

การปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นน้ำรับน้ำเหล็กโดยการใช้ Oxy burner

นายวิริยะ ไชตพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF LADLE PREHEATING BY USING OXY BURNER

Mr. Wiriya Chotekhan

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการใช้
Oxy burner

โดย

นายวิริยะ โชติพันธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จริญญาภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรานนท์)

วิริยะ โชติพันธ์ : การปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการใช้ Oxy burner. (EFFICIENCY IMPROVEMENT OF LADLE PREHEATING BY USING OXY BURNER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล, 146 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เสนอผลการศึกษาดำเนินการทดลอง เพื่อหา สภาวะทางความร้อน ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์ เบิร์นเนอร์ (Air burner) ที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง กับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ (Oxy burner) ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการศึกษามีขนาด ความจุขนาด 18 ตันน้ำเหล็ก งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ 2 ครั้ง และอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ 3 ครั้ง ซึ่งครั้งที่ 1 และ 2 อุ่นด้วยโหมด อัตโนมัติ ส่วนครั้งที่ 3 อุ่นด้วยโหมดจ่ายเชื้อเพลิงสูง โดยในการทดลองแต่ละครั้งจะมีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก 2 กรณี คือ เบ้าเย็นและเบ้าร้อน

จากการทดลองการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเย็นปรากฏว่า มีพลังงานสูญเสียในรูปก๊าซเสีย และพลังงานสูญเสียอื่นๆ ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ 59% ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติ และโหมดจ่ายเชื้อเพลิงสูงมีค่าประมาณ 31% ส่วนประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีค่าประมาณ 34% ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดจ่ายเชื้อเพลิงสูงมีค่าประมาณ 57% ส่วนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ร้อนปรากฏว่า มีพลังงานสูญเสียในรูปก๊าซเสียและพลังงานสูญเสียอื่นๆ ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ 65% ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติมีค่าประมาณ 43% โหมดจ่ายเชื้อเพลิงสูงมีค่าประมาณ 49% ส่วนประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ 16% อุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดจ่ายเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 30%

สำหรับเบ้าเย็น การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติสามารถ ประหยัดพลังงานได้ 41% โหมดจ่ายเชื้อเพลิงสูงประหยัดพลังงานได้ 50% เมื่อเปรียบเทียบกับแอร์เบิร์นเนอร์ สำหรับการอุ่นเบ้าร้อน ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติสามารถประหยัดพลังงานได้ 58% โหมดจ่ายเชื้อเพลิงสูงสามารถประหยัดพลังงานได้ 56% เมื่อเปรียบเทียบกับแอร์เบิร์นเนอร์ นอกจากนี้ ออกซิเบิร์นเนอร์ยังลดเวลาการอุ่นเบ้าลง 40% โดยประมาณ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2554

5270837021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : LADLE PREHEATING / COLD LADLE / AIR BURNER / OXY BURNER /

WIRIYA CHOTEKHAN : EFFICIENCY IMPROVEMENT OF LADLE

PREHEATING BY USING OXY BURNER. ADVISOR : ASST.PROF. MINGSAK

TANGTRAKUL, 146 pp.

This thesis presents experimental results of the ladle preheating efficiency and energy consumption in ladle preheating process. Two types of burners were taken under consideration. The oil-fired air burner and the gas-fired oxy burner. The 18 tons of liquid steel ladle was used for preheating. The ladle was preheated 2 times by the air burner and 3 times by the oxy burner. The first and second time of the oxy burner was set to an automatic mode while the third one was set to a high fire mode. In each time, the preheating process has a total of 4 steps. The first step preheats a cold ladle whereas the remaining ones preheat a hot ladle.

For a cold ladle case, the amount of the flue gas loss and other loss is 59% in case of the air burner. The amount of the flue gas loss and other loss is 31% in case of the oxy burner. The efficiency of the air burner is 34%. The efficiency of the oxy burner in automatic and high fire mode is 57%. For a hot ladle case, the amount of the flue gas and other loss is 65% in case of the air burner. The amount of the flue gas and other loss is 43% in case of the oxy burner in automatic mode whereas high fire mode is 49%. The efficiency of air burner is 16%. The efficiency of the oxy burner in automatic and high fire mode is 30%.

For a cold ladle, by comparing with the air burner preheating process, the oxy burner preheating process in automatic mode saves energy by 41% while that in high fire mode saves energy by 50%. For a hot ladle, the oxy burner preheating process in automatic mode saves energy by 58%. The oxy burner preheating process in high fire mode saves energy by 56%. Furthermore, the preheating period of time in case of oxy burner decreases by 40% compared with the air burner.

Department : Mechanical Engineering

Student's Signature.....

Field of Study : Mechanical Engineering

Advisor's Signature.....

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสสำคัญในการทำงานวิจัยฉบับนี้ รวมถึงการให้ความกรุณา ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ประสบการณ์อันล้ำค่าต่างๆ ที่มีคุณ ค่ายิ่ง อันเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่าน ที่สละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยชิ้นนี้จนกระทั่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท เกษมศักดิ์ เทรตดี้ง จำกัด ที่อำนวยความสะดวก ทั้งสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ทีมวิศวกรและทีมช่างเทคนิคของบริษัทที่ช่วยให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ รวมทั้ง อุปกรณ์การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ จากบริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด และ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ ผอ. วิกรม วัชรคุปต์ ผู้อำนวยการสถาบัน คุณหิน นววงศ์ ที่คอยแนะนำและให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณ ทีมงานจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณแมนพงษ์ ตั้งตระกูล คุณอภิสิทธิ์ บุญเกิด และคุณตรงจิตต์ ชวหา ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งร่วมทำการทดลอง ในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา อันคุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ครอบครัว ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1 ข้อมูลทั่วไปของเบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle).....	15
3.2 เหตุผลและประโยชน์ของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	17
3.3 ออกซิเบิร์นเนอร์ (Oxy burner).....	17
3.4 การถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	18
3.4.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer).....	18
3.4.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer).....	19
3.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer).....	20
3.5 สมดุลมวลและสมดุลพลังงานในเบ้ารับน้ำเหล็ก (Mass and Energy	

balance).....	21
3.5.1 สมดุลมวลในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	21
3.5.2 สมดุลพลังงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	25
3.6 สมการการเผาไหม้ (Combustion equation).....	35
3.6.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ.....	35
3.6.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้.....	36
3.7 ประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle preheating efficiency).....	40
บทที่ 4 การทดลองและการตรวจวัดข้อมูล.....	41
4.1 ข้อมูลเบื้องต้นและการทำงานของเครื่องอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	41
4.2 รูปแบบการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	41
4.2.1 อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ (ก่อนปรับปรุง).....	41
4.2.2 อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ (หลังปรับปรุง).....	42
4.3 รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องตรวจวัด.....	43
4.3.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ (ก่อนปรับปรุง).....	43
4.3.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ (หลังปรับปรุง).....	44
4.4 การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล.....	45
4.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	50
4.5.1 เทอร์มอคัปเปิล (Thermocouple).....	50
4.5.2 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (IR Thermometer).....	50
4.5.3 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ (Data logger).....	51
4.5.4 เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซเสีย (Flue gas analyzer).....	52
บทที่ 5 ผลการวิจัย.....	53
5.1 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ.....	53
5.1.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์.....	53
5.1.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์.....	57
5.2 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (Energy Consumption).....	59
5.3 สมดุลพลังงาน (Energy balance).....	60
5.3.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์.....	61
5.3.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์.....	69

5.4 เวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	80
5.5 ปริมาณ NOx ในก๊าซเสีย.....	82
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	83
6.1 อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง Lower (L1 – L5).....	83
6.1.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์.....	83
6.1.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์.....	85
6.2 สมดุลพลังงาน (Energy balance).....	86
6.2.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์.....	86
6.2.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์.....	89
6.3 ปริมาณ NOx ในก๊าซเสีย.....	94
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย.....	96
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	96
7.1.1 การอุ่นเบ้าเย็น (ขั้นตอนที่ 1).....	96
7.1.2 การอุ่นเบ้าร้อน (ขั้นตอนที่ 2 – 4).....	96
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	97
รายการอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	100
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณค่าพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	129
ภาคผนวก ค การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย.....	139
ภาคผนวก ง ข้อมูลทางเทคนิคของวัสดุทนไฟที่ใช้ก่อผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	144
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	146

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานการศึกษาวิจัยการศึกษาวิจัยการใช้ออกซิเบิร์นเนอร์ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	4
3.1	ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิก๊าซเสีย.....	31
3.2	องค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย.....	35
3.3	คุณสมบัติของน้ำมันเตา.....	35
3.4	องค์ประกอบของธาตุในก๊าซธรรมชาติ.....	36
3.5	คุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ.....	36
4.1	ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ (ก่อนปรับปรุง).....	43
4.2	ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ (หลังปรับปรุง).....	44
5.1	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	59
5.2	สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอน ที่ 1.....	62
5.3	สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอน ที่ 2.....	62
5.4	สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอน ที่ 3.....	63
5.5	สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอน ที่ 4.....	63
5.6	สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอน ที่ 1.....	65
5.7	สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอน ที่ 2.....	66
5.8	สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอน ที่ 3.....	66
5.9	สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอน ที่ 4.....	67

ตารางที่	หน้า	
5.10	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 1 ชั้นตอนที่ 1.....	70
5.11	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 1 ชั้นตอนที่ 2.....	70
5.12	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 1 ชั้นตอนที่ 3.....	71
5.13	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 1 ชั้นตอนที่ 4.....	71
5.14	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 2 ชั้นตอนที่ 1.....	73
5.15	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 2 ชั้นตอนที่ 2.....	74
5.16	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 2 ชั้นตอนที่ 3.....	74
5.17	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 2 ชั้นตอนที่ 4.....	75
5.18	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 3 ชั้นตอนที่ 1.....	77
5.19	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 3 ชั้นตอนที่ 2.....	77
5.20	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 3 ชั้นตอนที่ 3.....	78
5.21	สมดุผลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 3 ชั้นตอนที่ 4.....	78
5.22	ปริมาณของ CO และ NOx ที่วัดได้จากก๊าซเสีย.....	82
6.1	ค่าเฉลี่ยสมดุผลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแอร์เบรินเนอร์....	88
6.2	ค่าเฉลี่ยสมดุผลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแอร์เบรินเนอร์ เมื่อพิจารณาแบบเบ้าเย็นกับเบ้าร้อน.....	89
6.3	การประหยัดพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์โหมด อัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการอุ่นด้วย	

ตารางที่	หน้า
	91
6.4	91
6.5	92
6.6	92
6.7	93
6.8	93
6.9	94

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กแบบ direct flame.....	5
2.2	การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ.....	6
2.3	การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยไฟฟ้า.....	7
2.4	ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้า 30 kW.....	7
2.5	ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิในชั้นอิฐทนไฟ.....	8
2.6	การจำลองรูปแบบของอุณหภูมิของเนื้ออิฐในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	8
2.7	การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อวัดอุณหภูมิในชั้นอิฐทนไฟและชั้นผิวเหล็ก.....	9
2.8	ลักษณะของหัวเผาออกซิเบิร์นเนอร์.....	9
2.9	อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนกับปริมาณออกซิเจนในหัวออกซิไดซ์.....	10
2.10	อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน (adiabatic flame temperature) สำหรับการใช้อากาศและออกซิเจนในการเผาไหม้.....	10
2.11	อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนและสัดส่วนออกซิเจนกับก๊าซมีเทน.....	11
2.12	อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนกับอุณหภูมิที่อุ่นตัวออกซิไดซ์.....	12
2.13	ความร้อนใช้ประโยชน์กับปริมาณออกซิเจนในหัวออกซิไดซ์สำหรับก๊าซเสียที่อุณหภูมิต่างๆ.....	13

ภาพที่	หน้า
2.14 ความร้อนใช้ประโยชน์ของการเผาไหม้แบบ Air/CH ₄ กับ O ₂ /CH ₄ ที่อุณหภูมิ ก๊าซเสียต่าง ๆ.....	13
2.15 ปริมาณก๊าซเสียกับปริมาณออกซิเจนในตัวอย่างก๊าซ.....	14
3.1 เบ้ารับน้ำเหล็ก (ladle) ขนาด 18 ตัน.....	16
3.2 ลักษณะของหัวเผาออกซิเบิร์นเนอร์.....	18
3.3 สมดุลมวลในปริมาตรควบคุมของเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	22
3.4 สมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมของเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	25
3.5 ค่า effective emissivity ของช่องเปิด.....	31
4.1 เบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 18 ตัน.....	46
4.2 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล.....	47
4.3 ตำแหน่งเทอร์มอคัปเปิลทั้ง 5 ตัว ในอิฐทนไฟทั้ง 4 ตำแหน่ง.....	48
4.4 ลักษณะการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลชั้น working lining.....	49
4.5 ลักษณะการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล ชั้น safety lining.....	49
4.6 ลักษณะการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล ชั้น bottom layer 1, layer 2.....	50
4.7 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (infrared thermometer).....	51
4.9 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) YOKOGAWA รุ่น MW100.....	51
4.10 เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซเสีย (flue gas analyzer).....	52
5.1 อุณหภูมิตำแหน่ง Lower ของการอุ่นด้วยหัวเผาแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1.....	56
5.2 อุณหภูมิตำแหน่ง Lower ของการอุ่นด้วยหัวเผาแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2.....	57
5.3 อุณหภูมิตำแหน่ง Lower ของการอุ่นด้วยหัวเผาออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1.....	58

ภาพที่	หน้า
5.4	58
5.5	59
5.6	64
5.7	64
5.8	65
5.9	67
5.10	68
5.11	68
5.12	72
5.13	72
5.14	73
5.15	75
5.16	76
5.17	76
5.18	79
5.19	79

ภาพที่		หน้า
5.20	แข่งกี้อิโตะแกรมสมดุพลังงานการอู่บ้ำรับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ ครั้งที่ 3 ชั้นตอนที่ 1.....	80
5.21	เปรียบเทียบเวลาในการอู่บ้ำรับน้ำเหล็กระหว่างการอู่ด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ กับออกซิเบิร์นเนอร์.....	81

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
a_{ih}	อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อของเชื้อเพลิง	$\text{kmol}_{\text{O}_2} / \text{kmol}_{\text{fuel}}$
A_{cond}	พื้นที่ผิวของการนำความร้อน	m^2
A_{conv}	พื้นที่ของการพาความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก	m^2
A_S	พื้นที่ของการแผ่รังสีความร้อน	m^2
$A_{surface}$	พื้นที่ผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก	m^2
AF_{actual}	อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ	$\text{kg}_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$
AF_{stoic}	อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี	$\text{kg}_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$
\bar{C}_{p,CO_2}	ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
\bar{C}_{p,H_2O}	ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
\bar{C}_{p,O_2}	ค่าความร้อนจำเพาะของออกซิเจน	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
\bar{C}_{p,N_2}	ค่าความร้อนจำเพาะของไนโตรเจน	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
$C_{p,brick}$	ค่าความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
$C_{p,steel}$	ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
h_m	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย	$\text{W/m}^2\cdot\text{k}$
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	$\text{W/m}\cdot\text{k}$
m_{fuel}	มวลของเชื้อเพลิง	kg
$m_{air,comb}$	มวลของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้	kg
m_{flue}	มวลของก๊าซเสียที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก	kg
$m_{CO_2,flue}$	มวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเสีย	kg
$m_{H_2O,flue}$	มวลของไอน้ำในก๊าซเสีย	kg
$m_{O_2,flue}$	มวลของก๊าซออกซิเจนในก๊าซเสีย	kg
$m_{N_2,flue}$	มวลของก๊าซไนโตรเจนในก๊าซเสีย	kg
m_{ladle}	มวลของเบ้ารับน้ำเหล็ก	kg
m_{steel}	มวลของชิ้นเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็ก	kg

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
\overline{NU}	Nusselt Number เฉลี่ย	-
Q_{cond}	การถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน	W
Q_{conv}	การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน	W
Q_{rad}	การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อน	W
$Q_{surface,cover}$	การถ่ายเทความร้อนที่ผิวของฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	W
Q_{fuel}	ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง	W
$Q_{fuel,sen}$	ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	W
Q_{flue}	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	W
$Q_{storage,ladle}$	พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก	W
$Q_{storage,steel}$	ความร้อนสะสมในชั้นเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็ก	W
$Q_{storage,cover}$	ความร้อนสะสมในฝาของเบ้ารับน้ำเหล็ก	W
$Q_{surface,steel}$	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก	W
Q_{open}	ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	W
Ra_L	Rayleigh number	-
r_i	รัศมีภายในของเบ้ารับน้ำเหล็ก	m
r_o	รัศมีภายนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก	m
T_s	อุณหภูมิผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก	K
T_{amb}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	K
$T_{surface}$	อุณหภูมิที่ผิวเบ้ารับน้ำเหล็กด้านนอก	K
$T(r)$	อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟในเบ้ารับน้ำเหล็ก	K
t	เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กต่อรอบ	s
dT / dx	ค่าเกรเดียนต์อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก	K/m
V_{fuel}	ปริมาตรของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้	l
x_i	ความหนาเริ่มต้นของกันเบ้ารับน้ำเหล็ก	m
x_o	ความหนาสุดท้ายของเบ้ารับน้ำเหล็ก	m
β	coefficient of volume expansion	K ⁻¹

