิดต่างๆ แต่ถ้าหากอัตราการไหลไอเสีย มีปริมาณมากเกินไป จะทำให้ความดันภายในเตาเผา มีค่าเป็นลบ ซึ่งส่งผลให้อากาศจากภายนอก รั่วเข้าสู่เตาเผา ผ่านทางช่องเปิดต่างๆ ได้ แสดงให้เห็นว่าความดันภายในเตาเผาเป็นตัวกำหนดถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหา ก๊าซร้อนรั่วออกจากเตาเผา หรือจะมีอากาศจากภายนอก รั่วเข้าสู่เตาเผา ผ่านทางช่องเปิดต่างๆ โดยเมื่อทำการวาดกราฟแสดงลักษณะของ ความดันของอากาศและไอเสีย ที่ไหลผ่านเตาเผาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงลักษณะความดันของอากาศและไอเสียที่ไหลผ่านเตาเผาแบบ natural draft

ดังกราฟรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะความดันของอากาศและไอเสียที่ไหลผ่านเตาเผาแบบ natural draft โดยเริ่มจาก blower เพิ่มความดันเพื่อใช้ในการดูดอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ เมื่ออากาศไหลผ่านท่อและ recuperator รวมทั้งวาล์วควบคุม ทำให้ความดันของอากาศตกลงก่อนเข้าสู่ burner จากนั้นอากาศจะผสมกับเชื้อเพลิงตรง burner แล้วทำการเผาไหม้เป็นเปลวไฟพุ่งเข้าสู่เตาเผา ซึ่งค่าความดันในช่วงนี้เป็นค่าความดันภายในเตาเผา โดยไอเสียจากการเผาไหม้จะไหลวนอยู่ภายในเตาเผา จากนั้นไอเสียจะอาศัยแรงลอยตัวตามธรรมชาติไหลออกทางท่อไอเสียผ่าน recuperator และ exhausted gas damper ทำให้ความดันตกลงก่อนปล่อยไอเสียออกสู่บรรยากาศผ่านทางปล่องไอเสีย โดยหาก exhausted gas damper ที่ติดตั้งอยู่ตรงท่อไอเสียไม่สามารถควบคุมอัตราไหลของไอเสียได้ ทำให้เกิดปัญหาความดันภายในเตาบกพร่อง ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่ก๊าศร้อนรั่วออกจากเตาเผาหรือมีอากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องเปิดต่างๆ นอกจากนี้ยังมีรายละเอียดของผลเสียที่เกิดจากค่าความดันภายในเตาเผาที่มีค่าเป็นบวกและลบเมื่อเทียบกับค่าความดันบรรยากาศ ดังต่อไปนี้

ผลเสียของความดันภายในเตาเผาที่มีค่าเป็นบวก

1) ก๊าศร้อนและเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะไหลออกสู่ภายนอกผ่านทางช่องเปิดต่างๆ ส่งผลให้เตาเผาสูญเสียพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้

- 2) ผนังเตาเผาบริเวณช่องเปิดต่างๆ มีอายุการใช้งานลดลง เนื่องจากมีก๊าซร้อนและเปลวไฟลามออกจากช่องเปิด
- 3) การไหลของก๊าซร้อนและเปลวไฟออกจากช่องเปิดต่างๆ อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานบริเวณช่องเปิดได้

ผลเสียของความดันภายในเตาเผาที่มีค่าเป็นลบ

- 1) อากาศจากภายนอกจะรั่วเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องเปิดต่างๆ ทำให้อากาศในส่วนนี้พาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงออกไปพร้อมกับไอเสีย ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเพื่อให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าคงเดิมตามที่ตั้งค่าไว้ ซึ่งถือเป็นการสิ้นเปลืองการใช้พลังงานเชื้อเพลิง
- 2) การรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา อาจส่งผลต่ออัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ เนื่องจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาอาจจะรวมกับอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ทำให้อัตราส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลง
- 3) การรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผาส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการรั่วของอากาศเข้าสู่เตาเผาทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในเตาเผาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เนื้อเหล็กบางส่วนที่ถูกเผาไหม้รวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นเหล็กออกไซด์หรือที่เรียกว่าสเกล ซึ่งหากเหล็กเกิดสเกลมากขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีดเหล็กลดลง

ในทางทฤษฎีความดันภายในเตาเผาที่เหมาะสมที่สุด คือ ความดันภายในเตาเผาที่มีค่าเท่ากับศูนย์หรือมีค่าเทียบเท่ากับความดันบรรยากาศ แต่ในทางปฏิบัติการควบคุมให้ความดันภายในเตาเผาให้มีค่าเท่ากับศูนย์ทำได้ยาก เมื่อพิจารณาผลเสียที่เกิดจากความดันภายในเตาเผาที่มีค่าเป็นลบ พบว่ามีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่งผลต่อความเชื่อมั่นในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีดเหล็กลดลง เป็นผลให้ในทางปฏิบัติจะตั้งค่าความดันภายในเตาเผาให้มีค่าเป็นบวกเล็กน้อย โดยทั่วไปความดันภายในเตาเผาจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 5 Pa หรือประมาณ 5 mmH₂O

บทที่ 5

การตรวจวัดและเก็บข้อมูล

การตรวจวัดและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผา เพื่อนำมาเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผา รวมทั้งนำมาประกอบการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้นจากอากาศภายนอกที่เข้าสู่เตาเผา โดยข้อมูลที่ต้องการเบื้องต้นจะสามารถหาได้จาก 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นข้อมูลที่ได้จากการสอบถามข้อมูลและเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ของโรงงานโดยตรง ส่วนที่สองเป็นข้อมูลจากการนำอุปกรณ์เข้าทำการตรวจวัด ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของข้อมูลที่ต้องการตรวจวัดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัด ดังนี้

5.1 รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่ต้องการตรวจวัด

ข้อมูลตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวแปร
1) อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผา	อ่านจากมาตรวัดเชื้อเพลิงต่อเวลาที่จับได้ โดยค่าที่อ่านได้จะอยู่ในรูปของปริมาตรต่อเวลา	\dot{V}_{fuel}
2) อัตราการผลิตเหล็ก	นับจำนวนแท่งของ billet ที่ออกจากเตาเผาต่อเวลาที่จับได้ และสอบถามข้อมูลของน้ำหนัก billet ต่อแท่ง	\dot{m}_{billet}
3) ขนาดของ billet	สอบถามข้อมูลความกว้างและความยาวของ billet	W_i, L
4) เวลาการเปิดประตูถึงเหล็ก	จับเวลาการเปิดประตูถึงเหล็กต่อครั้ง	t_{open}
5) สัดส่วนของสเกลที่ออกมาที่เหล็ก	สอบถามข้อมูลปริมาณของสเกลจากระบบการรีดเหล็กเฉลี่ยทั้งปี โดยจะคิดเป็นร้อยละระหว่างปริมาณของสเกลที่ก่อตัวขึ้นต่อปริมาณเหล็กที่ผลิตได้ต่อปี	% scale
6) อุณหภูมิของอากาศภายนอก	ตรวจวัดด้วย thermometer	$T_{ambient}$
7) อุณหภูมิของอากาศหลังจากการอุ่น	อ่านจากจอแสดงผลที่เตา โดยตรวจวัดอุณหภูมิของอากาศหลังจากการอุ่นด้วย recuperator ก่อนเข้าสู่ burner เพื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิง	$T_{air, preheat}$

ข้อมูลตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวแปร
8) อุณหภูมิเชื้อเพลิง หลังจากการอุ่น	อ่านจากจอแสดงผลที่เตา โดยตรวจวัดอุณหภูมิของ น้ำมันเตาหลังจากการอุ่นด้วย heater ก่อนเข้าสู่ burner เพื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิง	$T_{fuel,in}$
9) อุณหภูมิภายใน เตาเผา	อ่านจากจอแสดงผลที่เตา โดยค่าที่ได้จากการ ตรวจวัดเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งเตา	$T_{furnace}$
10) อุณหภูมิของไอเสีย ที่ออกจากเตาเผา	อ่านจากจอแสดงผลที่เตา โดยการตรวจวัดอุณหภูมิ ของไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้าสู่ recuperator	$T_{flue,furnace}$
11) อุณหภูมิของไอเสีย ที่ออกจาก recuperator	ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer) ซึ่งสามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้	$T_{flue,stack}$
12) องค์ประกอบของ ไอเสียที่ออกจาก เตาเผา	ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer) โดยมีองค์ประกอบสำคัญที่ต้องการ ตรวจวัด คือ ปริมาณของก๊าซออกซิเจนภายในไอเสีย ซึ่งจะทำการตรวจวัดทั้งในขณะเปิดและปิดประตูยิง เหล็ก เพื่อนำมาพิจารณาหาปริมาณของอากาศรั่วเข้า สู่เตาเผาได้จากผลต่างของปริมาณก๊าซออกซิเจน ภายในไอเสีย	$\%O_2$
13) ความดันภายใน เตาเผา	ตรวจวัดด้วยเครื่อง Digital manometer ซึ่งเป็นการ ตรวจวัดความดันทั้งในช่วงเปิดและปิดประตูยิงเหล็ก	P
14) ขนาดของเตาเผา และช่องเปิดต่างๆ	อ่านค่าได้จากแบบโครงสร้างของเตาเผา	A_{wall} , $A_{opening}$
15) อุณหภูมิของผิว เตาเผาด้านนอก	ตรวจวัดด้วยเครื่อง Thermal imaging camera โดย การถ่ายภาพเชิงความร้อนของผิวเตาเผาด้านนอก ณ ตำแหน่งต่างๆ รอบเตาเผา โดยข้อมูลที่ได้จะทำการ เฉลี่ยค่าของอุณหภูมิจากผิวเตาเผาในแต่ละด้าน	T_{wall}
16) ความเร็วของไอเสีย	ตรวจวัดด้วย Pitot tube เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัด ความเร็วของไอเสีย ซึ่งใช้ร่วมกับ Digital manometer	V_{stack}

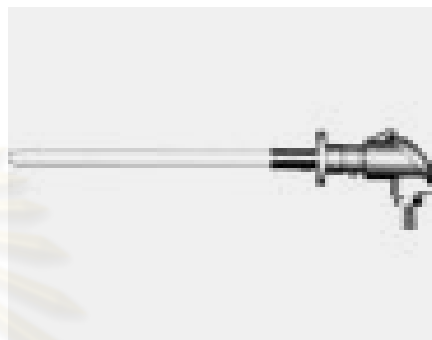
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

1) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของไอเสีย (Thermocouple)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของไอเสียคือ Thermocouple type K มีลักษณะเป็นโพรบหุ้มด้วย ceramic ยาว 1 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 mm และมีช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 1,400 °C โดยแสดงผลด้วย Digital indicator ซึ่งมีช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 1,200 °C



รูปที่ 5.1 Digital indicator



รูปที่ 5.2 Thermocouple probe

2) เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer)

เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสียที่ใช้คือ testo 350 M/XL ประกอบด้วย Analysis box และ Flue gas probe มีความยาวประมาณ 700 mm โดยเครื่องวัดจะทำการวัดปริมาณ O_2 , CO, NO, NO_2 และ SO_2 แสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยโมลแบบแห้ง (dry basis) เนื่องจากภายในมีเครื่องดูดความชื้นก่อนทำการวิเคราะห์ ในส่วนของการวัดอุณหภูมิไอเสียจะใช้ Thermocouple type K (NiCr - Ni) ซึ่งจะสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 1200 °C และมีความละเอียดในการแสดงผลของอุณหภูมิอยู่ที่ 0.1 °C



รูปที่ 5.3 Flue gas analyzer

3) อุปกรณ์วัดความเร็วของไอเสีย (Pitot tube)

อุปกรณ์วัดความเร็วของไอเสียคือ Pitot tube ซึ่งเป็นท่อที่ใช้สำหรับวัดความเร็วจากความแตกต่างของความดัน โดยจะใช้ร่วมกับอุปกรณ์วัดความดันหรือเครื่อง Digital manometer



รูปที่ 5.4 Pitot tube

4) กล้องถ่ายภาพเชิงความร้อน (Thermal Imaging Camera)

กล้องถ่ายภาพเชิงความร้อนคือ HotShot XL เป็นกล้องถ่ายภาพแบบ infrared camera มีความละเอียด 1.3 Mega-pixel และช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ -20 ถึง 350 °C โดยความละเอียดในการแสดงผลอยู่ที่ 0.1 °C และมีความแม่นยำ $\pm 2\%$ ซึ่งอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมขณะใช้งานควรอยู่ในช่วง -5 ถึง 50 °C นอกจากนี้สามารถกำหนดตัวคูณปรับแก้เพื่อให้อุณหภูมิมีค่าแม่นยำขึ้น โดยตัวคูณปรับแก้ เช่น Emissivity, Background และอุณหภูมิแวดล้อม เป็นต้น



รูปที่ 5.5 Thermal imaging camera

5) เครื่องวัดความดัน (Digital manometer)

เครื่องวัดความดันที่ใช้คือ OMEGA HHP-103 เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความดันเกจและความแตกต่างของความดันที่มีค่าต่ำ เนื่องจากความดันภายในเตามีค่าอยู่ในช่วง ± 100 Pa และมีช่วงการใช้งานอยู่ที่ประมาณ ± 10 Pa โดยตัวเครื่องสามารถวัดความดันในช่วง 0 ถึง 10.01 inH₂O และมีความละเอียดในการแสดงผลอยู่ที่ 0.001 inH₂O ซึ่งอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมขณะใช้งานควรอยู่ในช่วง -10 ถึง 50 °C นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลในหน่วยของ InH₂O, mmH₂O, mbar, PSI, PA, InHg และ mmHg ได้



รูปที่ 5.6 Digital manometer

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

แนวทางการวิเคราะห์ปัญหา

6.1 การวิเคราะห์ความดันภายในเตาเผา

ผลการตรวจวัดจากโรงงานตัวอย่าง พบว่า ความดันภายในเตาเผามีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ ทำให้เกิดการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา โดยปัญหานี้เกิดขึ้นจากอัตราการไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาที่มีปริมาณมากกว่าอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผา ส่งผลให้อากาศภายนอกบริเวณรอบเตาเผาไหลเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องเปิดต่างๆ โดยผลเสียจากการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา มีดังนี้

1. อากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผาจะพาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงออกไปพร้อมกับไอเสีย ทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าลดลง ส่งผลให้เตาเผาต้องการความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น เพื่อให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าคงเดิมตามที่ตั้งค่าไว้

2. ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา ทำให้ปริมาณของออกซิเจนภายในเตาเผาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เนื้อเหล็กบางส่วนที่ถูกเผาไหม้รวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นเหล็กออกไซด์หรือที่เรียกว่าสเกล ซึ่งหากเหล็กเกิดสเกลมากขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีดเหล็กลดลง นอกจากนี้การรั่วของอากาศเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องเปิด ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณช่องเปิดมีค่าลดลงและอุณหภูมิของเหล็กบริเวณนี้จะมีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่น โดยข้อมูลจากโรงงานตัวอย่าง พบว่า บริเวณหัวและท้ายของเหล็กจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณส่วนกลางของเหล็ก ซึ่งการที่อุณหภูมิของเหล็กก่อนทำการรีดไม่ uniform ส่งผลให้การรีดเหล็กทำได้ยากขึ้นและอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อกระบวนการรีดเหล็ก

6.2 การวิเคราะห์แนวทางการปรับปรุง

ปัญหาการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา เกิดจากระบบควบคุมความดันภายในเตาเผาบกพร่อง โดยพบว่าในระหว่างการทำงานของเตาเผา exhausted gas damper ถูกตั้งไว้ที่ตำแหน่งเดิมเสมอ จึงไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลของไอเสียให้สอดคล้องกับความดันภายในเตาเผาได้ ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงจึงมุ่งเน้นไปที่การควบคุมอัตราการไหลของไอเสียให้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามค่าความดันภายในเตาเผา โดยการติดตั้ง pressure transducer ทำการตรวจจับค่าความดันภายในเตาเผา เพื่อส่งสัญญาณไปขับเคลื่อนมอเตอร์ให้ปรับเปลี่ยนองศาของ exhausted gas damper สำหรับควบคุมอัตราการไหลของไอเสียตรงปล่องทางออกให้สอดคล้องกับค่าความดันภายในเตาเผา

หลังจากวิเคราะห์แนวทางการปรับปรุง งานวิจัยชิ้นนี้จึงทำการศึกษาสมมูลพลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผา รวมถึงจัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เพื่อนำมาพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้สามารถทำนายผลจากการลดปริมาณของอากาศจากภายนอกที่เข้าสู่เตาเผา รวมทั้งประเมินผลการประหยัดการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงของเตาเผา ซึ่งการประเมินผลจากการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผาที่มีข้อสมมุติฐาน ดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ปริมาณของอากาศจากภายนอกที่เข้าสู่เตาเผา มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อทำการปรับปรุงโดยการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา
2. กำหนดให้อุณหภูมิภายในเตาเผา อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิจากการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิง และอุณหภูมิของไอเสียมีค่าคงที่ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง
3. กำหนดให้พลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ ของเตาเผาและ recuperator มีค่าคงที่
4. กำหนดให้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงมีค่าคงที่ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง
5. กำหนดให้ประสิทธิภาพของ recuperator มีค่าคงที่

การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เริ่มจากการคำนวณสมมูลมวล สมดุลความร้อนและประสิทธิภาพของเตาเผา รวมถึงของ recuperator ดังแสดงวิธีการคำนวณไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณข้างต้นจะนำมาประกอบการพิจารณาภายใต้ข้อสมมุติฐานที่กำหนด เพื่อทำนายสมมูลมวล สมดุลความร้อน และประสิทธิภาพของเตาเผาและ recuperator หลังจากการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา โดยรายละเอียดของการพิจารณาและวิธีการคำนวณผลหลังจากการปรับปรุง มีดังต่อไปนี้

6.2.1 พิจารณาสมมูลมวลของเตาเผา (หลังจากการปรับปรุง)

การคำนวณเริ่มจากการพิจารณารายละเอียดของสมมูลมวลที่ไหลเข้าและออกจากเตาเผา ก่อนทำการปรับปรุง ดังนี้

มวลไหลเข้าสู่เตาเผาหลัก ประกอบด้วย

- 1) อัตราไหลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_{fuel})
- 2) อัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (\dot{m}_{air})
- 3) อัตราไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ($\dot{m}_{air,leak}$)

มวลไหลออกจากเตาเผาหลัก ประกอบด้วย

- 4) อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator ($\dot{m}_{flue, furnace}$)

จากสมการ 3.11 จะสามารถคำนวณอัตราการไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผา ดังสมการ

$$\dot{m}_{flue, furnace} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air, comb} + \dot{m}_{air, leak} \quad (6.1)$$

เมื่อทำการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา จะพิจารณาว่าไม่มีปริมาณอากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผา ($\dot{m}_{air, leak} = 0$) ดังนั้นสามารถคำนวณอัตราการไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator หลังจากการปรับปรุง ได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{flue, furnace, improve} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air, comb} \quad (6.2)$$

6.2.2 พิจารณาสมดุลความร้อนของเตาเผา (หลังจากการปรับปรุง)

เมื่อพิจารณาสมดุลมวลของเตาเผาหลังจากการปรับปรุงแสดงให้เห็นได้ว่าอัตราการไหลของไอเสียมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของอากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผา มีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นผลให้พลังงานความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียมีค่าลดลง โดยสามารถคำนวณความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสีย ดังต่อไปนี้

จากสมการ 3.24 สามารถคำนวณความร้อนสัมผัสของไอเสียก่อนการปรับปรุง ดังสมการ

$$\dot{Q}_{flue, furnace} = \sum \frac{\dot{m}_{flue, furnace}}{M_{flue, furnace}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, flue, furnace} dT \right) \quad (6.3)$$

เมื่อพิจารณาสมการภายใต้ข้อสมมุติฐานที่กำหนดให้อุณหภูมิของไอเสียมีค่าคงที่ ทำให้ $\dot{Q}_{flue, furnace}$ แปรผันตาม $\dot{m}_{flue, furnace}$ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ} \quad C_{flue, furnace} = \sum \frac{1}{M_{flue, furnace}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, flue, furnace} dT \right) = \text{constant.} \quad (6.4)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \dot{Q}_{flue, furnace} = C_{flue, furnace} \times \dot{m}_{flue, furnace} \quad (6.5)$$

สมการดังกล่าวข้างต้นสามารถคำนวณความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator หลังจากการปรับปรุง ดังสมการ

$$\dot{Q}_{flue, furnace, improve} = C_{flue, furnace} \times \dot{m}_{flue, furnace, improve} \quad (6.6)$$

เมื่อพิจารณาผลหลังจากการปรับปรุงเห็นได้ว่าพลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียมีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องคำนวณหาสมดุลความร้อนของเตาเผาใหม่ โดยเริ่มจากการพิจารณาพลังงานความร้อนเข้าและออกจากเตาเผาหลังจากการปรับปรุงในแต่ละส่วน ดังนี้

พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

1) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (\dot{Q}_{comb}) จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผา ซึ่งเห็นได้ชัดหลังจากการปรับปรุงพลังงานสูญเสียความร้อนออกไปกับไอเสียมีค่าลดลง โดยหากพิจารณาว่าเตาเผาตั้งอุณหภูมิภายในเตาคงที่ ทำให้เตาเผาต้องการความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงลดลงตามสัดส่วนของการสูญเสียความร้อนที่น้อยลง เป็นผลให้สามารถลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาได้

2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า ($\dot{Q}_{fuel, sen}$) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเช่นกัน เมื่อทำการปรับปรุงส่งผลให้สามารถลดอัตราการใช้เชื้อเพลิง ทำให้เตาเผาต้องการพลังงานความร้อนที่ใช้สำหรับการอุ่นเชื้อเพลิงน้อยลง

3) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล ($\dot{Q}_{scale, form}$) จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการผลิตเหล็กและเปอร์เซ็นต์การก่อตัวของสเกล เมื่อพิจารณาสภาวะการทำงานของเตาเผาแบบเดิม จึงกำหนดให้ความร้อนจากการก่อตัวของสเกลมีค่าคงเดิม

4) ความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้จากการอุ่นอากาศที่ recuperator ($\dot{Q}_{air, preheat}$) จะเปลี่ยนแปลงตามความร้อนสัมผัสของไอเสียและประสิทธิภาพของ recuperator เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของ recuperator มีค่าคงที่ ทำให้สามารถคำนวณหาความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการอุ่นอากาศใหม่ได้

5) ความร้อนของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ($\dot{Q}_{air, leak}$) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากหลังจากการปรับปรุงกำหนดให้ไม่มีปริมาณอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา จึงทำให้ไม่มีพลังงานความร้อนในส่วนนี้เข้าสู่เตาเผา

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

6) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก ($\dot{Q}_{billet, sen}$) เมื่อพิจารณาเตาเผาที่มีอัตราการผลิตเหล็กคงเดิมและมีอุณหภูมิภายในเตาเผาคงที่ จึงกำหนดให้ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็กมีค่าคงเดิม

7) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไปยัง recuperator ($\dot{Q}_{flue, furnace, improve}$) จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอเสีย เมื่อกำหนดอุณหภูมิของไอเสียมีค่าคงที่ ทำให้สามารถคำนวณหาความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไปยัง recuperator ใหม่ได้

8) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล ($\dot{Q}_{scale, sen}$) เมื่อพิจารณาเตาเผาที่มีอัตราการผลิตเหล็กคงเดิมและมีอุณหภูมิภายในเตาเผาคงที่ จึงกำหนดให้ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกลมีค่าคงเดิม

9) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี ($\dot{Q}_{opening}$) เมื่อพิจารณาเตาเผาที่มีอุณหภูมิภายในเตาเผาคงที่และโครงสร้างของช่องเปิดไม่เปลี่ยนแปลง จึงกำหนดให้ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสีมีค่าคงเดิม

10) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา (\dot{Q}_{wall}) เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิภายในเตาเผา มีค่าคงที่และโครงสร้างของผนังเตาเผาไม่เปลี่ยนแปลง จึงกำหนดให้ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา มีค่าคงเดิม

11) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ($\dot{Q}_{other, furnace}$) พิจารณาภายใต้ข้อสมมุติฐานที่กำหนดให้ ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ของเตาเผาไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนเข้าและออกจากเตาเผาหลังจากการปรับปรุง พบว่า พลังงานความร้อนบางส่วนหลังจากการปรับปรุงสามารถอ้างอิงจากสมดุลความร้อนของเตาเผา ก่อนทำการปรับปรุงได้ แต่เนื่องจากยังคงมีพลังงานความร้อนบางส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากทำการปรับปรุง จึงจำเป็นต้องคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาหลังทำการปรับปรุงใหม่ โดยมีรายละเอียดของวิธีการคำนวณ ดังต่อไปนี้

1. เริ่มจากคำนวณพลังงานความร้อนรวมที่ออกจากเตาเผาหลังการปรับปรุง ดังสมการ

$$\dot{Q}_{total, output} = \dot{Q}_{billet, sen} + \dot{Q}_{flue, furnace, improve} + \dot{Q}_{scale, sen} + \dot{Q}_{opening} + \dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{other, furnace} \quad (6.7)$$

2. คำนวณพลังงานความร้อนรวมที่เข้าสู่เตาเผาหลังการปรับปรุง ดังสมการ

$$\dot{Q}_{total, input} = \dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel, sen} + \dot{Q}_{scale, form} + \dot{Q}_{air, preheat} \quad (6.8)$$

3. คำนวณผลต่างของพลังงานความร้อนรวมหลังการปรับปรุง ดังสมการ

$$\Delta \dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{total, input} - \dot{Q}_{total, output} \quad (6.9)$$

4. โดยทั่วไปเมื่อเตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน พลังงานความร้อนรวมเข้าและออกจากเตาเผาจะมีค่าเท่ากันหรือมีผลต่างของพลังงานความร้อนรวมเท่ากับศูนย์ ($\Delta \dot{Q}_{total} = 0$) แต่หากพลังงานความร้อนรวมเข้าและออกจากเตาเผายังคงมีค่าต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเตาเผาไม่อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน จึงจำเป็นต้องคำนวณหาพลังงานความร้อนเข้าและออกจากเตาเผาจนกระทั่งเตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน

เมื่อพิจารณาผลของการปรับปรุง พบว่า พลังงานความร้อนที่ออกจากเตาเผามีค่าลดลง เนื่องจากมีพลังงานความร้อนสูญเสียไปพร้อมกับไอเสียลดลง เป็นผลให้พลังงานความร้อนที่ออกจากเตาเผามีค่าน้อยกว่าพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา การปรับให้เตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน จึงจำเป็นต้องลดพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา ซึ่งจากการพิจารณาพบว่าแหล่งพลังงานความร้อนที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ คือ ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและความร้อนสัมผัสจากการอุ่นเชื้อเพลิง โดยทั้งสองส่วนนี้จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผา ดังนั้นการทำให้เตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน จึงจำเป็นต้องปรับลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงลงตามปริมาณผลต่างของพลังงานความร้อนรวม โดยสามารถคำนวณหาพลังงานความร้อนที่เตาเผาต้องการจากเชื้อเพลิงได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{fuel,total} = \dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel,sen} - \Delta\dot{Q}_{total} \quad (6.10)$$

พลังงานความร้อนที่เตาเผาต้องการจากเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็นสัดส่วนของพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและพลังงานความร้อนสัมผัสจากการอุ่นเชื้อเพลิง ดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาการคำนวณความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากสมการ 3.15 คือ

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{V}_{fuel} \times LHV \quad (6.11)$$

และพิจารณาการคำนวณความร้อนสัมผัสจากการอุ่นเชื้อเพลิงจากสมการ 3.16 คือ

$$\dot{Q}_{fuel,sen} = \rho_{fuel} \dot{V}_{fuel} C_{fuel} (T_{fuel,in} - T_0) \quad (6.12)$$

ดังนั้นสัดส่วนของความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงกับความร้อนสัมผัสจากการอุ่นเชื้อเพลิงจะสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$C_{ratio} = \frac{\dot{Q}_{comb}}{\dot{Q}_{fuel,sen}} = \frac{LHV}{\rho_{fuel} C_{fuel} (T_{fuel,in} - T_0)} \quad (6.13)$$

เมื่อพิจารณาสมการข้างต้นภายใต้ข้อสมมุติฐานที่กำหนดให้อุณหภูมิจากการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงคงที่ ($T_{fuel,in} = constant.$) และใช้เชื้อเพลิงแบบเดิม ทำให้พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการคำนวณมีค่าคงที่ เป็นผลให้สัดส่วนของพลังงานความร้อนมีค่าคงที่ ($C_{ratio} = constant.$) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและความร้อนสัมผัสจากการอุ่นเชื้อเพลิงที่เตาเผาต้องการ ดังต่อไปนี้

คำนวณความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เตาเผาต้องการ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{comb,improve} = \frac{\dot{Q}_{fuel,total} \times C_{ratio}}{(C_{ratio} + 1)} \quad (6.14)$$

และคำนวณความร้อนสัมผัสจากการอุ่นเชื้อเพลิงที่เตาเผาต้องการ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{fuel,sen,improve} = \dot{Q}_{comb,improve} / C_{ratio} \quad (6.15)$$

5. เมื่อทราบค่าพลังงานความร้อนที่เตาเผาต้องการหลังจากการปรับปรุงจะสามารถคำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาได้ ดังสมการ

$$\dot{V}_{fuel,improve} = \dot{Q}_{comb,improve} / LHV \quad (6.16)$$

และสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงหลังจากการปรับปรุง ดังสมการ

$$\dot{m}_{fuel,improve} = \rho_{fuel} \times \dot{V}_{fuel,improve} \quad (6.17)$$

จากนั้นเมื่อพิจารณาภายใต้ข้อสมมุติฐานที่กำหนดให้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงมีค่าคงที่ ทำให้สามารถคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้หลังจากการปรับปรุงได้ ดังสมการ

$$\dot{m}_{air,improve} = AF_{actual,furnace} \times \dot{m}_{fuel,improve} \quad (6.18)$$

6. เมื่ออัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้หลังจากการปรับปรุงเปลี่ยนแปลง ทำให้อัตราการไหลของไอเสียเปลี่ยนแปลงตามกฎของการอนุรักษ์มวล จึงสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของไอเสียใหม่ ดังสมการ

$$\dot{m}_{flue,furnace,improve,new} = \dot{m}_{fuel,improve} + \dot{m}_{air,improve} \quad (6.19)$$

และคำนวณหาพลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียใหม่ จากสมการ 6.6 คือ

$$\dot{Q}_{flue,furnace,improve,new} = C_{flue,furnace} \times \dot{m}_{flue,furnace,improve,new} \quad (6.20)$$

7. เมื่อค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกไปกับไอเสียลดลง ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศด้วยไอเสียที่ recuperator น้อยลง ซึ่งหากพิจารณาภายใต้ข้อสมมุติฐานที่กำหนดให้ประสิทธิภาพผลของ recuperator และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่าคงเดิม ทำให้สามารถ

คำนวณหาพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศด้วยไอเสียที่ recuperator หลังจากทำการปรับปรุงได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{air,preheat,improve,new} = \dot{m}_{air,improve} \times h_{air,outlet} \quad (6.21)$$

เมื่อ

$$h_{air,outlet} = [\varepsilon \times (h_{air,outlet,max} - h_{air,inlet})] + h_{air,inlet} \quad (6.22)$$

8. จากนั้นแทนค่าพลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียใหม่ ($\dot{Q}_{flue,furnace,improve,new}$) และพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศใหม่ ($\dot{Q}_{air,preheat,improve,new}$) ลงในขั้นตอนที่ 1 และ 2 เพื่อทำการคำนวณหาสมดุลความร้อนของเตาเผาอีกครั้ง โดยหากพลังงานความร้อนรวมเข้าและออกจากเตาเผายังคงมีค่าต่างกันให้คำนวณซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่แรกถึงขั้นตอนสุดท้ายจนกระทั่งพลังงานความร้อนรวมเข้าและออกจากเตาเผามีค่าเท่ากันหรือมีค่า $\Delta\dot{Q}_{total} = 0$ ซึ่งถือว่าเตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนและสิ้นสุดกระบวนการคำนวณ

บทที่ 7

การออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์

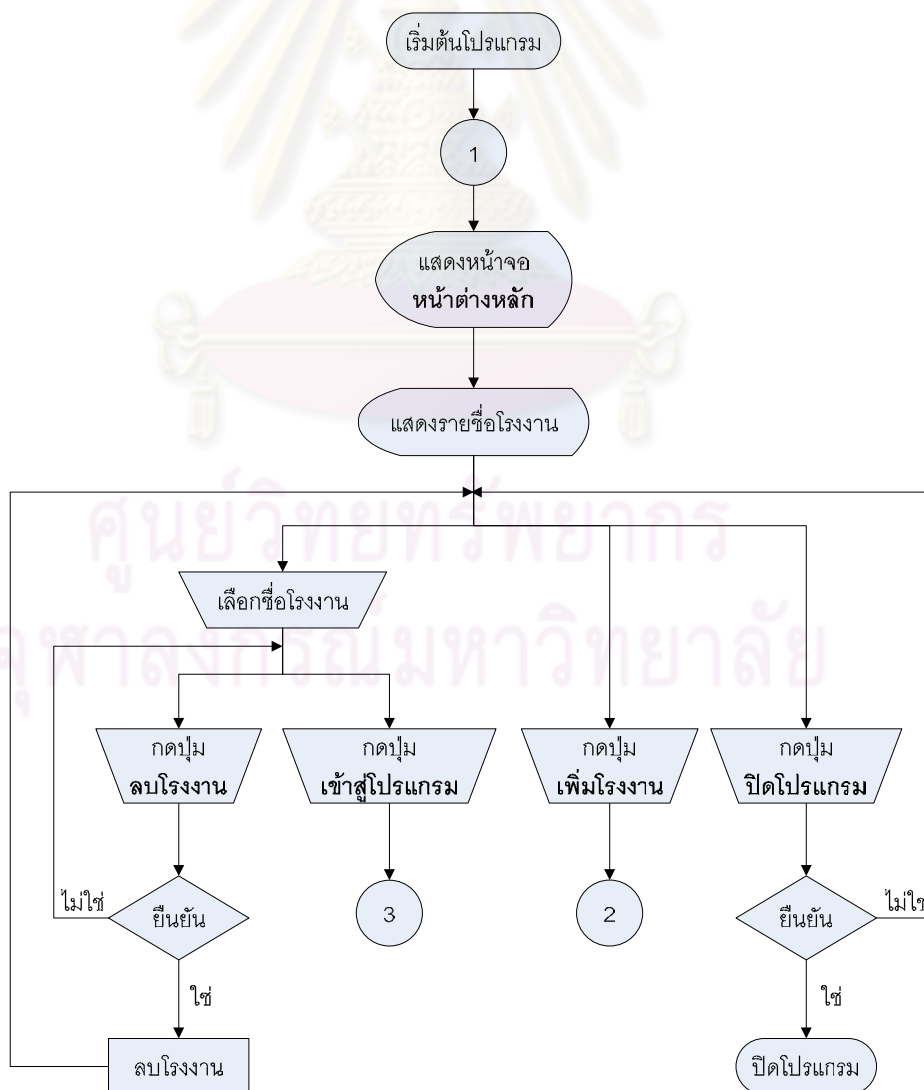
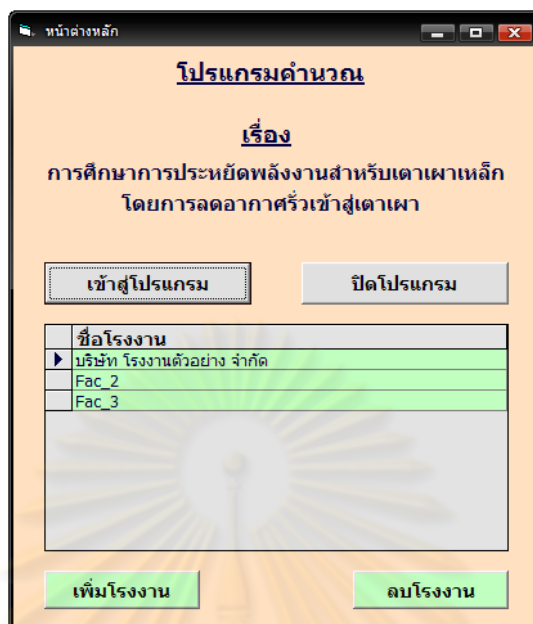
การออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 ช่วยในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดดังแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 6 เพื่อใช้ในการคำนวณหาสมมูลมวล สมดุลความร้อน และประสิทธิภาพของเตาเผา รวมถึงทำนายผลจากการลดปริมาณของอากาศที่เข้าสู่เตาเผาและประเมินผลการประหยัดการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงของเตาเผา โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของการบันทึกข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและเก็บข้อมูลของเตาเผา โดยจะใช้โปรแกรม Microsoft Access ช่วยในการเก็บข้อมูล อีกส่วนของโปรแกรมจะเป็นส่วนของการคำนวณผล

7.1 การบันทึกข้อมูล

การบันทึกข้อมูลการตรวจวัดและเก็บข้อมูลของเตาเผาจะใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 เชื่อมโยงกับโปรแกรม Microsoft Access โดยในส่วนของโปรแกรม Visual Basic 6.0 จะทำหน้าที่ในการรับค่าของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยการกรอกค่าต่างๆ ลงตรงช่องว่างที่กำหนดในหน้าต่างของโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะออกคำสั่งให้มีการบันทึกข้อมูลลงไปไว้ในโปรแกรม Microsoft Access อยู่ในรูปของฐานข้อมูลที่มีชื่อแฟ้มข้อมูลว่า DATA_FURNACE โดยมีแสดงรายละเอียดของ Flow chart และขั้นตอนการบันทึกข้อมูลของโปรแกรม ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. เริ่มต้นโปรแกรมจากหน้าต่างหลัก



2. แสดงหน้าต่างเพิ่มข้อมูลของโรงงาน

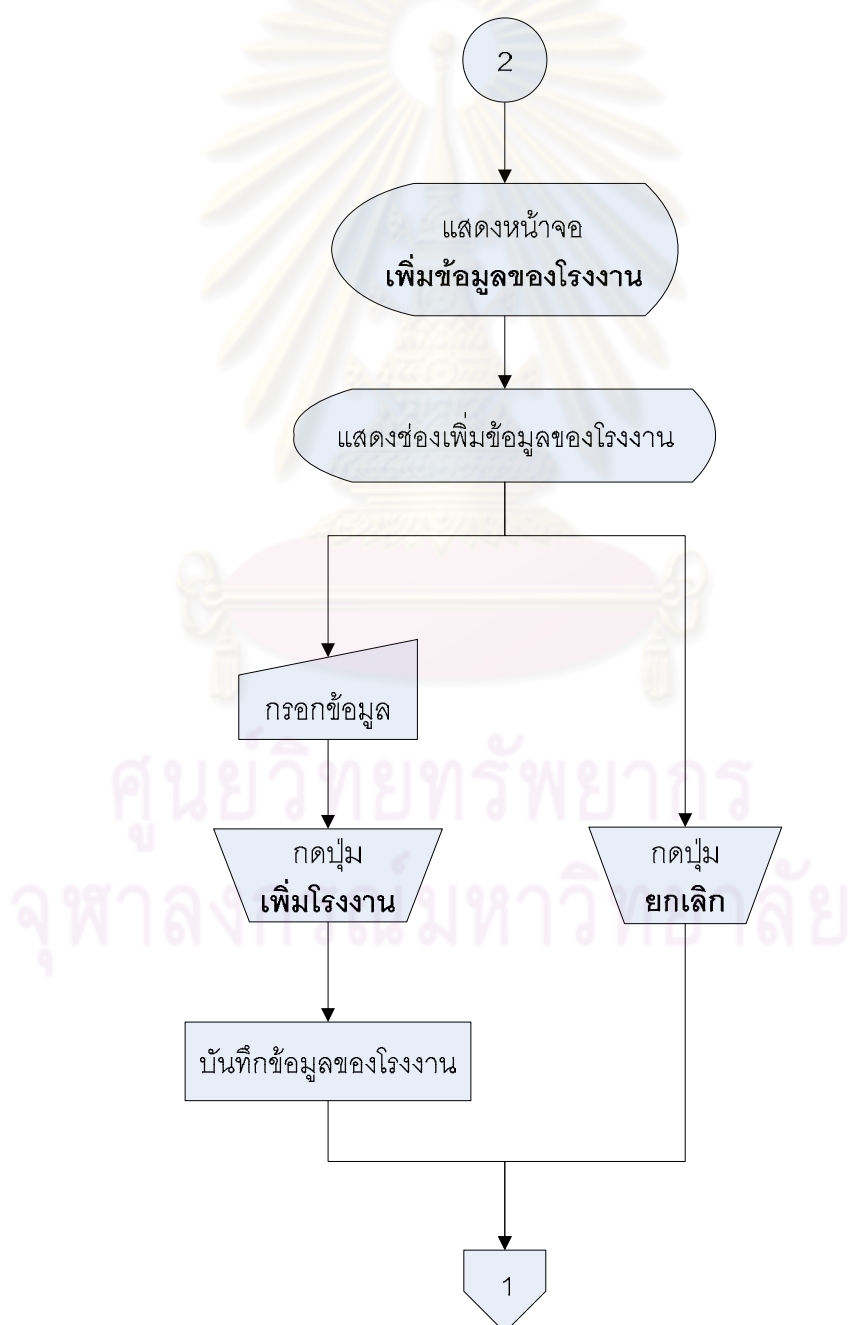
เพิ่มข้อมูลของโรงงาน

ข้อมูลของโรงงาน

ชื่อ

ที่ตั้ง

เพิ่มโรงงาน ยกเลิก



3. แสดงหน้าต่างรายละเอียดของโรงงาน

รายละเอียดของโรงงาน

ชื่อ: บริษัท โรงงานตัวอย่าง จำกัด

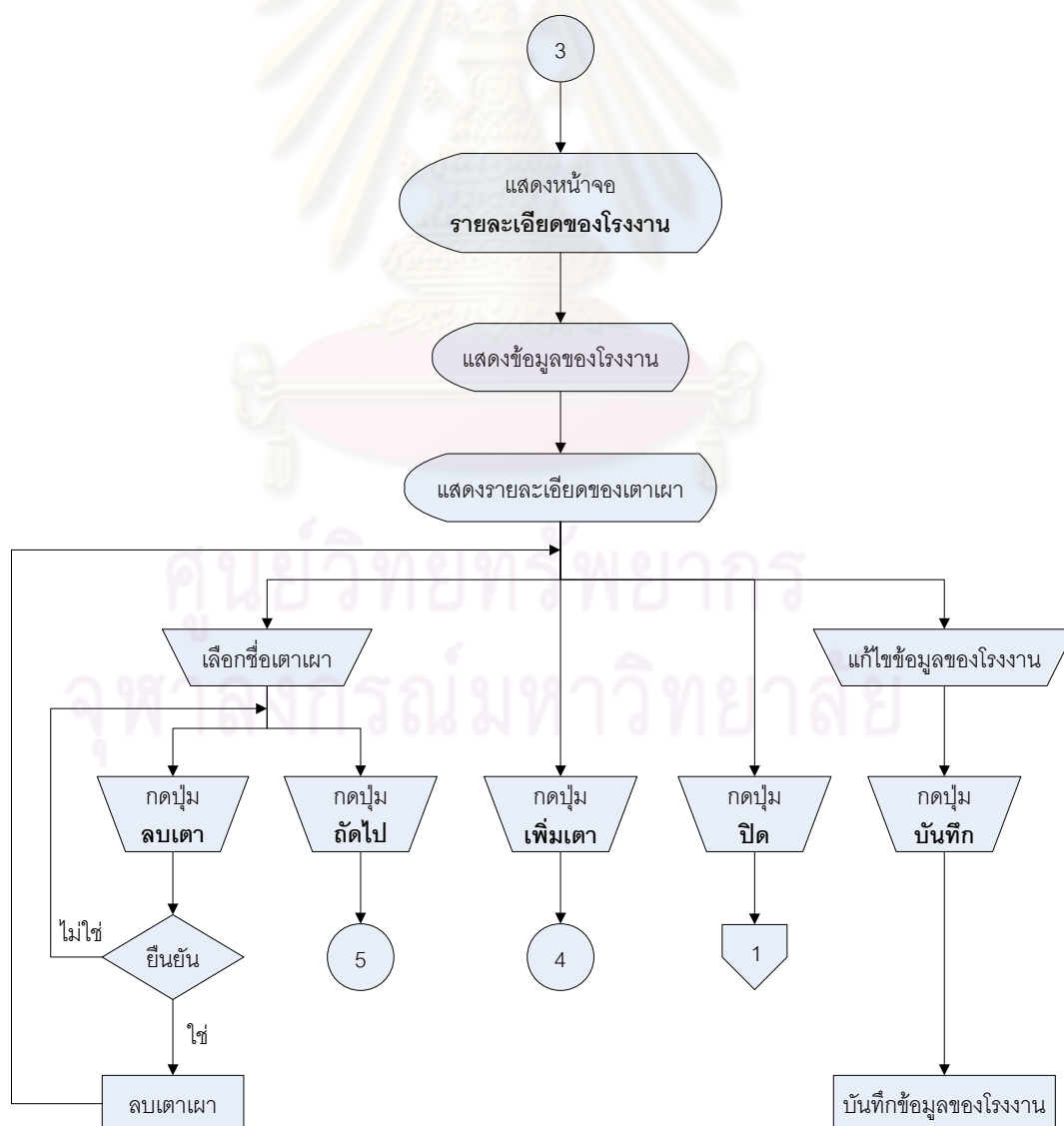
ที่ตั้ง: สถานที่ตัวอย่าง

บันทึก

รายละเอียดของเตาเผา

ชื่อเตาเผา	ขนาดเตาเผา
เตาเผาหนึ่ง	12
เตาเผาสอง	2
เตาเผาสาม	3

ถัดไป เพิ่มเตา ลบเตา ปิด



4. แสดงหน้าต่างเพิ่มข้อมูลของเตาเผา

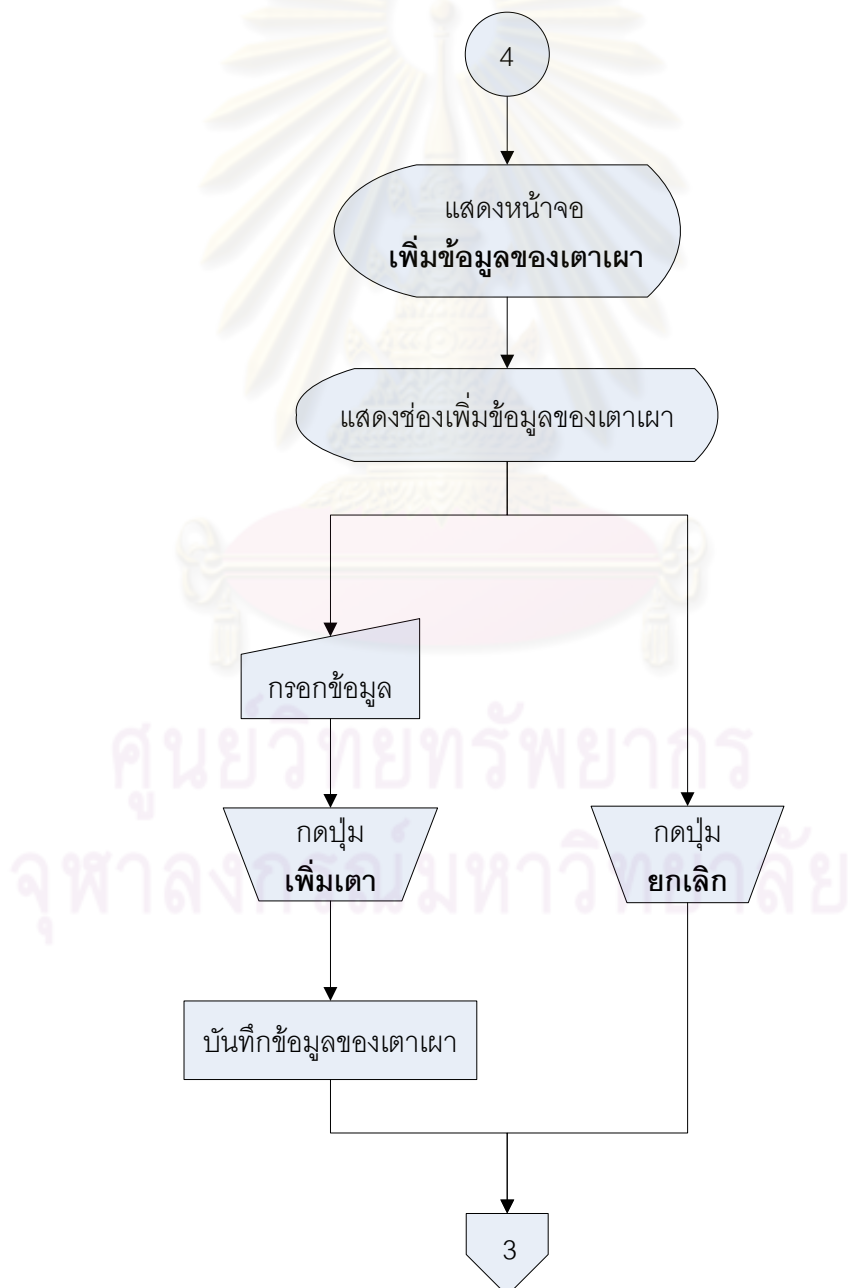
เพิ่มข้อมูลของเตาเผา

ข้อมูลของเตาเผา

ชื่อเตาเผา

ขนาดติดตั้งเตาเผา Tonne/hr

เพิ่มเตา ยกเลิก



5. แสดงหน้าต่างรายละเอียดของเตาเผา

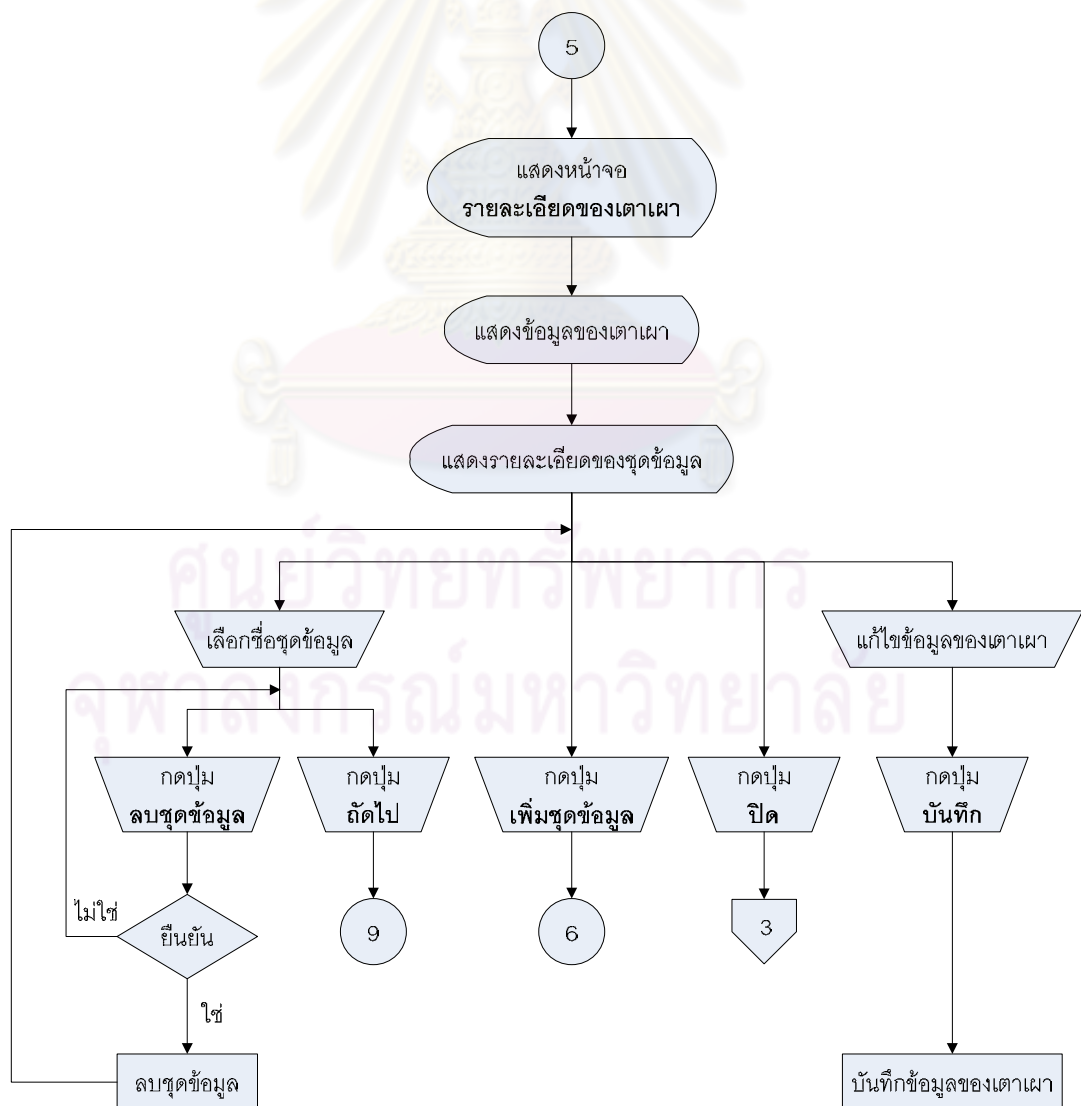
รายละเอียดของเตาเผา

ชื่อเตาเผา

ขนาดติดตั้งเตาเผา Tonne/hr

รายละเอียดของชุดข้อมูล

ชื่อชุดข้อมูล	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ลิตร/ชั่วโมง)
ชุดที่หนึ่ง(เตาเผาหนึ่ง)	414.75
ชุดที่สอง(เตาเผาหนึ่ง)	2
ชุดที่สาม(เตาเผาหนึ่ง)	3
ชุดที่สี่ (เตาเผาหนึ่ง)	4



6. แสดงหน้าต่างเพิ่มชุดข้อมูลของเตาเผา

เพิ่มชุดข้อมูลของเตาเผา

รายละเอียดของชุดข้อมูล

ชื่อชุดข้อมูล

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ลิตร/ชั่วโมง

ปริมาณการผลิตเหล็ก แ่ง/ชั่วโมง

น้ำหนักของเหล็ก kg/แ่ง

ความกว้างของเหล็ก เมตร

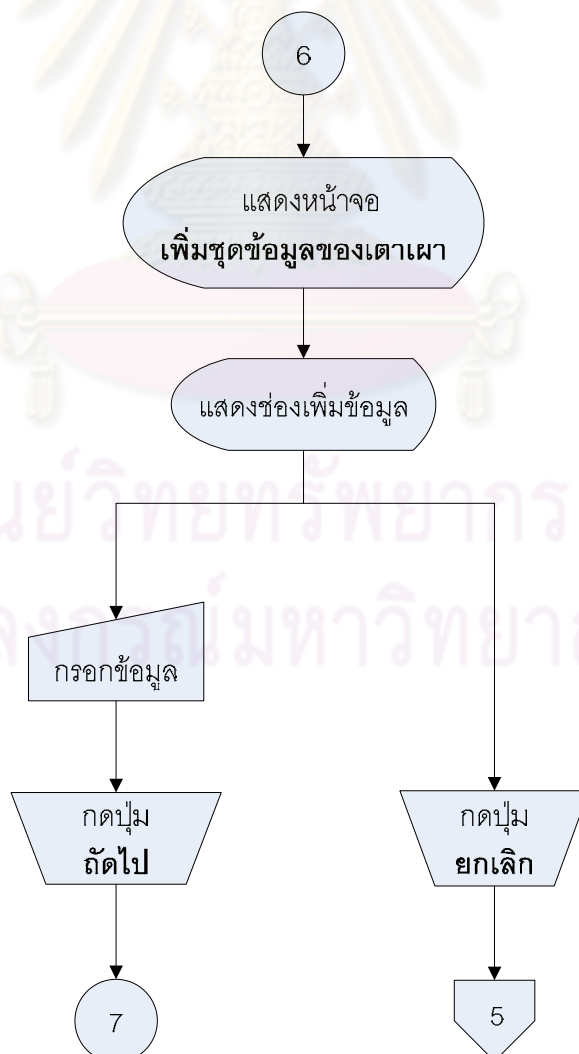
ความยาวของเหล็ก เมตร

เวลาการเปิดประตูเหล็ก วินาที/ครั้ง

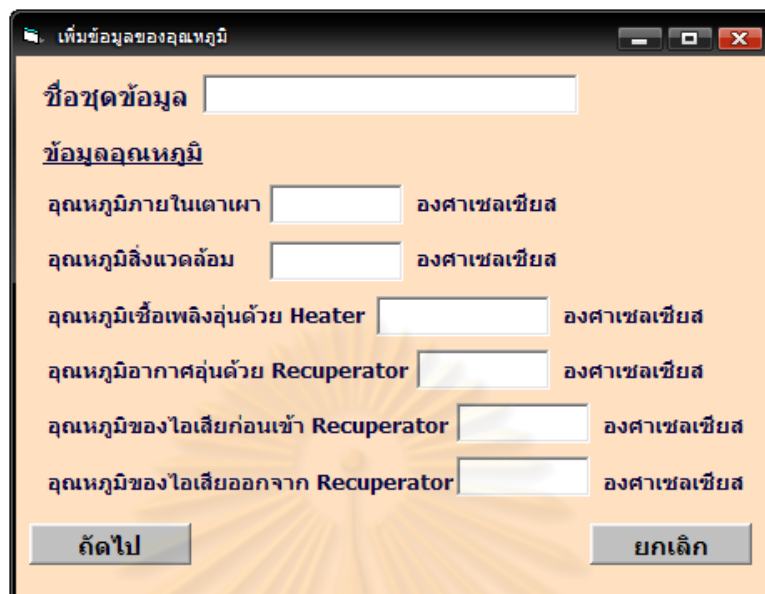
เปอร์เซ็นต์สเกล %

เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนขณะเปิดประตูเหล็ก %

เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนขณะเปิดประตูเหล็ก %



7. แสดงหน้าต่างเพิ่มข้อมูลของอุณหภูมิ



เพิ่มข้อมูลของอุณหภูมิ

ชื่อชุดข้อมูล

ข้อมูลอุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในเตาเผา องศาเซลเซียส

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม องศาเซลเซียส

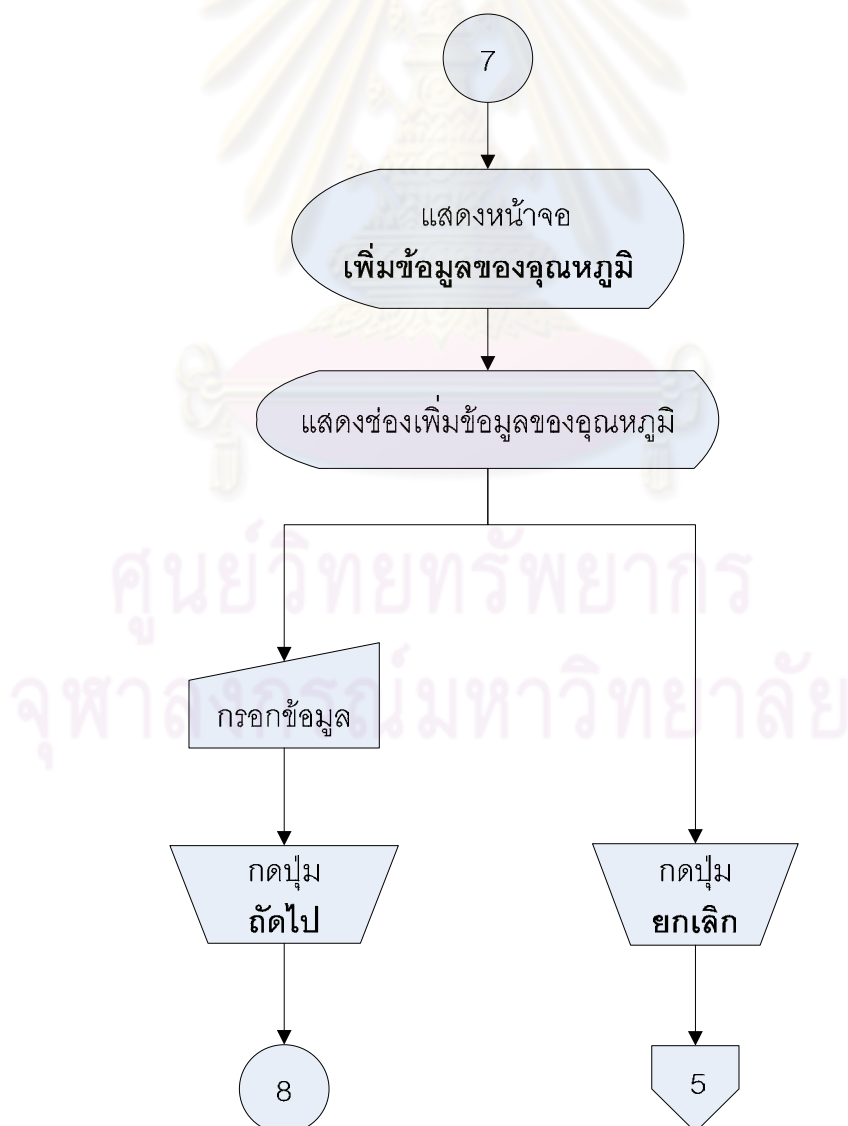
อุณหภูมิเชื้อเพลิงอุ่นด้วย Heater องศาเซลเซียส

อุณหภูมิอากาศอุ่นด้วย Recuperator องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของไอเสียก่อนเข้า Recuperator องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของไอเสียออกจาก Recuperator องศาเซลเซียส

ถัดไป ยกเลิก



8. แสดงหน้าต่างเพิ่มข้อมูลของช่องเปิดและผนังเตาเผา

เพิ่มข้อมูลของช่องเปิดและผนังเตาเผา

ชื่อชุดข้อมูล

ข้อมูลช่องเปิด

	ความกว้าง (เมตร)	ความยาว (เมตร)	ความหนา (เมตร)
ประตูด้านเหล็กเข้า	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
ประตูด้านยิงเหล็ก	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
ประตูด้านเหล็กออก	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

ข้อมูลผนังเตาเผา

	พื้นที่ (ตารางเมตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความสูง (เมตร)
ผนังด้านหน้าเตา	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
ผนังด้านหลังเตา	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
ผนังด้านยิงเหล็ก	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
ผนังด้านแท่นรีด	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

ปุ่ม:



9. แสดงหน้าต่างรายละเอียดของข้อมูล

รายละเอียดของชุดข้อมูล

รายละเอียดของชุดข้อมูล

ชื่อชุดข้อมูล ชุดที่หนึ่ง(เตาเผาหนึ่ง)

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง 414.75 ลิตร/ ชั่วโมง

ปริมาณการผลิตเหล็ก 82 แท่ง/ ชั่วโมง

น้ำหนักของเหล็ก 115 kg/ แท่ง

ความกว้างของเหล็ก .11 เมตร

ความยาวของเหล็ก 2.46 เมตร

เวลาการเปิดประตูเหล็ก 15 วินาที/ ครั้ง

เปอร์เซ็นต์สเกล 2.0914 %

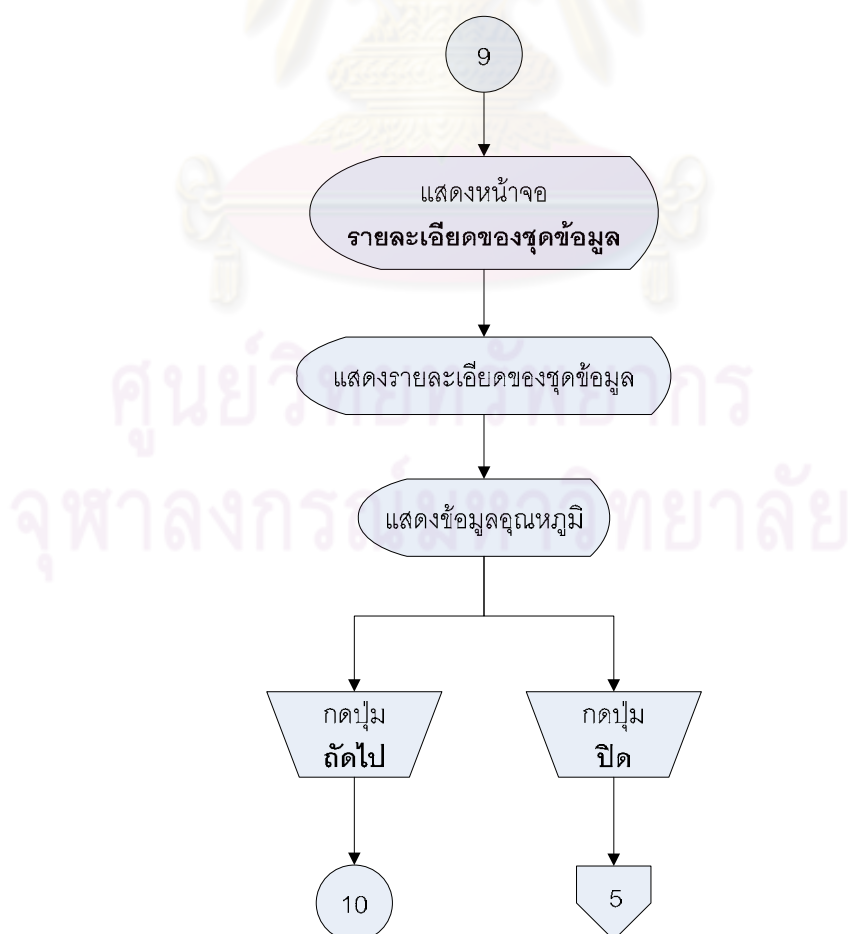
เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนขณะเปิดประตูเหล็ก 7.6033 %

เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนขณะเปิดประตูเหล็ก 9.9067 %

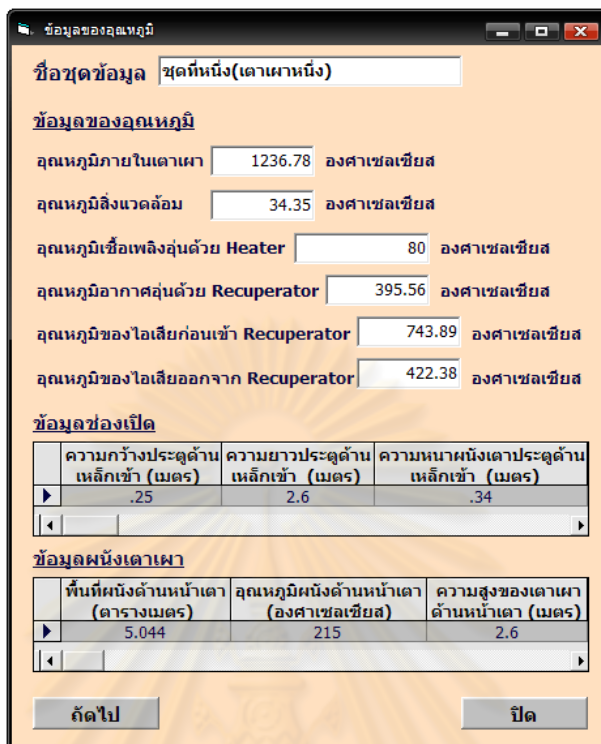
ข้อมูลอุณหภูมิ

	อุณหภูมิภายในเตาเผา (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิไอเสีย (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (องศาเซลเซียส)
	1236.78	743.89	34.35

ถัดไป ปิด



10. แสดงหน้าต่างข้อมูลของอุณหภูมิ



ข้อมูลของอุณหภูมิ

ชื่อจุดข้อมูล

ข้อมูลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในเตาเผา องศาเซลเซียส

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเชื้อเพลิงอุ่นด้วย Heater องศาเซลเซียส

อุณหภูมิอากาศอุ่นด้วย Recuperator องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของไอลีก่อนเข้า Recuperator องศาเซลเซียส

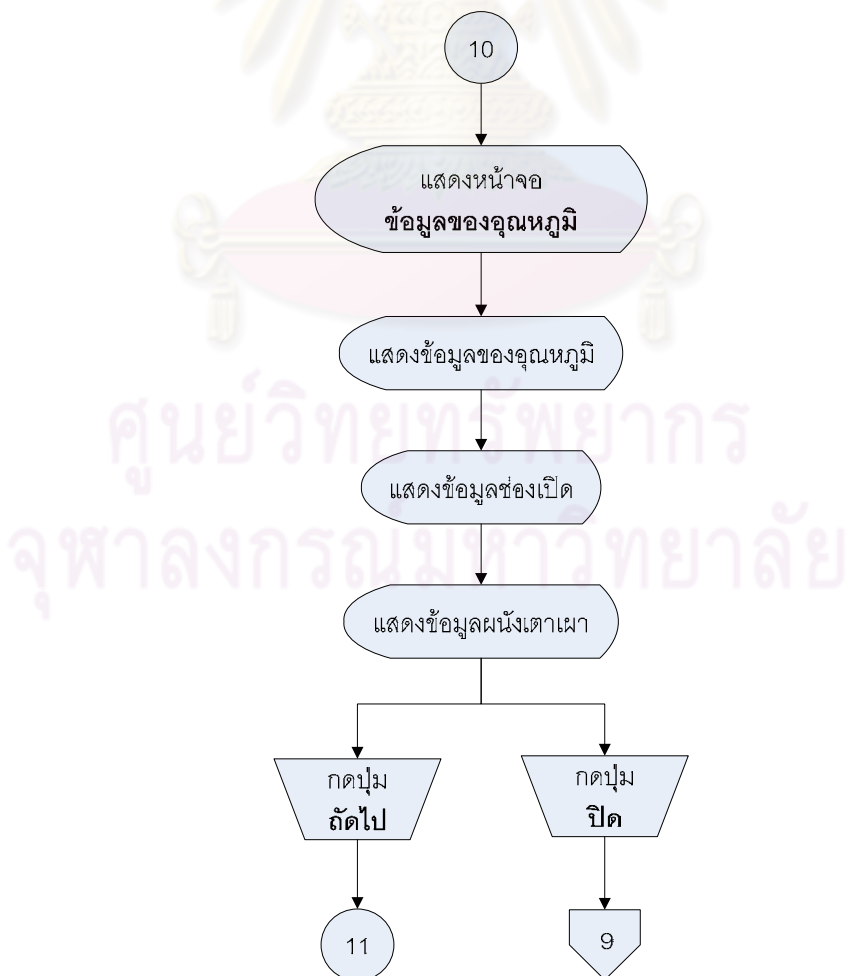
อุณหภูมิของไอลี้ออกจาก Recuperator องศาเซลเซียส

ข้อมูลช่องเปิด

ความกว้างประตูด้าน เหล็กเข้า (เมตร)	ความยาวประตูด้าน เหล็กเข้า (เมตร)	ความหนาผนังเตาประตูด้าน เหล็กเข้า (เมตร)
.25	2.6	.34

ข้อมูลผนังเตาเผา

พื้นที่ผนังด้านหน้าเตา (ตารางเมตร)	อุณหภูมิผนังด้านหน้าเตา (องศาเซลเซียส)	ความสูงของเตาเผา ด้านหน้าเตา (เมตร)
5.044	215	2.6



11. แสดงหน้าต่างข้อมูลของช่องเปิดและผนังเตาเผา

ข้อมูลของช่องเปิดและผนังเตาเผา

ชื่อชุดข้อมูล ชุดที่หนึ่ง(เตาเผาหนึ่ง)

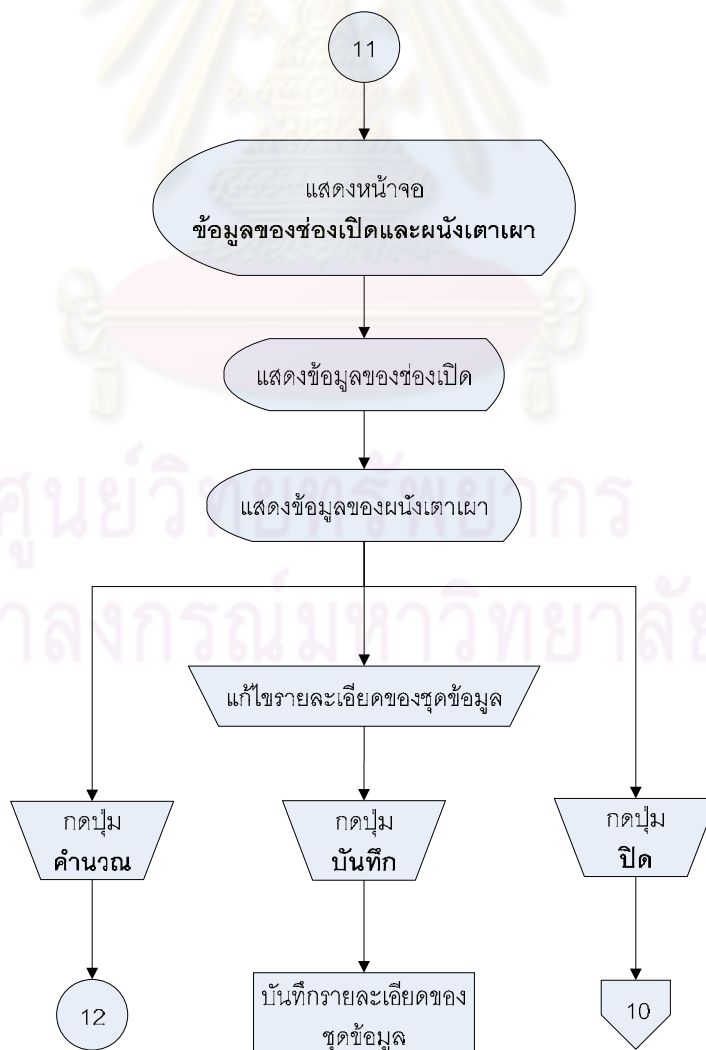
ข้อมูลของช่องเปิด

	ความกว้าง (เมตร)	ความยาว (เมตร)	ความหนา (เมตร)
ประตูด้านเหล็กเข้า	.25	2.6	.34
ประตูด้านยิงเหล็ก	.3	.6	.44
ประตูด้านเหล็กออก	.4	.6	.44

ข้อมูลของผนังเตาเผา

	พื้นที่ (ตารางเมตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความสูง (เมตร)
ผนังด้านหน้าเตา	5.044	215	2.6
ผนังด้านหลังเตา	3.8324	92	1.474
ผนังด้านยิงเหล็ก	18.7322	84.6364	1.2
ผนังด้านแท่นรีด	18.7322	74.7273	1.2

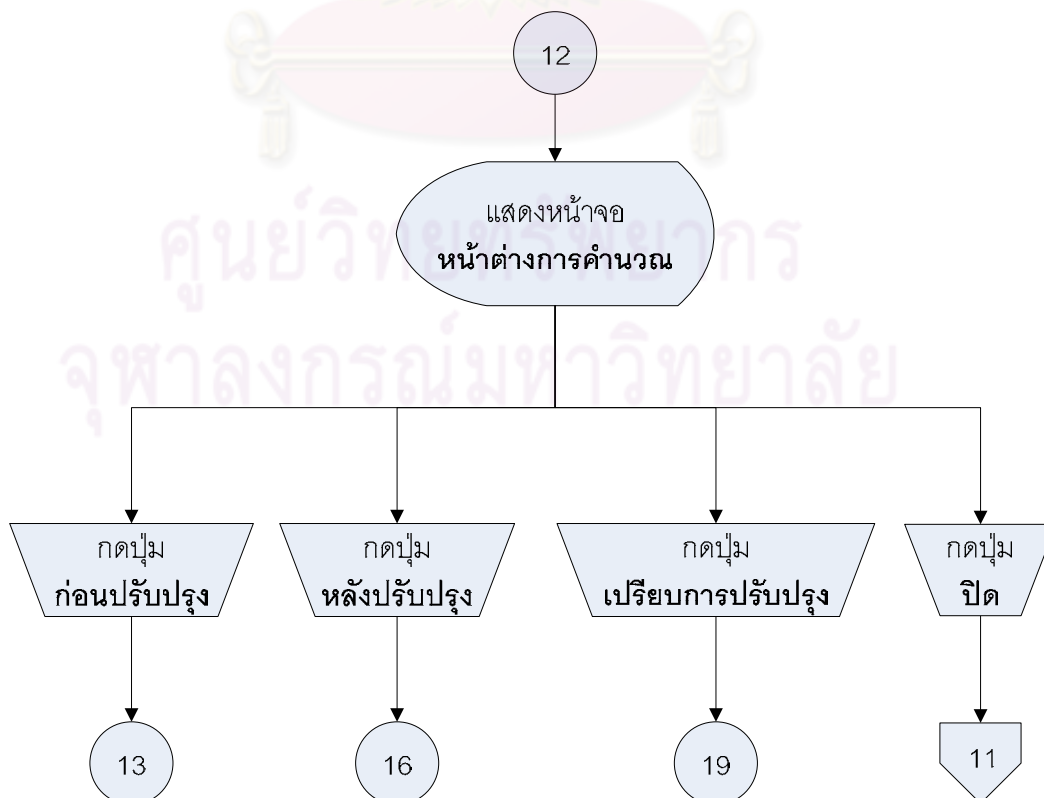
คำนวณ ปิด



7.2 ขั้นตอนการคำนวณ

การคำนวณของโปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนของการคำนวณสมมูลพลังงานของเตาเผาก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง ส่วนสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบผลของการปรับปรุง โดยมีรายละเอียดของ Flow chart และผลจากการคำนวณของโปรแกรม ดังนี้

1. แสดงหน้าต่างการคำนวณ



2. แสดงหน้าต่างผลการคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผา (ก่อนปรับปรุง)

สมดุลพลังงานของเตาเผา(ก่อนปรับปรุง)

สมดุลมวลของเตาเผา

สมดุลความร้อนของเตาเผา

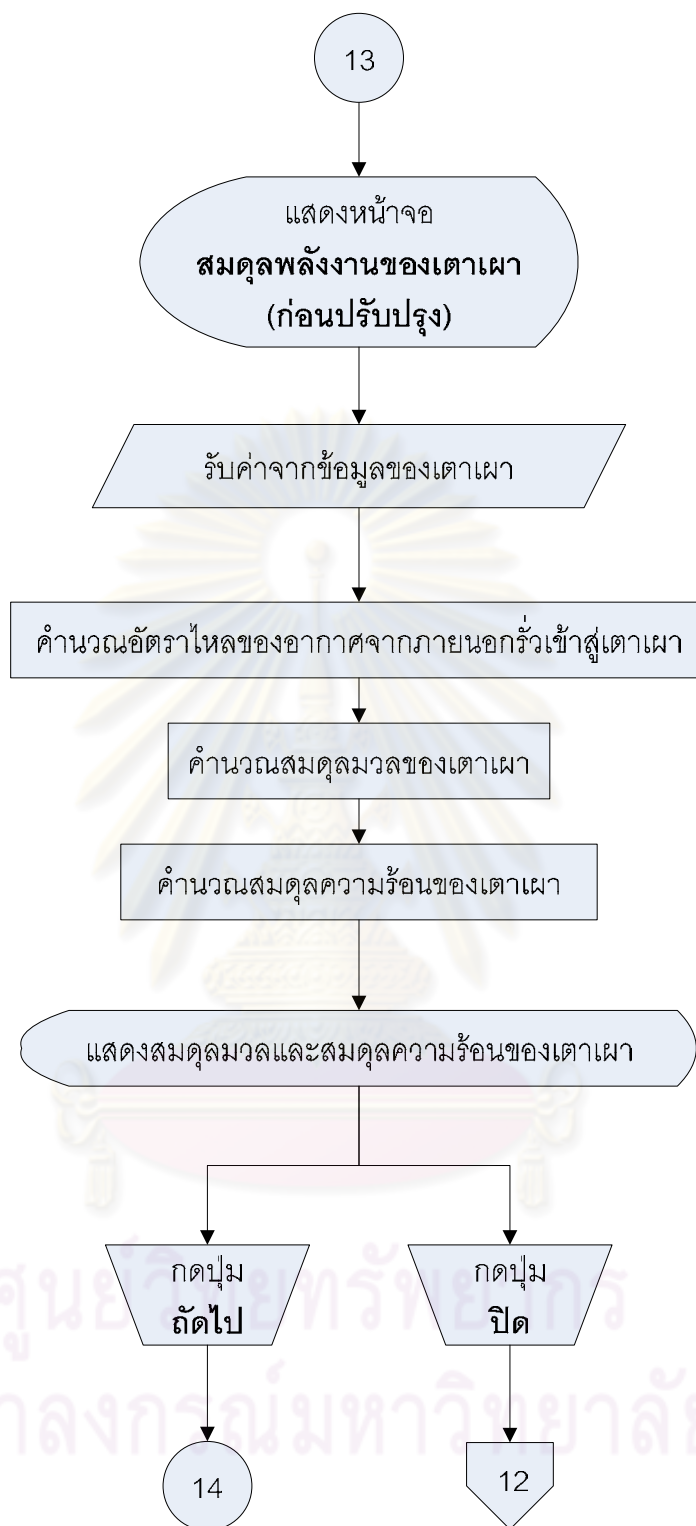
พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผา

ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า	<input type="text"/>	kW
ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล	<input type="text"/>	kW
ความร้อนจากการอุ่นอากาศ	<input type="text"/>	kW
ความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา	<input type="text"/>	kW

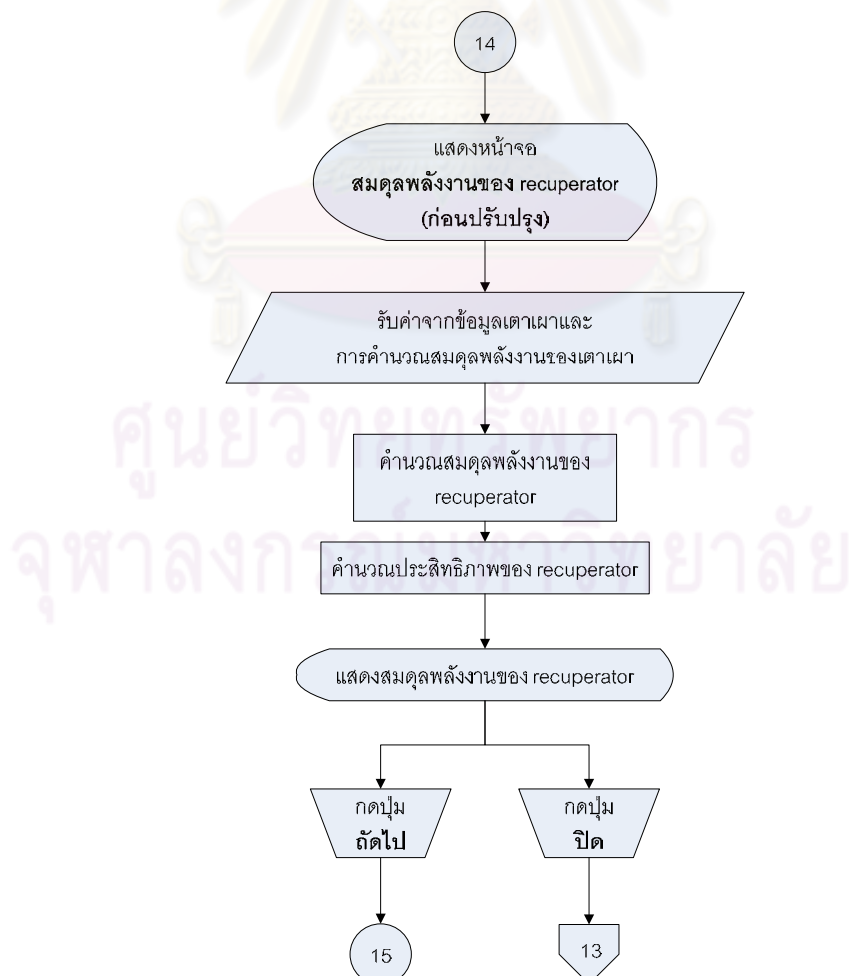
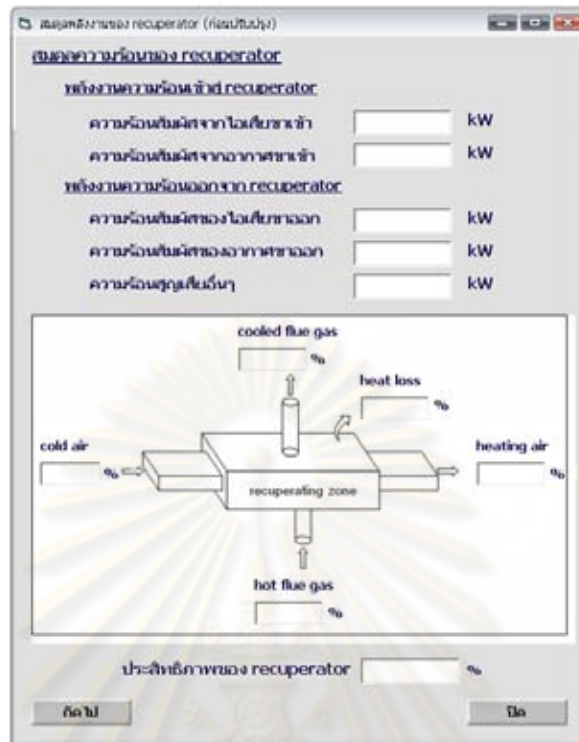
พลังงานความร้อนออกจากเตาเผา

ความร้อนสัมผัสเข้าสู่เหล็ก	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสัมผัสของไอเสีย	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสัมผัสเข้าสู่สเกล	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	<input type="text"/>	kW

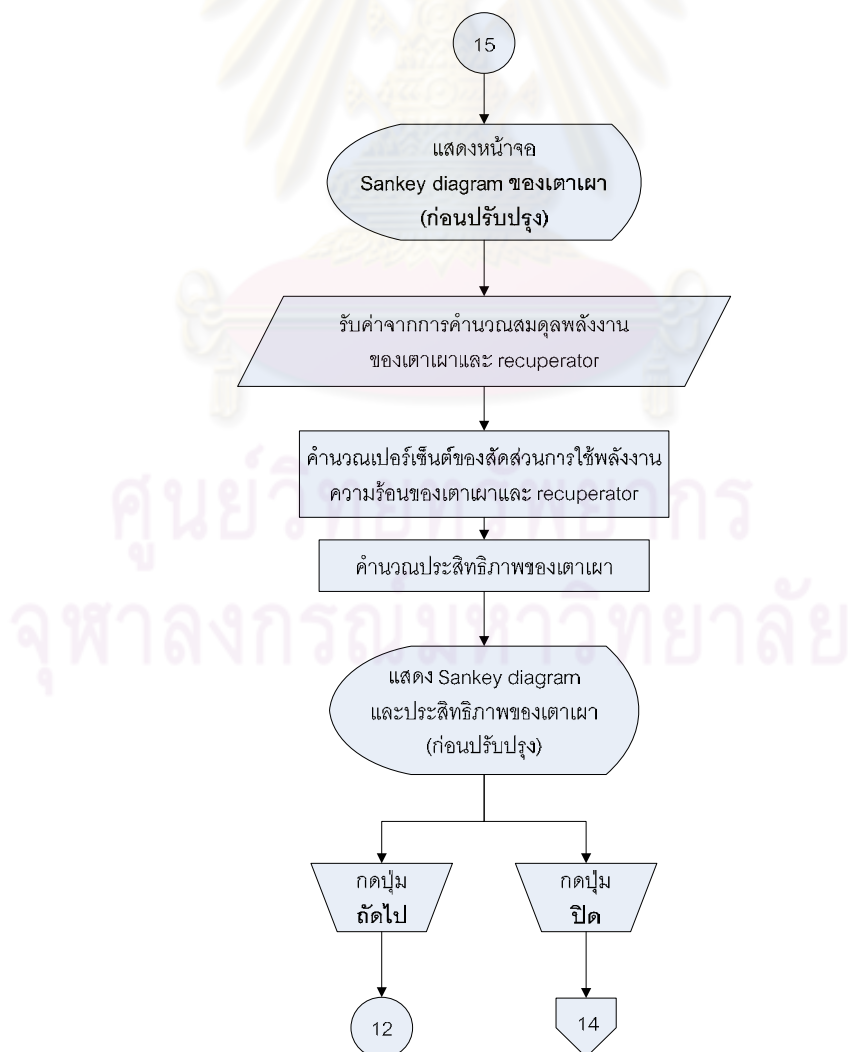
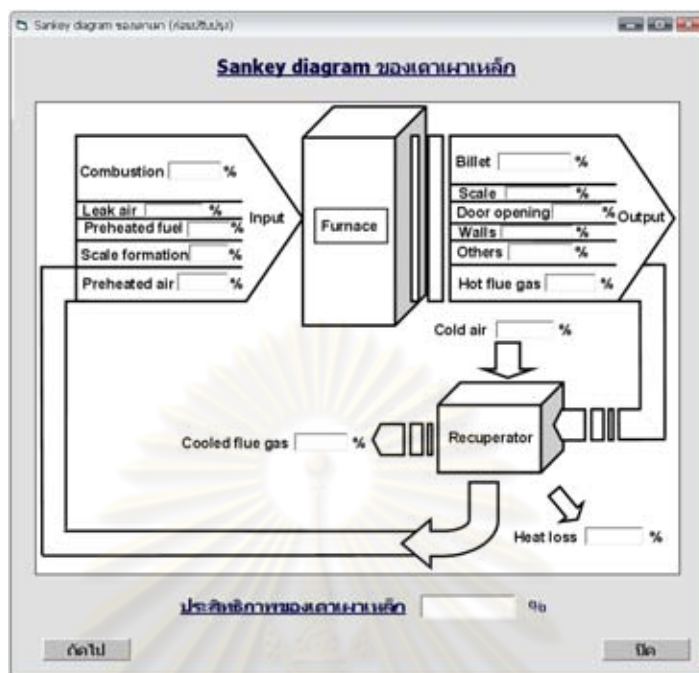
ถัดไป ปิด



3. แสดงหน้าต่างผลการคำนวณสมมูลพลังงานของ recuperator (ก่อนปรับปรุง)



4. แสดงหน้าต่างผลการคำนวณ Sankey diagram ของเตาเผา (ก่อนปรับปรุง)



5. แสดงหน้าต่างผลการคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผา (หลังปรับปรุง)

สมดุลพลังงานของเตาเผา(หลังปรับปรุง)