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
ε_s	emissivity	-
σ	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
ν	kinematics viscosity	m^2/s
ρ_{fuel}	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	kg/m^3
λ	ปริมาณอากาศส่วนเกินในทางปฏิบัติ	-
η_{ladle}	ประสิทธิภาพการอุ่นน้ำรับน้ำเหล็ก	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันแต่ละประเทศมีการแข่งขันด้านเศรษฐกิจกันอย่างมากเพื่อให้ประเทศตนสามารถทัดเทียมกับประเทศอื่น ๆ ได้ ดังนั้นแต่ละประเทศจึงได้พยายามส่งเสริมและพัฒนาด้านอุตสาหกรรมของตนเพื่อผลักดันเศรษฐกิจให้รุ่งเรือง ทำให้มีการสร้างโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ขึ้นอย่างมากมายและรวดเร็ว ซึ่งในแต่ละโรงงานอุตสาหกรรมก็ต้องนำทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ในกระบวนการผลิตและหนึ่งในทรัพยากรที่สำคัญก็คือ ทรัพยากรด้านพลังงาน

แต่เนื่องจากพลังงานเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดซึ่งนับวันจะมีปริมาณเหลือน้อยลงเรื่อย ๆ ทำให้ทั้งราคาพลังงานสูงขึ้น ทำให้ต้นทุนพลังงานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีสัดส่วนที่สูงขึ้นตามไปด้วย การอนุรักษ์พลังงานจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ทั้งในแง่สิ่งแวดล้อมและการลดต้นทุนการผลิต โดยเฉพาะผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เรื่องที่พูดถึงกันมากที่สุดขณะนี้ก็คือ ภาวะโลกร้อน ซึ่งทวีความรุนแรงและปรากฏชัดขึ้นทุกขณะ หลายประเทศทั่วโลกจึงเล็งเห็นความสำคัญของการประหยัดพลังงานเพื่อลดภาวะโลกร้อน จึงได้มีการร่วมมือและข้อตกลงขององค์กรระหว่างประเทศในการจัดการเรื่องนี้

อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตสูงมาก ซึ่งในแต่ละกระบวนการจะมีพลังงานสูญเสีย (loss) เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุปกรณ์และเครื่องจักรกลให้ดีขึ้นจะช่วยลดพลังงานสูญเสียได้ด้วยวิธีการหรือเทคโนโลยีใหม่ ๆ เรื่องนี้จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น ในการวิจัยนี้เราจะให้ความสำคัญที่อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กโดยจะเจาะจงไปที่กระบวนการการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (ladle preheating) เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีการใช้พลังงานในการเผาเบ้ารับน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิตามที่ต้องการ โรงงานเหล็กส่วนมากใช้หัวเผา (burner) ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยพ่นเปลวไฟจากหัวเผาเข้าไปตรงกลางเบ้ารับน้ำเหล็ก (ladle) แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ เมื่อปะทะกับกันเบ้ารับน้ำเหล็ก เปลวไฟจะแผ่ออกและไหลย้อนไปตามผนังออกมาที่ปากของเบ้ารับน้ำเหล็กและถูกพ่นทิ้งออกไปจากขอบเบ้ารับน้ำเหล็ก ลักษณะเช่นนี้ ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟและแก๊สสันดาปในสัดส่วนที่ไม่สูงมากนัก และมีการสูญเสียพลังงานในรูปของก๊าซเสีย (flue gas) สูงมาก

โดยทั่วไปการเผาไหม้ในเบ้ารับน้ำเหล็กมีประสิทธิภาพต่ำกว่าร้อยละ 50 การสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่อยู่ในรูปของก๊าซเสีย แต่มีอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่สามารถนำความร้อน

จำนวนนี้กลับมาใช้ได้ อุปกรณ์นี้มีชื่อว่า regenerative burner แต่อุปกรณ์นี้มีองค์ประกอบที่ซับซ้อนและยังใช้เงินลงทุนสูงเกินไปที่จะนำมาใช้กับเบิร์บน้ำเหล็กขนาดกลางและขนาดเล็กซึ่งมีใช้เป็นส่วนใหญ่ภายในประเทศ

กระบวนการให้ความร้อนที่ใช้เชื้อเพลิงเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับออกซิเจน โดยปกติแล้วออกซิเจนได้จากอากาศซึ่งสามารถหาได้ทั่วไป แต่ อากาศประกอบด้วยออกซิเจนประมาณร้อยละ 21 ส่วนที่เหลือเป็นไนโตรเจนและก๊าซอื่นๆ อีกร้อยละ 79 จะเห็นว่าการเผาไหม้ที่ใช้อากาศนั้นจะมีไนโตรเจนผสมเข้าไปด้วยถึงร้อยละ 79 ไนโตรเจนจำนวนนี้เมื่อผ่านเข้าไปในห้องเผาไหม้จะรับความร้อนแล้วนำทิ้งออกไปพร้อมกับก๊าซเสียอื่น นั่นหมายความว่าถ้าหากใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศการสูญเสียความร้อนจากการปล่อยก๊าซเสียก็จะลดลง ดังนั้นจึงนำมาสู่การศึกษาในหัวข้อนี้ นั่นก็คือ การใช้หัวเผาแบบใช้ออกซิเจน (oxy burner) หมายถึงหัวเผาที่ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ช่วยในการเผาไหม้เชื้อเพลิง นอกจากการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการอุ่นเบิร์บน้ำเหล็กจะทำให้ลดการสูญเสียความร้อนไปกับไนโตรเจนในรูปของก๊าซเสียได้ค่อนข้างมากแล้ว การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ยังช่วยลดการเกิด CO₂ และ NO_x ซึ่งจะรวมอยู่ในก๊าซเสียเมื่อปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [1]

การใช้ออกซิเจนที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ลดการสูญเสียความร้อนลงหรือประหยัดพลังงานมากขึ้น การเผาไหม้ของมีเทนที่ความเข้มข้นของออกซิเจนเข้าใกล้ 100% การเกิด NO จะเป็นศูนย์ [2] แต่การใช้ออกซิเจนที่ความเข้มข้นสูงก็ต้องมีค่าใช้จ่ายในการผลิตด้วยยิ่งใช้ออกซิเจนความเข้มข้นสูงมากเท่าไรราคาก็จะสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ในระดับที่เหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพและต้นทุน แต่ถ้าหากไม่ใช้ออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูง (90%) จะทำให้เกิด NO_x ในสัดส่วนที่สูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานและสภาวะทางความร้อนในการอุ่นเบิร์บน้ำเหล็ก ตามแบบเดิมที่ใช้งานทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง
2. ปรับปรุงการอุ่นเบิร์บน้ำเหล็กด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์โดยให้ผลได้เช่นเดียวกับการอุ่นด้วยวิธีปกติ โดยการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี สร้าง และทดลองใช้งานจริง
3. ประเมินผลการประหยัดพลังงานและการเกิด NO_x

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับวิธีการและประสิทธิภาพในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในปัจจุบันทั้งการค้นคว้าเชิงเอกสารและข้อมูลการใช้งานจริงในโรงงาน
2. ตรวจสอบและบันทึกสภาพการทำงานเพื่อหาประสิทธิภาพการใช้พลังงานและสถานะทางความร้อนในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในปัจจุบันและหลังปรับปรุง
3. สร้าง ทดลองใช้งานและบันทึกข้อมูลการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์เพื่อหาประสิทธิภาพและสถานะทางความร้อน ตลอดจนแนวทางในการควบคุมการทำงานที่เหมาะสมที่สุด

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับออกซิเบิร์นเนอร์
2. เตรียมความพร้อมด้านอุปกรณ์และเครื่องมือ
3. ติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิในผนังของเบ้ารับน้ำเหล็กที่จะใช้ในการทดลองและเก็บข้อมูล
4. ตรวจสอบและบันทึกข้อมูลการทำงานพร้อมวิเคราะห์สมรรถนะของอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันในโรงงานที่ร่วมโครงการ
5. ออกแบบการก่อก้อนหินไฟ ของอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ตามแนวคิดใหม่
6. สร้างอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก
7. ทดลองใช้งานอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่สร้างขึ้น พร้อมทั้งตรวจสอบและบันทึกข้อมูลการทำงานและสถานะทางความร้อนของอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก
8. วิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัดบันทึกและสรุปผลการศึกษาวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ต้นแบบของอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง ข้อมูลการใช้พลังงานและการประหยัดพลังงานของการใช้ออกซิเบิร์นเนอร์

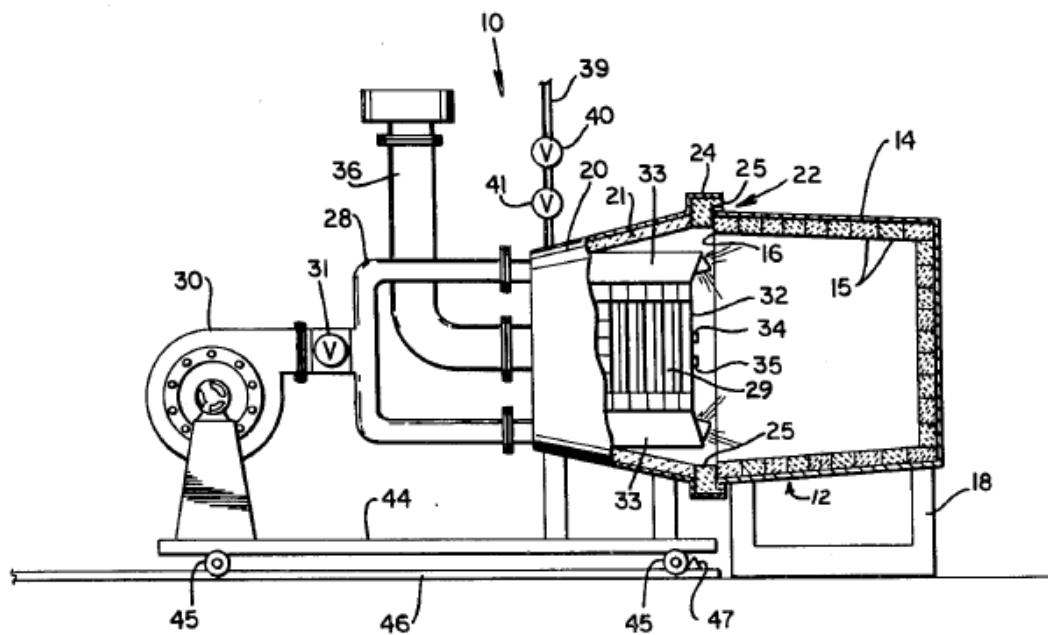
พร้อมทั้งข้อมูลแสดงสภาวะทางความร้อนในการทำงานจริง สำหรับใช้ในการสาริตและอ้างอิง
เพื่อส่งเสริมให้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเหล็กต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

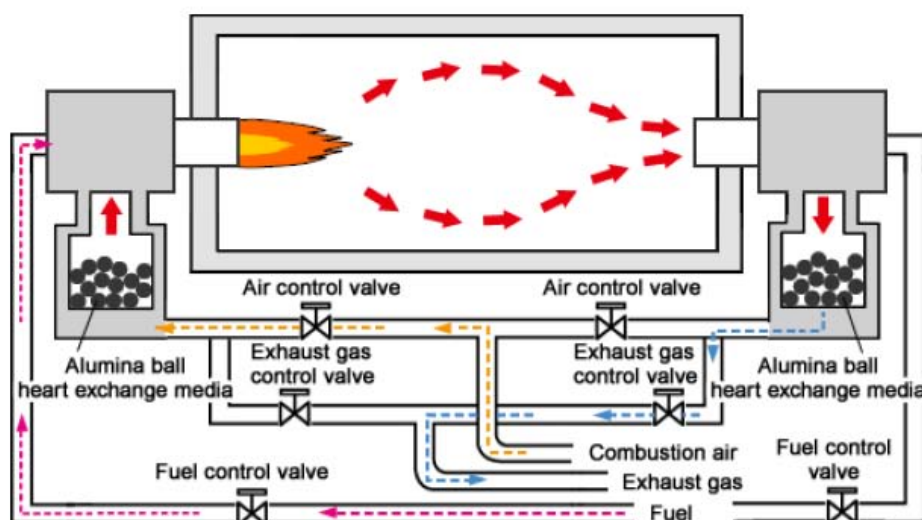
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Donald D. Battles [3] ได้ออกแบบอุปกรณ์การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (ladle) แบบ direct flame เป็นการให้ความร้อนกับเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการถ่ายเทความร้อนโดยตรงจากแหล่งความร้อน ซึ่งก็คือ ความร้อน จากก๊าซที่พุ่งออกมาจากหัวเผาและการนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียกลับมาใช้ผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) และการควบคุมการเผาไหม้เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดและเพื่ออัตราการให้ความร้อนสูงสุดโดยที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงมากเกินไป ห้องแลกเปลี่ยนความร้อนจะรับความร้อนโดยตรงจากก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก แล้วถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศขาเข้า (air inlet) ก่อนที่ก๊าซเสียจะออกไปตามท่อก๊าซทิ้ง



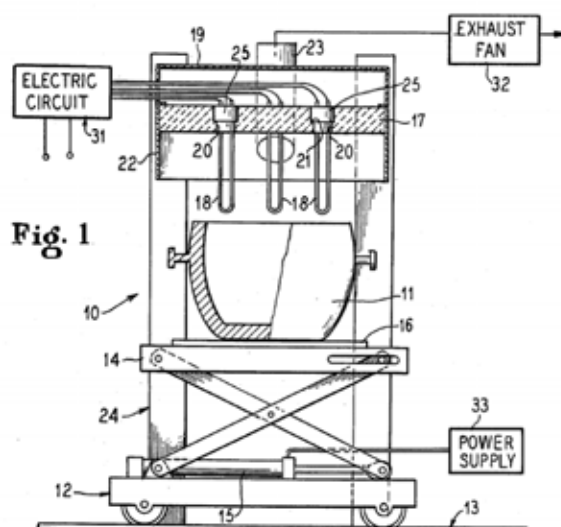
ภาพที่ 2.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กแบบ direct flame [3]

โดยทั่วไปการเผาไหม้ในเบ้ารับน้ำเหล็กมีประสิทธิภาพต่ำกว่าร้อยละ 50 การสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่อยู่ในรูปของก๊าซเสีย มีอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่สามารถนำความร้อนจำนวนนี้กลับมาใช้ได้ อุปกรณ์นี้มีชื่อว่า regenerative burner โดย จักรวราช จรุงยุทธกุล และ พงษ์ธร จริญญากรณ์ [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ ผลประหยัดพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟเทียบกับหัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงอยู่ที่ 45.20% และเมื่อเทียบรีเจนเนอเรทีฟกับกับหัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง ผลประหยัดอยู่ที่ 23.91% แต่อุปกรณ์การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนและใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก นอกจากนี้ยังใช้เงินลงทุนค่อนข้างสูง



ภาพที่ 2.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ [4]

Klas B.O. Magnusson [5] ได้ออกแบบอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยพลังงานไฟฟ้าเพื่อแก้ปัญหาก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจำนวนมากจากการเผาไหม้ เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยขดลวดไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ ไม่มีก๊าซเสียเกิดขึ้น ไม่มีมลภาวะด้านอากาศ การให้ความร้อนที่สม่ำเสมอ และลดมลภาวะทางเสียงได้อีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่เหมาะกับ เบ้ารับน้ำเหล็กที่มีขนาดใหญ่ เพราะเมื่อขนาดของเบ้าใหญ่ก็จะทำให้ขนาดของขดลวดและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่างๆ มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย การใช้งานก็ต้องมีความระมัดระวังเรื่องความปลอดภัยอย่างมาก และขดลวดเองก็มีความเปราะและหักได้ง่ายเมื่อมีการเคลื่อนตัวบ่อยๆ



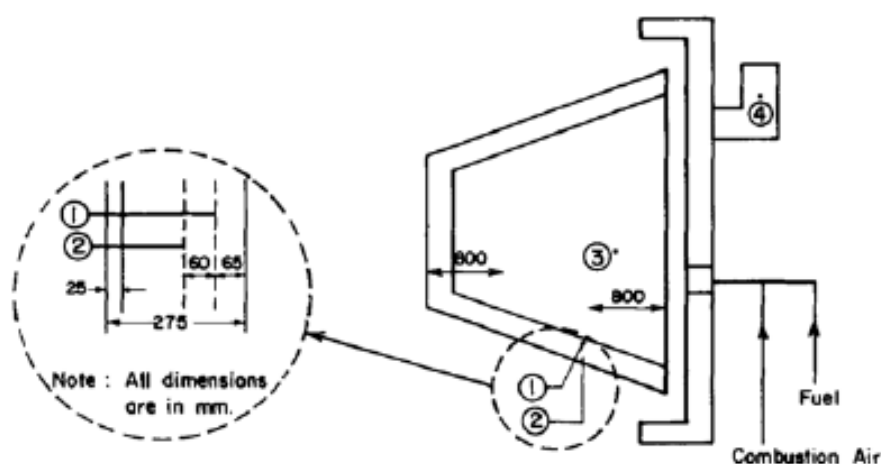
ภาพที่ 2.3 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยไฟฟ้า [5]

มโน จันทรกระจ่าง และพงษ์ธร จริญญากรณ์ [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการอนุรักษ์พลังงานในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กขนาดเล็กโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า แทนการอุ่นด้วยหัวเผาซึ่งใช้น้ำมันดีเซลหรือแก๊สแอลพีจี เบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการศึกษามีขนาดความจุ 1 ตันน้ำเหล็ก ผลการทดลองปรากฏว่า ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอุ่นด้วยหัวเผาน้ำมันดีเซล และการอุ่นด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า เท่ากับ 15% และ 34% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเสียค่าใช้จ่ายประมาณครึ่งหนึ่งของค่าใช้จ่ายในการอุ่นด้วยหัวเผาน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้ สภาพแวดล้อมที่สะอาดและอุณหภูมิต่ำกว่าในกรณีที่อุ่นด้วยหัวเผาน้ำมันอีกด้วย



ภาพที่ 2.4 ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาดกำลังไฟฟ้า 30 kW [6]

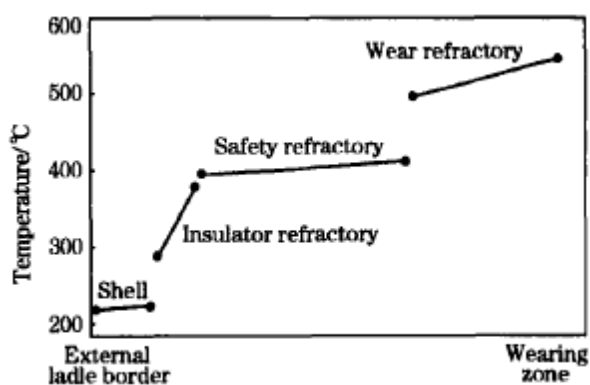
Mohanty และ Satayayut [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเบ้ารับน้ำเหล็กโดยใช้ 1D transient heat conduction equation เพื่อหาค่าอุณหภูมิ การสูญเสียความร้อนจากก๊าซเสียและสมมูลพลังงาน ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ผนังด้านข้าง เบ้ารับน้ำเหล็ก ก้น เบ้าและที่ฝาของชุดอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก



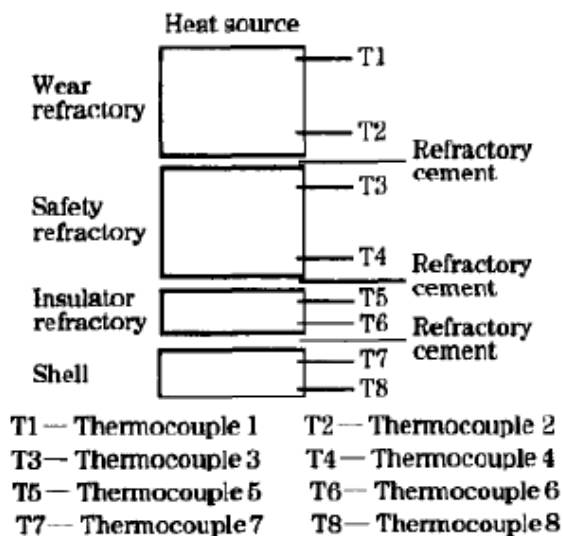
ภาพที่ 2.5 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิในอิฐทนไฟ [7]

ผลที่ได้จากการทดลองแบบจำลอง อุณหภูมิชั้นอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน มีความถูกต้องเพียงพอจะใช้ทำนายผลจากการทดลอง และผลจากการทำนายจะมีค่าเข้าใกล้ผลจากการทดลองมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป

Zimmer et al [8] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ ในชั้นอิฐทนไฟและในชั้นผิวเหล็กเพื่อนำค่าที่ได้มาประเมินลักษณะหรือรูปร่างของอุณหภูมิระหว่างผิวร้อนและเย็นของเบ้ารับน้ำเหล็กโดยไม่คิดผลที่เกิดจาก contact resistance

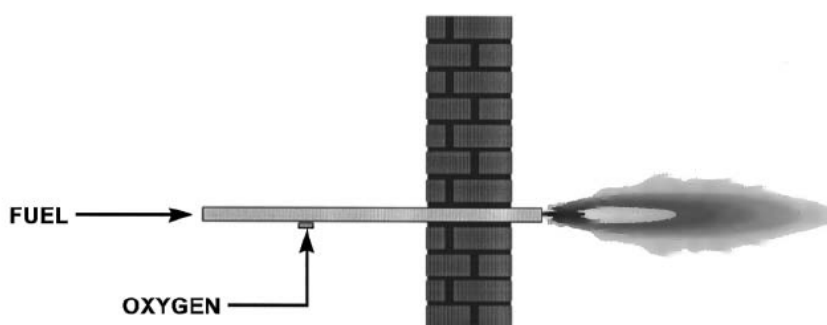


ภาพที่ 2.6 การจำลองรูปแบบของอุณหภูมิของเนื้ออิฐในเบ้ารับน้ำเหล็ก [8]



ภาพที่ 2.7 การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อวัดอุณหภูมิในชั้นอิฐทนไฟและชั้นผิวเหล็ก [8]

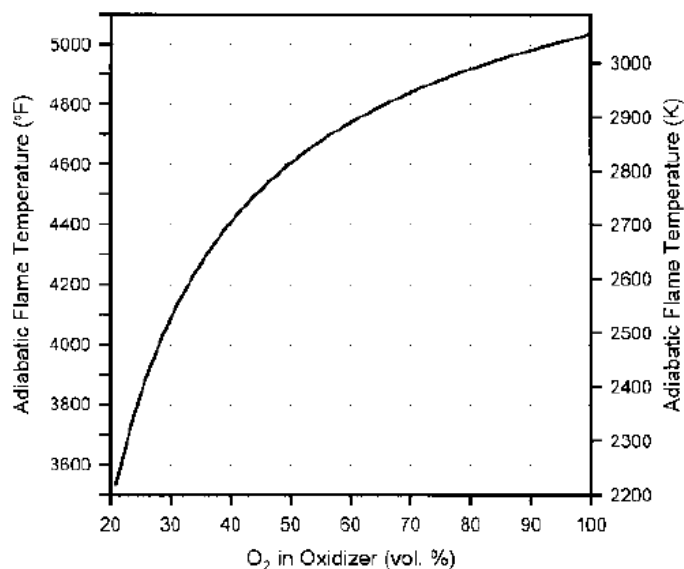
Charles E. Baukal, Jr. [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยภายในหัวเผา นั้นเชื้อเพลิงกับออกซิเจนจะถูกแยกจากกันโดยไม่มีการผสมกันจนกระทั่งออกจากหัวเผา เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ภายในหัวเผาด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัยนั่นเอง เพราะออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีปฏิกิริยาที่สูงมากและ มีความสามารถในการจุดระเบิดได้ถ้ามีการผสมกันกับแก๊ส



ภาพที่ 2.8 ลักษณะของหัวเผาแบบ oxy burner [9]

อุณหภูมิเปลวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้ออกซิเจนแทนอากาศ ดัง ภาพที่ 2.9 เป็นกราฟที่แสดงอุณหภูมิเปลวการเผาไหม้ของ CH_4 ที่สภาวะสมดุลทางความร้อน อุณหภูมิเปลวเปลี่ยนแปลงในช่วง 3600 ถึง 5000°F จะเห็นว่าอุณหภูมินั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ในช่วงที่ปริมาณออกซิเจนมากกว่า 20% ซึ่งก็คือปริมาณออกซิเจนในอากาศนั่นเอง จนกระทั่งถึงช่วงที่ปริมาณ O_2 ที่ 60% อุณหภูมิเปลวจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้าลง ภาพที่ 2.10 แสดงอุณหภูมิเปลวของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการเผาไหม้เปรียบเทียบ ตัวออกซิไดซ์ระหว่างการใช้อากาศกับออกซิเจน จะเห็นว่าอุณหภูมิเปลวของเชื้อเพลิงทุกชนิดที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าการใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ในการเผาไหม้



ภาพที่ 2.9 อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนกับปริมาณออกซิเจนในตัวออกซิไดซ์ [9]

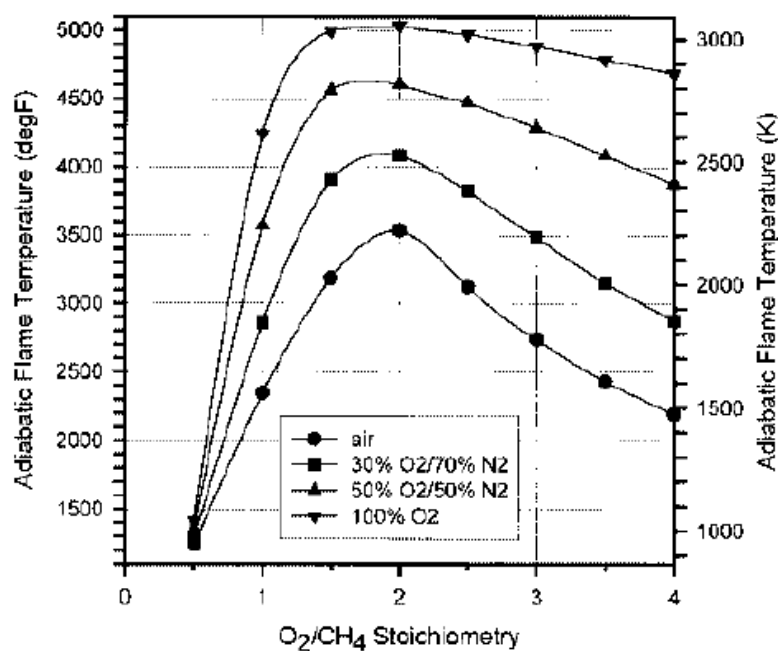
Adiabatic Flame Temperatures

Fuel	Air		O_2	
	°F	K	°F	K
H_2	3807	2370	5082	3079
CH_4	3542	2223	5036	3053
C_2H_2	4104	2535	5556	3342
C_2H_4	3790	2361	5256	3175
C_2H_6	3607	2259	5095	3086
C_3H_6	4725	2334	5203	3138
C_3H_8	3610	2261	5112	3095
C_4H_{10}	3583	2246	5121	3100
CO	3826	2381	4901	2978

ภาพที่ 2.10 อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน (adiabatic flame temperature) สำหรับการใช้อากาศและออกซิเจนในการเผาไหม้ [9]

ภาพที่ 2.11 เป็นกราฟแสดงอุณหภูมิเปลวที่สภาวะไม่มีการสูญเสียความร้อนของ CH_4 โดยมีกราฟ 4 กราฟที่แตกต่างกันตามค่าปริมาณการใช้ O_2 เป็นตัวออกซิไดซ์ ตั้งแต่อากาศ ($\text{O}_2 = 21\%$) จนถึงออกซิเจนบริสุทธิ์ ($\text{O}_2 = 100\%$) กราฟของออกซิเจน 100% จะมีอุณหภูมิเปลวที่สูงที่สุด ส่วนกราฟของอากาศนั้นมีอุณหภูมิเปลวที่ต่ำที่สุด

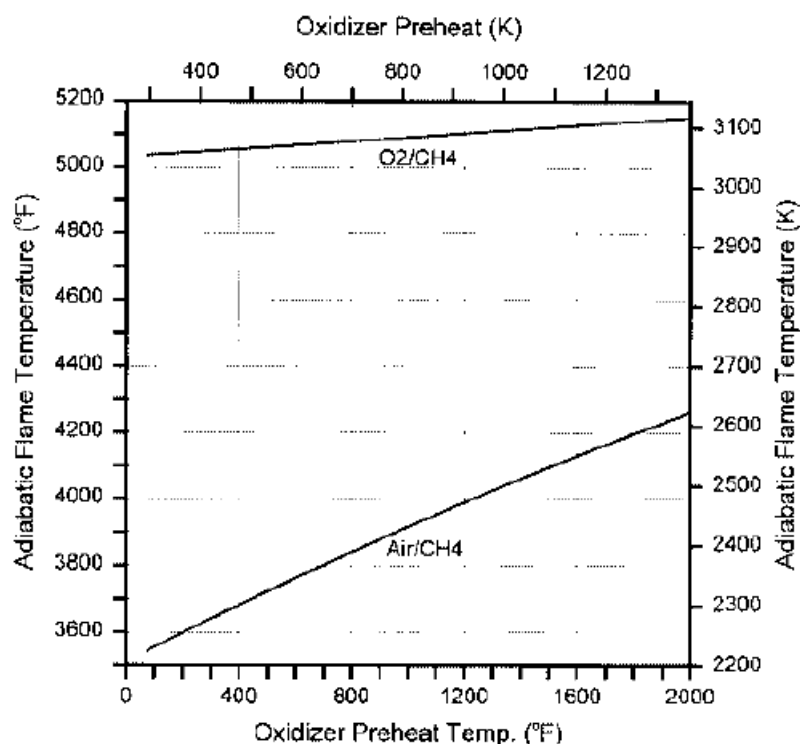
ภาพที่ 2.12 แสดงอุณหภูมิเปลวในกระบวนการ adiabatic ที่แปรตามอุณหภูมิของตัวออกซิไดซ์ที่ถูกอุ่น สำหรับ O_2/CH_4 จะมีผลต่ออุณหภูมิเปลวน้อยมากเพราะความร้อนที่เพิ่มขึ้นของออกซิเจนถือเป็นส่วนน้อยของพลังงานเคมีที่อยู่ในเชื้อเพลิง ส่วนเปลวของ air/CH_4 นั้น การอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น มีผลกระทบอย่างมากเพราะการเพิ่มความร้อนมีนัยสำคัญอย่างมากกับเปลว เนื่องจากอากาศมีมวลมากกว่าเมื่อเทียบกับออกซิเจน จึงส่งผลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้มากกว่า นั่นก็คือ การอุ่นตัวออกซิไดซ์ที่เป็นอากาศจะได้ประโยชน์มากกว่าตัวออกซิไดซ์ที่เป็นออกซิเจน



ภาพที่ 2.11 อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนที่แปรตามสัดส่วนออกซิเจนกับก๊าซมีเทน [9]

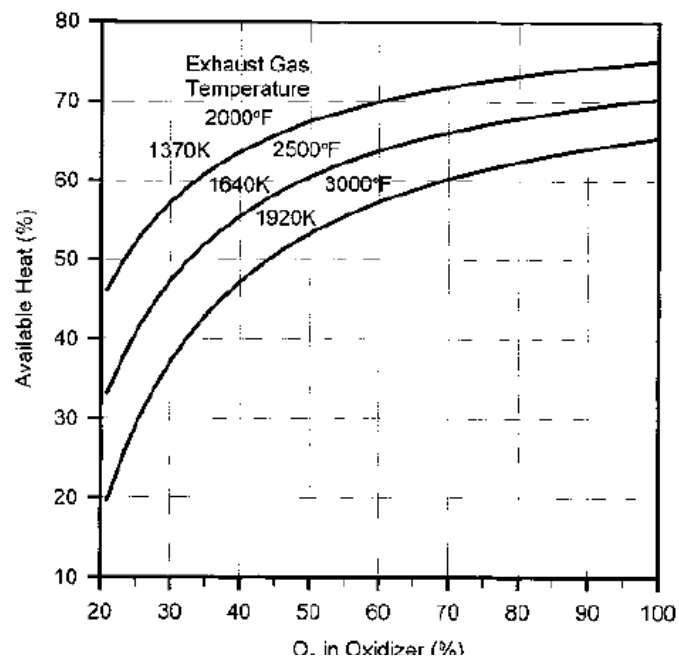
available heat คือ ค่าความร้อนรวมของเชื้อเพลิงลบด้วยพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกจากกระบวนการเผาไหม้โดยสูญเสียออกไปกับก๊าซเสีย โดยไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศซึ่งไม่ได้ใช้ในกระบวนการเผาไหม้จะเป็นตัวพาพลังงานความร้อนออกไปพร้อมกับก๊าซเสีย ภาพที่ 2.13 เป็นกราฟแสดง available heat ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของออกซิเจน

ในตัวออกซิไดซ์ ความเข้มข้นของออกซิเจน เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ available heat เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ขณะที่อุณหภูมิก๊าซเสียเพิ่มขึ้น available heat จะลดลงเพราะว่าพลังงานความร้อนถูกพาออกไปมากขึ้นตรงทางออกของก๊าซเสีย จากกราฟจะเห็นว่า available heat เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นของออกซิเจนมากกว่า 21% ขึ้นไปซึ่งเป็นปริมาณของออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ หมายความว่า การเพิ่มปริมาณออกซิเจนในตัวออกซิไดซ์ให้มากกว่าแค่การใช้อากาศจะทำให้ available heat เพิ่มขึ้นอย่างมาก

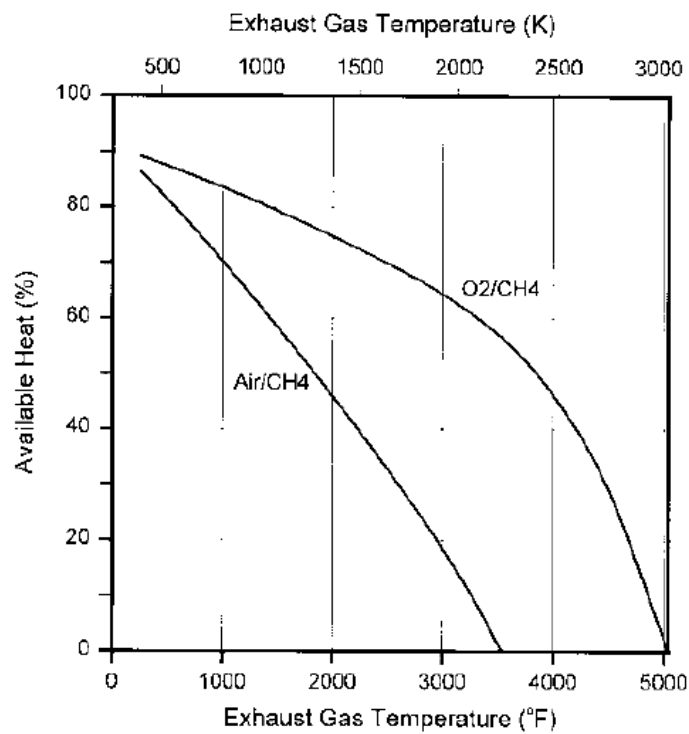


ภาพที่ 2.12 อุณหภูมิเปลวไฟในสภาวะที่ไม่มีความร้อนสูญเสียกับอุณหภูมิที่อุณหภูมิในตัวออกซิไดซ์ [9]