สมดุลมวลของเตาเผา

สมดุลความร้อนของเตาเผา

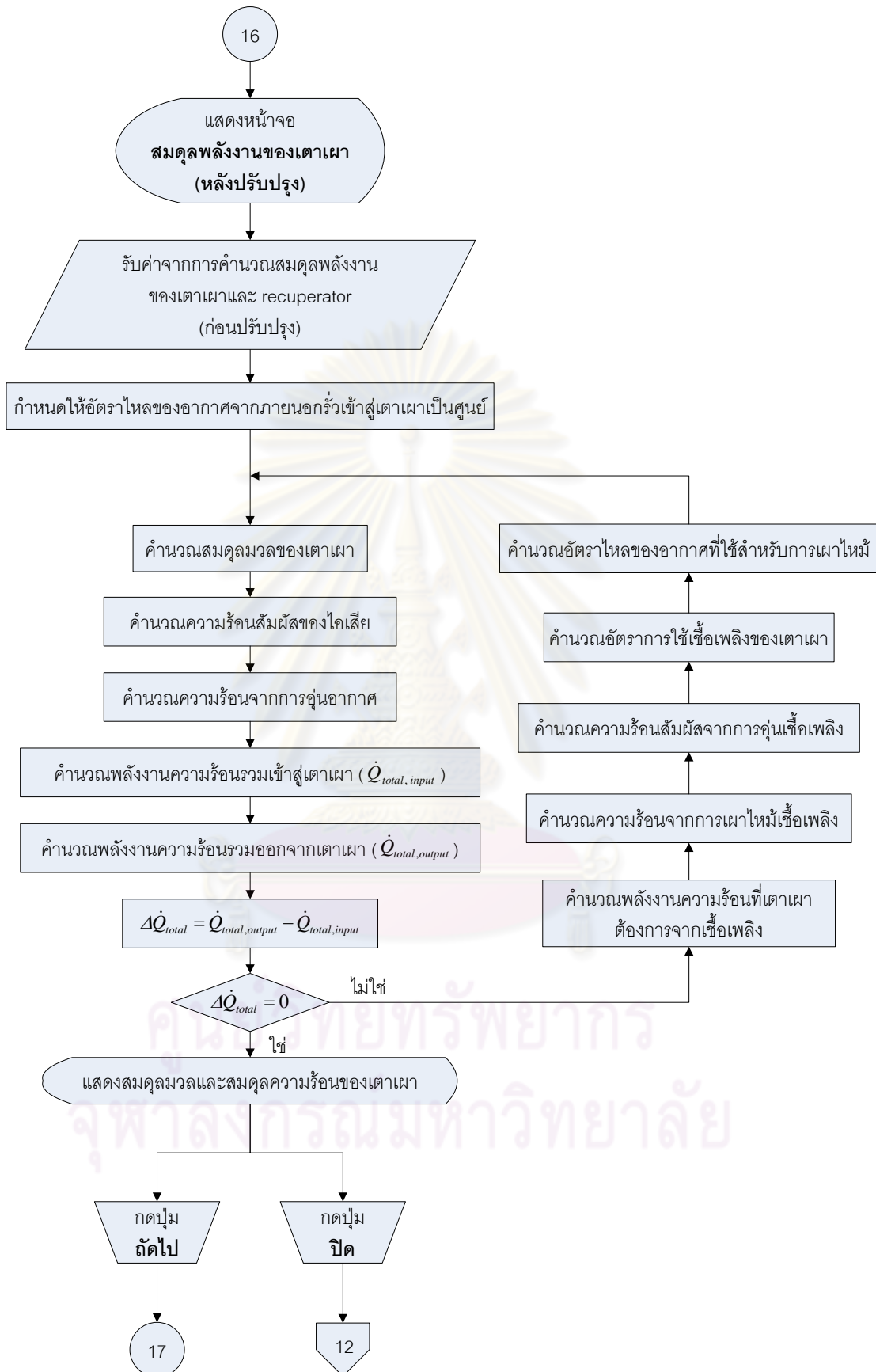
พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผา

ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า	<input type="text"/>	kW
ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล	<input type="text"/>	kW
ความร้อนจากการอุ่นอากาศ	<input type="text"/>	kW

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผา

ความร้อนสัมผัสเข้าสู่เหล็ก	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสัมผัสของไอเสีย	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสัมผัสเข้าสู่สเกล	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	<input type="text"/>	kW
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	<input type="text"/>	kW

ถัดไป ปิด



6. แสดงหน้าต่างผลการคำนวณสมมูลพลังงานของ recuperator (หลังปรับปรุง)

สมมูลพลังงานของ recuperator (หลังปรับปรุง)

สมดุลความร้อนของ recuperator

พลังงานความร้อนเข้า recuperator

ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้า kW

ความร้อนสัมผัสจากอากาศเข้า kW

พลังงานความร้อนออกจา recuperator

ความร้อนสัมผัสของไอเสียออก kW

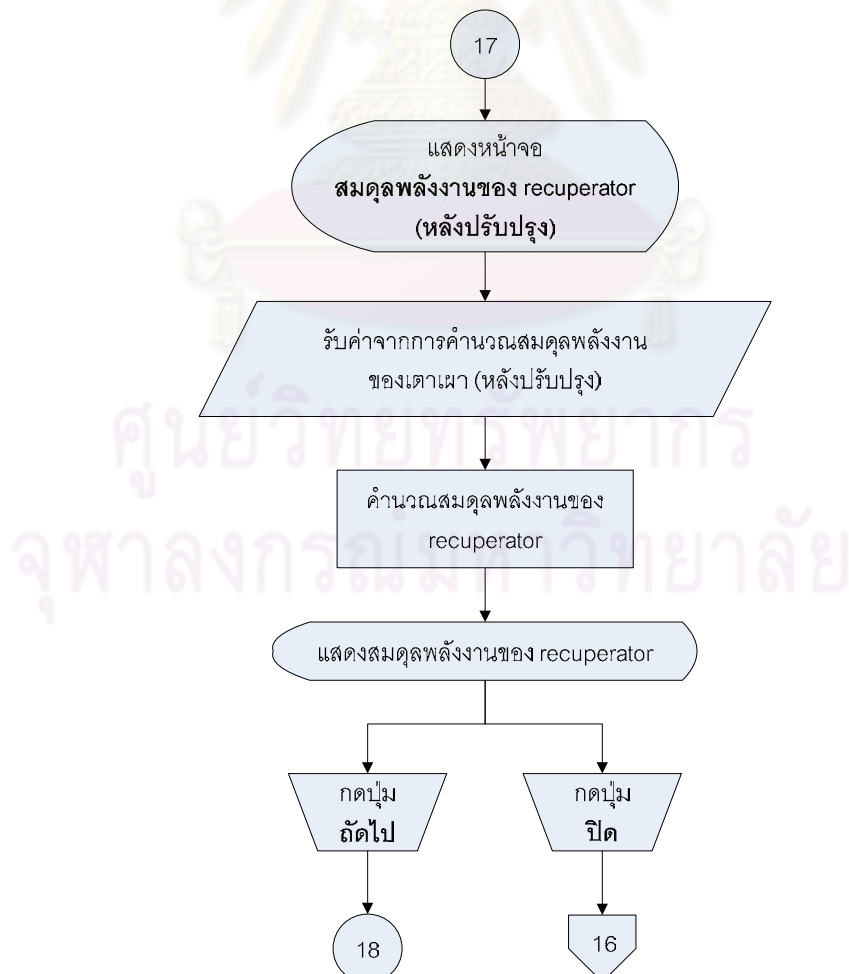
ความร้อนสัมผัสของอากาศออก kW

ความร้อนสูญเสียอื่นๆ kW

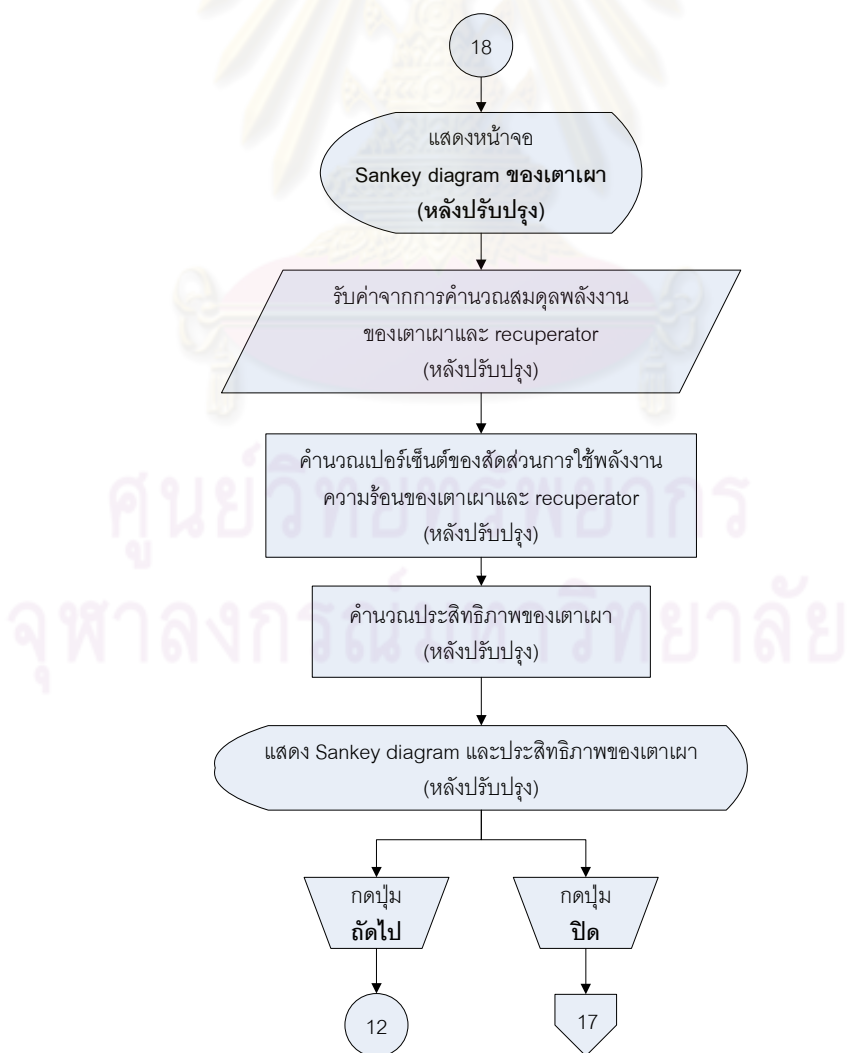
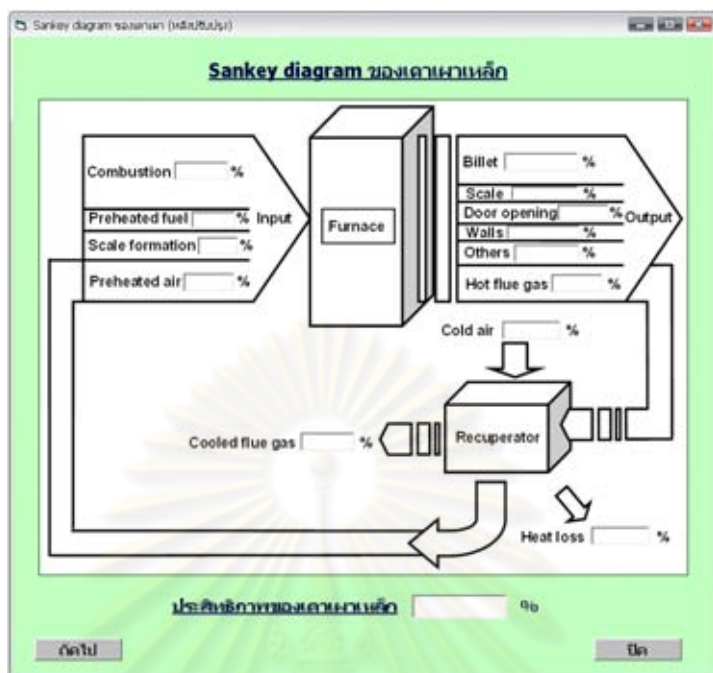
Diagram showing a recuperating zone with inputs: cold air (\dot{Q}_a), hot flue gas (\dot{Q}_b), and heat loss (\dot{Q}_c). Outputs: heating air (\dot{Q}_d), cooled flue gas (\dot{Q}_e), and hot flue gas (\dot{Q}_f).

ประสิทธิภาพของ recuperator %

ถัดไป ปิด



7. แสดงหน้าต่างผลการคำนวณ Sankey diagram ของเตาเผา (หลังปรับปรุง)



8. แสดงหน้าต่างผลการคำนวณของการปรับปรุง

ผลของการปรับปรุง

เปรียบเทียบผลการปรับปรุง

	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	<input type="text"/>	<input type="text"/> kW
ความร้อนจากการอุ่นเชื้อเพลิงขาเข้า	<input type="text"/>	<input type="text"/> kW
รวม	<input type="text"/>	<input type="text"/> kW

การประหยัด

ลดการใช้พลังงานความร้อน kW

หรือ

สามารถลดอัตราการใช้เชื้อเพลิง ลิตร/ชั่วโมง

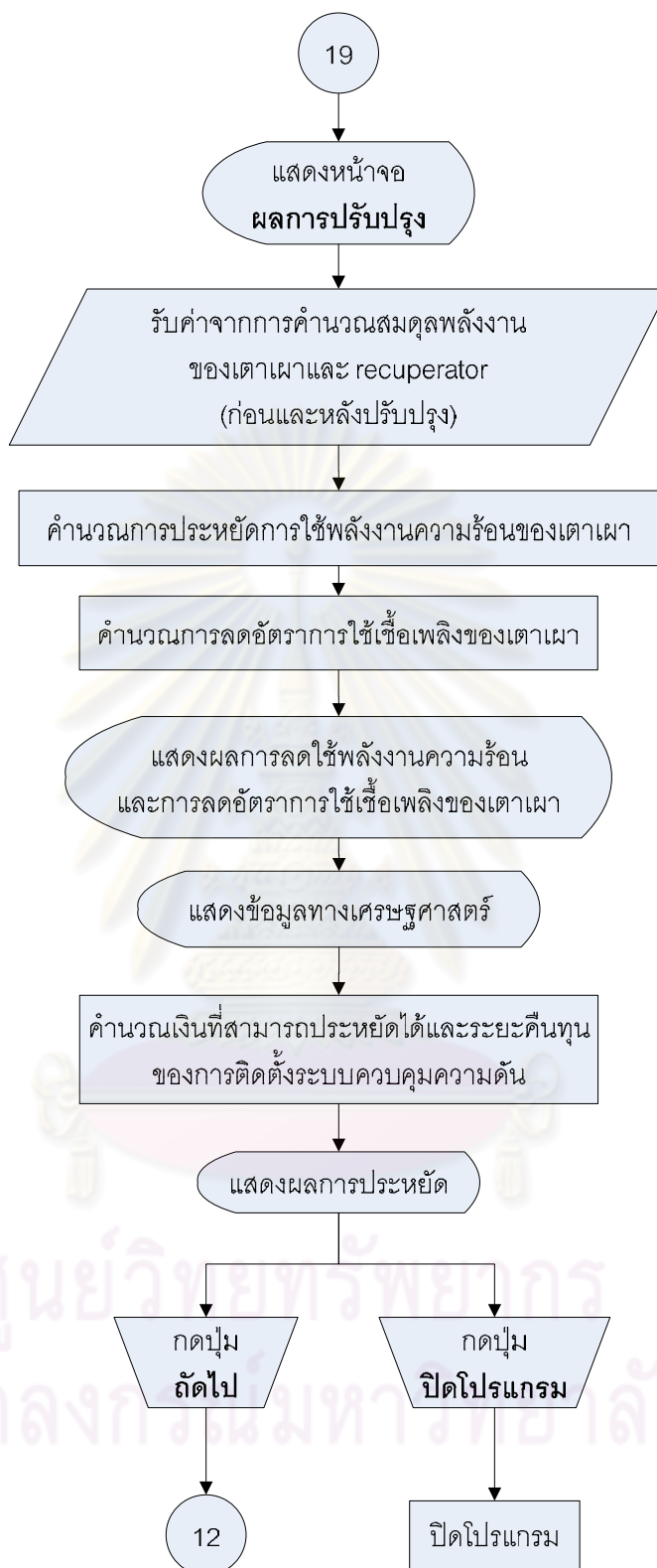
คิดเป็นร้อยละ ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงเดิม

ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	ค่า	หน่วย
▶ ราคาเชื้อเพลิง	<input type="text"/>	บาท/ลิตร
ชั่วโมงการทำงานของเขาเผาต่อวัน	<input type="text"/>	ชั่วโมง/วัน
วันทำงานของเขาเผาต่อปี	<input type="text"/>	วัน/ปี
เงินลงทุน (ค่าอุปกรณ์)	<input type="text"/>	บาท
เงินลงทุน (ค่าแรง)	<input type="text"/>	บาท

เงินที่สามารถประหยัดได้ บาทต่อปี

ระยะคืนทุนของการติดตั้งระบบควบคุมความดัน เดือน



บทที่ 8

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ข้อมูลดิบจากการตรวจวัดและเก็บข้อมูลดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก จะนำมาเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาสมดุลมวล สมดุลความร้อน และประสิทธิภาพของเตาเผา รวมถึงการประเมินผลจากการปรับปรุง โดยตัวอย่างของวิธีการคำนวณจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข ซึ่งมีรายละเอียดของผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล ดังนี้

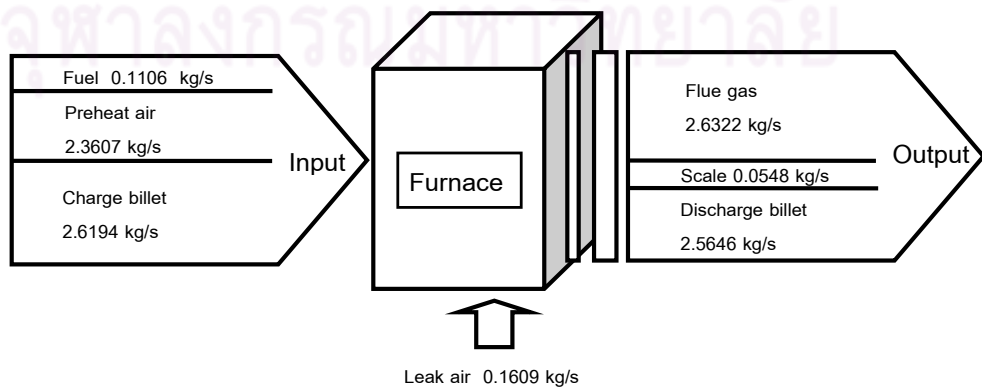
8.1 ผลการคำนวณก่อนทำการปรับปรุง

8.1.1 สมดุลมวลของเตาเผาก่อนทำการปรับปรุง

ตารางที่ 8.1 ตารางแสดงรายละเอียดสมดุลมวลของเตาเผาก่อนทำการปรับปรุง

Input	kg/s	%	Output	kg/s	%
1) อัตราไหลของเชื้อเพลิง	0.1106	2.11	1) อัตราไหลของสเกล	0.0548	1.05
2) อัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้	2.3607	44.95	2) อัตราไหลของเหล็กออก	2.5646	48.83
3) อัตราไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา	0.1609	3.06	3) อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผา	2.6322	50.12
4) อัตราไหลของเหล็กเข้า	2.6194	49.88			
Total mass input	5.2516	100.00	Total mass output	5.2516	100.00

จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 8.1 จะสามารถเขียน diagram สมดุลมวลของเตาเผา ดังนี้



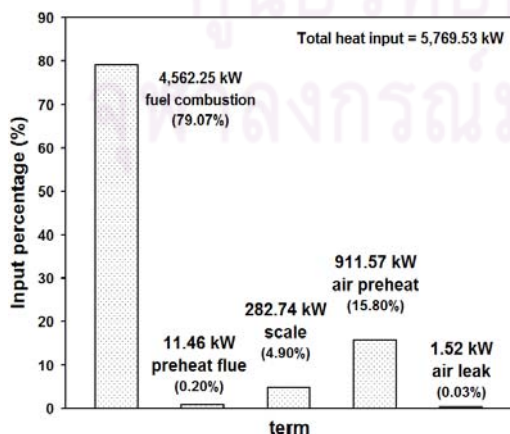
รูปที่ 8.1 Diagram สมดุลมวลของเตาเผาก่อนทำการปรับปรุง

8.1.2 สมดุลความร้อนของเตาเผาก่อนทำการปรับปรุง

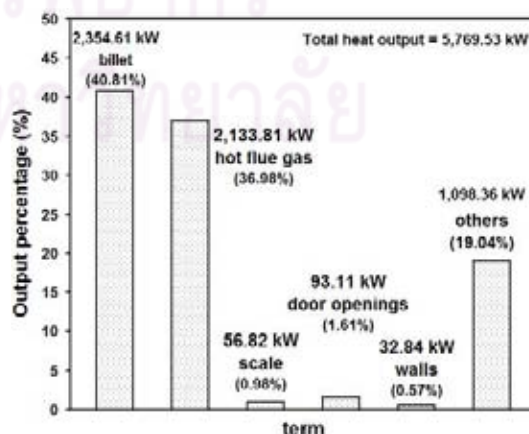
ตารางที่ 8.2 ตารางแสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของเตาเผาก่อนทำการปรับปรุง

Input Zone	kW	%	Output Zone	kW	%
1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	4,562.25	79.07	1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	2,354.61	40.81
2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า	11.46	0.20	2) ความร้อนสัมผัสที่ออกไปกับไอเสีย	2,133.81	36.98
3) ความร้อนที่เกิดจากการก่อตัวของสเกล	282.74	4.90	3) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล	56.82	0.98
4) ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่ recuperator	911.57	15.80	4) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	93.11	1.61
5) ความร้อนจากอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา	1.52	0.03	5) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	32.84	0.57
			6) ความสูญเสียอื่นๆ (เช่นหลังคาและพื้น)	1098.36	19.04
Total Heat Input	5,769.53	100.00	Total Heat Output	5,769.53	100.00

ผลจากการคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผามีค่าเท่ากับ 51.5% โดยข้อมูลดังแสดงไว้ในตารางที่ 8.2 จะสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงรายละเอียดพลังงานความร้อนเข้าและออกจากเตาเผาได้ ดังรูป



รูปที่ 8.2 พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผา



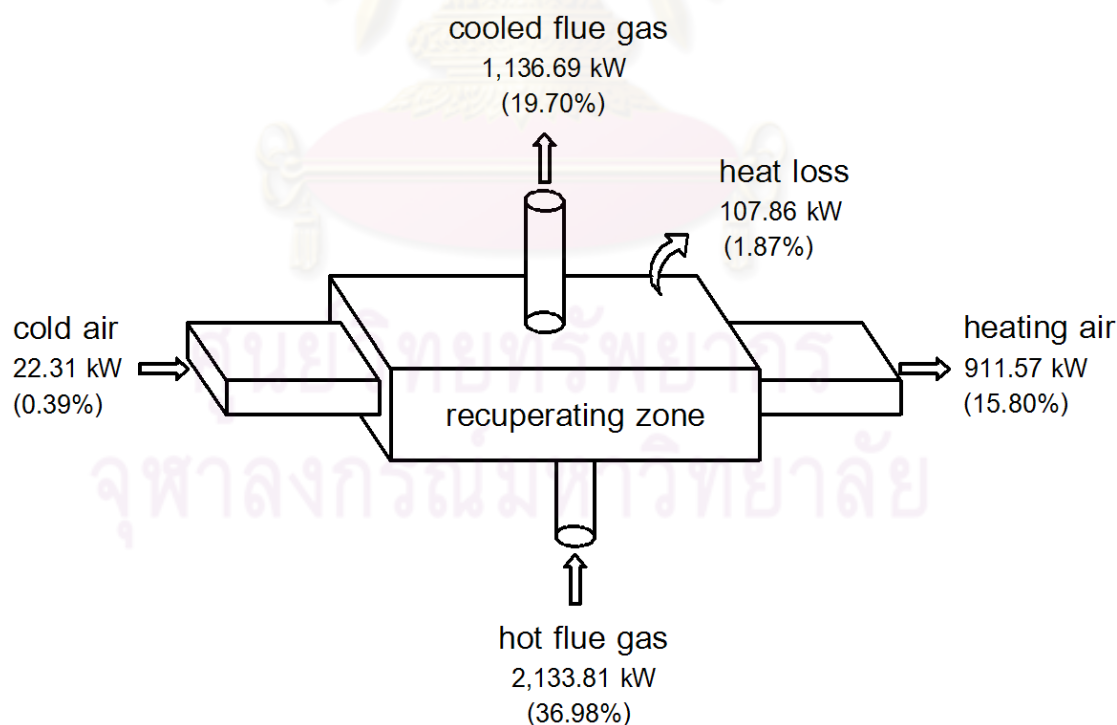
รูปที่ 8.3 พลังงานความร้อนออกจากเตาเผา

8.1.3 สมดุลความร้อนของ recuperator ก่อนทำการปรับปรุง

ตารางที่ 8.3 ตารางแสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของ recuperator ก่อนทำการปรับปรุง

Input Zone	kW	%	Output Zone	kW	%
1) ความร้อนสัมผัสจาก ไอเสียขาเข้า	2,133.81	36.98	1) ความร้อนสัมผัสจาก ไอเสียขาออก	1,136.69	19.70
2) ความร้อนสัมผัสจาก อากาศขาเข้า	22.31	0.39	2) ความร้อนสัมผัสจาก อากาศขาออก	911.57	15.80
			3) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	107.86	1.87
Total Heat Input	2,156.12	37.37	Total Heat Output	2,156.12	37.37

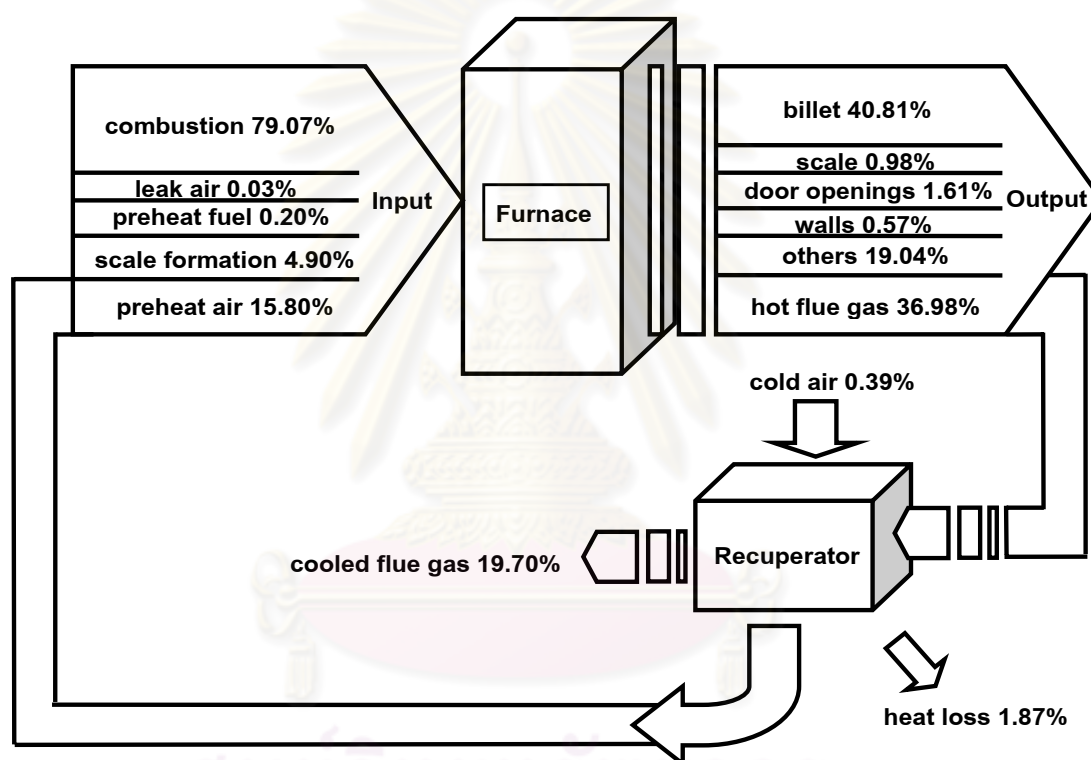
ผลจากการคำนวณประสิทธิภาพของ recuperator มีค่าเท่ากับ 0.493 โดยข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 8.3 จะสามารถนำมาเขียน diagram แสดงรายละเอียดพลังงานความร้อนเข้าและออกจาก recuperator ได้ ดังรูป



รูปที่ 8.4 Diagram สมดุลความร้อนของ recuperator ก่อนทำการปรับปรุง

เมื่อพิจารณา diagram สมดุลความร้อนของ recuperator ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.4 พบว่า ความร้อนที่ออกไปกับไอเสียมีปริมาณมากถึง 37.0% ของพลังงานความร้อนรวมที่ออกจากเตาเผาทั้งหมด เตาเผาจึงมี recuperator ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียกับอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ซึ่งผลจากการคำนวณจะเห็นได้ว่าอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 15.8% ของพลังงานความร้อนรวมที่เข้าสู่เตาเผา และส่งผลให้ความร้อนออกไปกับไอเสียสู่บรรยากาศลดลงเหลือ 19.7% ของความร้อนรวมออกจากเตาเผา

ผลจากการคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาทั้งระบบก่อนทำการปรับปรุง จะสามารถนำมาเขียน Sankey diagram ของเตาเผา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.5



รูปที่ 8.5 Sankey diagram ของเตาเผาทั้งระบบก่อนทำการปรับปรุง

เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและเก็บข้อมูล พบว่า ความดันภายในเตาเผาส่วนใหญ่มีค่าเป็นลบและแกว่งขึ้นลงในช่วงที่มีการเปิดปิดประตูยิงเหล็ก ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะมีอากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องเปิดต่างๆ โดยหากพิจารณาประกอบกับข้อมูลการตรวจวัดองค์ประกอบภายในไอเสีย พบว่า เปอร์เซนต์ออกซิเจนภายในไอเสียขณะปิดประตูยิงเหล็กมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.60% แต่เมื่อทำการเปิดประตูยิงเหล็กเปอร์เซนต์ออกซิเจนภายในไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 9.91% ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นผลจากการรั่วของอากาศเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องประตูยิงเหล็ก โดยอัตราการไหลของอากาศในส่วนนี้คำนวณได้จากผลต่างของเปอร์เซนต์