จากภาพที่ 2.14 แสดงค่า available heat สำหรับ Air/CH₄ กับ O₂/CH₄ ซึ่งแปรตามอุณหภูมิของก๊าซเสีย ก็คือ อุณหภูมิของก๊าซเสียเพิ่มขึ้น พลังงานจะถูกพาออกไปจากระบบการเผาไหม้มากขึ้น ทำให้ available heat มีค่าลดลง จะเห็นว่าการเผาไหม้แบบ Air/CH₄ ที่อุณหภูมิก๊าซเสียเป็น 3500°F จะทำให้ available heat จะลดลงถึงศูนย์ ส่วนการเผาไหม้แบบ O₂/CH₄ ที่อุณหภูมิก๊าซเสียเป็น 3500°F available heat ยังคงมีค่าสูงถึง 60% ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการที่ต้องใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงหรือกระบวนการหลอมที่มีอุณหภูมิสูงนั้น ไม่เหมาะที่จะใช้ระบบ Air/CH₄ ในการเผาไหม้



ภาพที่ 2.13 ความร้อนใช้ประโยชน์กับปริมาณออกซิเจนในตัวออกซิไดซ์สำหรับก๊าซเสียที่อุณหภูมิต่างๆ [9]

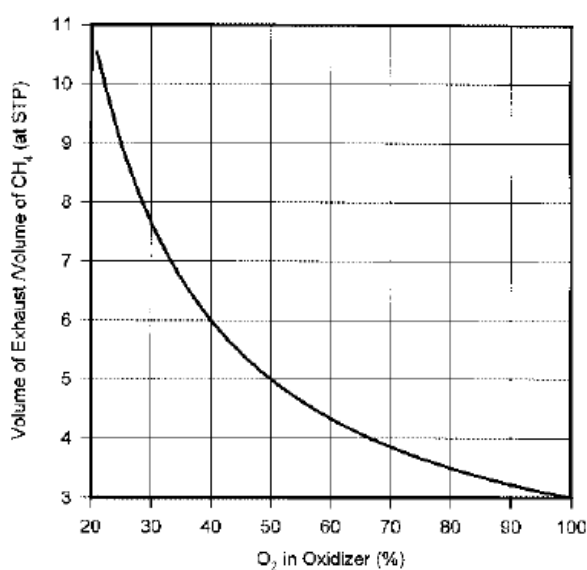


ภาพที่ 2.14 ความร้อนใช้ประโยชน์ของการเผาไหม้แบบ Air/CH₄ กับ O₂/CH₄ ของอุณหภูมิก๊าซเสีย [9]

โดยพื้นฐานแล้ววิธีการหรือเทคนิคการเพิ่มปริมาณออกซิเจนเพื่อช่วยในการเผาไหม้คือ การกำจัดไนโตรเจนออกจากตัวออกซิไดซ์ซึ่งจะทำให้ปริมาณก๊าซเสียลดลง ซึ่งเป็นข้อแตกต่างที่ชัดเจนประการหนึ่งของการเผาไหม้ด้วยอากาศกับการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน ภาพที่ 2.15 แสดงปริมาณของก๊าซเสียต่อปริมาณเชื้อเพลิง CH_4 สำหรับการใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ปริมาณต่างๆ การลดปริมาณก๊าซเสียให้ได้มากขึ้นนั้น ต้อง เพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ด้วยการเพิ่มปริมาณออกซิเจนซึ่งจะทำให้การทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ดีขึ้น นั่นคือจะทำให้การใช้เชื้อเพลิงลดลงดังนั้นการเกิดก๊าซเสียก็จะลดลงโดยให้ผลลัพธ์เท่าเดิม

ส่วนประโยชน์อื่นๆของการเพิ่มปริมาณออกซิเจนเพื่อช่วยในการเผาไหม้ (OEC) จะเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบในก๊าซเสีย ซึ่งมีความแตกต่างจากการใช้อากาศในการเผาไหม้อย่างมีนัยสำคัญ การเผาไหม้ด้วยออกซิเจนจะผลิตก๊าซ CO_2 แค่หนึ่งในสาม และ H_2O เพียงสองในสามเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ด้วยอากาศ ส่วนมลพิษอื่น เช่น NO_x และ SO_x ที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนก็สามารถกำจัดได้โดยง่ายเพราะมีความเข้มข้นสูงเมื่อเทียบกับก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยอากาศโดยการทำให้เจือจางลงด้วยก๊าซ N_2 สำหรับก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้แบบ oxy/fuel ถ้ากลั่นน้ำออกจากก๊าซเสียแล้ว ก๊าซที่เหลืออยู่ ส่วนใหญ่จะเป็น CO_2 เกือบทั้งหมด

จากภาพที่ 2.15 จะเห็นว่าปริมาณของก๊าซเสียต่อปริมาณเชื้อเพลิง CH_4 จะลดลงเมื่อปริมาณออกซิเจนในตัวออกซิไดซ์เพิ่มขึ้นและเมื่อใช้ออกซิเจนที่ 100% ปริมาณก๊าซเสียลดลงเกือบจะเป็นศูนย์หรือเกือบจะไม่มีก๊าซเสียเลยเมื่อเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้



ภาพที่ 2.15 ปริมาณก๊าซเสียกับปริมาณออกซิเจนในตัวออกซิไดซ์ [9]

บทที่ 3

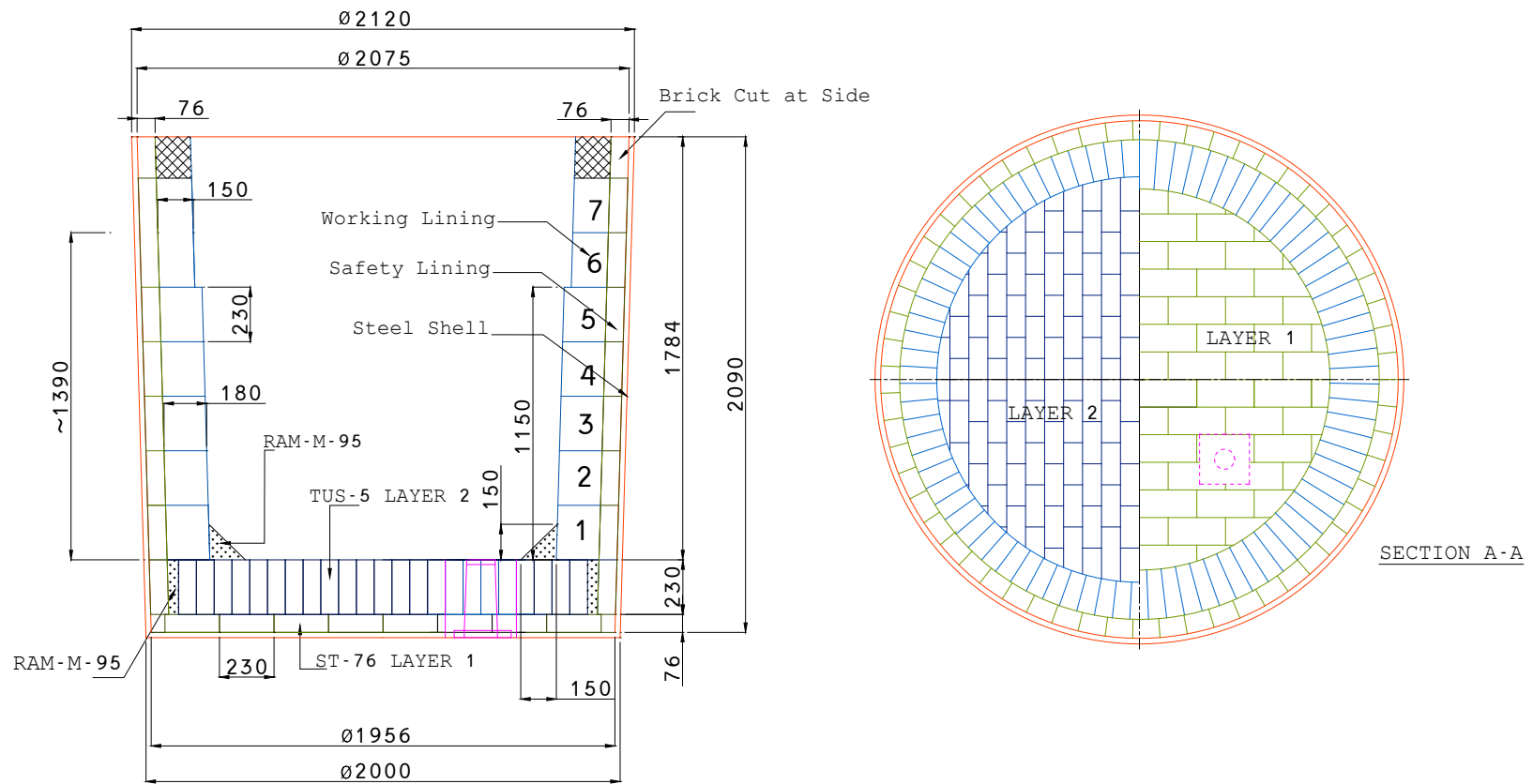
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ข้อมูลทั่วไปของเบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle)

ในกระบวนการผลิตเหล็ก ขั้นตอนหลังจากการหลอมเหล็กโดยเตาหลอมเพื่อนำน้ำเหล็กที่หลอมได้ไปสู่กระบวนการหล่อ ซึ่งการเคลื่อนย้ายน้ำเหล็กไปที่แท่นหล่อนั้นจะต้องอาศัยเบ้ารับน้ำเหล็กในการรับและส่งน้ำเหล็ก นั่นคือหน้าที่ของ เบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นเบ้าขนาด 18 ตันน้ำเหล็ก เบ้ารับน้ำเหล็กนี้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ปากรับน้ำเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอก 2.12 เมตร ก้นเบ้ารับน้ำเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอก 2.00 เมตร ความสูงตามแนวตั้งฉาก 2.09 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.1

การจัดเรียงตัวของอิฐทนไฟที่ผนังด้านในของเบ้าแบ่งเป็น 2 ชั้น ซึ่งทำด้วยอิฐทนไฟชนิด SK 38 ชั้นแรก อยู่ที่ผนังด้านในสุดเรียกว่า working lining มีความหนา 150 – 180 มิลลิเมตร ถัดออกมาที่ชั้นที่สอง เรียกว่า safety lining มีความหนา 76 มิลลิเมตร ด้านก้นเบ้าแบ่งออกเป็นสองชั้นเช่นเดียวกับด้านข้าง ชั้นบนเรียกว่า layer 2 มีความหนา 230 มิลลิเมตร ชั้นล่างเรียกว่า layer 1 มีความหนา 76 มิลลิเมตร

ก่อนที่จะนำเบ้าไปรับน้ำเหล็กนั้นมีขั้นตอนที่สำคัญอย่างมากนั่นก็คือ การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยต้องอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 แบบ คือ เบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ที่ยังไม่เคยผ่านการอุ่นหรือเบ้าที่ผ่านการอุ่นมาแล้ว แต่หยุดใช้งานจนกระทั่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงหรือเทียบเท่าเบ้าที่ยังไม่เคยอุ่นโดยจะเรียกว่าเบ้าเย็น และแบบที่สองเบ้ารับน้ำเหล็กร้อนหรือเบ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วโดยที่เบ้ายังมีความร้อนสูง



ภาพที่ 3.1 เมาร์บหน้าเหล็ก (ladle) ขนาด 18 ตัน

3.2 เหตุผลและประโยชน์ของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนนำไปใช้งานมีเหตุผลหลัก 4 ประการ

1. เพื่อลดผลจากการสูญเสียความร้อนจากน้ำเหล็กไปสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก
2. เพื่อลด thermal shock ในชั้นอิฐทนไฟ
3. เพื่อขจัดความชื้นที่สะสมในตัวเบ้ารับน้ำเหล็ก
4. เพื่อให้กระบวนการการผลิตมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

ประโยชน์ที่ได้จากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

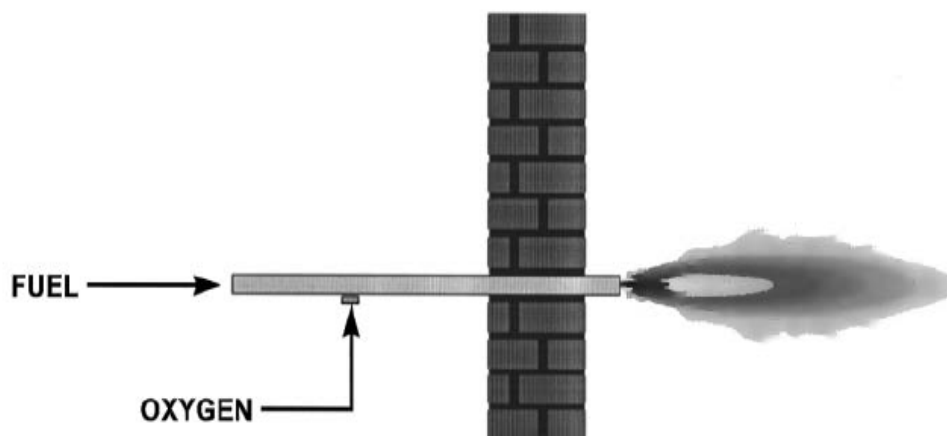
1. ลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (tapping temperature)
2. เพิ่มอายุการใช้งานของอิฐทนไฟ
3. ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็ก
4. เพิ่มผลิตผลและคุณภาพในการหล่อเนื่องจากน้ำเหล็กมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ

3.3 ออกซิเบิร์นเนอร์ (Oxy burner)

ออกซิเบิร์นเนอร์เป็นหัวเผาที่ใช้ออกซิเจนความเข้มข้นสูง (มากกว่า 90% โดยปริมาตร) เป็นตัวออกซิไดซ์ในปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิง เป็นการใช้ออกซิเจนแทนอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ โดยภายในหัวเผานั้น เชื้อเพลิงกับออกซิเจนจะถูกแยกจากกันโดยไม่มีการผสมกันจนกระทั่งจะออกจากหัวเผา เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ภายในหัวเผาด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัย เพราะออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีปฏิกิริยาที่ไวมากและมีความสามารถในการจุดระเบิดได้ถ้ามีการผสมกันกับก๊าซ ส่วนที่ปลายของหัวเผาจะมีตัวจุดประกายไฟเพื่อช่วยให้ติดไฟเมื่อเริ่มอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ภาพที่ 3.2 แสดงลักษณะทั่วไปของออกซิเบิร์นเนอร์

โดยพื้นฐานแล้ววิธีการหรือเทคนิคการเพิ่มปริมาณออกซิเจนเพื่อช่วยในการเผาไหม้คือ การกำจัดไนโตรเจนออกจากตัวออกซิไดซ์ซึ่งจะทำให้ปริมาณก๊าซเสียลดลง เช่น NOx แต่การใช้ออกซิเจนแทนอากาศนั้นจะทำให้เปลวมีอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้

สูงขึ้นและจะทำให้เกิด NOx มากขึ้นตามไปด้วยถ้ามีอากาศเข้าไปในเบ้ารับน้ำเหล็กเพราะในอากาศมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบด้วย



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของออกซิเบิร์นเนอร์ [9]

3.4 การถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก

ขณะที่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกตัวเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบ สามารถพิจารณาได้ดังนี้

3.4.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก สามารถพิจารณาการนำความร้อนในผนังของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เป็นการแจกแจงของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (temperature distribution) และนำการแจกแจงของอุณหภูมิมามาพิจารณาในส่วนของพลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (energy content) ซึ่งเป็นความร้อนที่สะสมในอิฐทนไฟ โดยสามารถนำไปใช้หาประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้ การพิจารณาการนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก สามารถใช้ Fourier's law พิจารณาการแจกแจงของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังสมการ

$$q_{cond} = -kA_{cond} \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

เมื่อ q_{cond} คือ การถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน (W)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) (W/m·K)

A_{cond} คือ พื้นที่ผิวของการนำความร้อน (m^2)

$\frac{dT}{dx}$ คือ ค่าเกรเดียนต์อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (K/m)

3.4.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

ในขณะที่อุณหภูมิลูกน้ำเหล็ก จะมีการพาความร้อนจากผนังของเบ้ารับน้ำเหล็ก และผนังของชุดฝาปิดไปยังสิ่งแวดล้อม โดยการพาความร้อนเป็นค่าความร้อนสูญเสียผ่านผนัง โดยจะกล่าวในส่วนของความร้อนสูญเสียในส่วนของสมดุลพลังงานต่อไป ดังนั้นสมการพาความร้อนสามารถพิจารณาโดยใช้สมการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) จากสมการของ Newton's law ดังนี้

$$q_{conv} = h_m A_{conv} (T_s - T_{amb}) \quad (3.2)$$

เมื่อ q_{conv} คือ การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (W)

h_m คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$)

A_{conv} คือ พื้นที่ของการพาความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กหรือชุดฝาเบ้า(K)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย (h_m)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยนั้น สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ average Nusselt number (\overline{NU}) ที่ได้จากการทดลอง (Cengel, 2006) ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ของค่า average Nusselt number ดังสมการ

$$h = \frac{k}{L_c} \overline{NU} \quad (3.3)$$

พิจารณาลักษณะของพื้นที่ผิวเพื่อนำไปใช้หา \overline{NU} โดยที่เบ้ารับน้ำเหล็กนั้นมีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอก ดังนั้นสมการที่นำมาใช้เพื่อหาค่า \overline{NU} นั้นสามารถใช้สมการที่ใช้กับ vertical plate ซึ่งสามารถใช้กับทุกช่วงของค่า Rayleigh number ตามสมการ

$$\overline{NU} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6} L}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{8/27} \right]} \right\}^2 \quad (3.4)$$

โดยมีเงื่อนไขกำหนดเพื่อให้สามารถนำสมการไปใช้กับรูปทรงกระบอกได้

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}} \quad (3.5)$$

เมื่อ Ra_L^n คือ ค่า Rayleigh number โดยค่า Ra_L^n มีความสัมพันธ์กับค่า Prandtl number (Pr) ดังสมการ

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_C^3}{\nu^2} Pr \quad (3.6)$$

ν คือ ค่า kinematics viscosity ของของไหล (m^2/s)

L_C คือ ค่าความยาวของทรงกระบอก (m)

β คือ ค่า coefficient of volume expansion (K^{-1})

C คือ ค่าคงที่ในรูปทรงเลขาคณิตของพื้นที่ผิวและระบบการไหลซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงของค่า Rayleigh number โดยปกติแล้วจะมีค่าน้อยกว่า 1

N คือ ค่าคงที่ในรูปทรงเลขาคณิตของพื้นที่ผิวและระบบการไหลซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงของค่า Rayleigh number โดยปกติแล้วจะมีค่า 1/4 เมื่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และมีค่าเท่ากับ 1/3 เมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)

Gr_L คือ ค่า Grashof number โดยสามารถตรวจสอบชนิดของการไหลได้จากค่า Gr ถ้า Gr มีค่าไม่เกิน 10^9 ถือว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)

Pr คือ Prandtl number หาค่าได้จากตารางคุณสมบัติ [12]

3.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

ความร้อนจากการแผ่รังสีเป็นค่าความร้อนสูญเสียผ่านผนังและชุดฝาปิด เช่นเดียวกันกับการพาความร้อนดั่งนั้น สามารถพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนตามสมการของ Stefan – Boltzmann law เป็นการพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวไปยังสิ่งแวดล้อม ดังนี้

$$q_{rad} = \epsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (3.7)$$

เมื่อ	Q_{rad}	คือ การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อน (W)
	A_s	คือ พื้นที่ของการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำ เหล็กหรือชุดฝาปิด (m^2)
	T_s	คืออุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กหรือชุดฝาเบ้า (K)
	T_{amb}	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)
	ϵ_s	คือ ค่า emissivity ผิวนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กหรือชุดฝาปิดมีค่าประมาณ 0.8
	σ	คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzman มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

3.5 สมดุลมวลและสมดุลพลังงานในเบ้ารับน้ำเหล็ก (Mass and Energy balance)

ในการศึกษานี้จะพิจารณาในส่วนของสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก สมดุลมวลของถ่ายน้ำเหล็กจะไม่มีเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม แต่เนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กมีความร้อนสะสมอยู่ในตัวเบ้ารับน้ำเหล็ก การพิจารณาสมดุลพลังงานจึงต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในปริมาตรควบคุมด้วย

3.5.1 สมดุลมวลในเบ้ารับน้ำเหล็ก

การทำสมดุลมวลในเบ้ารับน้ำเหล็กพิจารณาปริมาตรควบคุมดังรูป เราสามารถเขียนสมดุลมวลได้จากกฎการอนุรักษ์มวลดังนี้

มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ภายในปริมาตรควบคุม – มวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม

= การเปลี่ยนแปลงของมวลสุทธิภายในปริมาตรควบคุม

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = \Delta m_{CV} \quad (3.8)$$

เมื่อ $\sum m_{in}$ คือ มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ภายในปริมาตรควบคุม (kg)

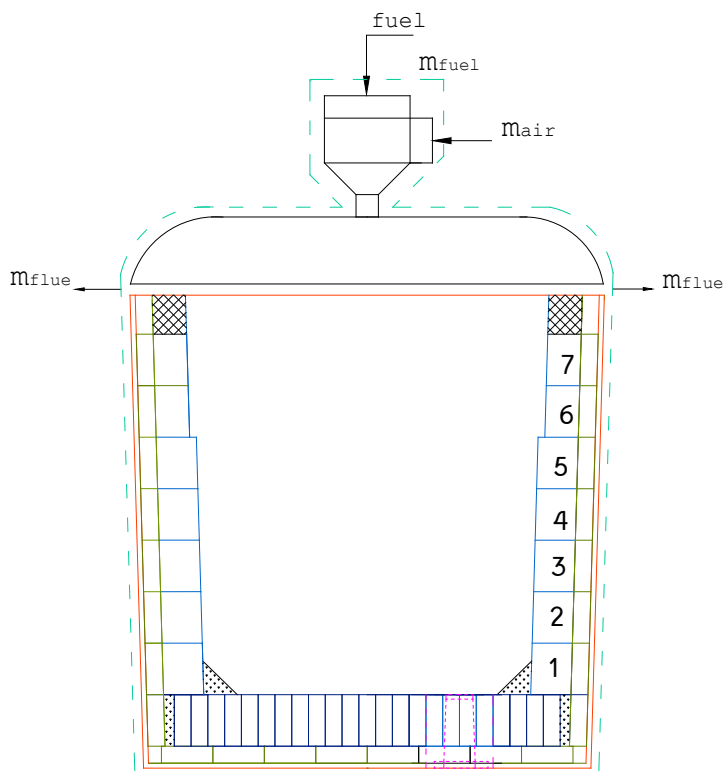
$\sum m_{out}$ คือ มวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม (kg)

Δm_{CV} คือ การเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม (kg)

สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาระบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลภายใน ดังนั้น $\Delta m_{CV} = 0$ จึงสามารถเขียนสมการสมดุลมวลได้ดังนี้

มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม = มวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} \quad (3.9)$$



ภาพที่ 3.3 สมดุลมวลในปริมาตรควบคุมของเบ้ารับน้ำหลัก

พิจารณาจากปริมาตรควบคุมของเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถหาสมมูลมวลของ ปริมาตรควบคุมได้จาก

1) มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม ($\sum m_{in}$) ประกอบด้วย

1.1 มวลของเชื้อเพลิง (m_{fuel})

มวลของเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณการใช้น้ำมัน เชื้อเพลิงทั้งหมดซึ่งคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$m_{fuel} = \rho_{fuel} V_{fuel} \quad (3.10)$$

เมื่อ ρ_{fuel} คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/l)

V_{fuel} คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ใช้ (l)

กรณีของน้ำมันเตา

มวลของเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการ (3.10) และ V_{fuel} หาได้จาก flow meter ที่ติดตั้งไว้สำหรับวัดปริมาตรของน้ำมันเตาที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.95 kg/l

กรณีของก๊าซธรรมชาติ

เราจะหาความหนาแน่นของก๊าซธรรมชาติจากค่าความถ่วงจำเพาะในตารางที่ 3.5 โดยความหนาแน่นของเชื้อเพลิงหรือก๊าซธรรมชาติมีความสัมพันธ์กับความถ่วงจำเพาะดังนี้

$$SG = \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{air@25^{\circ}C}} \quad (3.11)$$

เมื่อ SG คือ ความถ่วงจำเพาะ

ρ_{fuel} คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

$\rho_{air@0^{\circ}C}$ คือ ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 0 °C 1 atm (1.2867 kg/m³) [11]

จากตารางที่ 3.5 เราสามารถหาความหนาแน่นของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$\rho_{fuel} = SG \times \rho_{air@0^{\circ}C} = 0.72 \times 1.2867 = 0.9264 \text{ kg/m}^3 \quad (3.12)$$

1.2 มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($m_{air,comb}$)

กรณีอุ่นด้วยน้ำมันเตา

มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ หาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย จากนั้นนำปริมาณออกซิเจนที่ตรวจวัดได้มาคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (AF_{actual}) โดยรายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อการวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของการเผาไหม้ เมื่อทราบค่า AF_{actual} จะสามารถคำนวณหามวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังสมการ

$$m_{air,comb} = AF_{actual} \times m_{fuel} \quad (3.13)$$

เมื่อ AF_{actual} คือ อัตราส่วนที่แท้จริงของอากาศต่อเชื้อเพลิง ($\text{kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$) หาได้จากสมการ (3.49)

กรณีอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์

เนื่องจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์นั้น ความดันใน เบ้ารับน้ำเหล็กจะต่ำกว่าภายนอกเบ้าทำให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปข้างในได้ ดังนั้นการวัดปริมาณออกซิเจนจากก๊าซเสียบริเวณปากเบ้าจึงมีความแม่นยำน้อย จึงไม่สามารถใช้วิธีเดียวกับการอุ่นด้วยน้ำมันเตาได้

มวลโมเลกุลของออกซิเจนสามารถหาได้จาก

$$M_{w,oxy} = O_2 = 2 \times 15.999 = 31.998 \quad (3.14)$$

โดย $M_{w,oxy}$ ที่ได้เป็นมวลต่อมวลโมเลกุล kg/kmol

จากสมการ (3.12) ความหนาแน่นของออกซิเจนจึงเท่ากับ

$$\rho_{oxy} = \frac{M_{w,oxy}}{(V/n)} = \frac{31.998}{22.711} \text{kg}/\text{m}^3 = 1.409 \text{kg}/\text{m}^3 \quad (3.15)$$

ดังนั้นมวลของออกซิเจนสามารถหาได้จาก

$$m_{oxy} = \rho_{oxy} V_{oxy} \quad (3.16)$$

เมื่อ ρ_{oxy} คือ ความหนาแน่นของออกซิเจนที่อุณหภูมิ 0 °C ความดันบรรยากาศ 0.986 atm มีค่าเท่ากับ 1.409 kg/Nm^3

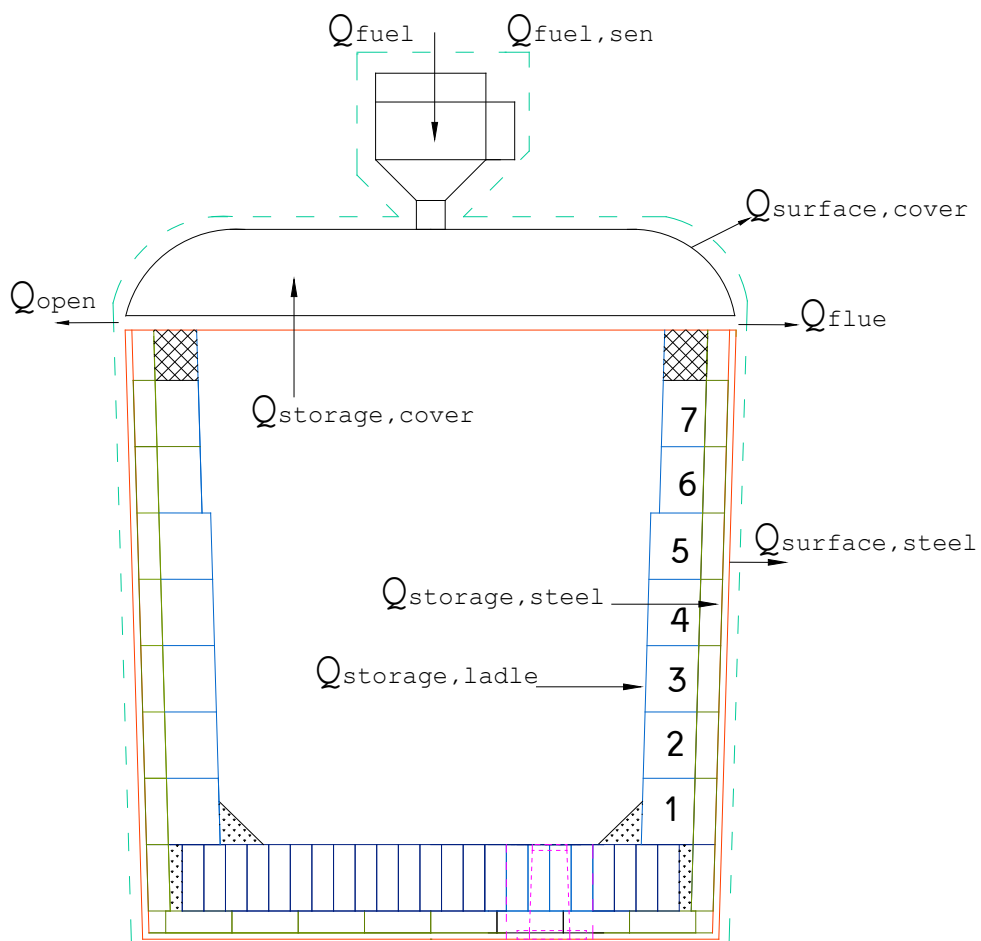
2) มวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม ($\sum m_{out}$) ประกอบด้วย

2.1 มวลของก๊าซเสียที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก (m_{flue})

เมื่อแทนค่ามวลที่เข้าและออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กในสมการ (3.9) แล้วจัดรูปสมการสมดุลมวลใหม่ได้ดังนี้

$$m_{flue} = m_{fuel} + m_{air,comb} \quad (3.17)$$

3.5.2 สมดุลพลังงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก



ภาพที่ 3.4 สมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมของเบ้ารับน้ำเหล็ก

เราสามารถหาสมดุลพลังงานของเบ้ารับน้ำเหล็กได้จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ในระบบเปิดดังนี้

$$Q - W_{CV} + \sum m_i \theta_i - \sum m_e \theta_e = \Delta E_{CV} \quad (3.18)$$

เมื่อ Q คือ การถ่ายเทความร้อนจากปริมาตรควบคุมไปยังสิ่งแวดล้อม

W_{CV} คือ งานทั้งหมดที่ได้ออกและให้กับปริมาตรควบคุม

$\sum m_i \theta_i$ คือ พลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม

$\sum m_e \theta_e$ คือ พลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุมไปยังสิ่งแวดล้อม

ΔE_{CV} คือ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในปริมาตรควบคุม

จากสมการ (3.18) เขียนเต็มรูปแบบได้ดังนี้

$$Q - W_{CV} + \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = \Delta E_{CV} \quad (3.19)$$

และจากสมการ (3.19) เนื่องจากไม่มีงานเกิดจากระบบในปริมาตรควบคุม

$W_{CV} = 0$ ความแตกต่างของพลังงานศักย์ (gz) และพลังงานจลน์ ($\frac{V^2}{2}$) ของระบบมีน้อยมากสามารถพิจารณาให้เป็นศูนย์ได้ ดังนั้นสมการ (3.19) จึงลดรูปเป็น

$$Q + \sum m_i h_i - \sum m_e h_e = \Delta E_{CV} \quad (3.20)$$

จากสมการที่ (3.20) สามารถจำแนกพารามิเตอร์ออกเป็น 4 กลุ่ม ได้ดังนี้

1) การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม (Q) สามารถจำแนกได้ดังนี้

1.1 การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม ($Q_{surface, steel}$)

1.2 การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม ($Q_{surface, cover}$)

2) พลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม ($\sum m_i h_i$) สามารถจำแนกได้ดังนี้

2.1 ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

2.2 ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง ($Q_{fuel, sen}$)

3) พลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุม ($\sum m_e h_e$) สามารถจำแนกได้ดังนี้

3.1 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย (Q_{flue})

3.2 ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด (Q_{open})

4) การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในปริมาตรควบคุม (ΔE_{CV}) สามารถจำแนกได้ดังนี้

4.1 พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ($Q_{storage, ladle}$)

4.2 ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก ($Q_{storage, steel}$)

4.3 ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก ($Q_{storage, cover}$)

5) พลังงานสูญเสียอื่นๆ (Q_{other})

จากการพิจารณาเบื้องต้น เราสามารถจำแนกรายละเอียดการคำนวณพลังงานที่เข้าและออกจากปริมาตรควบคุมได้ดังนี้

1) การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม (Q)

1.1 ความร้อนสูญเสียผ่านผิวของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ($Q_{surface, steel}$)

$$Q_{surface, steel} = [h_m A_{surface} (T_{surface} - T_{amb}) + \varepsilon_{surface} \sigma A_{surface} (T_{surface}^4 - T_{amb}^4)] \times t \quad (3.21)$$

เมื่อ $Q_{surface, steel}$ คือ ความร้อนสูญเสียผ่านผิวของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (J)

h_m คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$)

$A_{surface}$ คือ พื้นที่ผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)

$T_{surface}$ คือ อุณหภูมิผิวเบ้ารับน้ำเหล็กด้านนอก (K)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

$\varepsilon_{surface}$ คือ ค่า emissivity ของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าประมาณ 0.78

σ คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzman มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)

t คือ เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กต่อรอบ (s)

1.2 ความร้อนสูญเสียผ่านผิวของฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก ($Q_{\text{surface,cover}}$)

$$Q_{\text{surface,cover}} = [h_m A_{\text{cover}} (T_{\text{cover}} - T_{\text{amb}}) + \varepsilon_{\text{cover}} \sigma A_{\text{cover}} (T_{\text{cover}}^4 - T_{\text{amb}}^4)] \times t \quad (3.22)$$