ออกซิเจนภายในไอเสียขณะเปิดและปิดประตูยিংเหล็ก ผลการคำนวณดังแสดงไว้ในตารางที่ 8.1 พบว่าอัตราไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผามีค่าเท่ากับ 0.161 kg/s และเมื่อพิจารณา diagram สมดุลมวลของเตาเผาดังรูปที่ 8.1 จะเห็นได้ว่าการรั่วของอากาศเข้าสู่เตาเผาทำให้ปริมาณของมวลที่ไหลเข้าสู่เตาเผาที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อทำการสมดุลมวลของเตาเผาปริมาณของมวลที่ไหลออกจากเตาเผาหรืออัตราการไหลของไอเสียจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนของเตาเผา พบว่า พลังงานความร้อนหลักที่เข้าสู่เตาเผาได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและจากการอุ่นอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ด้วยไอเสีย ซึ่งคิดเป็น 79.1% และ 15.8% ของพลังงานความร้อนรวมที่เข้าสู่เตาเผา ส่วนแหล่งความร้อนหลักที่ออกจากเตาเผาจะประกอบด้วยความร้อนที่เหล็กสามารถดูดซับได้ 40.8% ส่วนที่เหลือเป็นความร้อนที่เตาเผาสูญเสียในรูปแบบต่างๆ คิดรวมเป็น 59.2% ของพลังงานความร้อนรวมที่ออกจากเตาเผา เมื่อพิจารณา sankey diagram ของเตาเผาดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.5 จะเห็นได้ว่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกไปกับไอเสียมีค่าสูงถึง 37.0% โดยส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา ทำให้อากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาพาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ออกไปพร้อมกับไอเสีย ส่งผลให้ความร้อนที่ออกไปกับไอเสียมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิม

8.2 ผลการคำนวณหลังทำการปรับปรุง

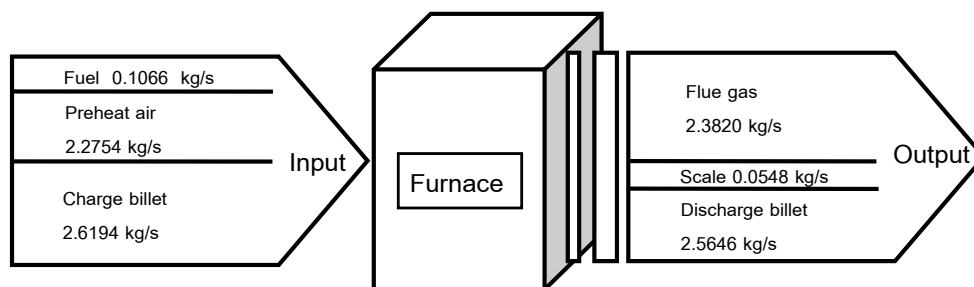
การคำนวณผลหลังจากการปรับปรุงจะอาศัยข้อมูลจากการคำนวณก่อนทำการปรับปรุง มาพิจารณาตามเงื่อนไขที่กำหนดดังแสดงไว้ในบทที่ 6 โดยรายละเอียดของผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผลหลังจากการปรับปรุง มีดังนี้

8.2.1 สมดุลมวลของเตาเผาหลังทำการปรับปรุง

ตารางที่ 8.4 ตารางแสดงรายละเอียดสมดุลมวลของเตาเผาหลังทำการปรับปรุง

Input	kg/s	%	Output	kg/s	%
1) อัตราไหลของเชื้อเพลิง	0.1066	2.13	1) อัตราไหลของสเกล	0.0548	1.10
2) อัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้	2.2754	45.50	2) อัตราไหลของเหล็กออก	2.5646	51.28
3) อัตราไหลของเหล็กเข้า	2.6194	52.37	3) อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผา	2.3820	47.62
Total mass input	5.0014	100.00	Total mass output	5.0014	100.00

จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 8.4 จะสามารถเขียน diagram สมดุลมวลของเตาเผา ดังนี้



รูปที่ 8.6 Diagram สมดุลมวลของเตาเผาหลังทำการปรับปรุง

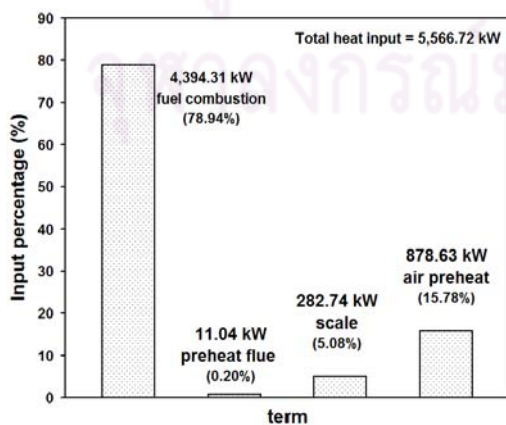
การคำนวณสมดุลมวลของเตาเผาหลังจากการปรับปรุง จะอาศัยข้อมูลการคำนวณผลก่อนทำการปรับปรุงมาพิจารณาภายใต้ข้อสมมุติฐานที่กำหนด โดยพิจารณาว่าเมื่อทำการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา ทำให้สามารถลดปริมาณของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผาได้ ซึ่งการลดปริมาณของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผานั้น ทำให้อัตราการไหลของมวลเข้าสู่เตาเผาที่มีปริมาณลดลง เมื่อทำการสมดุลมวลของเตาเผาหลังจากการปรับปรุง เป็นผลให้อัตราการไหลของไอเสียมีค่าลดลงและทำให้พลังงานความร้อนที่ออกไปกับไอเสียมีค่าลดลงตาม โดยผลการคำนวณสมดุลมวลของเตาเผาดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.6 เป็นการประเมินผลสมดุลมวลของเตาเผาที่อยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนหลังจากการปรับปรุง ซึ่งการคำนวณจำเป็นต้องพิจารณาสมดุลมวลควบคู่ไปกับสมดุลความร้อนของเตาเผา งานวิจัยชิ้นนี้จึงพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณและประเมินผลที่ได้หลังจากการปรับปรุง โดยผลจากการคำนวณสมดุลมวลของเตาเผา พบว่า อัตราไหลของไอเสียมีปริมาณลดลงจากเดิม 2.63 kg/s เหลือเพียง 2.38 kg/s ซึ่งการลดลงของอัตราการไหลของไอเสียส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากการลดปริมาณของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา แต่อีกส่วนเป็นผลทางอ้อมเกิดจากการที่พลังงานความร้อนที่ออกไปกับไอเสียมีค่าลดลง ส่งผลให้เตาเผาต้องการพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ลดลง ดังรูปที่ 8.6 จะแสดงให้เห็นว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงมีค่าลดลงจากเดิม 0.111 kg/s เหลือเพียง 0.107 kg/s เมื่อพิจารณาให้เตาเผาใช้สัดส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงที่ใช้สำหรับการเผาไหม้มีค่าคงที่ ทำให้อัตราการไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้มีค่าลดลงเช่นกัน โดยจากเดิมมีอัตราการไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ 2.36 kg/s เหลือเพียง 2.28 kg/s ผลจากการทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของมวลที่เข้าและออกจากเตาเผาที่มีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้สมดุลความร้อนของเตาเผาเปลี่ยนแปลงไป โดยจะแสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของเตาเผาไว้ในตารางที่ 8.5

8.2 สมดุลความร้อนของเตาเผาหลังทำการปรับปรุง

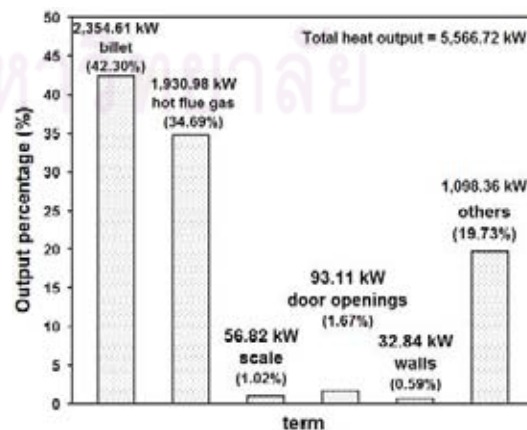
ตารางที่ 8.5 ตารางแสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของเตาเผาหลังทำการปรับปรุง

Input Zone	kW	%	Output Zone	kW	%
1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	4,394.31	78.94	1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	2,354.61	42.30
2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า	11.04	0.20	2) ความร้อนสัมผัสที่ออกไปกับไอเสีย	1,930.98	34.69
3) ความร้อนที่เกิดจากการก่อตัวของสเกล	282.74	5.08	3) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล	56.82	1.02
4) ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่ recuperator	878.63	15.78	4) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	93.11	1.67
			5) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	32.84	0.59
			6) ความสูญเสียอื่นๆ (เช่นหลังคาและพื้น)	1098.36	19.73
Total Heat Input	5,566.72	100.00	Total Heat Output	5,566.72	100.00

ผลจากการคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผามีค่าเท่ากับ 53.4% โดยข้อมูลดังแสดงไว้ในตารางที่ 8.5 จะสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงรายละเอียดพลังงานความร้อนเข้าและออกจากเตาเผาได้ ดังรูป



รูปที่ 8.7 พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผา



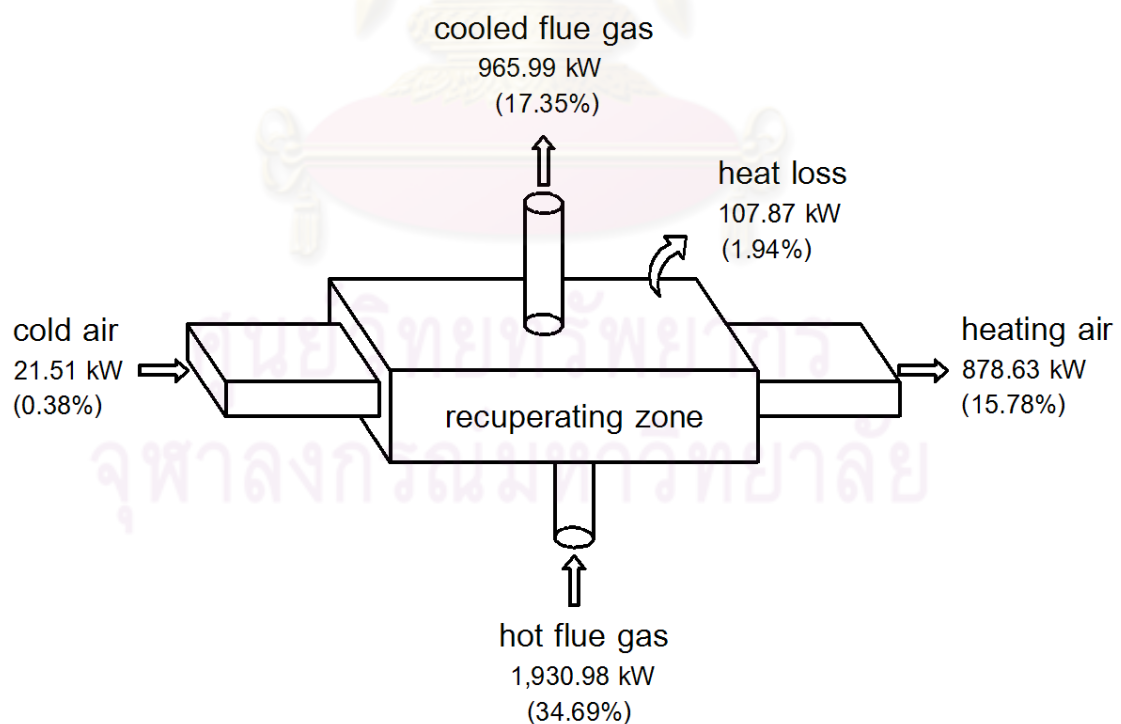
รูปที่ 8.8 พลังงานความร้อนออกจากเตาเผา

8.2.3 สมดุลความร้อนของ recuperator หลังทำการปรับปรุง

ตารางที่ 8.6 ตารางแสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของ recuperator หลังทำการปรับปรุง

Input Zone	kW	%	Output Zone	kW	%
1) ความร้อนสัมผัสจาก ไอเสียเข้า	1,930.98	34.69	1) ความร้อนสัมผัสจาก ไอเสียออก	965.99	17.35
2) ความร้อนสัมผัสจาก อากาศเข้า	21.51	0.38	2) ความร้อนสัมผัสจาก อากาศออก	878.63	15.78
			3) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	107.87	1.94
Total Heat Input	1,952.49	35.07	Total Heat Output	1,952.49	35.07

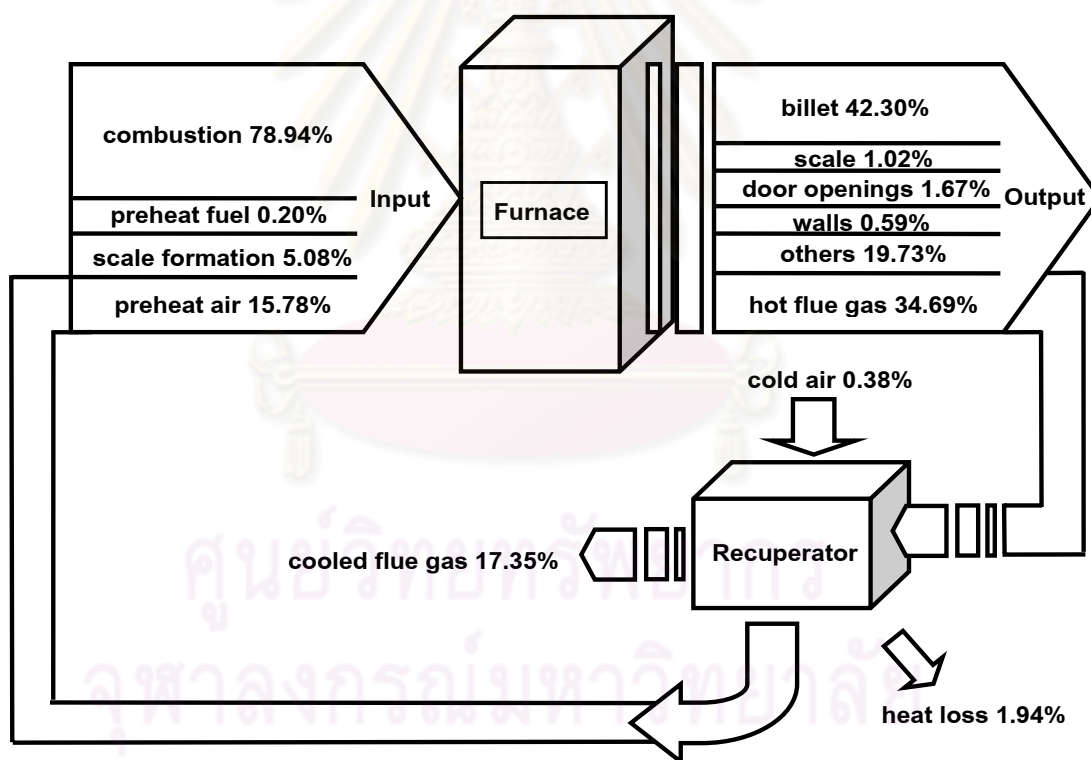
ผลจากการคำนวณประสิทธิภาพของ recuperator มีค่าเท่ากับ 0.493 โดยข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 8.6 จะสามารถนำมาเขียน diagram แสดงรายละเอียดพลังงานความร้อนเข้าและออกจาก recuperator ได้ ดังรูป



รูปที่ 8.9 Diagram สมดุลความร้อนของ recuperator หลังทำการปรับปรุง

เมื่อพิจารณา diagram สมดุลความร้อนของ recuperator หลังจากการปรับปรุงดังแสดงในรูปที่ 8.9 จะเห็นได้ว่าความร้อนที่ออกไปกับไอเสียมีค่าลดลงจากเดิม 37.0% เหลือเพียง 34.7% ของพลังงานความร้อนรวมที่ออกจากเตาเผาทั้งหมด เป็นผลให้ recuperator สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนของไอเสียให้กับอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ได้น้อยลง เมื่อพิจารณาภายใต้ข้อสมมุติฐานที่กำหนดให้ประสิทธิภาพของ recuperator ทั้งก่อนและหลังทำการปรับปรุงมีค่าคงเดิม พบว่าอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้เพียง 878.6 kW โดยเมื่อเทียบกับผลก่อนการปรับปรุงสามารถนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 911.6 kW ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดปริมาณของอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา ทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศด้วย recuperator มีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนที่ออกไปให้กับไอเสียมีค่าน้อยลง

จากผลการคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาทั้งระบบหลังทำการปรับปรุง จะสามารถนำมาเขียน Sankey diagram ของเตาเผา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.10



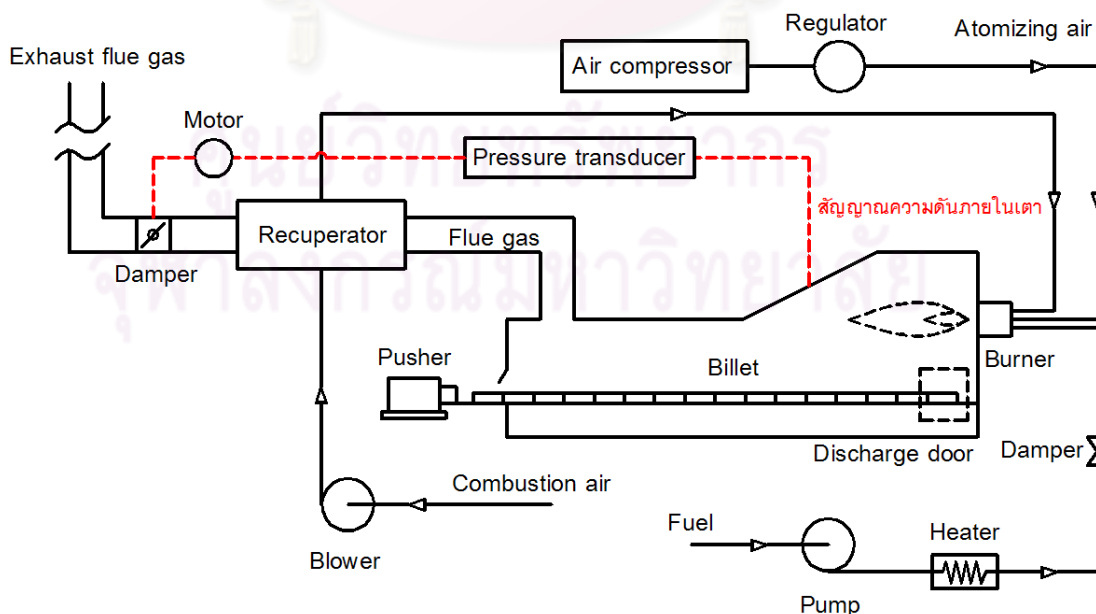
รูปที่ 8.10 Sankey diagram ของเตาเผาทั้งระบบหลังทำการปรับปรุง

ผลจากการคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาหลังจากทำการปรับปรุง พบว่า พลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียมีปริมาณลดลงถึง 202.8 kW ซึ่งเป็นผลให้เตาเผาสามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เนื่องจากระบบของเตาเผานี้มี recuperator ที่สามารถ

นำความร้อนที่ออกไปกับไอเสียกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้การที่ปริมาณความร้อนของไอเสียลดลงนั้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ด้วยไอเสียมีค่าลดลง 32.9 kW ถึงแม้ว่าเตาเผาจะได้รับพลังงานความร้อนจากการอุ่นอากาศน้อยลง แต่หากเทียบกับพลังงานความร้อนรวมที่สามารถประหยัดได้ พบว่า พลังงานความร้อนรวมที่ประหยัดได้ยังคงมีสัดส่วนที่มากกว่า โดยเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพของเตาเผาหลังจากการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของเตาเผามีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 51.5% เป็น 53.4% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบควบคุมความดันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผาได้ถึง 1.9% โดยหากเทียบเป็นผลการประหยัดหลังจากการปรับปรุง พบว่า เตาเผาสามารถลดความต้องการความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ถึง 168.4 kW ซึ่งหากคิดเป็นส่วนของอัตราการใช้เชื้อเพลิง เตาเผาสามารถประหยัดอัตราการใช้เชื้อเพลิงได้ประมาณ 15.3 ลิตรต่อชั่วโมง หรือคิดเทียบเป็น 3.7% ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่มีอยู่เดิม

8.3 ผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

แนวทางในการปรับปรุงดังแสดงไว้ในบทที่ 6 เพื่อแก้ปัญหาการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา อันเนื่องมาจากระบบควบคุมความดันภายในเตาเผาบกพร่อง โดยการติดตั้ง pressure transducer สำหรับตรวจจับความดันภายในเตาเผา เพื่อส่งสัญญาณไปยังบมเตอรีให้ปรับเปลี่ยนองศาของ exhausted gas damper สำหรับการควบคุมอัตราการไหลของไอเสียตรงปล่องทางออกให้สอดคล้องความดันภายในเตาเผา ดังแสดงไว้ในรูป 8.11



รูปที่ 8.11 การติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา

โดยการประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผาจะอาศัยรายละเอียดของข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ดังแสดงไว้ในตาราง 8.7 โดยเงินลงทุนค่าอุปกรณ์หลักประกอบด้วย

- 1) pressure transducer เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความดันภายในเตาเผา เพื่อส่งสัญญาณไปยังแผงควบคุม
- 2) แผงควบคุม (controller) เป็นอุปกรณ์ควบคุมจังหวะการขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อปรับเปลี่ยนองศาของ exhausted gas damper ให้สอดคล้องกับค่าความดันภายในเตาเผา
- 3) มอเตอร์ใช้สำหรับขับเคลื่อน exhausted gas damper
- 4) ระบบเฟืองทด

ตารางที่ 8.7 ตารางแสดงรายละเอียดของข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	ค่า	หน่วย
ราคาเชื้อเพลิง	15	บาท/ลิตร
ชั่วโมงทำงานของเตาต่อวัน	17.5	ชั่วโมง/วัน
วันทำงานต่อปี	300	วัน/ปี
เงินลงทุน (ค่าอุปกรณ์)	200,000	บาท
เงินลงทุน (ค่าแรง)	0	บาท

รายละเอียดของข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์สามารถนำมาคำนวณหาเงินที่สามารถประหยัดได้จากการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา ดังนี้

พลังงานความร้อนที่ประหยัดได้ เท่ากับ

$$\begin{aligned}\Delta Q &= \{(Q_{comb} + Q_{fuel, sen}) - (Q_{comb, improve} + Q_{fuel, sen, improve})\} \\ &= \{(4562.25 + 11.46) - (4394.31 + 11.04)\} = 168.37 \text{ kW}\end{aligned}$$

การประหยัดเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง เท่ากับ

$$F_{save} = 3.6 \times \Delta Q / LHV = 3.6 \times 168.37 / 39.6 = 15.31 \text{ ลิตร/ชั่วโมง}$$

เงินที่สามารถประหยัดได้ เท่ากับ

$$M_{save} = F_{save} \times C \times H \times D = 15.31 \times 15 \times 17.5 \times 300 = 1,205,662 \text{ บาท/ปี}$$

ซึ่งสามารถคำนวณระยะคืนทุนจากการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา ดังนี้

$$PB = (I_{equip} + I_{labor}) * 12 / M_{save} = (200,000 + 0) * 12 / 1,205,662 = 1.99 \text{ เดือน}$$

ผลจากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุง พบว่าการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผาสามารถประหยัดเงินได้ 1,205,662 บาทต่อปี และมีระยะคืนทุนของการติดตั้งระบบนี้ประมาณ 2 เดือน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลดอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา โดยการศึกษาเริ่มต้นจากการตรวจวัดและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผาของโรงงานตัวอย่างแห่งหนึ่ง เพื่อนำมาเป็นต้นแบบสำหรับทำการศึกษาสมดุลมวล สมดุลความร้อน และประสิทธิภาพของเตาเผา รวมถึงพิจารณาปัญหาการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา

ผลจากการตรวจวัดองค์ประกอบภายในไอเสียของเตาเผาเหล็กจากโรงงานตัวอย่าง พบว่าในขณะที่ปิดประตูเชิงเหล็กเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในไอเสียมีค่าเท่ากับ 7.60% แต่เมื่อทำการเปิดประตูเชิงเหล็กเปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในไอเสียมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 9.91% ซึ่งจากข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องเปิดประตูเชิงเหล็ก โดยปัญหานี้เกิดจากความดันภายในเตาเผาเป็นลบเมื่อเทียบความดันบรรยากาศ ซึ่งหากพิจารณาประกอบกับผลจากการเก็บข้อมูล พบว่าในระหว่างการทำงาน exhausted gas damper ถูกตั้งไว้ที่ตำแหน่งเดิมเสมอ จึงทำให้ไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของไอเสียให้สอดคล้องกับค่าความดันภายในเตาเผาได้ ส่งผลให้ระบบควบคุมความดันภายในเตาเผาบกพร่อง ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้ความดันภายในเตาเผาเป็นลบและทำให้มีปริมาณอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา

เมื่อพิจารณาผลจากการคำนวณสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผา จะเห็นได้ว่าพลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับความร้อนที่เตาเผาสูญเสียในรูปแบบอื่นๆ โดยส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ทำให้อากาศในส่วนนี้พาความร้อนของก๊าซร้อนภายในเตาเผาออกไปพร้อมกับไอเสีย ส่งผลให้พลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียมีปริมาณเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การรั่วของอากาศยังส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีดลดลง ดังผลเสียที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการลดปริมาณของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา

การศึกษาแนวทางในการปรับปรุงจะมุ่งเน้นไปที่การควบคุมอัตราการไหลของไอเสียให้สามารถปรับเปลี่ยนตามค่าความดันภายในเตาเผา โดยการติดตั้ง pressure transducer ตรวจจับค่าความดันภายในเตาเผา เพื่อส่งสัญญาณไปยังมอเตอร์ให้ปรับเปลี่ยนองศาของ exhausted gas damper สำหรับควบคุมอัตราการไหลของไอเสียตรงปล่องทางออกให้สอดคล้องกับค่าความดันภายในเตาเผา โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เพื่อทำนายสมมูลมวล สมดุลความร้อน และประสิทธิภาพของเตาเผาหลังจากลดปริมาณอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา รวมถึงประเมินผลการประหยัดหลังจากการปรับปรุงด้วยการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้งานร่วมกับเตาเผาอื่นที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกัน รวมทั้งสามารถนำข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลของโปรแกรมได้

เมื่อพิจารณาการทำนายผลหลังจากการปรับปรุงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าพลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียหลังจากการปรับปรุงมีปริมาณลดลงถึง 202.83 kW ทำให้ประสิทธิภาพของเตาเผามีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 51.48% เป็น 53.45% ซึ่งเมื่อเทียบเป็นผลการประหยัด พบว่า เตาเผาลดความต้องการใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ถึง 168.37 kW ซึ่งหากคิดเป็นอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะสามารถลดลงได้ถึง 15.31 ลิตรต่อชั่วโมงหรือคิดเทียบเป็น 3.69% ของอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่มีอยู่เดิม เมื่อทำการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุง พบว่า การติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผาสามารถประหยัดเงินได้ 1,205,662 บาทต่อปี และมีระยะคืนทุนของการติดตั้งระบบนี้ประมาณ 2 เดือน

9.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต

1. จากการตรวจวัดข้อมูลของเตาเผา พบว่ามีข้อมูลบางส่วนที่ทำการตรวจวัดได้ยาก อย่างเช่น อุณหภูมิของผิวผนังเตาของหลังคาเตาเผา อัตราการไหลของไอเสียหลังออกจากเตาเผา รวมถึงอัตราการไหลของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผาบริเวณช่องเปิดต่างๆ ดังนั้นก่อนเข้าทำการตรวจวัด จึงควรทำการศึกษาเพื่อหาวิธีการตรวจวัดข้อมูลดังกล่าวไว้ข้างต้นก่อน
2. งานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษาเตาเผาเหล็กขนาดเล็กแบบ pusher type และใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งงานวิจัยในอนาคตสามารถทำการศึกษาเตาเผาแบบอื่น อย่างเช่น เตาเผาเหล็กแบบ walking beam เป็นต้น นอกจากนี้ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของเตาเผาที่มีการใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่น อย่างเช่น การใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น
3. การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเตาเผาที่มีสภาวะการทำงานแบบปกติ ซึ่งโดยทั่วไปการทำงานของเตาเผาจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ลักษณะการทำงานของเตาเผาแบบปกติ แบบหยุดเตา และแบบเร่งเตา ซึ่งงานวิจัยในอนาคตสามารถทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้ได้
4. งานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษาถึงปัญหาของการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา อันเนื่องมาจากความดันภายในเตาเผามีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ ซึ่งงานวิจัยในอนาคตสามารถทำการศึกษาเตาเผาที่ประสบปัญหาเรื่องความดันภายในเตาเผาที่มีค่าเป็นบวก อันเป็นผลให้ก๊าซร้อนภายในเตาเผารั่วออกทางช่องเปิดต่างๆ เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุง

5. งานวิจัยชิ้นนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้สำหรับทำนายผลหลังจากการปรับปรุงระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา ซึ่งในอนาคตสามารถทำการศึกษาถึงผลหลังจากการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผาจริง เพื่อนำข้อมูลจากการติดตั้งจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

6. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยชิ้นนี้มีขอบเขตในการใช้งานได้เฉพาะเตาเผาแบบ pusher type และใช้น้ำมันเตาเผาเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจึงควรทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้มีขีดความสามารถเพิ่มขึ้น เพื่อให้โปรแกรมสามารถใช้งานร่วมกับเตาเผาที่มีคุณสมบัติอื่นได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- Frank P. Incropera and David P. Dewitt. Introduction to Heat Transfer. Third Edition. USA : John Wiley & Sons, 1996.
- J. Ward and S.D. Probert. Reduction of energy losses associated with stock support structures in slab-reheating furnaces. Applied Science Publishers (1975) : 223-236.
- J.C. Ho, S.K. Chou and T.T. Chandratilleke. Energy audit of a steel mill. Energy 16, 7 (1991) : 1021-1029.
- M. Bojic and M. Tomic. Effect of refuse-gas fuel use on energy consumption in an industrial pusher furnace. Energy 23, 9 (1998) : 767-775.
- National Certificate Examination for Energy Managers and Energy Auditors. Guide Book 4 : Energy Performance Assessment of furnaces, Chapter 2 : Furnaces. Bureau of Energy Efficiency and National Productivity Council of India, 2006.
- W. Trinks et al. Industrial Furnaces. Sixth edition. USA : John Wiley & Sons, 2004.
- W.H. Chen, Y.C. Chung, and J.L. Liu. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnace in a hot strip mill. International Communications in Heat and Mass Transfer 32 (2005) : 695-706.
- W.M. Kays and M.E. Crawford. Convective Heat and Mass Transfer. Third Edition. Singapore : McGraw-Hill, 1993.
- Yunus A. Cengel and Michael A. Boles. Thermodynamics An Engineer Approach. Fifth edition. Singapore : McGraw-Hill, 2006.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
ข้อมูลการตรวจวัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1 เตาเผาอยู่ในสภาวะการทำงานแบบปกติ

1. ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- อุณหภูมิของเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่นด้วย heater ก่อนเข้าสู่ burner เฉลี่ย 80°C

ตารางที่ ก.1 ตารางบันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	ค่าเริ่มต้น (ลิตร)	ค่าสุดท้าย (ลิตร)
06:30	07:00	1,204,782.0	1,205,014.4
07:00	07:30	1,205,014.4	1,205,193.2
07:30	08:00	1,205,193.2	1,205,375.0
08:00	08:30	1,205,375.0	1,205,512.5
08:30	09:00	1,205,512.5	1,205,775.6
09:00	09:30	1,205,775.6	1,205,957.8
09:30	10:00	1,205,957.8	1,206,235.8
10:00	10:30	1,206,235.8	1,206,441.0

- ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย 414.75 ลิตร/ชั่วโมง

2. ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

ตารางที่ ก.2 ตารางบันทึกอุณหภูมิของอากาศหลังจากการอุ่นด้วยไอเสียที่ recuperator

เวลา	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
06:30	399	09:00	395
07:00	399	09:30	394
07:30	400	10:00	391
08:00	397	10:30	394
08:30	391		

- อุณหภูมิของอากาศหลังจากการอุ่นด้วยไอเสียที่ recuperator เฉลี่ย 395.56°C
- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 34.35°C

3. ข้อมูลการผลิตและสเกล

- วัตถุดิบเป็น billet ขนาด 110 x 110 mm ยาว 2.46 m น้ำหนัก 115 kg/แท่ง

ตารางที่ ก.3 ตารางบันทึกปริมาณการผลิตจากจำนวน billet ที่ออกจากเตา

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา (แท่ง)
06:30	07:00	31
07:00	07:30	28
07:30	08:00	33
08:00	08:30	24
08:30	09:00	45
09:00	09:30	58
09:30	10:00	69
10:00	10:30	39

- ปริมาณการผลิตเหล็กเฉลี่ย 82 แท่ง/ชั่วโมง
- ปริมาณของสเกลคิดเป็นค่าเฉลี่ยทั้งปี โดยเหล็กที่ได้ออกจากเตาต่อปีมีปริมาณ 39,513 ตัน ซึ่งเกิดเป็นสเกล 826.39 ตัน หรือคิดเป็น 2.0914 %

4. ข้อมูลของความดันและอุณหภูมิภายในเตาเผา

ตารางที่ ก.4 ตารางบันทึกความดันภายในเตาเผา

เวลา	ความดัน (Pa)	เวลา	ความดัน (Pa)
09:25	-26.3	10:05	-126.7
09:30	-204.0	10:10	-94.4
09:35	-23.2	10:15	-80.6
09:40	-36.5		
09:45	-128.7		
09:50	-178.2		
09:55	-219.0		
10:00	-152.6		

ตารางที่ ก.5 ตารางบันทึกอุณหภูมิภายในเตาเผา

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	เวลา	อุณหภูมิ (°C)
06:30	1,235	09:00	1,248
07:00	1,256	09:30	1,249
07:30	1,195	10:00	1,231
08:00	1,224	10:30	1,266
08:30	1,227		

- อุณหภูมิภายในเตาเผาเฉลี่ย 1,236.78 °C

5. ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ก.6 ตารางบันทึกอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้าสู่ recuperator

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	เวลา	อุณหภูมิ (°C)
06:30	744	09:00	739
07:00	749	09:30	738
07:30	752	10:00	736
08:00	747	10:30	741
08:30	749		

- อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้าสู่ recuperator เฉลี่ย 743.89 °C

ตารางที่ ก.7 ตารางบันทึกอุณหภูมิและองค์ประกอบของไอเสียที่ออกจาก recuperator

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	O ₂ (%)	CO (ppm)	หมายเหตุ
06:27	421.9	8.17	0	ประตูยิงเหล็กปิด
06:31	422.6	10.43	0	ประตูยิงเหล็กเปิด
06:35	422.4	7.20	0	ประตูยิงเหล็กปิด
06:44	422.2	9.66	0	ประตูยิงเหล็กเปิด
06:52	421.7	7.44	0	ประตูยิงเหล็กปิด
06:55	423.5	9.63	0	ประตูยิงเหล็กเปิด

- อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจาก recuperator เฉลี่ย 422.38 °C
- เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในไอเสียขณะปิดประตูยิงเหล็กเฉลี่ย 7.6033%
- เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในไอเสียขณะเปิดประตูยิงเหล็กเฉลี่ย 9.9067%

6. ข้อมูลของช่องเปิดต่างๆ

- ขนาดช่องเปิดด้านเหล็กเข้ารูปสี่เหลี่ยม กว้าง x ยาว x หนา มีขนาด 25 x 260 x 34 cm
- ขนาดช่องเปิดด้านยิงเหล็กรูปสี่เหลี่ยม กว้าง x ยาว x หนา มีขนาด 30 x 60 x 44 cm
- ขนาดช่องเปิดด้านเหล็กออกรูปสี่เหลี่ยม กว้าง x ยาว x หนา มีขนาด 40 x 60 x 44 cm
- เวลาการเปิดประตูยิงเหล็ก 15 วินาที/ครั้ง

7. ข้อมูลอุณหภูมิผิวเตา

ตารางที่ ก.8 ตารางบันทึกอุณหภูมิผิวเตา ณ ตำแหน่งต่างๆ รอบเตาเผา

ด้าน	ตำแหน่งที่	รายละเอียดตำแหน่ง	อุณหภูมิ (°C)
หลังเตา	1	-	215
หน้าเตา	1	burner ด้านซ้ายเมื่อหันหน้าเข้าผนัง	89
	2	burner ด้านขวาเมื่อหันหน้าเข้าผนัง	95
ยิงเหล็ก	1	เริ่มจากด้านหลังเตาที่ป้อนเหล็กเข้า	76
	2	-	80
	3	-	83
	4	-	89
	5	-	85
	6	-	77
	7	-	76
	8	มี service door	99
	9	-	82
	10	มี service door	88
	11	ประตูด้านยิงเหล็ก	96

ด้าน	ตำแหน่งที่	รายละเอียดตำแหน่ง	อุณหภูมิ (°C)
แท่นรีด	1	เริ่มจากด้านหลังเตาที่ป้อนเหล็กเข้า	69
	2	-	60
	3	-	59
	4	-	61
	5	-	64
	6	-	70
	7	-	76
	8	มี service door	92
	9	-	80
	10	มี service door	88
	11	ประตูด้านหลังออกไปแท่นรีด	103

- อุณหภูมิของผิวผนังด้านหน้าเตาเฉลี่ย 215 °C โดยมีพื้นที่ประมาณ 5.044 m² และมีความสูงเฉลี่ย 2.6 m
- อุณหภูมิของผิวผนังด้านหลังเตาเฉลี่ย 92 °C โดยมีพื้นที่ประมาณ 3.8324 m² และมีความสูงเฉลี่ย 1.474 m
- อุณหภูมิของผิวผนังด้านข้างเหล็กเฉลี่ย 84.6364 °C โดยมีพื้นที่ประมาณ 18.7322 m² และมีความสูงเฉลี่ย 1.2 m
- อุณหภูมิของผิวผนังด้านข้างเหล็กเฉลี่ย 74.7273 °C โดยมีพื้นที่ประมาณ 18.7322 m² และมีความสูงเฉลี่ย 1.2 m

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.1 ตัวอย่างการคำนวณก่อนทำการปรับปรุง

การคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาและ recuperator ก่อนทำการปรับปรุง ดังแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 มีดังนี้

1. สมดุลมวลของเตาเผา ประกอบด้วย

1.1 อัตราไหลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_{fuel})

ผลจากการตรวจวัดพบว่า ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย 414.75 ลิตร/ชั่วโมง โดยมีค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.96 kg/liter จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ \dot{m}_{fuel} ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{fuel} = \rho_{fuel} \dot{V}_{fuel} = 0.96 * 414.75 / 3600 = 0.1106 \text{ kg/s}$$

1.2 อัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (\dot{m}_{air})

เริ่มจากการคำนวณตัวคูณสำหรับการปรับแก้ของปริมาณอากาศส่วนเกินขณะปิดประตูยิงเหล็ก ดังสมการ

$$\lambda = \frac{0.54015 - 0.153 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}{0.54015 - 2.571 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}$$

ผลจากการตรวจวัด พบว่า เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในไอเสียขณะปิดประตูยิงเหล็กมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.6033% จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาค่า λ ได้เท่ากับ 1.5334 จากนั้นคำนวณค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (actual air-fuel ratio, AF_{actual}) ดังสมการ

$$AF_{actual} = \lambda AF_{stoic} \quad \text{เมื่อ} \quad AF_{stoic} = 13.92 \text{ kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$$

จากสมการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงได้เท่ากับ 21.35 kg_{air}/kg_{fuel} ซึ่งนำมาคำนวณอัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ได้ ดังนี้

$$\dot{m}_{air} = AF_{actual} \times \dot{m}_{fuel} = 21.35 \times 0.1106 = 2.3607 \text{ kg/s}$$

1.3 อัตราไหลของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ($\dot{m}_{air,leak}$)

อัตราไหลของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผาสามารถคำนวณได้จากผลต่างของอัตราไหลของอากาศขณะปิดและเปิดประตูยิงเหล็ก ซึ่งอัตราไหลของอากาศขณะปิดประตูยิงเหล็ก

ได้คำนวณไว้แล้วในหัวข้อ 1.2 จากนั้นจึงต้องคำนวณอัตราไหลของอากาศขณะเปิดประตูยิงเหล็ก โดยเริ่มจากการคำนวณตัวคูณสำหรับการปรับแก้ของปริมาณอากาศส่วนเกินขณะเปิดประตูยิงเหล็ก ดังสมการ

$$\lambda = \frac{0.54015 - 0.153 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}{0.54015 - 2.571 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}$$

ผลจากการตรวจวัด พบว่า เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในไอเสียขณะเปิดประตูยิงเหล็กมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.9067% จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาค่า λ ได้เท่ากับ 1.8392 จากนั้นคำนวณค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (actual air-fuel ratio, AF_{actual}) ดังสมการ

$$AF_{actual} = \lambda AF_{stoic} \quad \text{เมื่อ} \quad AF_{stoic} = 13.92 \text{ kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$$

จากสมการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงได้เท่ากับ 25.60 kg_{air}/kg_{fuel} ซึ่งนำมาคำนวณอัตราไหลของอากาศในช่วงเปิดประตูยิงเหล็กได้ ดังนี้

$$\dot{m}_{air} = AF_{actual} \times \dot{m}_{fuel} = 25.60 \times 0.1106 = 2.8315 \text{ kg/s}$$

เนื่องจากประตูยิงเหล็กไม่ได้เปิดตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องคำนวณสัดส่วนเวลาของการเปิดประตูยิงเหล็ก (f_{open}) จากเวลาการเปิดประตูยิงเหล็ก 15 วินาที/ครั้ง และปริมาณการผลิตเหล็กเฉลี่ย 82 แท่ง/ชั่วโมง ดังนี้

$$f_{open} = \frac{t_{open}}{t_{total}} = \frac{82 \times 15}{3600} = 0.3417$$

ดังนั้นอัตราไหลของอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผาผ่านทางช่องประตูยิงเหล็ก จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \dot{m}_{air,leak,discharge} &= f_{open} \times (\dot{m}_{air,open} - \dot{m}_{air,closed}) \\ &= 0.3417 \times (2.8315 - 2.3607) = 0.1609 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

1.4 อัตราไหลของเหล็กเข้าสู่เตาเผา ($\dot{m}_{billet,charge}$)

อัตราไหลของเหล็กเข้าสู่เตาเผาสามารถคำนวณได้จากอัตราการผลิตเหล็กจากอัตราการผลิตเหล็กของเตาเผาและน้ำหนักของเหล็กต่อแท่ง ดังนี้

$$\dot{m}_{billet,charge} = N_{billet} * W_{billet} / 3600 = 82 * 115 / 3600 = 2.6194 \text{ kg/s}$$

1.5 อัตราไหลของสเกลออกจากเตาเผา (\dot{m}_{scale})

อัตราไหลของสเกลออกจากเตาเผาสามารถคำนวณได้จากร้อยละของสเกลที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณของเหล็กที่ผลิต ดังนี้

$$\dot{m}_{scale} = \dot{m}_{billet,charge} * \left(\frac{\%scale}{100} \right) = 2.6194 * \left(\frac{2.0914}{100} \right) = 0.0548 \text{ kg/s}$$

1.6 อัตราไหลของเหล็กออกจากเตาเผา ($\dot{m}_{billet,discharge}$)

อัตราไหลของเหล็กออกจากเตาเผาสามารถคำนวณจากอัตราไหลของเหล็กเข้าสู่เตาเผากับอัตราไหลของสเกลออกจากเตาเผา ดังนี้

$$\dot{m}_{billet,discharge} = \dot{m}_{billet,charge} - \dot{m}_{scale} = 2.6194 - 0.0548 = 2.5646 \text{ kg/s}$$

1.7 อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator ($\dot{m}_{flue,furnace}$)

จากกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) จะสามารถคำนวณอัตราไหลของไอที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{m}_{flue,furnace} &= \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air} + \dot{m}_{air,leak} + \dot{m}_{billet,charge} - \dot{m}_{billet,discharge} - \dot{m}_{scale} \\ &= 0.1106 + 2.3607 + 0.1609 + 2.6194 - 2.5646 - 0.0548 = 2.6322 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

2. สมดุลความร้อนของเตาเผา ประกอบด้วย

2.1 ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (\dot{Q}_{comb})

ผลจากการตรวจวัดพบว่า ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย 414.75 ลิตร/ชั่วโมง โดยมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำของเชื้อเพลิงเท่ากับ 39.6 MJ/L จากข้อมูลสามารถคำนวณ \dot{Q}_{comb} ได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{V}_{fuel} LHV = \frac{414.75 \times 39.6 \times 1000}{3600} = 4562.25 \text{ kW}$$

2.2 ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า ($\dot{Q}_{fuel,sen}$)

เมื่อทราบอุณหภูมิของเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่นด้วย heater เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 80°C จะสามารถนำมาคำนวณหา $\dot{Q}_{fuel,sen}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{fuel, sen} &= \rho_{fuel} \dot{V}_{fuel} C_{fuel} (T_{fuel, in} - T_0) \\ &= 0.96 \times \frac{414.75}{3600} \times 1.884 \times (353.15 - 298.15) = 11.46 \text{ kW}\end{aligned}$$

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

เมื่อทราบปริมาณการผลิตเหล็กเฉลี่ย 82 แห่ง/ชั่วโมง โดยเหล็กมีน้ำหนัก 115 kg/แห่ง และมีเปอร์เซ็นต์ของสเกลมีค่าเท่ากับ 2.0914 % จากข้อมูลสามารถคำนวณหา $\dot{Q}_{scale, form}$ ได้ดังนี้

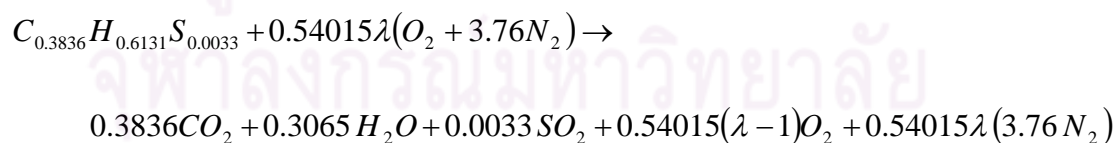
$$\begin{aligned}\dot{Q}_{scale, form} &= \dot{m}_{billet} \left(\frac{\% scale}{100} \right) HV_{scale} \\ &= 2.6194 \times \frac{2.0914}{100} \times 5161 = 282.74 \text{ kW}\end{aligned}$$

2.4 ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการอุ่นอากาศที่ recuperator ($\dot{Q}_{air, preheat}$)

เมื่อทราบค่าอุณหภูมิของอากาศหลังจากการอุ่นด้วยไอเสียที่ recuperator เฉลี่ยเท่ากับ 395.56 °C และผลจากการคำนวณสมดุลมวลของเตาเผา ทำให้ทราบค่าอัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ 2.3607 kg/s โดยจะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{air, preheat}$ ได้ดังสมการ

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

โดยการคำนวณเริ่มจากหาสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ซึ่งจะพิจารณาจากสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา



ดังสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา จะเห็นได้ว่าปริมาณของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้คือ $0.54015\lambda(O_2 + 3.76N_2)$ ซึ่งจากการคำนวณอัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ในหัวข้อ 1.2 พบว่า λ มีค่าเท่ากับ 1.5334 ดังนั้นจำนวนโมลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีค่าเท่ากับ $0.8283(O_2 + 3.76N_2)$ ซึ่งสัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบภายในอากาศจะสามารถนำไปหาค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ ดังแสดงไว้ในตาราง ข.1

ตารางที่ ข.1 แสดงสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ

i	N_i (kmol _i)	Y_i (kmol _i /kmol _{total})	M_i (kg _f /kmol _i)	$Y_i * M_i$ (kg _f)	$Y_i * M_i / \sum Y_i * M_i$ (kg _f /kg _{total})
O ₂	0.8283	0.21	31.999	21.8041	0.2329
N ₂	3.1144	0.79	28.013	71.7721	0.7671
\sum (Air)	3.9427	1	-	93.5762	1

จากตาราง ข.1 เมื่อทราบค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ ซึ่งจะนำมาคำนวณหาอัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนภายในอากาศที่เข้าเผาไหม้ ดังนี้

$$\dot{m}_{O_2,air} = 0.2329 \times \dot{m}_{air} = 0.2329 \times 2.3607 = 0.5498 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{N_2,air} = 0.7671 \times \dot{m}_{air} = 0.7671 \times 2.3607 = 1.8109 \text{ kg/s}$$

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{air,preheat}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{air,preheat} &= \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,preheat}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,preheat}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= \frac{0.5498}{31.999} \left(\int_{298.15}^{668.71} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{1.8109}{28.013} \left(\int_{298.15}^{668.71} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= 198.9276 + 712.6399 = 911.57 \text{ kW} \end{aligned}$$

2.5 ความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ($\dot{Q}_{air,leak}$)

เมื่อทราบค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยเท่ากับ 34.35 °C และผลจากการคำนวณสมดุลมวลของเตาเผา ทำให้ทราบค่าอัตราไหลของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผาเท่ากับ 0.1609 kg/s จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{air,leak}$ ได้ดังสมการ

$$\dot{Q}_{air,leak} = \frac{\dot{m}_{O_2,airleak}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,airleak}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right)$$

จากตาราง ข.1 ทำให้ทราบค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ ซึ่งจะนำมาคำนวณหาอัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนภายในอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ดังนี้

$$\dot{m}_{O_2,airleak} = 0.2329 \times \dot{m}_{air,leak} = 0.2329 \times 0.1609 = 0.0375 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{N_2,airleak} = 0.7671 \times \dot{m}_{air,leak} = 0.7671 \times 0.1609 = 0.1234 \text{ kg/s}$$

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{air,leak}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{air,leak} &= \frac{\dot{m}_{O_2,airleak}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,airleak}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= \frac{0.0375}{31.999} \left(\int_{298.15}^{307.50} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{0.1234}{28.013} \left(\int_{298.15}^{307.50} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= 0.3228 + 1.198 = 1.52 \text{ kW}\end{aligned}$$

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

เมื่อทราบปริมาณการผลิตเหล็กเฉลี่ย 82 แห่ง/ชั่วโมง โดยเหล็กมีน้ำหนัก 115 kg/แห่ง และกำหนดให้อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตามีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาประมาณ 50 °C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1186.78 °C ส่วนอุณหภูมิเหล็กที่เข้าสู่เตาเผาจะประมาณให้เท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 34.35 °C จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{billet, sen}$ ได้ดังนี้

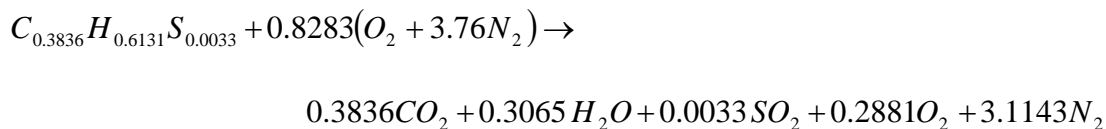
$$\begin{aligned}\dot{Q}_{billet, sen} &= \dot{m}_{billet} C_{billet} (T_{billet, out} - T_{billet, in}) \\ &= \frac{82}{3600} \times 115 \times 0.78 \times (1186.78 - 34.35) = 2354.61 \text{ kW}\end{aligned}$$

2.7 ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator ($\dot{Q}_{flue, furnace}$)

เมื่อทราบค่าอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้าสู่ recuperator เฉลี่ยเท่ากับ 743.89 °C และจากการคำนวณสมดุลมวลของเตาเผา ทำให้ทราบค่าอัตราไหลของไอเสียเท่ากับ 2.6322 kg/s จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{flue, furnace}$ ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{flue, furnace} &= \frac{\dot{m}_{CO_2, flue, furnace}}{M_{CO_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, CO_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{H_2O, flue, furnace}}{M_{H_2O}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, H_2O} dT \right) \\ &+ \frac{\dot{m}_{SO_2, flue, furnace}}{M_{SO_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, SO_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{O_2, flue, furnace}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, O_2} dT \right) \\ &+ \frac{\dot{m}_{N_2, flue, furnace}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, N_2} dT \right)\end{aligned}$$

เริ่มจากการหาสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบไอเสีย ซึ่งพิจารณาจากสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา เมื่อทราบค่า $\lambda = 1.5334$ ดังแสดงไว้ในหัวข้อ 2.4 ทำให้สามารถหาจำนวนโมลของแต่ละองค์ประกอบภายในไอเสีย ดังสมการต่อไปนี้



จากสมการการเผาไหม้ดังกล่าวข้างต้น ทำให้ทราบถึงสัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบภายในไอเสีย เพื่อนำไปหาค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสีย ดังแสดงไว้ในตาราง ข.2

ตารางที่ ข.2 แสดงสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสีย

i	N_i (kmol)	Y_i (kmol/kmol _{total})	M_i (kg/kmol)	$Y_i \cdot M_i$ (kg)	$Y_i \cdot M_i / \sum Y_i \cdot M_i$ (kg/kg _{total})
CO ₂	0.3836	0.0937	44.01	4.1237	0.1418
H ₂ O	0.3065	0.0748	18.015	1.3475	0.0463
SO ₂	0.0033	0.0008	64.063	0.0513	0.0018
O ₂	0.2881	0.0703	31.999	2.2495	0.0774
N ₂	3.1143	0.7604	28.013	21.3011	0.7327
\sum (Flue)	4.0958	1	-	29.0731	1

จากตาราง ข.2 เมื่อทราบค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสีย จะสามารถนำมาคำนวณหาอัตราไหลของแต่ละองค์ประกอบภายในไอเสียได้ แต่เนื่องจากสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสียได้มาจากสมการการเผาไหม้ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เท่านั้น โดยไม่ได้รวมกับปริมาณของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาและออกไปพร้อมกับไอเสีย ทำให้อัตราไหลของแต่ละองค์ประกอบภายในไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้คิดจากอัตราไหลของเชื้อเพลิงรวมกับอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\dot{m}_{flue, furnace, comb} = 0.1106 + 2.3607 = 2.4713$ kg/s จากนั้นนำปริมาณของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผามารวมที่หลัง โดยแสดงรายละเอียดของการคำนวณอัตราไหลของแต่ละองค์ประกอบภายในไอเสีย ดังนี้

$$\dot{m}_{CO_2, flue, furnace} = 0.1502 \times \dot{m}_{flue, furnace, comb} = 0.1418 \times 2.4713 = 0.3504 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{H_2O, flue, furnace} = 0.0491 \times \dot{m}_{flue, furnace, comb} = 0.0463 \times 2.4713 = 0.1144 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{SO_2, flue, furnace} = 0.0020 \times \dot{m}_{flue, furnace, comb} = 0.0018 \times 2.4713 = 0.0044 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{O_2, flue, furnace} = (0.0774 \times \dot{m}_{flue, furnace, comb}) + \dot{m}_{O_2, airleak} = 0.2288 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{N_2, flue, furnace} = (0.7327 \times \dot{m}_{flue, furnace, comb}) + \dot{m}_{N_2, airleak} = 1.9341 \text{ kg/s}$$

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{flue, furnace}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{flue, furnace} &= \frac{\dot{m}_{CO_2, flue, furnace}}{M_{CO_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, CO_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{H_2O, flue, furnace}}{M_{H_2O}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, H_2O} dT \right) \\ &+ \frac{\dot{m}_{SO_2, flue, furnace}}{M_{SO_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, SO_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{O_2, flue, furnace}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, O_2} dT \right) \\ &+ \frac{\dot{m}_{N_2, flue, furnace}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue, furnace}} \bar{c}_{p, N_2} dT \right) \\ &= \frac{0.3502}{44.01} \left(\int_{298.15}^{1017.04} \bar{c}_{p, CO_2} dT \right) + \frac{0.1146}{18.015} \left(\int_{298.15}^{1017.04} \bar{c}_{p, H_2O} dT \right) \\ &+ \frac{0.0045}{64.063} \left(\int_{298.15}^{1017.04} \bar{c}_{p, SO_2} dT \right) + \frac{0.2287}{31.999} \left(\int_{298.15}^{1017.04} \bar{c}_{p, O_2} dT \right) \\ &+ \frac{1.9340}{28.013} \left(\int_{298.15}^{1017.04} \bar{c}_{p, N_2} dT \right) \\ &= 273.0313 + 169.7928 + 2.4184 + 167.3544 + 1521.2085 \\ &= 2133.81 \text{ kW} \end{aligned}$$

2.8 ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล ($\dot{Q}_{scale, sen}$)

เมื่อทราบปริมาณการผลิตเหล็กเฉลี่ย 82 แห่ง/ชั่วโมง โดยเหล็กมีน้ำหนัก 115 kg/แห่ง และมีอุณหภูมิของสเกลที่ออกจากเตาเผาเท่ากับ 1186.78°C ซึ่งจะประมาณให้เท่ากับอุณหภูมิของ billet ที่ออกจากเตาเผา ส่วนอุณหภูมิของสเกลที่เข้าสู่เตาเผาจะประมาณให้เท่ากับอุณหภูมิของ billet ที่เข้าสู่เตาเผา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 34.35°C จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{scale, sen}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{scale, sen} &= \dot{m}_{billet} \left(\frac{\%scale}{100} \right) C_{scale} (T_{scale, out} - T_{scale, in}) \\ &= \frac{82}{3600} \times 115 \times \frac{2.0914}{100} \times 0.90 \times (1186.78 - 34.35) = 56.82 \text{ kW}\end{aligned}$$

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

เตาเผาประกอบด้วยช่องเปิด 3 ด้านคือ ช่องเปิดด้านเหล็กเข้า ช่องเปิดด้านยิงเหล็ก และช่องเปิดด้านเหล็กออก โดยวิธีการคำนวณจะคำนวณความร้อนสูญเสียของแต่ละช่องเปิด หลังจากนั้นจะนำมารวมกัน ซึ่งจะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{opening}$ ได้ดังสมการ

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

1) ช่องเปิดด้านเหล็กเข้า

- $C_t = 1$ เนื่องจากช่องเปิดด้านเหล็กเข้าเปิดอยู่ตลอดเวลา
- $C_b = 0.5837$ โดยคำนวณจากสัดส่วนของ billet ขนาด 0.11x2.46 m บดบังช่องเปิด ขนาด 0.25x2.6 m
- $\varepsilon_{opening} = 0.6322$ โดยสามารถหาค่าได้จากรูปที่ 3.1 เมื่อทราบค่า $\frac{D}{X} = \frac{0.25}{0.34} = 0.74$
และ $\frac{W}{D} = \frac{2.6}{0.25} = 10.40$
- อุณหภูมิภายในเตาเผาเฉลี่ย 1509.93 K และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 307.50 K

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น } \dot{Q}_{opening,1} &= C_t C_b \varepsilon_{opening} \sigma A_{opening} (T_{furnace}^4 - T_{amb}^4) \\ &= 0.5837 \times 0.6322 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (0.25 \times 2.6) \times (1509.93^4 - 307.50^4) \\ &= 70.5700 \text{ kW}\end{aligned}$$

2) ช่องเปิดด้านยิงเหล็ก

- $C_t = 0.3417$ โดยคำนวณจากสัดส่วนเวลาการเปิดปิดของช่องเปิด
- $C_b = 1$ เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่บดบังช่องเปิด
- $\varepsilon_{opening} = 0.5042$ โดยสามารถหาค่าได้จากรูปที่ 3.1 เมื่อทราบค่า $\frac{D}{X} = \frac{0.30}{0.44} = 0.68$
และ $\frac{W}{D} = \frac{0.6}{0.3} = 2$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } \dot{Q}_{opening,2} &= C_t C_b \varepsilon_{opening} \sigma A_{opening} (T_{furnace}^4 - T_{amb}^4) \\
 &= 0.3417 \times 0.5042 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (0.6 \times 0.3) \times (1509.93^4 - 307.50^4) \\
 &= 9.1240 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

3) ช่องเปิดด้านเหล็กออก

- $C_t = 0.3417$ โดยคำนวณจากสัดส่วนเวลาการเปิดปิดของช่องเปิด
- $C_b = 1$ เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่บดบังช่องเปิด
- $\varepsilon_{opening} = 0.5560$ โดยสามารถหาค่าได้จากรูปที่ 3.1 เมื่อทราบค่า $\frac{D}{X} = \frac{0.40}{0.44} = 0.91$
และ $\frac{W}{D} = \frac{0.6}{0.4} = 1.5$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } \dot{Q}_{opening,3} &= C_t C_b \varepsilon_{opening} \sigma A_{opening} (T_{furnace}^4 - T_{amb}^4) \\
 &= 0.3417 \times 0.5560 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (0.6 \times 0.4) \times (1509.93^4 - 307.50^4) \\
 &= 13.4151 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณข้างต้น ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสีรวม มีค่าเท่ากับ

$$\dot{Q}_{opening} = \dot{Q}_{opening,1} + \dot{Q}_{opening,2} + \dot{Q}_{opening,3} = 70.5700 + 9.1240 + 13.4151 = 93.11 \text{ kW}$$