เมื่อ $Q_{\text{surface,cover}}$ คือ ความร้อนสูญเสียผ่านฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก (J)

h_m คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

A_{cover} คือ พื้นที่ผิวด้านนอกของฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)

T_{cover} คือ อุณหภูมิที่ผิวฝาเบ้ารับน้ำเหล็กด้านนอก (K)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

$\varepsilon_{\text{cover}}$ คือ ค่า emissivity ของฝาเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าประมาณ 0.78

t คือ เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กต่อรอบ (s)

2) พลังงานความร้อนที่เข้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก ($\sum m_i e_i$)

2.1 ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

$$Q_{\text{fuel}} = V_{\text{fuel}} \times LHV \quad (3.23)$$

เมื่อ V_{fuel} คือ ปริมาตรการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงต่อรอบการอุ่น (l)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/l)

2.2 ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง ($Q_{\text{fuel,sen}}$)

ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยฮีทเตอร์ (heater) ก่อนจะจ่ายเข้าสู่หัวเผา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความหนืด

ของน้ำมันเชื้อเพลิงและยังทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นละอองฝอยได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับอากาศได้ดีขึ้น โดย $Q_{fuel, sen}$ คำนวณได้ดังสมการ

$$Q_{fuel, sen} = \rho_{fuel} \times V_{fuel} \times c_{fuel} (T_{fuel, in} - T_{amb}) \quad (3.24)$$

เมื่อ $Q_{fuel, sen}$ คือ ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง (kJ)

ρ_{fuel} คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/l)

V_{fuel} คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิงต่อรอบการอุ่น (l)

c_{fuel} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 1.884 (kJ/kg·K)

$T_{fuel, in}$ คือ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่นด้วยฮีตเตอร์ (K)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

3) พลังงานความร้อนที่ออกจากเบิร์บ้ำน้ำเหล็ก ($\sum m_e h_e$)

3.1 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย (Q_{flue})

$$\begin{aligned} Q_{flue} = & m_{CO_2, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, CO_2} dT \right) + m_{H_2O, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, H_2O} dT \right) \\ & + m_{O_2, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, O_2} dT \right) + m_{SO_2, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, SO_2} dT \right) \\ & + m_{N_2, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, N_2} dT \right) \end{aligned} \quad (3.25)$$

เมื่อ Q_{flue} คือ ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย (kJ)

$m_{CO_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเสีย (kg)

$m_{H_2O, flue}$ คือ มวลของไอน้ำในก๊าซเสีย (kg)

$m_{O_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซออกซิเจนในก๊าซเสีย (kg)

$m_{SO_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซเสีย (kg)

$m_{N_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซไนโตรเจนในก๊าซเสีย (kg)

c_{p, CO_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kJ/kg·K)

c_{p, H_2O} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg·K)

c_{p, O_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของออกซิเจน (kJ/kg·K)

c_{p, SO_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (kJ/kg·K)

c_{p, N_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไนโตรเจน (kJ/kg·K)

3.2 ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด (Q_{open})

ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดเป็นความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีผ่านช่องเปิดต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยความร้อนดังกล่าวขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิด เวลาในการเปิดและอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วย สามารถหาได้ดังนี้

$$Q_{open} = C_t \sigma \varepsilon_{open} A_{open} (T_{ladle}^4 - T_{amb}^4) \times t \quad (3.26)$$

เมื่อ Q_{open} คือ ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด (J)

C_t คือ ตัวปรับแก้เวลาในการเปิดปิดช่องเปิด ในกรณีนี้ตัวปรับแก้จะเท่ากับ 1 เนื่องจากช่องเปิดนั้นเปิดอยู่ตลอดเวลาของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

σ คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzman มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

ε_{open} คือ ค่า effective emissivity ของช่องเปิด (factor for total radiation) สามารถหาได้จากภาพที่ 3.5

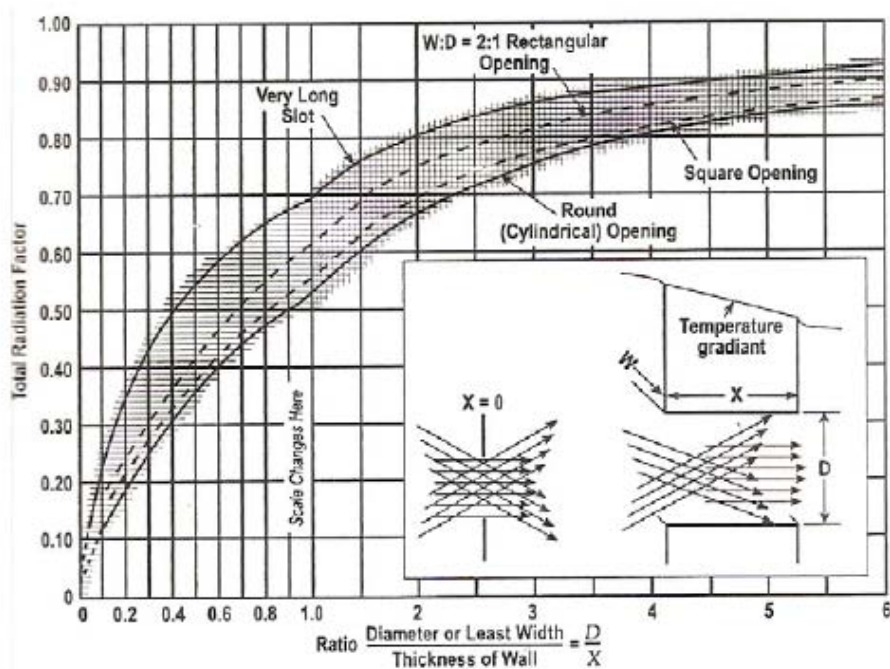
A_{open} คือ พื้นที่ของช่องเปิดทั้งหมด (m^2)

T_{ladle} คือ อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

t คือ เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กต่อรอบ (s)

ตารางที่ 3.1 ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ อุณหภูมิก๊าซเสีย [13]

ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg-K)
$\bar{c}_{p,O_2} = (0.88 - 0.0001(\frac{T}{1000}) + 0.54(\frac{T}{1000})^2 - 0.33(\frac{T}{1000})^3)$
$\bar{c}_{p,CO_2} = (0.45 + 1.67(\frac{T}{1000}) - 1.27(\frac{T}{1000})^2 + 0.39(\frac{T}{1000})^3)$
$\bar{c}_{p,H_2O} = (1.79 + 0.107(\frac{T}{1000}) + 0.586(\frac{T}{1000})^2 - 0.20(\frac{T}{1000})^3)$
$\bar{c}_{p,N_2} = (1.11 - 0.48(\frac{T}{1000}) + 0.96(\frac{T}{1000})^2 - 0.42(\frac{T}{1000})^3)$
$\bar{c}_{p,SO_2} = (0.37 + 1.05(\frac{T}{1000}) - 0.77(\frac{T}{1000})^2 + 0.21(\frac{T}{1000})^3)$



ภาพที่ 3.5 ค่า effective emissivity ของช่องเปิด [14]

4) พลังงานที่เปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุม (ΔE_{CV})

4.1 ความร้อนสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก ($Q_{storage,ladle}$)

ค่าความร้อนสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก สามารถหาได้จากสมการ

$$Q_{storage,ladle} = \int_{r_i}^{r_o} \bar{c}_{brick} T(r) dm_{ladle} \quad (3.27)$$

เมื่อ m_{ladle} คือ มวลของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kg)

$T(r)$ คือ อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็กที่เป็นฟังก์ชันของรัศมี โดย $T(r)$ สามารถหาได้จากการแจกแจงของอุณหภูมิภายในผนังของเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการนำความร้อน

จากสมการ (3.27) เมื่อ $dm_{ladle} = \rho dV_{ladle}$ สามารถจัดรูปใหม่ได้ ดังนี้

$$Q_{storage,ladle} = \int_{r_i}^{r_o} \bar{c}_{brick} T(r) \rho dV_{ladle} \quad (3.28)$$

พลังงานความร้อนสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถหาได้จาก

พลังงานความร้อนสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก = พลังงานสะสมในผนังด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก
+ พลังงานสะสมภายในผนังตำแหน่งก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก

พิจารณาด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก ปริมาตรของเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากับ

$dV_{ladle} = 2\pi rh dr$ จัดสมการ (3.28) ใหม่เป็น

$$Q_{side,storage,ladle} = 2\pi h \rho \bar{c}_{brick} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr \quad (3.29)$$

พิจารณาก้น (bottom) เบ้ารับน้ำเหล็กปริมาตรของเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากับ

$dV_{ladle} = \pi r^2 dx$ จัดสมการ (3.28) ใหม่เป็น

$$Q_{bottom,storage,ladle} = \pi r_{bottom}^2 \rho \bar{c}_{brick} \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx \quad (3.30)$$

ดังนั้น พลังงานความร้อนสะสมภายใน เบ้ารับน้ำเหล็กได้จากผลรวมสมการ (3.29) กับ (3.30) ได้สมการใหม่เป็น

$$Q_{storage,ladle} = 2\pi h \rho \bar{c}_{brick} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr + \pi r_{bottom}^2 \rho \bar{c}_{brick} \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx \quad (3.31)$$

เมื่อ $Q_{storage,ladle}$ คือ ความร้อนสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (MJ)

\bar{c}_{brick} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ SK38 (1.3 kJ/kg·K)

h คือ ความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

ρ คือ ความหนาแน่นของอิฐทนไฟ (2.75 kg/m³)

r_i คือ รัศมีภายในของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

r_o คือ รัศมีภายนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

x_i คือ ความหนาเริ่มต้นของก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

x_o คือ ความหนาสุดท้ายของก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

$T(x)$ คือ อุณหภูมิภายในชั้นเหล็กที่ก้นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของชั้นเหล็ก

4.2 ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก ($Q_{storage,steel}$)

ค่าความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก สามารถหาได้จาก

$$Q_{storage,steel} = 2\pi h \rho \bar{c}_{steel} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr + \pi r_{bottom}^2 \rho \bar{c}_{steel} \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx \quad (3.32)$$

เมื่อ $Q_{storage,steel}$ คือ ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก (kJ)

\bar{c}_{steel} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก (0.787 kJ/kg·K)

h คือ ความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

ρ คือ ความหนาแน่นของเหล็ก (7.8 kg/m³)

r_i คือ รัศมีภายในชั้นเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

r_o คือ รัศมีภายนอกชั้นเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

x_i คือ ความหนาเริ่มต้นชั้นเหล็กที่กันเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

x_o คือ ความหนาสุดท้ายชั้นเหล็กที่กันเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

$T(r)$ คือ อุณหภูมิภายในชั้นเหล็กที่ด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เป็นฟังก์ชันของรัศมี โดย $T(r)$ นี้สามารถหาได้จากการแจกแจงอุณหภูมิภายในชั้นเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการนำความร้อน

$T(x)$ คือ อุณหภูมิภายในชั้นเหล็กที่กันของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของชั้นเหล็ก

4.3 ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก ($Q_{storage,cover}$)

การหาค่าความร้อนสะสมในฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น ทางผู้วิจัยได้ประเมินให้มีค่าเป็นสัดส่วนโดยมวลระหว่างฝาเบ้ากับกันเบ้า ซึ่งมวลของฝาเบ้าเป็น 0.83 เท่าของกันเบ้า

$$Q_{storage,cover} = \pi r_{cover}^2 \rho \bar{c}_{congrat} \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx \quad (3.33)$$

เมื่อ $\bar{c}_{congrat}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 0.75 kJ/kg·K

ρ คือ ความหนาแน่นของคอนกรีต (2.3 kg/m³)

r_{cover} คือ รัศมีของฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

x_i คือ ความหนาเริ่มต้นของฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

x_o คือ ความหนาสุดท้ายของฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

$T(x)$ คือ อุณหภูมิภายในฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เป็นฟังก์ชันของความหนาของฝา

5) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

ความร้อนสูญเสียอื่นๆ (Q_{other}) เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่ไม่สามารถหาค่าได้ เช่น ความร้อนสูญเสียจากอากาศภายนอก เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานเพื่อหาค่า ดังสมการ

$$Q_{other} = (Q_{fuel} + Q_{fuel, sen}) - (Q_{surface, cover} + Q_{surface, steel} + Q_{flue} + Q_{open} + Q_{storage, ladle} + Q_{storage, steel} + Q_{storage, cover}) \quad (3.34)$$

3.6 สมการการเผาไหม้ (Combustion equation)

3.6.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย (รายงานการทดสอบของกรมวิทยาศาสตร์ หมายเลขปฏิบัติการ L51/05648.1)

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก
C	82.8
H	12.9
O	3.20
S	0.52
N	0.04

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของน้ำมันเตา

คุณสมบัติ	น้ำมันเตา	หน่วย
มวลโมเลกุล	99.46	kg/kmol
ความถ่วงจำเพาะ	0.95	-
ความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ	39.11	MJ/l

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบของธาตุในก๊าซธรรมชาติ (ข้อมูล บริษัท ปตท จำกัด (มหาชน), สถานี
ตะวันตก ป๋อราชบุรี)

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยปริมาตร
CH ₄	72.75
C ₂ H ₆	3.71
C ₃ H ₈	1.11
C ₄ H ₁₀	0.48
C ₅ H ₁₂	0.15
C ₆ H ₁₄	0.074
CO ₂	6.58
N ₂	15.14

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ

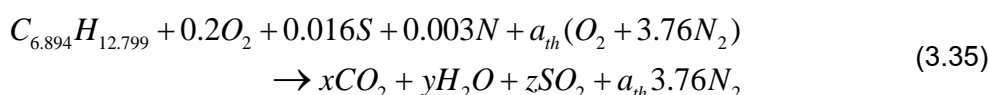
คุณสมบัติ	ก๊าซธรรมชาติ	หน่วย
มวลโมเลกุล	20.86	kg/kmol
ความถ่วงจำเพาะ	0.72	-
ความร้อนเชื้อเพลิงสูง	31.82	MJ/Nm ³
ความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ	28.72	MJ/Nm ³

3.6.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

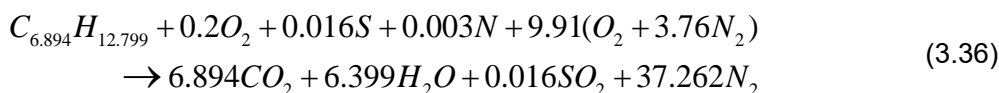
เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง การคำนวณโดยทั่วไปจะใช้ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง ซึ่งอ้างอิงที่ 0 °C, 1 atm ซึ่ง ณ สถานะดังกล่าว ไอน้ำที่อยู่ในก๊าซเสียจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ก่อให้เกิดค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอน้ำเป็นของเหลว ความเป็นจริงอุณหภูมิก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิก่อนข้างสูง (500-800 °C) ทำให้ไอน้ำที่อยู่ในก๊าซเสียมีสถานะเป็นก๊าซเช่นเดิม ดังนั้น ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการคำนวณจึงเป็นค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ

1) สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา

ในทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้



เมื่อทำสมดุลสมการจะได้ $x = 6.894$, $y = 6.399$, $z = 0.016$, $a_{th} = 9.91$ ดังนั้น สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎีเป็น



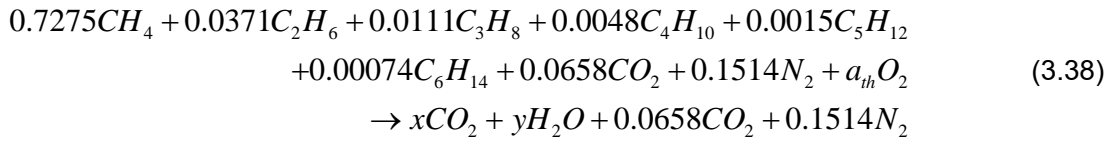
นำสมการที่ได้ข้างต้นมาคิดอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีได้จาก

$$AF_{stoic} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{9.91 \times [31.998 + (3.76 \times 28.014)]}{102.6572} = 13.257 \quad (3.37)$$

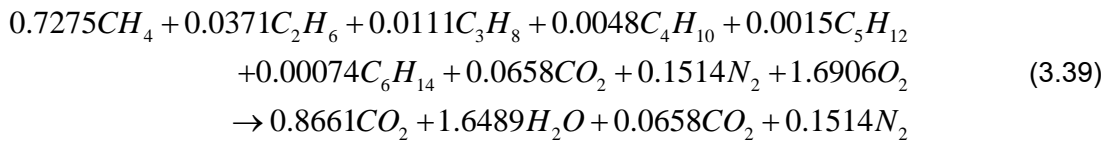
2) สมการการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติ

ในกรณีที่ใช้ oxy burner เป็นการใช้ออกซิเจนแทนอากาศ 100% นั้น หมายความว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้จะไม่มีไนโตรเจนจากอากาศเลย ไนโตรเจนที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นจะมาจากก๊าซธรรมชาติเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

ในทางทฤษฎีสามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้



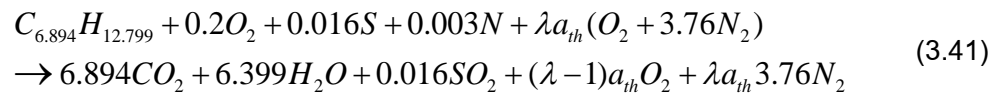
เมื่อทำสมดุลสมการจะได้ $x = 0.8661$, $y = 1.6489$, $a_{th} = 1.6906$ ดังนั้น สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎีเป็น



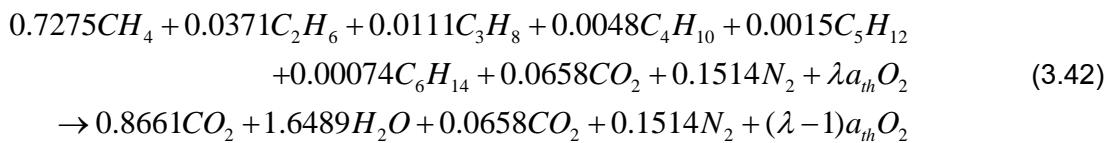
นำสมการที่ได้ข้างต้นมาคิดอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีได้จาก

$$AF_{stoic} = \frac{m_{oxy}}{m_{fuel}} = 2.593 \tag{3.40}$$

เนื่องจากสมการ (3.36) และ (3.39) เป็นสมการการเผาไหม้ทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงจะสูงกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกินจะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาได้ดังนี้



และสมการการเผาไหม้ในทางปฏิบัติของก๊าซธรรมชาติ



เมื่อ λ คือ ปริมาณอากาศส่วนเกินในทางปฏิบัติ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ $(\lambda - 1)a_{th}O_2$ ในทางปฏิบัติสามารถวัดค่าอากาศส่วนเกินได้จากเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซเสีย (flue gas analyzer) ค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปอัตราส่วน ร้อยละโดยโมล

เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซเสีย จะวัดปริมาณออกซิเจนในลักษณะ dry basis ซึ่งหมายถึง ก๊าซเสียจะถูกดึงเอาไอน้ำและความชื้นออกไปก่อนจะทำการวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะต้องแปลงไปปริมาณอากาศส่วนเกินในทางปฏิบัติตั้งสมการ

สำหรับน้ำมันเตา

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{SO_2} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{(\lambda - 1)a_{th}}{6.894 + 0.016 + (\lambda - 1)a_{th} + 3.76\lambda a_{th}} \quad (3.43)$$

จัดรูปให้อยู่ในรูปสมการของ λ จะได้

$$\lambda = \frac{a_{th} + \left[(7.088 - a_{th}) \left(\frac{\%O_2}{100} \right) \right]}{a_{th} - 4.76a_{th} \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.44)$$

โดย $a_{th} = 9.91$ และแทนค่าเข้าไปในสมการ (3.44)

$$\lambda = \frac{9.91 - (2.822) \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{9.91 - (47.172) \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.45)$$

สำหรับก๊าซธรรมชาติ

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{(\lambda - 1)a_{th}}{0.8661 + 0.0658 + (\lambda - 1)a_{th} + 0.1514} \quad (3.46)$$

จัดรูปให้อยู่ในรูปสมการของ λ จะได้

$$\lambda = \frac{a_{th} \left[1 - \left(\frac{\%O_2}{100} \right) \right] + 1.0833 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{a_{th} \left[1 - \left(\frac{\%O_2}{100} \right) \right]} \quad (3.47)$$

โดย $a_{th} = 1.6906$ และแทนค่าเข้าไปในสมการ (3.47) ดังนั้น

$$\lambda = \frac{1.6906 \left[1 - \left(\frac{\%O_2}{100} \right) \right] + 1.0833 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{1.6906 \left[1 - \left(\frac{\%O_2}{100} \right) \right]} \quad (3.48)$$

เมื่อหาค่า λ ได้แล้ว เราสามารถหาอัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง
ในทางปฏิบัติ (actual air-fuel ratio) ดังต่อไปนี้

$$AF_{actual} = \lambda AF_{stoic} \quad (3.49)$$

โดย AF_{actual} คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ

AF_{stoic} คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี

3.7 ประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle preheating efficiency)

ประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น สามารถหาได้จากอัตราส่วนของความร้อนสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กกับความร้อนที่ให้กับเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ในรูปสมการ

$$\eta_{ladle} = \frac{Q_{storage,ladle}}{Q_{input}} \times 100\% \quad (3.50)$$

บทที่ 4

การทดลองและการตรวจวัดข้อมูล

4.1 ข้อมูลเบื้องต้นและการทำงานของ การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของหัวเผาที่ใช้อุ่น คือ กรณีที่ 1 เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ (Air burner) ที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง กรณีที่ 2 เป็นการอุ่นเบ้าด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ (Oxy burner) ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งสองกรณีตามลักษณะของหัวเผาที่ตามกล่าวมาแล้ว จะเป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก 2 ลักษณะ ลักษณะที่ 1 เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ (Cold ladle) ซึ่งเป็นเบ้าที่ยังไม่เคยผ่านการใช้งานมาก่อน ลักษณะที่ 2 เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการรับน้ำเหล็กมาแล้วหรือเบ้าร้อน ซึ่งเป็นเบ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและรอไว้ใช้งานในรอบต่อไป ในการทดลองนี้ เบ้ารับน้ำเหล็กที่มีการอุ่นแล้วและยังมีอุณหภูมิสูง (ไม่ต่ำกว่า 600°C) จะถือว่าเป็นเบ้าร้อน

การทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละครั้งจะมี 4 ขั้นตอน ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของเบ้ารับน้ำเหล็กกับการทดลองในแต่ละขั้นตอนแล้ว จะเห็นว่า เบ้าเย็นเปรียบได้กับขั้นตอนที่ 1 ส่วนเบ้าร้อนเปรียบได้กับขั้นตอนที่ 2 3 และ 4 นั้นเอง

4.2 รูปแบบการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

4.2.1 อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ (ก่อนปรับปรุง)

การทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง โดยจะทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง โดยจะทดลองในรูปแบบเดียวกันทั้งสองครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งจะ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1

อุณหภูมิใหม่หรือเบ้าที่ยังไม่เคยผ่านการอุ่นมาก่อนเรียกว่า cold ladle จะใช้เวลาในการอุ่น 4 ชั่วโมง ตรวจสอบอุณหภูมิตามจุดต่างๆ พร้อมจดบันทึก หลังจากนั้น พัก การอุ่นไว้ 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2

อุณหภูมิรับน้ำเหล็กต่อจากขั้นตอนที่ 1 จนกระทั่งอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 หลังจากนั้น พัก การอุ่นไว้ 30 นาที

ขั้นตอนที่ 3

อุณหภูมิรับน้ำเหล็กต่อจากขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 1 หลังจากนั้น พัก ไว้โดยไม่มีการอุ่น 20 นาที

ขั้นตอนที่ 4

อุณหภูมิรับน้ำเหล็กต่อจากขั้นตอนที่ 3 จนกระทั่งอุณหภูมิตำแหน่ง L2 มีค่ามากกว่าอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 1 ประมาณ 50 °C เพื่อเก็บข้อมูลกรณีการอุ่นอุณหภูมิเกินที่กำหนด

4.2.2 อุณหภูมิรับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ (หลังปรับปรุง)

การทดลองอุณหภูมิรับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ซึ่งใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 และ 2 จะเป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยโหมดอัตโนมัติ ก็คือ เริ่มต้นอุณหภูมิรับน้ำเหล็กด้วย อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง (High fire) และเมื่ออุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 (เป็นตัวแทนของอุณหภูมิผิวอิฐทนไฟ) มีค่า 1100 °C ให้เปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงจากสูงเป็นอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำ (Low fire) และเมื่ออุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 ต่ำกว่า 1000 °C ให้เปลี่ยนจากอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำกลับมาเป็นอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง อีกครั้งแล้วทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ (ในการทดลองครั้งนี้ได้ตั้งค่าอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงเท่ากับ 110 Nm³/hour ส่วนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำเท่ากับ 40 Nm³/hour) ส่วนการทดลองครั้งที่ 3 จะอุ่นเบ้าด้วยโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงตลอดการทดลอง ซึ่งในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง จะใช้รูปแบบการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยรูปแบบเดียวกัน โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1

อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 มีค่า เท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 1 ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ จากนั้น พัก การอุ่นไว้ จนกระทั่งอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 ลดลงเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 1 ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

ขั้นตอนที่ 2

อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 มีค่า เท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 1 ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ จากนั้น พัก การอุ่นไว้ จนกระทั่งอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 ลดลงเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 2 ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

ขั้นตอนที่ 3

อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 มีค่า เท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 1 ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ จากนั้น พัก การอุ่นไว้ จนกระทั่งอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 ลดลงเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 3 ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

ขั้นตอนที่ 4

อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 มีค่า มากกว่าอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 1 ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ประมาณ 50 °C เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิเกิน

4.3 รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องตรวจวัด

4.3.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ (ก่อนปรับปรุง)

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ (ก่อนปรับปรุง)

ลำดับ	ข้อมูลในการตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	สัญลักษณ์
1	อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟ	ติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลในอิฐทนไฟและต่อ	$T(r)$

ลำดับ	ข้อมูลในการตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	สัญลักษณ์
	ไฟของเบ้ารับน้ำเหล็ก	สายสัญญาณเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล	
2	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก	อ่านค่าจาก flow meter	V_{fuel}
3	อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก	ติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลที่ช่องเปิดของฝากับเบ้ารับน้ำเหล็ก	T_{flue}
4	อุณหภูมิของชั้นผิวเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็ก	ตรวจวัดด้วยเครื่อง infrared thermometer	$T_{surface, steel}$
5	อุณหภูมิผิวของฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	ตรวจวัดด้วยเครื่อง infrared thermometer	$T_{surface, cover}$
6	อุณหภูมิของอากาศภายนอก	ติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลที่สภาพแวดล้อมของโรงงานและต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล	T_{amb}
7	อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ผ่านเครื่อง heater	ใช้เทอร์มอคัปเปิลวัดอุณหภูมิน้ำมัน	$T_{fuel, in}$
8	ปริมาณออกซิเจนและ NOx ในก๊าซเสีย	ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดก๊าซเสีย (flue gas analyzer)	%

4.3.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ (หลังปรับปรุง)

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ (หลังปรับปรุง)

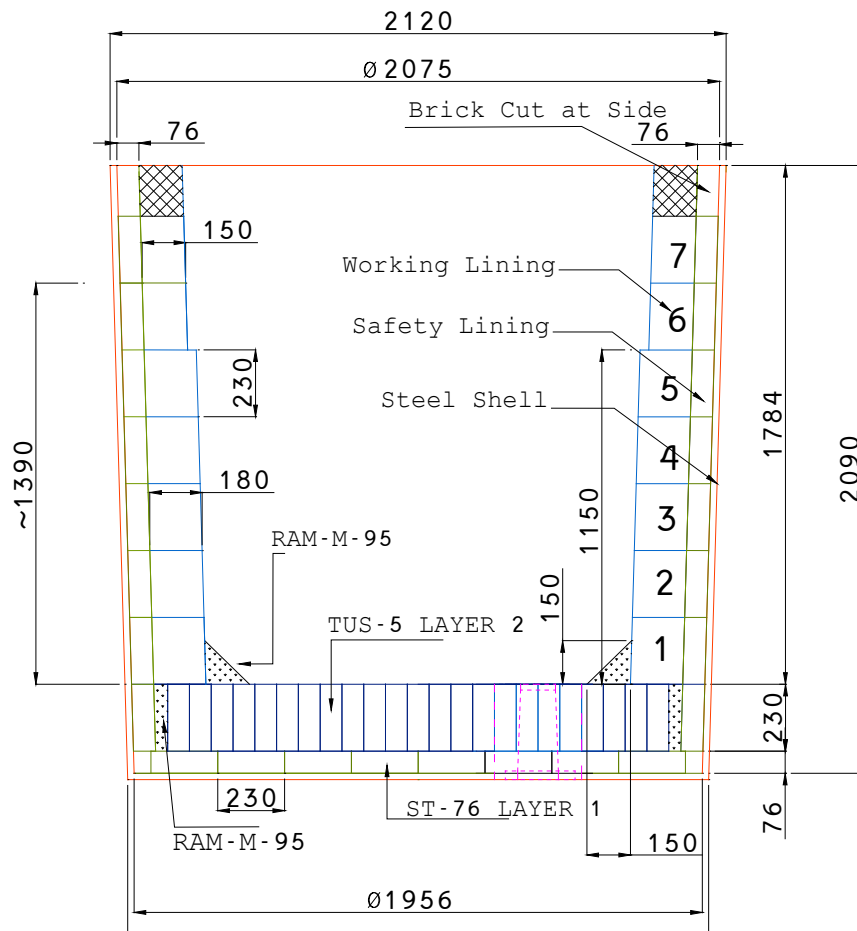
ลำดับ	ข้อมูลในการตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	สัญลักษณ์
1	อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของเบ้ารับน้ำเหล็ก	ติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลในอิฐทนไฟและต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล	$T(r)$
2	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก	อ่านค่าจาก flow meter	V_{fuel}
3	ปริมาณการใช้ออกซิเจน	อ่านค่าจาก flow meter	V_{O_2}
4	อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก	ติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลที่ช่องเปิดของฝากับเบ้ารับน้ำเหล็ก	T_{flue}

ลำดับ	ข้อมูลในการตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	สัญลักษณ์
5	อุณหภูมิของชั้นผิวเหล็ก (steel shell) ของเบ้ารับน้ำเหล็ก	ตรวจวัดด้วยเครื่อง infrared thermometer	$T_{surface, steel}$
6	อุณหภูมิผิวของฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	ตรวจวัดด้วยเครื่อง infrared thermometer	$T_{surface, cover}$
7	อุณหภูมิของอากาศภายนอก	ติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลที่สภาพแวดล้อมของโรงงานและต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล	T_{amb}
8	ปริมาณออกซิเจนและ NOx ในก๊าซเสีย	ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดก๊าซเสีย (flue gas analyzer)	%

4.4 การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล

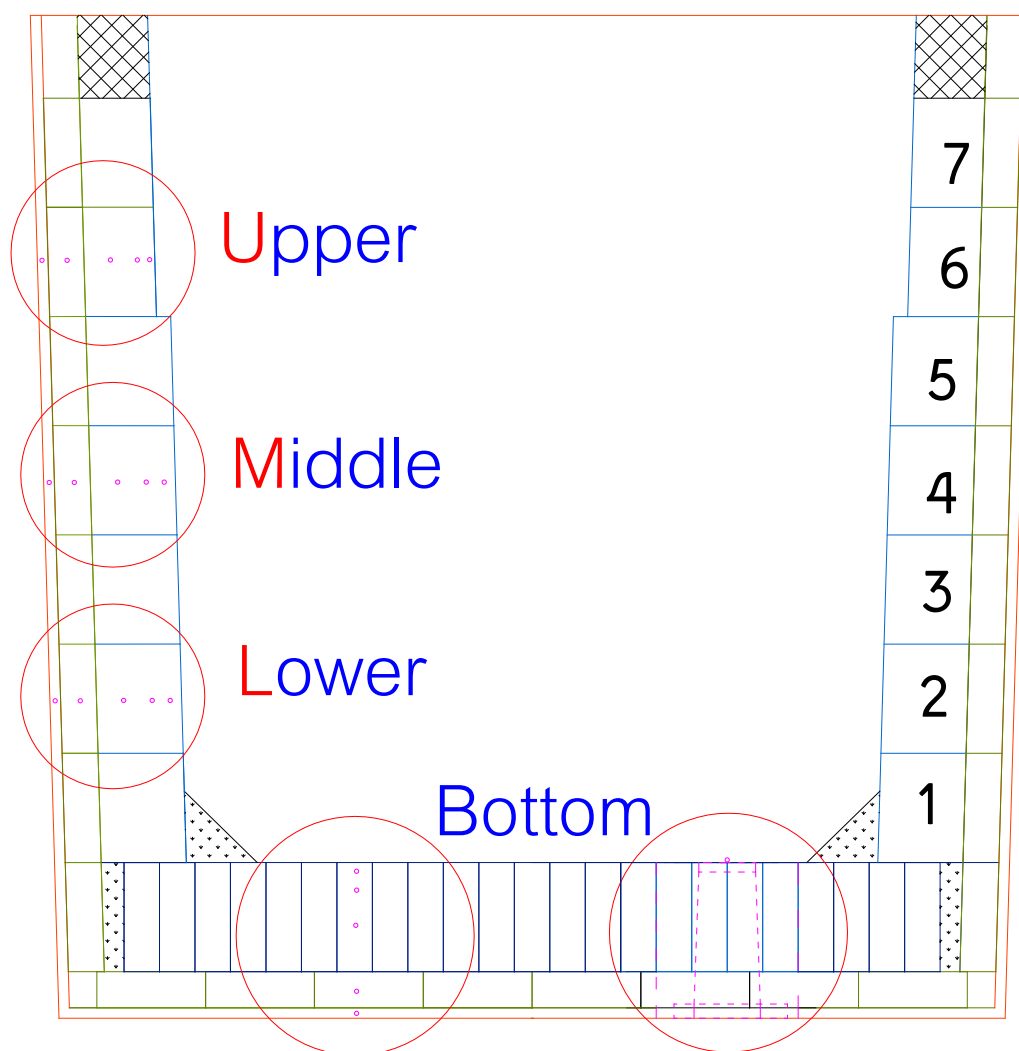
เบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเบ้าขนาด 18 ตันน้ำเหล็ก โดยเบ้ารับน้ำเหล็กนี้จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ปากของเบ้ารับน้ำเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอก 2.12 เมตร ก้นเบ้ารับน้ำเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอก 2.00 เมตร ความสูงตามแนวตั้งฉาก 2.09 เมตร