2.10 ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา (\dot{Q}_{wall})

การคำนวณความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา จะแบ่งการคำนวณออกเป็น 4 ส่วน คือ ความร้อนสูญเสียผ่านผนังด้านหน้าเตา ด้านหลังเตา ด้านยิงเหล็ก และด้านแท่นรีด โดยจะสามารถคำนวณ \dot{Q}_{wall} ของผนังเตาแต่ละด้าน ดังสมการ

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

1) ผนังด้านหน้าเตา

- อุณหภูมิของผิวผนังด้านหน้าเตาเฉลี่ย 215°C (488.15 K)
- พื้นที่ของผนังด้านหน้าเตา เท่ากับ 5.044 m^2 และมีความสูงผนังเตาเฉลี่ย 2.6 m
- $h = 3.02 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ โดยสามารถคำนวณดังต่อไปนี้

$$T_f = \frac{(T_{wall} + T_{amb})}{2} = \frac{(488.15 + 307.50)}{2} = 397.825 \text{ K}$$

และ

$$\beta = 1/T_f = 1/397.825 = 0.0025$$

โดยค่า Rayleigh number สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Ra_L = \frac{g\beta L^3(T_{wall} - T_{amb})}{\nu\alpha} = \frac{0.98 \times 0.0025 \times 2.6^3 \times (488.15 - 307.50)}{(2.6186 \times 10^{-5})(3.7761 \times 10^{-5})} = 7.9101 \times 10^9$$

เมื่อ $Ra_L = 7.9101 \times 10^9$ จะมีลักษณะการไหลของแบบ Turbulent Flow ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า Nusselt number ดังสมการ

$$\overline{Nu}_L^{1/2} = 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} = 0.825 + \frac{0.387 \times (7.9101 \times 10^9)^{1/6}}{[1 + (0.492/0.6947)^{9/16}]^{8/27}} = 15.28$$

จากนั้นสามารถคำนวณหา h_m ดังสมการ

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} = \frac{15.28^2 \times 0.0336}{2.6} = 3.02 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{ดังนั้น } \dot{Q}_{wall,1} = h_m A_{wall} (T_{wall} - T_{amb}) + \varepsilon_{wall} \sigma A_{wall} (T_{wall}^4 - T_{amb}^4)$$

$$= \{3.02 \times 5.044 \times (488.15 - 307.50)\} + \{0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 5.044 \times (448.15^4 - 307.50^4)\}$$

$$= 2.7518 + 12.3142 = 15.0660 \text{ kW}$$

2) ผนังด้านหลังเตา

- อุณหภูมิของผิวผนังด้านหลังเตาเฉลี่ย 92°C (365.15 K)
- พื้นที่ของผนังด้านหลังเตา เท่ากับ 3.8324 m^2 และมีความสูงผนังเตาเฉลี่ย 1.474 m
- $h = 1.8117 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ โดยสามารถคำนวณดังต่อไปนี้

$$T_f = \frac{(T_{wall} + T_{amb})}{2} = \frac{(365.15 + 307.50)}{2} = 336.325 \text{ K}$$

และ

$$\beta = 1/T_f = 1/336.325 = 0.00297$$

โดยค่า Rayleigh number สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Ra_L = \frac{g\beta L^3(T_{wall} - T_{amb})}{\nu\alpha} = \frac{0.98 \times 0.00297 \times 1.474^3 \times (365.15 - 307.50)}{(1.9532 \times 10^{-5})(2.7855 \times 10^{-5})} = 9.8880 \times 10^8$$

เมื่อ $Ra_L = 9.8880 \times 10^8$ จะมีลักษณะการไหลของแบบ Laminar Flow ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า Nusselt number ดังสมการ

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} = 0.68 + \frac{0.670 \times (9.8880 \times 10^8)^{1/4}}{[1 + (0.492/0.7031)^{9/16}]^{4/9}} = 91.7696$$

จากนั้นสามารถคำนวณหา h_m ดังสมการ

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} = \frac{91.7696 \times 0.0291}{1.474} = 1.8117 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \dot{Q}_{wall,2} &= h_m A_{wall} (T_{wall} - T_{amb}) + \varepsilon_{wall} \sigma A_{wall} (T_{wall}^4 - T_{amb}^4) \\ &= \{1.8117 \times 3.8324 \times (365.15 - 307.5)\} + \{0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 3.8324 \times (365.15^4 - 307.5^4)\} \\ &= 0.4003 + 1.7283 = 2.1286 \text{ kW} \end{aligned}$$

3) ผนังด้านข้างเหล็ก

- อุณหภูมิของผนังด้านข้างเหล็กเฉลี่ย 84.6364°C (357.79 K)
- พื้นที่ของผนังด้านข้างเหล็ก เท่ากับ 18.7322 m^2 และมีความสูงผนังเตาเฉลี่ย 1.2 m
- $h = 1.8491 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ โดยสามารถคำนวณดังต่อไปนี้

$$T_f = \frac{(T_{wall} + T_{amb})}{2} = \frac{(357.79 + 307.50)}{2} = 332.645 \text{ K}$$

และ

$$\beta = 1/T_f = 1/332.645 = 0.00301$$

โดยค่า Rayleigh number สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Ra_L = \frac{g \beta L^3 (T_{wall} - T_{amb})}{\nu \alpha} = \frac{0.98 \times 0.00301 \times 1.2^3 \times (357.79 - 307.50)}{(1.9157 \times 10^{-5})(2.7297 \times 10^{-5})} = 4.8955 \times 10^8$$

เมื่อ $Ra_L = 4.8955 \times 10^8$ จะมีลักษณะการไหลของแบบ Laminar Flow ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า Nusselt number ดังสมการ

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} = 0.68 + \frac{0.670 \times (4.8955 \times 10^8)^{1/4}}{[1 + (0.492/0.7037)^{9/16}]^{4/9}} = 77.0962$$

จากนั้นสามารถคำนวณหา h_m ดังสมการ

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} = \frac{77.0962 \times 0.0288}{1.2} = 1.8491 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \dot{Q}_{\text{wall},3} &= h_m A_{\text{wall}} (T_{\text{wall}} - T_{\text{amb}}) + \varepsilon_{\text{wall}} \sigma A_{\text{wall}} (T_{\text{wall}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \\ &= \{1.8491 \times 18.73 \times (357.79 - 307.5)\} + \{0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 18.73 \times (357.79^4 - 307.5^4)\} \\ &= 1.7418 + 7.1176 = 8.8594 \text{ kW} \end{aligned}$$

4) ผนังด้านแทนรีด

- อุณหภูมิของผิวผนังด้านแทนรีดเฉลี่ย $74.7273 \text{ }^\circ\text{C}$ (347.88 K)
- พื้นที่ของผนังด้านแทนรีด เท่ากับ 18.7322 m^2 และมีความสูงผนังเตาเฉลี่ย 1.2 m
- $h = 1.7584 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ โดยสามารถคำนวณดังต่อไปนี้

$$T_f = \frac{(T_{\text{wall}} + T_{\text{amb}})}{2} = \frac{(347.88 + 307.50)}{2} = 327.69 \text{ K}$$

และ

$$\beta = 1/T_f = 1/327.69 = 0.00305$$

โดยค่า Rayleigh number สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Ra_L = \frac{g\beta L^3 (T_{\text{wall}} - T_{\text{amb}})}{\nu\alpha} = \frac{0.98 \times 0.00305 \times 1.2^3 \times (347.88 - 307.50)}{(1.8657 \times 10^{-5})(2.6552 \times 10^{-5})} = 4.2123 \times 10^8$$

เมื่อ $Ra_L = 4.2123 \times 10^8$ จะมีลักษณะการไหลของแบบ Laminar Flow ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า Nusselt number ดังสมการ

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} = 0.68 + \frac{0.670 \times (9.8880 \times 10^8)^{1/4}}{[1 + (0.492/0.7046)^{9/16}]^{4/9}} = 74.2877$$

จากนั้นสามารถคำนวณหา h_m ดังสมการ

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} = \frac{74.2877 \times 0.0284}{1.2} = 1.7584 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \dot{Q}_{wall,4} &= h_m A_{wall} (T_{wall} - T_{amb}) + \varepsilon_{wall} \sigma A_{wall} (T_{wall}^4 - T_{amb}^4) \\ &= \{1.7584 \times 18.73 \times (347.88 - 307.5)\} + \{0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 18.73 \times (347.88^4 - 307.5^4)\} \\ &= 1.3301 + 5.4535 = 6.7836 \text{ kW} \end{aligned}$$

เมื่อทราบความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาของแต่ละด้าน จะสามารถหาความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{wall} &= \dot{Q}_{wall,1} + \dot{Q}_{wall,2} + \dot{Q}_{wall,3} + \dot{Q}_{wall,4} \\ &= 15.0660 + 2.1286 + 8.8594 + 6.7836 = 32.84 \text{ kW} \end{aligned}$$

2.11 ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ($\dot{Q}_{other, furnace}$)

จากหลักการอนุรักษ์พลังงาน จะสามารถหาสมดุลพลังงาน (Energy balance) ของเตาเผา เพื่อคำนวณหา $\dot{Q}_{other, furnace}$ ดังสมการ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{other, furnace} &= (\dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel, sen} + \dot{Q}_{scale, form} + \dot{Q}_{air, preheat} + \dot{Q}_{air, leak}) \\ &\quad - (\dot{Q}_{billet, sen} + \dot{Q}_{flue, furnace} + \dot{Q}_{scale, sen} + \dot{Q}_{opening} + \dot{Q}_{wall}) \\ &= (4562.25 + 11.46 + 282.74 + 911.57 + 1.52) \\ &\quad - (2354.61 + 2133.81 + 56.82 + 93.11 + 32.84) \\ &= 1098.36 \text{ kW} \end{aligned}$$

3. ประสิทธิภาพของเตาเผา ($\eta_{furnace}$)

ผลจากการคำนวณสมดุลความร้อนของเตาเผา จะสามารถคำนวณหา $\eta_{furnace}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Furnace efficiency} &= \frac{\dot{Q}_{billet, sen}}{\dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel, sen}} \times 100\% \\ &= \frac{2354.61}{4562.25 + 11.46} \times 100\% \\ &= 51.48\% \end{aligned}$$

4. สมดุลมวลของ recuperator ประกอบด้วย

4.1 อัตราไหลของไอเสียเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{flue,recup}$)

กำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผา ดังนี้

$$\dot{m}_{flue,recup} = \dot{m}_{flue,furnace} = 2.6322 \text{ kg/s}$$

4.2 อัตราไหลของอากาศเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{air,inlet}$)

กำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังนี้

$$\dot{m}_{air,inlet} = \dot{m}_{air,preheat} = 2.3607 \text{ kg/s}$$

4.3 อัตราไหลของไอเสียที่ออกจาก recuperator ไปสู่ปล่องไอเสีย ($\dot{m}_{flue,stack}$)

กำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราไหลของไอเสียเข้าสู่ recuperator ดังนี้

$$\dot{m}_{flue,stack} = \dot{m}_{flue,recup} = 2.6322 \text{ kg/s}$$

4.4 อัตราไหลของอากาศเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{air,inlet}$)

กำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังนี้

$$\dot{m}_{air,inlet} = \dot{m}_{air,preheat} = 2.3607 \text{ kg/s}$$

5. สมดุลความร้อนของ recuperator ประกอบด้วย

5.1 ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้า ($\dot{Q}_{flue,recup}$)

ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้าจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผา ดังนี้

$$\dot{Q}_{flue,recup} = \dot{Q}_{flue,furnace} = 2133.81 \text{ kW}$$

5.2 ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า ($\dot{Q}_{air,inlet}$)

ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า เป็นพลังงานความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศภายนอกกับอุณหภูมิจากข้างใน เมื่อทราบค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยเท่ากับ $34.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{air,inlet}$ ได้ดังนี้

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

จากตาราง ข.1 ทำให้ทราบค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ ซึ่งจะนำมาคำนวณหาอัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนภายในอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา ดังนี้

$$\dot{m}_{O_2,air,inlet} = 0.2329 \times \dot{m}_{air,inlet} = 0.2329 \times 2.3607 = 0.5498 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{N_2,air,inlet} = 0.7671 \times \dot{m}_{air,inlet} = 0.7671 \times 2.3607 = 1.8109 \text{ kg/s}$$

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{air,inlet}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{air,inlet} &= \frac{\dot{m}_{O_2,air,inlet}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air,inlet}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= \frac{0.5498}{31.999} \left(\int_{298.15}^{307.50} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{1.8109}{28.013} \left(\int_{298.15}^{307.50} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= 4.7333 + 17.5802 = 22.31 \text{ kW} \end{aligned}$$

5.3 ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาออก ($\dot{Q}_{flue,stack}$)

ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาออก เป็นพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากไอเสียที่ออกจาก recuperator หลังจากการแลกเปลี่ยนความร้อนของไอเสียกับอากาศ เมื่อทราบค่าอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจาก recuperator เฉลี่ย $422.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{flue,stack}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{flue,stack} &= \frac{\dot{m}_{CO_2,flue,stack}}{M_{CO_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,CO_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{H_2O,flue,stack}}{M_{H_2O}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,H_2O} dT \right) \\ &+ \frac{\dot{m}_{SO_2,flue,stack}}{M_{SO_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,SO_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{O_2,flue,stack}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) \\ &+ \frac{\dot{m}_{N_2,flue,stack}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,stack}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \end{aligned}$$

จากตาราง ข.2 ทำให้ทราบค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสีย จะนำมาคำนวณหาอัตราไหลขององค์ประกอบภายในไอเสียได้

$$\dot{m}_{CO_2, flue, stack} = 0.1502 \times \dot{m}_{flue, stack} = 0.1418 \times 2.4713 = 0.3504 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{H_2O, flue, stack} = 0.0491 \times \dot{m}_{flue, stack} = 0.0463 \times 2.4713 = 0.1144 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{SO_2, flue, stack} = 0.0020 \times \dot{m}_{flue, stack} = 0.0018 \times 2.4713 = 0.0044 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{O_2, flue, stack} = (0.0774 \times \dot{m}_{flue, stack}) + \dot{m}_{O_2, airleak} = 0.2288 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{N_2, flue, stack} = (0.7327 \times \dot{m}_{flue, stack}) + \dot{m}_{N_2, airleak} = 1.9341 \text{ kg/s}$$

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{flue, stack}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{flue, stack} &= \frac{0.3504}{44.01} \left(\int_{298.15}^{695.53} \bar{c}_{p, CO_2} dT \right) + \frac{0.1144}{18.015} \left(\int_{298.15}^{695.53} \bar{c}_{p, H_2O} dT \right) \\ &+ \frac{0.0044}{64.063} \left(\int_{298.15}^{695.53} \bar{c}_{p, SO_2} dT \right) + \frac{0.2288}{31.999} \left(\int_{298.15}^{695.53} \bar{c}_{p, O_2} dT \right) \\ &+ \frac{1.9341}{28.013} \left(\int_{298.15}^{695.53} \bar{c}_{p, N_2} dT \right) \\ &= 139.0066 + 89.3991 + 1.2533 + 89.0999 + 817.9275 = 1136.69 \text{ kW} \end{aligned}$$

5.4 ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออก ($\dot{Q}_{air, outlet}$)

ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออกจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการอุ่นอากาศที่ recuperator ดังนี้

$$\dot{Q}_{air, outlet} = \dot{Q}_{air, preheat} = 911.57 \text{ kW}$$

5.5 ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ($\dot{Q}_{other, recuper}$)

จากหลักการอนุรักษ์พลังงาน จะสามารถหาสมดุลพลังงาน (Energy balance) ของ recuperator เพื่อคำนวณหา $\dot{Q}_{other, furnace}$ ดังสมการ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{other, recuper} &= \dot{Q}_{flue, recuper} + \dot{Q}_{air, inlet} - \dot{Q}_{flue, stack} - \dot{Q}_{air, outlet} \\ &= 2133.81 + 22.31 - 1136.69 - 911.57 = 107.86 \text{ kW} \end{aligned}$$

6. ประสิทธิภาพของ recuperator (Effectiveness, ε)

ผลการคำนวณสมมูลความร้อนของ recuperator จะสามารถคำนวณหา ε ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{q_{recup,act}}{q_{recup,max}} = \frac{h_{air,outlet} - h_{air,inlet}}{h_{air,outlet,max} - h_{air,inlet}}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} h_{air,outlet} &= \frac{1}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,outlet}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{1}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,outlet}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= \frac{0.2329}{31.999} \left(\int_{298.15}^{668.71} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{0.7671}{28.013} \left(\int_{298.15}^{668.71} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= 84.27 + 301.88 = 386.15 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} h_{air,inlet} &= \frac{1}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{1}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= \frac{0.2329}{31.999} \left(\int_{298.15}^{307.50} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{0.7671}{28.013} \left(\int_{298.15}^{307.50} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= 2.01 + 7.45 = 9.46 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} h_{air,outlet,max} &= \frac{1}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,furnace}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{1}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{flue,furnace}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= \frac{0.2329}{31.999} \left(\int_{298.15}^{1017.04} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{0.7671}{28.013} \left(\int_{298.15}^{1017.04} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= 170.35 + 603.34 = 773.69 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\varepsilon = \frac{h_{air,outlet} - h_{air,inlet}}{h_{air,outlet,max} - h_{air,inlet}} = \frac{386.15 - 9.46}{773.69 - 9.46} = 0.4929$$

ข.2 ตัวอย่างการคำนวณหลังทำการปรับปรุง

การคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาและ recuperator หลังทำการปรับปรุง จะคำนวณสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาไปพร้อมกัน ดังแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 6 ดังนี้

1. พิจารณาสมดุลมวลของเตาเผา

หลังจากทำการปรับปรุง จะพิจารณาว่าไม่มีปริมาณอากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผา ($\dot{m}_{air,leak} = 0$) เมื่อทำการคำนวณสมดุลมวล จะสามารถคำนวณอัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator หลังทำการปรับปรุง ดังนี้

$$\dot{m}_{flue, furnace} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air,comb} + \dot{m}_{air,leak} = 0.1106 + 2.3607 + 0 = 2.4713 \text{ kg/s}$$

2. พิจารณาสมดุลความร้อนของเตาเผา

เมื่ออัตราไหลของไอเสียมีค่าลดลง ส่งผลให้พลังงานความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจะสามารถคำนวณความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียได้ ดังสมการ

$$\dot{Q}_{flue, furnace, improve} = C_{flue, furnace} \times \dot{m}_{flue, furnace, improve}$$

เมื่อ

$$C_{flue, furnace} = \dot{Q}_{flue, furnace} / \dot{m}_{flue, furnace} = 2133.81 / 2.6322 = 810.66 \text{ kJ/kg}$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสีย จะมีค่าเท่ากับ

$$\dot{Q}_{flue, furnace, improve} = C_{flue, furnace} \times \dot{m}_{flue, furnace, improve} = 810.66 \times 2.4713 = 2003.38 \text{ kW}$$

เมื่อพลังงานความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียมีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องคำนวณหาสมดุลความร้อนของเตาเผาใหม่ ดังต่อไปนี้

1) เริ่มจากคำนวณพลังงานความร้อนรวมที่ออกจากเตาเผาหลังการปรับปรุง ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{total, output} &= \dot{Q}_{billet, sen} + \dot{Q}_{flue, furnace, improve} + \dot{Q}_{scale, sen} + \dot{Q}_{opening} + \dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{other, furnace} \\ &= 2354.61 + 2003.38 + 56.82 + 93.11 + 32.84 + 1098.36 = 5639.12 \text{ kW} \end{aligned}$$

2) คำนวณพลังงานความร้อนรวมที่เข้าสู่เตาเผาหลังการปรับปรุง ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{total, input} &= \dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel, sen} + \dot{Q}_{scale, form} + \dot{Q}_{air, preheat} \\ &= 4562.25 + 11.46 + 282.74 + 911.57 = 5768.02 \text{ kW}\end{aligned}$$

3) คำนวณผลต่างของพลังงานความร้อนรวมหลังการปรับปรุง ดังนี้

$$\Delta\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{total, input} - \dot{Q}_{total, output} = 5768.02 - 5639.12 = 128.9 \text{ kW}$$

โดยหากพลังงานความร้อนของทั้งสองส่วนมีค่าเท่ากันหรือ $\Delta\dot{Q}_{total} = 0$ จะถือว่าเตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนและจะสิ้นสุดกระบวนการคำนวณทันที แต่ถ้าหากทั้งสองส่วนมีค่าต่างกันจำเป็นต้องคำนวณหาอัตราไหลของมวลที่เข้าสู่เตาเผาใหม่ เนื่องจากพลังงานความร้อนที่เตาเผาต้องการจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลี่ยนไป ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของวิธีการคำนวณไว้ในขั้นตอนถัดไป

4) คำนวณหาพลังงานความร้อนที่เตาเผาต้องการจากเชื้อเพลิง ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{fuel, total} &= \dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel, sen} - \Delta\dot{Q}_{total} \\ &= 4562.25 + 11.46 - 128.9 = 4444.81 \text{ kW}\end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณสัดส่วนของความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงกับความร้อนสัมผัสจากการอุ่นเชื้อเพลิง เพื่อนำไปคำนวณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เตาเผาต้องการ ดังนี้

$$C_{ratio} = \frac{\dot{Q}_{comb}}{\dot{Q}_{fuel, sen}} = \frac{4562.25}{11.46} = 398.10$$

ซึ่งสามารถคำนวณหาความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เตาเผาต้องการ ดังนี้

$$\dot{Q}_{comb, improve} = \frac{\dot{Q}_{fuel, total} \times C_{ratio}}{(C_{ratio} + 1)} = \frac{4444.81 \times 398.10}{(398.10 + 1)} = 4433.67 \text{ kW}$$

และคำนวณความร้อนสัมผัสจากการอุ่นเชื้อเพลิงที่เตาเผาต้องการ ดังนี้

$$\dot{Q}_{fuel, sen, improve} = \dot{Q}_{comb, improve} / C_{ratio} = 4433.67 / 398.10 = 11.37 \text{ kW}$$

5) เมื่อทราบค่าพลังงานความร้อนที่เตาเผาต้องการหลังจากการปรับปรุง จะสามารถคำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาได้ ดังนี้

$$\dot{V}_{fuel,improve} = \dot{Q}_{comb,improve} / LHV = 4433.67/39600 = 0.1120 \text{ liter/s}$$

และคำนวณหาอัตราไหลของเชื้อเพลิงหลังจากการปรับปรุงได้ ดังนี้

$$\dot{m}_{fuel,improve} = \rho_{fuel} \times \dot{V}_{fuel,improve} = 0.96 \times 0.1120 = 0.1075 \text{ kg/s}$$

6) จากนั้นเมื่อกำหนดให้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้สำหรับการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงคงที่เป็นผลให้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงมีค่าคงที่ โดยสามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงก่อนการปรับปรุง ดังนี้

$$AF_{actual} = \dot{m}_{air} / \dot{m}_{fuel} = 2.3607 / 0.1106 = 21.3445 \text{ kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$$

เมื่อทราบค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง จะสามารถคำนวณหาอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้หลังจากการปรับปรุง ดังนี้

$$\dot{m}_{air,improve} = AF_{actual,furnace} \times \dot{m}_{fuel,improve} = 21.3445 \times 0.1075 = 2.2945 \text{ kg/s}$$

7) เมื่ออัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เปลี่ยนแปลง ทำให้อัตราการไหลของไอเสียเปลี่ยนแปลงตามกฎของการอนุรักษ์มวล ซึ่งจะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของไอเสียใหม่ ดังนี้

$$\dot{m}_{flue,furnace,improve,new} = \dot{m}_{fuel,improve} + \dot{m}_{air,improve} = 0.1075 + 2.2945 = 2.4020 \text{ kg/s}$$

ซึ่งสามารถคำนวณหาพลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียใหม่ ดังนี้

$$\dot{Q}_{flue,furnace,improve,new} = C_{flue,furnace} \times \dot{m}_{flue,furnace,improve,new}$$

$$= 810.66 \times 2.4020$$

$$= 1947.21 \text{ kW}$$

8) เมื่อทราบค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกไปกับไอเสียใหม่ จะสามารถคำนวณหาพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศด้วย recuperator ดังสมการ

$$\dot{Q}_{air,preheat,improve,new} = \dot{m}_{air,improve} \times h_{air,outlet}$$

เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของ recuperator และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าคงที่ พบว่า

$$h_{air,outlet} = [\varepsilon \times (h_{air,outlet,max} - h_{air,inlet})] + h_{air,inlet} = constant.$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศด้วย recuperator คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{air,preheat,improve,new} &= \dot{m}_{air,improve} \times h_{air,outlet} \\ &= 2.2945 \times 386.15 = 886.02 \text{ kW} \end{aligned}$$

9) จากนั้นแทนค่าพลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียใหม่ ($\dot{Q}_{flue,furnace,improve,new}$) และพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศใหม่ ($\dot{Q}_{air,preheat,improve,new}$) ลงในขั้นตอนที่ 1 และ 2 เพื่อทำการคำนวณหาสมดุลความร้อนของเตาเผา โดยหากพลังงานความร้อนรวมที่เข้าและออกจากเตาเผายังคงมีค่าต่างกันให้คำนวณซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 จนกระทั่งพลังงานความร้อนรวมที่เข้าและออกจากเตาเผา มีค่าเท่ากันหรือมีค่า $\Delta\dot{Q}_{total} = 0$ ซึ่งถือว่าเตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนและจะสิ้นสุดกระบวนการคำนวณ

เมื่อทำการคำนวณจนกระทั่งเตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน จะสามารถแสดงรายละเอียดของผลจากการคำนวณสมดุลมวลของเตาเผาหลังทำการปรับปรุง ดังนี้

มวลไหลเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- 1) อัตราไหลของเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 0.1066 kg/s
- 2) อัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 2.2754 kg/s

มวลไหลออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- 3) อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผา มีค่าเท่ากับ 2.3820 kg/s

โดยรายละเอียดของผลการคำนวณสมดุลความร้อนหลังการปรับปรุง เมื่อเตาเผาอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน มีดังนี้

พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 4394.31 kW
- 2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า มีค่าเท่ากับ 11.04 kW
- 3) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล มีค่าเท่ากับ 282.74 kW
- 4) ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่ recuperator มีค่าเท่ากับ 878.63 kW

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- 5) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก มีค่าเท่ากับ 2354.61 kW
- 6) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผา มีค่าเท่ากับ 1930.98 kW
- 7) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล มีค่าเท่ากับ 56.82 kW
- 8) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี มีค่าเท่ากับ 93.11 kW
- 9) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา มีค่าเท่ากับ 32.84 kW
- 10) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 1098.36 kW

3. ประสิทธิภาพของเตาเผา ($\eta_{furnace}$)

ผลจากการคำนวณสมดุลความร้อนของเตาเผา จะสามารถคำนวณหา $\eta_{furnace}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Furnace efficiency} &= \frac{\dot{Q}_{billet, sen}}{\dot{Q}_{comb} + \dot{Q}_{fuel, sen}} \times 100 \% \\ &= \frac{2354.61}{4394.31 + 11.04} \times 100 \\ &= 53.45\% \end{aligned}$$

4. สมดุลมวลของ recuperator ประกอบด้วย

4.1 อัตราไหลของไอเสียเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{flue, recup, improve}$)

กำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผา ดังนี้

$$\dot{m}_{flue, recup, improve} = \dot{m}_{flue, furnace, improve} = 2.3820 \text{ kg/s}$$

4.2 อัตราไหลของอากาศเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{air, inlet, improve}$)

กำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังนี้

$$\dot{m}_{air, inlet, improve} = \dot{m}_{air, preheat, improve} = 2.2754 \text{ kg/s}$$

4.3 อัตราไหลของไอเสียที่ออกจาก recuperator ไปสู่ปล่องไอเสีย ($\dot{m}_{flue,stack,improve}$)

กำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราไหลของไอเสียเข้าสู่ recuperator ดังนี้

$$\dot{m}_{flue,stack,improve} = \dot{m}_{flue,recup,improve} = 2.3820 \text{ kg/s}$$

4.4 อัตราไหลของอากาศเข้าสู่ recuperator ($\dot{m}_{air,inlet,improve}$)

กำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังนี้

$$\dot{m}_{air,inlet,improve} = \dot{m}_{air,preheat,improve} = 2.2754 \text{ kg/s}$$

5. สมดุลความร้อนของ recuperator ประกอบด้วย

5.1 ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้า ($\dot{Q}_{flue,recup,improve}$)

ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้า กำหนดให้มีค่าเท่ากับความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากเตาเผา ดังนี้

$$\dot{Q}_{flue,recup,improve} = \dot{Q}_{flue,furnace,improve} = 1930.98 \text{ kW}$$

5.2 ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า ($\dot{Q}_{air,inlet,improve}$)

กำหนดให้อุณหภูมิของอากาศภายนอกคงที่ แต่เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เปลี่ยนแปลง ทำให้ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้าเปลี่ยนไป ซึ่งจะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{air,inlet,improve}$ ได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{air,inlet,improve} = \frac{\dot{m}_{O_2,air,inlet}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,inlet}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air,inlet}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{air,inlet}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right)$$

จากตาราง ข.1 จะสามารถคำนวณหาอัตราไหลขององค์ประกอบภายในอากาศ ดังนี้

$$\dot{m}_{O_2,air,inlet} = 0.2329 \times \dot{m}_{air,inlet,improve} = 0.2329 \times 2.2754 = 0.5299 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{N_2,air,inlet} = 0.7671 \times \dot{m}_{air,inlet,improve} = 0.7671 \times 2.2754 = 1.7455 \text{ kg/s}$$

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะสามารถคำนวณ $\dot{Q}_{air,inlet}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{air,inlet} &= \frac{\dot{m}_{O_2,air,inlet}}{M_{O_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air,inlet}}{M_{N_2}} \left(\int_{T_0}^{T_{ambient}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= \frac{0.5299}{31.999} \left(\int_{298.15}^{307.50} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{1.7455}{28.013} \left(\int_{298.15}^{307.50} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= 4.5619 + 16.9453 = 21.51 \text{ kW}\end{aligned}$$

5.3 ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออก ($\dot{Q}_{air,outlet,improve}$)

ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออก จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการอุ่นอากาศที่ recuperator ดังนี้

$$\dot{Q}_{air,outlet,improve} = \dot{Q}_{air,preheat,improve} = 878.63 \text{ kW}$$

5.4 ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ($\dot{Q}_{other,recup,improve}$)

จากข้อสมมุติฐานกำหนดให้ความร้อนสูญเสียอื่นๆ มีค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\dot{Q}_{other,recup} = 107.86 \text{ kW}$$

5.5 ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาออก ($\dot{Q}_{flue,stack,improve}$)

จากหลักการอนุรักษ์พลังงาน จะสามารถหาสมดุลพลังงาน (Energy balance) ของ recuperator เพื่อคำนวณหา $\dot{Q}_{flue,stack,improve}$ ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{flue,stack,improve} &= \dot{Q}_{flue,recup,improve} + \dot{Q}_{air,inlet,improve} - \dot{Q}_{air,outlet,improve} - \dot{Q}_{other,recup} \\ &= 1930.98 + 21.51 - 878.63 - 107.86 = 965.99 \text{ kW}\end{aligned}$$



ภาคผนวก ค
บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลดอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา

A study of Energy Saving for a Reheating Furnace by Reduction of Air Leak

ศุภณัฐ เจริญ* จิตติน แดงเที่ยง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 E-mail: supanut_567@hotmail.com

Supanut Charoen and Chittin Tangtieng

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phyathai Rd, Pathumwan, Bangkok 10330 E-mail: supanut_567@hotmail.com

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่ใช้พลังงานสูงเป็นลำดับต้นๆ ของประเทศ เนื่องจากอุตสาหกรรมประเภทนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนมาก เพื่อทำความร้อนให้มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,100 - 1,250 °C สำหรับการเผาเหล็ก การเข้าใจถึงพลังงานที่ใช่ของเตาเผาจะนำไปสู่การปรับปรุงพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผา งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับสมดุลพลังงานและประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา โดยเตาเผาที่ทำการศึกษาขนาด 12 ตันชั่วโมง แบบ pusher type ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง และมีลักษณะการทำงานของเตาแบบต่อเนื่องในสภาวะการทำงานแบบปกติ ผลจากการตรวจวัด พบว่า ความดันภายในเตาเผาเป็นลบ ซึ่งหมายถึงความดันมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายนอก ทำให้มีอากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่เตาผ่านช่องเปิดต่างๆ ซึ่งอากาศในส่วนนี้จะพาความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงออกไปพร้อมกับไอเสีย หลังจากการปรับปรุงโดยการลดอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา พบว่าสามารถประหยัดเชื้อเพลิงที่ใช้ได้ 10.48 ลิตร/ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 2.53 เมื่อเทียบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่มีอยู่เดิม

Abstract

An iron and steel industry is one of the industries that uses a high level of energy consumption in our country. In order to shape the iron and steel, it is reheated to 1,100 - 1,250 °C, resulting in a high energy consumption. Thus, understanding how to efficiently consume a probable amount for energy can lead us to a higher performance of the furnace. This research focuses on the energy balance and the efficiency of a pusher-type reheating furnace. The furnace capacity is 12-tonne per hour, and the heavy fuel oil is used as a fuel. The working condition of the furnace is normal operation. The result from the field

measurement indicates that the furnace pressure is negative, leading to the cold air leaking through the openings into the furnace. Therefore, this cold air will absorb heat from the combustion process and flow out through the stack. It is estimated that after reducing the air leakage, the fuel consumption of 10.48 L/h can be saved, which is equivalent to 2.53% of the previous energy consumption rate.