การจัดเรียงตัวของอิฐทนไฟที่ผนังด้านในของเบ้ารับน้ำเหล็กแบ่งเป็น 2 ชั้น ซึ่งทำด้วยอิฐทนไฟชนิด SK 38 ชั้นแรกอยู่ที่ผนังด้านในสุดเรียกว่า working lining มีความหนา 150 – 180 มิลลิเมตร ถัดออกมาชั้นที่สอง เรียกว่า safety lining มีความหนา 76 มิลลิเมตร ก้นเบ้ารับน้ำเหล็กแบ่งเป็นสองชั้นเช่นเดียวกัน ชั้นบนเรียกว่า layer 2 ซึ่งก็คือ working lining นั้นเอง มีความหนา 230 มิลลิเมตร ชั้นล่างเรียกว่า layer 1 ซึ่งก็คือ safety lining มีความหนา 76 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 เบ้ารับน้ำเฮลิคขนาด 18 ตัน

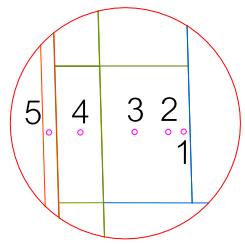
การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลนั้นจะมีทั้งหมด 21 ตัว ประกอบด้วย ด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กในเนื้ออิฐทนไฟที่ตำแหน่ง lower middle และ upper ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะฝังเทอร์มอคัปเปิลที่อิฐชั้น working lining 3 ตัว ที่ชั้น safety lining 1 ตัว และที่ชั้น steel shell อีก 1 ตัว ความลึกของการฝังเทอร์มอคัปเปิลที่ชั้น working lining คือ 50 50 100 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนชั้น safety lining จะฝังที่ตำแหน่งกึ่งกลางของอิฐชั้น safety lining และชั้น steel shell จะฝังที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความหนา steel shell ส่วนตำแหน่ง bottom จะฝังเทอร์มอคัปเปิลที่ layer 2 ทั้งหมด 3 ตัว ที่ layer 1 อีก 1 ตัว และที่ steel shell อีก 1 ตัว และอีกหนึ่งตัวถูกติดตั้งเข้าไปด้านในเบ้าที่ตำแหน่ง slide gate โดยจะฝังให้ทะลุชั้น layer2 ขึ้นไปประมาณ 1 เซนติเมตร ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล

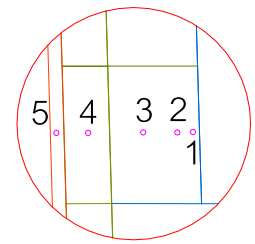
ที่ตำแหน่ง Upper เทอร์มอคัปเปิล ตัวที่ 1-5 จะแทนด้วย U1 U2 U3 U4 และ U5 ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง Middle เทอร์มอคัปเปิล ตัวที่ 1-5 จะแทนด้วย M1 M2 M3 M4 และ M5 ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง Lower เทอร์มอคัปเปิล ตัวที่ 1-5 จะแทนด้วย L1 L2 L3 L4 และ L5 ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง Bottom เทอร์มอคัปเปิล ตัวที่ 1-5 จะแทนด้วย B1 B2 B3 B4 และ B5 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.3

Upper



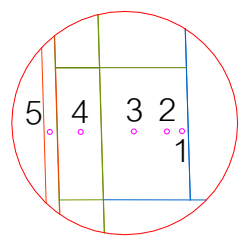
U5 ← U1

Middle



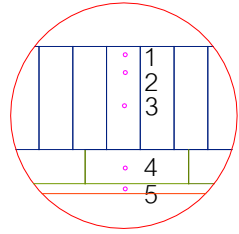
M5 ← M1

Lower



L5 ← L1

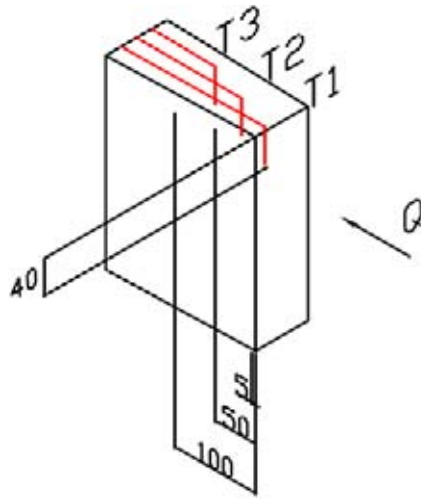
Bottom



B5 ← B1

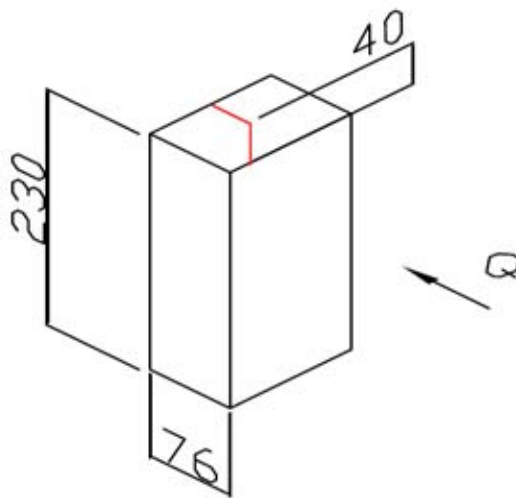
ภาพที่ 4.3 ตำแหน่งเทอร์มอคัปเปิลทั้ง 5 ตัว ในอิฐทนไฟทั้ง 4 ตำแหน่ง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้น จะพิจารณาในแบบภาพ 3 มิติ ยกตัวอย่างเช่น ที่ชั้น working lining จะติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล 3 ตัว ให้เทอร์มอคัปเปิลตัวที่ 1 เป็น T1 ติดตั้งที่ความลึก 5 มิลลิเมตร ให้เทอร์มอคัปเปิลตัวที่ 2 เป็น T2 ติดตั้งที่ความลึก 50 มิลลิเมตร ให้เทอร์มอคัปเปิลตัวที่ 3 เป็น T3 ติดตั้งที่ความลึก 100 มิลลิเมตร วัตถุประสงค์จากผิวอิฐทนไฟที่ความร้อนพุ่งเข้ามา โดยเทอร์มอคัปเปิลจะติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับแหล่งความร้อนที่ต้องการวัดดังภาพที่ 4.4



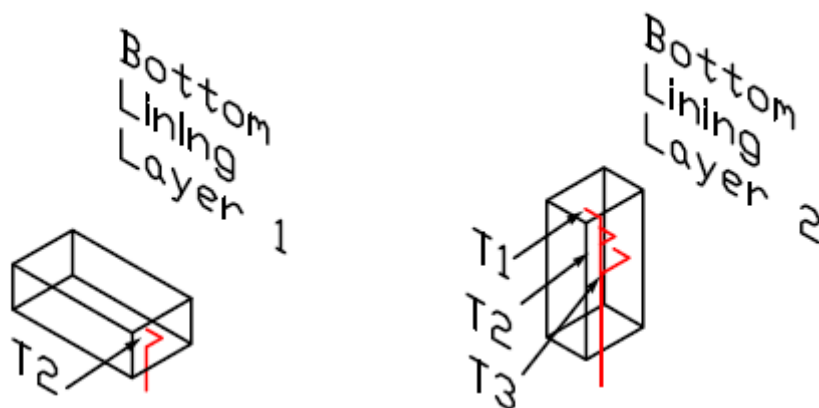
ภาพที่ 4.4 ลักษณะการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลชั้น working lining

ส่วนที่ชั้น safety lining จะฝังเทอร์มอคัปเปิลที่ตำแหน่งกึ่งกลางของอิฐ ลึกลงไปในเนื้ออิฐ 40 มิลลิเมตรดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ลักษณะการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล ชั้น safety lining

ส่วนตำแหน่ง bottom ดังภาพที่ 4.6 จะมี 2 ชั้นหรือเลเยอร์ (layer) เลเยอร์ที่ 1 ก็คือ ชั้น safty lining และเลเยอร์ที่ 2 ก็คือ ชั้น working lining ซึ่งรายละเอียดการติดตั้งและระยะก็เหมือนกับที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้



ภาพที่ 4.6 ลักษณะการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล ชั้น bottom layer 1, layer 2

4.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

4.5.1 เทอร์มอคัปเปิล (Thermocouple)

ชนิดและลักษณะของเทอร์มอคัปเปิลที่ใช้ในการตรวจวัดและเก็บข้อมูลมีดังนี้

- 1) เทอร์มอคัปเปิลชนิด R ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มิลลิเมตร หุ้มด้วยเซรามิก มีช่วงการวัดตั้งแต่ 0-1,600 °C
- 2) เทอร์มอคัปเปิลชนิด K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มิลลิเมตร หุ้มด้วยเซรามิก มีช่วงการวัดตั้งแต่ 0 - 1,370 °C
- 3) เทอร์มอคัปเปิลแบบเซรามิกชนิด R ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร มีช่วงการวัดตั้งแต่ 0 - 1,600 °C

4.5.2 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (IR thermometer)

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ ทู อิน วัน วัดได้ทั้งแบบไม่สัมผัสด้วยอินฟราเรดและการวัดแบบสัมผัสด้วยเทอร์มอคัปเปิลชนิด K และ probe สามารถปรับค่า emissivity ได้ 3 ระดับ low (0.3), medium (0.7) และ high (0.95) มีเลเซอร์ชี้ตำแหน่งเพื่อเล็งจุดศูนย์กลางของพื้นที่วัด ซึ่ง

สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 550 °C และมีความละเอียดในการแสดงผลของอุณหภูมิอยู่ที่ 0.1 °C



ภาพที่ 4.7 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (Infrared thermometer)

4.5.3 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)

เครื่องบันทึกข้อมูลนี้เป็นของ YOKOGAWA รุ่น MW100 เป็นเครื่องที่ใช้อ่านและบันทึกข้อมูลจากตัวเซนเซอร์ที่ติดตั้งไว้ในจุดที่ต้องการวัด ช่วงสัญญาณ อินพุทจะอยู่ในช่วง ± 10 VDC เมื่อต้องการดูข้อมูลแบบ on-line ก็สามารถดูได้ผ่านซอฟต์แวร์โดยต่อผ่านสาย LAN เข้ากับคอมพิวเตอร์ เมื่อต้องการดูข้อมูลย้อนหลังก็สามารถทำได้ โดยเรียกข้อมูลที่บันทึกไว้ผ่านซอฟต์แวร์ ข้อมูลที่บันทึกไว้สามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบของ excel ได้



ภาพที่ 4.8 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) YOKOGAWA รุ่น MW100

4.5.4 เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซเสีย (flue gas analyzer)

เป็นเครื่องวัดปริมาณ O_2 , CO , CO_2 , NO , NO_2 , NO_x , SO_2 รวมทั้งประสิทธิภาพการเผาไหม้แสดงในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยโมลแบบแห้ง (Dry basis) และสามารถติดตั้งเซ็นเซอร์วัดก๊าซได้ พร้อมกัน 6 เซนเซอร์



ภาพที่ 4.9 เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซเสีย (flue gas analyzer)

บทที่ 5

ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 18 ตันน้ำเหล็ก ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กก่อด้วยอิฐทนไฟชนิด SK38 ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี กรณีที่ 1 เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง โดยทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง ส่วนกรณีที่ 2 เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 และ 2 เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยโหมดอัตโนมัติ ซึ่งการทำงานในโหมดอัตโนมัตินี้จะเปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง (High fire) เป็นอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำ (Low fire) โดยมีเงื่อนไขดังนี้ เริ่มต้นการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง และเมื่ออุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 มีค่า 1100 °C ให้เปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงเป็นอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำ เมื่ออุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 ต่ำกว่า 1000 °C ก็จะเปลี่ยนจากอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำกลับมาเป็นอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงอีกครั้ง แล้วทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ (ในการทดลองครั้งนี้ได้ตั้งค่าอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงเป็น 110 Nm³/hr อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำเป็น 40 Nm³/hr) ครั้งที่ 3 เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงตลอดการทดลอง (ขั้นตอนที่ 1-4)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะประกอบด้วยปริมาณการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ และองค์ประกอบไอเสีย ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 โดยอุณหภูมิจะแสดงผลในลักษณะของกราฟเส้น และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าพลังงานในรูปแบบต่างๆ ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 แล้วนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของตาราง กราฟและแซงก์ไดอะแกรม (Sankey Diagram) เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ โดยแซงก์ไดอะแกรมจะแสดงเฉพาะขั้นตอนที่ 1

5.1 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ

5.1.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

จากบทที่ 4 ที่ได้อธิบายถึงการเลือกตำแหน่ง L2 ให้เป็นตำแหน่งแสดงอุณหภูมิอ้างอิงของการทดลองในครั้งนี้ ดังนั้นในบทนี้ จะแสดงผลการทดลองของอุณหภูมิเฉพาะตำแหน่ง Lower เท่านั้น ส่วนอุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นๆ (Upper, Middle, Bottom) สามารถดูข้อมูลได้จากภาคผนวก ก ลักษณะของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง Upper, Middle, Bottom พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับตำแหน่ง Lower แต่อุณหภูมิที่ตำแหน่ง Upper, Middle จะน้อยกว่าเพราะระยะทางจากแหล่งความร้อนหรือเปลวไฟไกลกว่าตำแหน่ง Lower แต่ที่ตำแหน่ง

Bottom จะมีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่ง Lower เนื่องจากเปลวไฟสัมผัสกับผิวของอิฐทนไฟโดยตรง

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ ทำการทดลอง 2 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 5.1 และ 5.2 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง L1 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าตำแหน่งอื่น และอุณหภูมิก็ลดลงเร็วที่สุดเช่นกัน ส่วนตำแหน่ง L2 จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับตำแหน่ง L1 เพียงแต่จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนตำแหน่ง L3 ถึง L5 อุณหภูมิจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

การทดลองครั้งที่ 1 ที่ตำแหน่ง L1 ในขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิเริ่มต้นจากประมาณ 125°C ถึงอุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 1160°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 613°C

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 613°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 1013°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 680°C

ขั้นตอนที่ 3 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 680°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 1105°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 20 นาที อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 787°C

ขั้นตอนที่ 4 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 787°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 1175°C

ที่ตำแหน่ง L2 ในขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิเริ่มต้นจากประมาณ 79°C ถึงอุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 844°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 660°C

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 660°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 826°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 736°C

ขั้นตอนที่ 3 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 736°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 826°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 20 นาที อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 804°C

ขั้นตอนที่ 4 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 804°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 904°C

ที่ตำแหน่ง L3 จากขั้นตอนที่ 1-4 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากประมาณ 62 - 635°C

ที่ตำแหน่ง L4 จากขั้นตอนที่ 1-4 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากประมาณ 50 - 280°C

ที่ตำแหน่ง L5 จากขั้นตอนที่ 1-4 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากประมาณ 36 - 80°C

การทดลองครั้งที่ 2 ที่ตำแหน่ง L1 ในขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิเริ่มต้นจากประมาณ 39°C ถึงอุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 1120°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 863°C

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 863°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 1096°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 930°C

ขั้นตอนที่ 3 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 930°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 1060°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 20 นาที อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 820°C

ขั้นตอนที่ 4 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 820°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 1162°C

ที่ตำแหน่ง L2 ในขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิเริ่มต้นจากประมาณ 40°C ถึงอุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 842°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 830°C

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 830°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 847°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 860°C

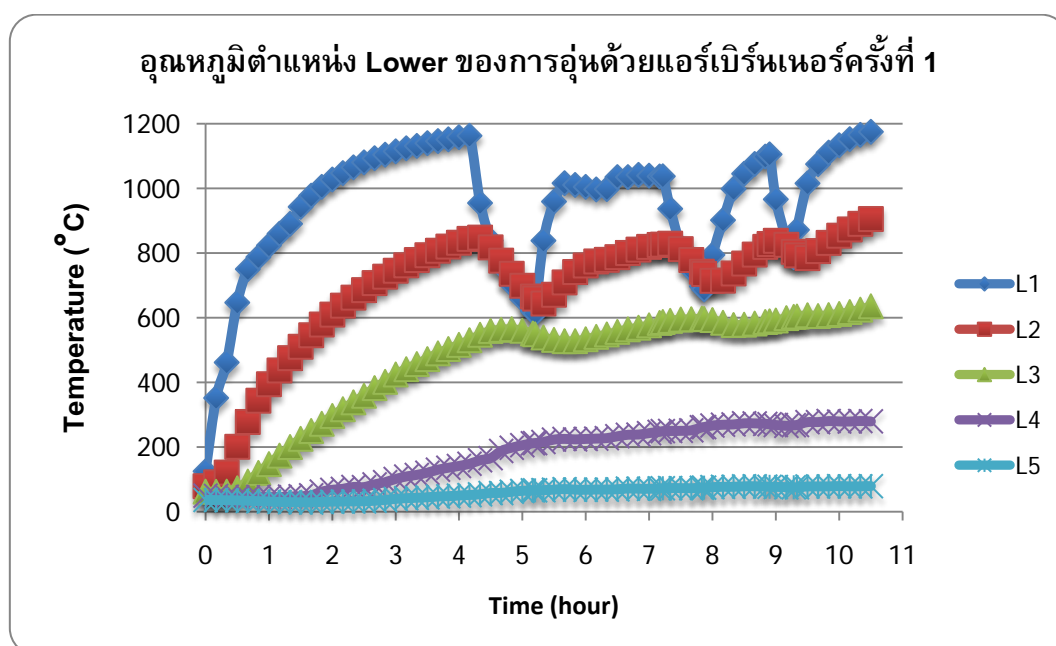
ขั้นตอนที่ 3 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 860°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 857°C จากนั้นหยุดอุ่