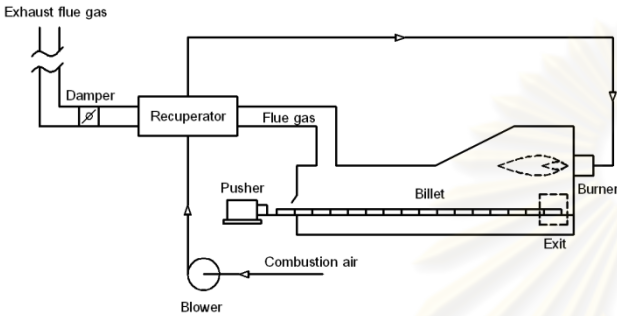
1. บทนำ

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นๆ อย่างเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้ามีการใช้พลังงานจำนวนมาก โดยอุปกรณ์หลักที่ใช้พลังงานสูงในกระบวนการผลิต คือ เตาเผาเหล็ก ซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้ส่วนใหญ่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำพวกน้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ เพื่อทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่เหล็ก ทำให้เหล็กอ่อนตัวและง่ายต่อการขึ้นรูป เนื่องจากกระบวนการผลิตมีการใช้เชื้อเพลิงจำนวนมาก การพัฒนาหาแนวทางการประหยัดพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับผู้ผลิตจากต่างประเทศได้ การเข้าใจถึงพลังงานที่ใช่ของเตาเผาด้วยการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผา ทำให้ทราบถึงพลังงานความร้อนที่สูญเสียของเตาเผาในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนา ซึ่งการลดพลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดจากอากาศภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผา เนื่องจากความดันภายในเตาเผาเป็นลบ จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยลดการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงของเตาเผาได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาปริมาณของพลังงานความร้อนสูญเสียจากอากาศภายนอกรั่วเข้าสู่เตาเผา รวมถึงวิธีการปรับปรุงเพื่อลดปริมาณของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา

2. เตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace)

2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา

เตาเผา มีขนาด 12 tonne/hr แบบ pusher type ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง และการคิดอัตราค่าไฟฟ้าเป็นแบบ TOD (Time of Day Rate) หรือคิดตามความต้องการการใช้ไฟฟ้า ซึ่งแบ่งเป็น 3 ช่วงต่อวัน คือ ตั้งแต่เวลา 08.00-18.30 น. จะอยู่ในช่วง Patial Peak และตั้งแต่เวลา 18.30-21.30 น. จะอยู่ในช่วง On Peak ส่วนตั้งแต่เวลา 21.30-08.00 น. จะอยู่ในช่วง Off Peak โดยแผนผังของระบบเตาเผาเบื้องต้นแสดงไว้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบของระบบเตาเผา

2.2 ลักษณะการทำงานของเตาเผา

เตาเผา มีสภาวะการทำงานแบบปกติ ตั้งแต่ 22.00 - 18.30 น. ของทุกวัน เมื่อคิดอัตราค่าไฟฟ้าเป็นแบบ TOD จะอยู่ในช่วง Off Peak และ Patial Peak หลังจากนั้นจะทำการหยุดเตาในระยะเวลา ตั้งแต่ 18.30 - 21.00 น. เนื่องจากช่วงเวลานี้จะคิดอัตราค่าไฟฟ้าในช่วง On Peak และจะเร่งเตา ตั้งแต่เวลา 21.00 -22.00 น. เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาตามต้องการ ซึ่งหากต้องการเปลี่ยนลูกรีดจะทำการเปลี่ยนในช่วงนี้ด้วย เมื่อพิจารณาลักษณะการทำงานทั้งหมดของเตา จะเห็นได้ว่าลักษณะการทำงานของเตาเผาส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสภาวะการทำงานแบบปกติ

3. องค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

องค์ประกอบน้ำมันเตาที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแสดงได้ในรูปของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงองค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก
C	86.4
H	11.6
S	2.0

องค์ประกอบของน้ำมันเตาในรูปของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักจะสามารถจำแนกเป็นสัดส่วนจำนวนโมลของแต่ละธาตุได้ ซึ่งน้ำมันเตาจำนวน 1 kmol ประกอบด้วย C = 0.3836 kmol, H = 0.6131 kmol และ S = 0.0033 kmol

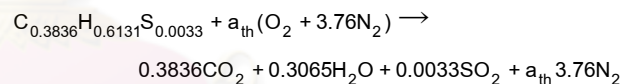
การพิจารณาค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันเตา โดยทั่วไปมักจะนำค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงมาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง นั้นหมายถึงการหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงจะถูกกำหนดสถานะอ้างอิงของสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงไว้ โดยสถานะอ้างอิงมาตรฐานจะอยู่ที่ 25 °C, 1 atm ซึ่ง ณ อุณหภูมิและความดันดังกล่าวไอน้ำที่อยู่ในไอเสียจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ทำให้เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากก๊าซเป็นของเหลว แต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิของไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นมีค่าสูงประมาณ 500 - 800 °C ส่งผลให้ไอน้ำที่อยู่ภายในไอเสียยังคงมีสถานะเป็นก๊าซเหมือนเดิม จึงไม่เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณจึงควรเป็นค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ ดังแสดงไว้ในตาราง

ตารางที่ 2 ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำมันเตา

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
มวลโมเลกุล	5.33	kg/kmol
ความถ่วงจำเพาะ	0.96	-
ความจุความร้อนจำเพาะ	1.884	kJ/kg-K
ความร้อนเชื้อเพลิงสูง	42.1	MJ/liter
ความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ	39.6	MJ/liter

4. การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

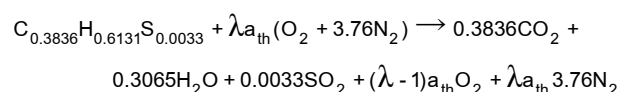
องค์ประกอบของน้ำมันเตาดังที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาเขียนสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎี ดังสมการ



เมื่อ a_{th} คือ จำนวนโมลของออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kmol ทางทฤษฎี จากการคำนวณหาสมดุลของสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงทางทฤษฎีดังกล่าวข้างต้น จะได้ว่า a_{th} มีค่าเท่ากับ 0.54015 kmol_{O2}/kmol_{fuel} โดยใช้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (stoichiometric air-fuel ratio, AF_{stoic}) จะสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$AF_{stoic} = \dot{m}_{air} / \dot{m}_{fuel} = 13.92 \text{ kg}_{air} / \text{kg}_{fuel} \quad (1)$$

จากสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎีเขียนขึ้นภายใต้เงื่อนไขการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วปริมาณอากาศที่ใช้จะสูงกว่าปริมาณอากาศที่ใช้ในทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกินจะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ ดังสมการ



เมื่อ λ คือตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน

เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ จะเห็นได้ว่ามีปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมาเท่ากับไอเสีย เท่ากับ $(\lambda - 1)a_{th}O_2$ โดยในทางปฏิบัติจะสามารถวัดได้จากเครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของไอเสีย (flue gas analyzer) ซึ่งแสดงในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยโมล แต่เนื่องจากเครื่องมือวัดจะวัดปริมาณออกซิเจนในลักษณะ dry basis นั้นหมายถึง ไอเสียจะถูกดึงเอาไอน้ำและความชื้นออกไปก่อนจะทำการวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะต้องแปลงไปเป็นตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของคุณค่าอากาศส่วนเกิน ดังสมการ

$$\%O_2 = \frac{(\lambda - 1)a_{th}}{0.3836 + 0.0033 + (\lambda - 1)a_{th} + 3.76\lambda a_{th}} \quad (2)$$

เนื่องจาก a_{th} มีค่าเท่ากับ 0.54015 เมื่อแทนค่า a_{th} ลงในสมการ (2) จะสามารถจัดรูปสมการให้ค่า λ อยู่ในรูปของ $\%O_2$ ได้ดังสมการ

$$\lambda = \frac{0.5401 - 50.153 \frac{\%O_2}{100}}{0.5401 - 52.571 \frac{\%O_2}{100}} \quad (3)$$

เมื่อทราบค่า λ จากสมการ (3) จะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิงจริง (actual air-fuel ratio, AF_{actual}) ได้ดังสมการ

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

5. การวิเคราะห์ปริมาณของอากาศจากภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา

อัตราไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา เกิดจากความดันภายในเตามีค่าเป็นลบ เมื่อเปิดประตูยั้งเหล็กทำให้อากาศจากภายนอกรั่วไหลเข้าสู่เตา โดยจะสังเกตได้จากปริมาณออกซิเจนภายในไอเสียที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนในขณะปิดประตูยั้งเหล็ก ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา จะสามารถคำนวณได้จากผลต่างของอัตราการไหลของอากาศในช่วงปิดและเปิดประตูยั้งเหล็ก ดังสมการ

อัตราการไหลของอากาศในช่วงปิดประตูยั้งเหล็ก

$$\dot{m}_{air, closed} = AF_{actual, closed} \times \dot{m}_{fuel} \quad (5)$$

อัตราการไหลของอากาศในช่วงเปิดประตูยั้งเหล็ก

$$\dot{m}_{air, open} = AF_{actual, open} \times \dot{m}_{fuel} \quad (6)$$

เนื่องจากเตาเผาเหล็กไม่ได้เปิดประตูยั้งเหล็กตลอดเวลา แต่จะเปิดเฉพาะช่วงที่ต้องการยั้งเหล็กออกจากเตาเผาเท่านั้น ทำให้ลักษณะการทำงานของประตูยั้งเหล็กจะเปิดและปิดสลับกัน จึงจำเป็นต้องหาสัดส่วนเวลาของการเปิดประตูยั้งเหล็ก (f_{open}) ดังสมการ

$$f_{open} = t_{open} / t_{total} \quad (7)$$

โดยที่ t_{open} คือระยะเวลาในช่วงที่เปิดประตูยั้งเหล็ก ซึ่งสามารถหาได้จากเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการเปิดประตูยั้งเหล็กต่อครั้งคูณด้วยจำนวนครั้งที่เปิดประตูยั้งเหล็กในช่วงระยะเวลาทั้งหมดหรือ t_{total}

ดังนั้นอัตราไหลของอากาศภายนอกที่รั่วเข้าสู่เตาเผา จะสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{air, leak} = f_{open} \times (\dot{m}_{air, open} - \dot{m}_{air, closed}) \quad (8)$$

6. การคำนวณและวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผา

การตรวจวัดและเก็บข้อมูลของเตาเผา ขนาด 12 tonne/hr แบบ pusher type และใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง จะนำมาคำนวณและวิเคราะห์สมดุลมวล สมดุลความร้อน รวมถึงประสิทธิภาพของเตาเผา

6.1 สมดุลมวลของเตาเผา

เมื่อพิจารณาเตาเผาเหล็กเป็นปริมาตรควบคุม และมีระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดยในกรณีนี้ความดันภายในเตาเผามีค่าเป็นลบ ผลที่ได้จากการคำนวณและวิเคราะห์สมดุลมวลของเตาเผา จะแสดงรายละเอียดของมวลไหลที่เข้าและออกจากเตาเผาในแต่ละส่วน ดังตารางที่ 3 และ 4

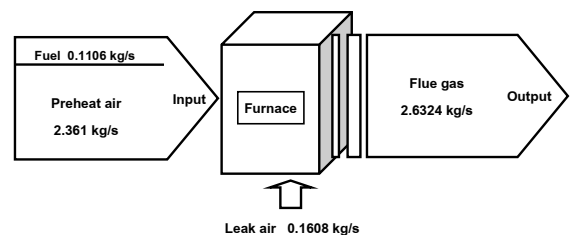
ตารางที่ 3 ตารางแสดงรายละเอียดของมวลที่ไหลเข้าสู่เตาเผา

Input	kg/s	%
1) อัตราไหลของเชื้อเพลิง	0.1106	4.20
2) อัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	2.3610	89.69
3) อัตราไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา	0.1608	6.11
Total mass input	2.6324	100.00

ตารางที่ 4 ตารางแสดงรายละเอียดของมวลที่ไหลออกจากเตาเผา

Output	kg/s	%
1) อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาไปยัง recuperator	2.6324	100.00
Total mass output	2.6324	100.00

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะสามารถนำมาเขียน diagram สมดุลมวลของเตาเผา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 diagram สมดุลมวลของเตาเผา

6.2 สมดุลความร้อนของเตาเผา

เมื่อพิจารณาระบบการทำงานของเตาเผาแบบต่อเนื่องที่มีสภาวะการทำงานแบบปกติ หรือระบบอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน ซึ่งจะถือว่าอุณหภูมิภายในเตามีค่าเฉลี่ยที่คงที่หรือทั้งเตามีอุณหภูมิเดียวกันทั้งหมด และพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ตัวเตาจะกลายเป็นพลังงานความร้อนที่ออกจากตัวเตาทั้งหมดโดยไม่มีการสะสมอยู่ภายใน ซึ่งในกรณีนี้ที่ความดันภายในเตาเผามีค่าเป็นลบ จะสามารถแสดงรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจากเตาเผา ดังนี้

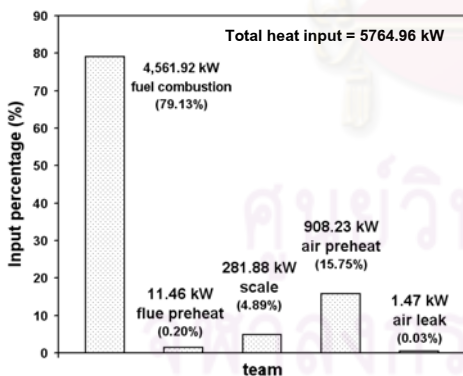
พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเหล็ก ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง
- 2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า
- 3) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล
- 4) ความร้อนจากการ preheat อากาศที่ recuperator
- 5) ความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา

พลังงานความร้อนออกจากเตาเหล็ก ประกอบด้วย

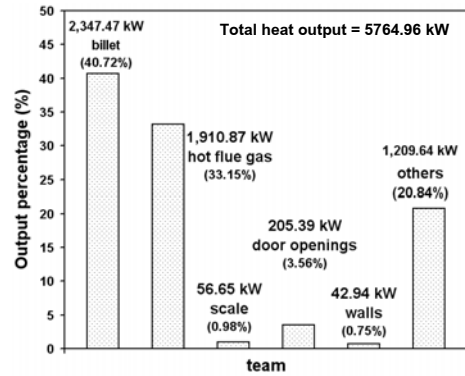
- 1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก
- 2) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไปยัง recuperator
- 3) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล
- 4) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี
- 5) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา
- 6) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เช่น หลังคาและพื้น เป็นต้น

ในการคำนวณพลังงานความร้อนของเตาเผา จะต้องมีกำหนดอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) และความดันอ้างอิง (P_0) ไว้ที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 1 atm ตามลำดับ เพื่อให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล โดยผลจากการคำนวณจะแสดงสัดส่วนการใช้พลังงานของเตาเผา ซึ่งรายละเอียดของพลังงานความร้อนที่เข้าและออกจากเตา แสดงไว้ดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 เปอร์เซนต์ของพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแหล่งพลังงานความร้อนหลักที่เข้าสู่เตาได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าสูงถึง 79.13% รองลงมาคือความร้อนจากการ preheat อากาศด้วยไอเสียก่อนเข้าทำการเผาไหม้ โดยคิดเป็นสัดส่วน 15.75% นอกจากนี้ได้จากการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิง การก่อตัวของสเกล และความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาเมื่อเทียบกับสถานะอ้างอิง โดยคิดรวมเป็น 5.12% เมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา รวม



รูปที่ 4 เปอร์เซนต์ของพลังงานความร้อนออกจากเตาเผา

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าพลังงานความร้อนหลักเกิดจากการดูดซับความร้อนของ billet และการสูญเสียความร้อนออกไปกับไอเสีย โดยคิดรวมเป็น 73.87% นอกจากนี้จะสูญเสียไปกับสเกลของเหล็ก ช่องเปิดต่างๆ ผนังเตาเผา และความร้อนสูญเสียในส่วนอื่นๆ เช่น พื้นและหลังคาของเตาเผา เป็นต้น โดยคิดเป็น 0.98%, 3.56%, 0.75% และ 20.84% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสีย มีค่าสูงถึง 33.15% ส่วนหนึ่งเกิดจากมีอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา ทำให้อากาศส่วนนี้พาความร้อนจากก๊าซร้อนภายในเตาเผาออกไปพร้อมกับไอเสีย เป็นผลให้ความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียมีปริมาณมากขึ้น

6.3 การคำนวณและวิเคราะห์สมดุลพลังงานของ recuperator

จากการพิจารณา recuperator เป็นปริมาตรควบคุมและมีระบบการทำงานในสภาวะคงตัว (steady state) ด้วยกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) โดยมีรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจาก recuperator มีดังนี้

พลังงานความร้อนเข้าสู่ recuperator ประกอบด้วย

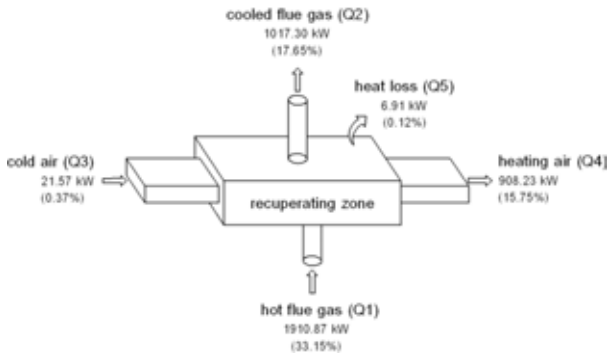
- 1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้า
- 2) ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า

พลังงานความร้อนออกจาก recuperator ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาออก
- 2) ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออก
- 3) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

ในการคำนวณจะอาศัยข้อมูลจากการตรวจวัดอุณหภูมิของอากาศและไอเสียทั้งขาเข้าและออกจาก recuperator รวมถึงองค์ประกอบการนำความร้อนกลับมาใช้ (heat recovery) ของ recuperator โดยในรูปที่ 5 จะแสดงถึงรายละเอียดของสมดุลความร้อนและเปอร์เซนต์ของพลังงานความร้อนในแต่ละส่วน เมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนของเตาเผา รวม จากนั้นพิจารณาประสิทธิภาพการนำความร้อนกลับมาใช้ของ recuperator ดังสมการ

$$\eta_{re} (\%) = \frac{Q_4 - Q_3}{Q_1} \times 100\% \tag{9}$$



รูปที่ 5 diagram สมดุลความร้อนของ recuperator

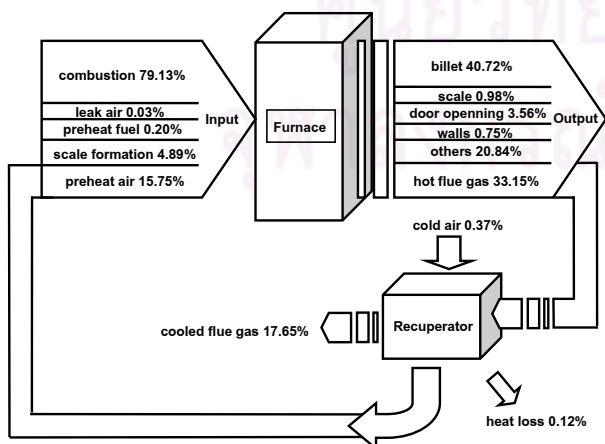
จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า recuperator สามารถ preheat อากาศด้วยไอเสียได้ถึง 886.66 kW หรือคิดได้เป็น 15.75% เมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนของเตาเผารวม และจากการคำนวณประสิทธิภาพการนำความร้อนกลับมาใช้ของ recuperator มีค่าเท่ากับ 46.40%

6.4 ประสิทธิภาพของเตาเผา (Furnace Efficiency)

ประสิทธิภาพของเตาเผา ($\eta_{furnace}$) คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป ในกรณีนี้พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์คือความร้อนที่เข้าสู่เหล็ก ($\dot{Q}_{billet, sen}$) เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ส่วนพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปคือความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (\dot{Q}_{comb}) โดยสามารถคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผา ดังสมการ

$$\eta_{furnace} (\%) = \frac{\dot{Q}_{billet, sen}}{\dot{Q}_{comb}} \times 100\% \quad (10)$$

ผลจากการคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผา มีค่าเท่ากับ 51.46% และเมื่อพิจารณาระบบของเตาเผา จะสามารถเขียน Sankey diagram เพื่อแสดงสมดุลความร้อนทั้งระบบของเตาเผาได้ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 Sankey diagram ของเตาเผาทั้งระบบ

7. การวิเคราะห์และแนวทางการปรับปรุง

7.1 การวิเคราะห์การไหลของอากาศและไอเสีย

การไหลเริ่มจากการดูดอากาศด้วย blower ผ่าน recuperator เพื่ออุ่นอากาศก่อนทำการเผาไหม้ จากนั้นอากาศจะไหลผ่าน damper ก่อนเข้าสู่ burner โดย damper จะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง และนอกจากนี้ยังมีอากาศอีกส่วนหนึ่งที่ใช้ในการทำให้น้ำมันเตาเป็นละอองฝอย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้เชื้อเพลิง หรือเรียกว่า atomized air ซึ่งได้มาจากเครื่องอัดอากาศ หลังจากนั้นเมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิง ไอเสียที่ได้จะถูกดูดผ่าน exhausted gas damper ก่อนออกไปทางปล่องไฟ โดยอาศัยแรงลอยตัวจากไอเสียร้อนตามธรรมชาติ ซึ่ง exhausted gas damper จะทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของไอเสีย โดยมีการควบคุมแบบ manual

7.2 แนวทางการปรับปรุง

เนื่องจากการรั่วของอากาศจากภายนอกเข้าสู่เตาเผา เกิดจากความดันภายในเตาเผาเป็นลบ ซึ่งให้เห็นว่าระบบควบคุมความดันของเตาเผาบกพร่อง จากการเก็บข้อมูลพบว่าในขณะที่เตาเผาทำงาน exhausted gas damper จะตั้งไว้ที่ตำแหน่งเดิม ทำให้เมื่อค่าความดันภายในเตาเปลี่ยนแปลงจึงไม่มีอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมความดันภายในเตาเผาให้คงที่ได้ ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงจึงมุ่งเน้นไปที่การควบคุมอัตราการไหลของไอเสียที่สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความดันภายในเตาเผา โดยการติดตั้ง sensor ตรวจวัดความดัน เพื่อส่งสัญญาณไปควบคุม exhausted gas damper ให้ปรับเปลี่ยนองศาสำหรับการควบคุมการไหลของไอเสีย เมื่อวิเคราะห์ผลจากการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตา พบว่าก่อนทำการปรับปรุงมีพลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียเท่ากับ 1,910.87 kW และมีพลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาจากอากาศรั่วเท่ากับ 1.47 kW แต่หลังจากทำการปรับปรุงพบว่าพลังงานความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียมีค่าเท่ากับ 1,794.14 kW โดยพิจารณาว่าหากติดตั้งระบบควบคุมความดันแล้วจะทำให้อากาศที่รั่วเข้าสู่เตามีค่าเป็นศูนย์ ส่งผลให้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อากาศรั่วพาออกไปพร้อมกับไอเสียลดลง ซึ่งเห็นได้จากค่าของพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกไปกับไอเสียลดลงถึง 115.26 kW หรือเมื่อเทียบเป็นปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้เท่ากับ 10.48 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 2.53 เมื่อเทียบกับอัตราการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่มีอยู่เดิมคือ 414.72 ลิตร/ชั่วโมง โดยข้อมูลจากตารางที่ 5 จะสามารถนำมาคำนวณหาเงินที่สามารถประหยัดได้ต่อปีเท่ากับ 1,224,588 บาทต่อปี และจากนั้นประเมินผลของระยะคืนทุน

ตารางที่ 5 ตารางแสดงรายละเอียดของข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์

รายละเอียด	ค่า	หน่วย
ราคาเชื้อเพลิง	19	บาท/ลิตร
ชั่วโมงทำงานของเตาต่อวัน	20.5	ชั่วโมง/วัน
วันทำงานต่อปี	300	วัน/ปี
เงินลงทุน (ค่าอุปกรณ์)	200,000	บาท
เงินลงทุน (ค่าแรง)	0	บาท

จากการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา พบว่าต้นทุนที่ใช้สำหรับการปรับปรุงครั้งนี้ คิดรวมเป็นเงิน 200,000 บาท ดังแสดงในตารางที่ 5 และหลังจากการปรับปรุงแล้วจะสามารถประหยัดเงินได้ 1,224,588 บาทต่อปี ดังนั้นระยะคืนทุนของการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาเผา มีค่าเท่ากับ 1.96 เดือน

8. สรุป

จากการศึกษาปริมาณการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กขนาดเล็กที่มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่องในสภาวะการทำงานแบบปกติ โดยใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นว่า แหล่งพลังงานความร้อนหลักที่เข้าสู่เตาเผาได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและความร้อนจากการ preheat อากาศด้วยไอเสียก่อนทำการเผาไหม้ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนโดยรวมเท่ากับ 94.88% ส่วนแหล่งพลังงานความร้อนหลักที่ออกจากเตาเผาเกิดจากการดูดซับความร้อนของ billet และการสูญเสียความร้อนออกไปกับไอเสีย ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนโดยรวมเท่ากับ 73.87% และประสิทธิภาพของเตาเผา มีค่าเท่ากับ 51.46% นอกจากนี้ พบว่า พลังงานความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียไปกับอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา เนื่องจากความดันภายในเตาเป็นลบ โดยจะสังเกตได้ว่าความร้อนสูญเสียออกไปกับไอเสียมีค่าสูง ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาพาความร้อนจากก๊าซร้อนภายในเตาเผาออกไปพร้อมกับไอเสีย โดยหลังจากการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาจะสามารถประหยัดเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ได้ 10.48 ลิตร/ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 2.53 เมื่อเทียบกับอัตราการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่มีอยู่เดิม และหลังจากการปรับปรุงครั้งนี้จะสามารถคืนทุนได้ประมาณภายใน 2 เดือน

เอกสารอ้างอิง

1. Janjai, W.H. Chena, Y.C. Chung, J.L. Liu, 2005. "Analysis on energy consumption and performance of reheating furnace in a hot strip mill," 2005.
2. Industrial Furnaces (6th edition), W. Trinks et al., John Wiley & Sons Inc., 2004.
3. Thermodynamics. An Engineering Approach (5th edition), Yunus A. Zengel & Michael A. Boles., 2006.
4. โครงการการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่างๆ (SEC), (โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก), กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549.
5. เอกสารเผยแพร่ "การประหยัดพลังงานในเตาเผา", กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, 2545.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุภณัฐ เจริญ เกิดเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา เมื่อปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 ระหว่างการศึกษาได้รับทุนผู้ช่วยสอน และได้เข้าร่วมกับโครงการของสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย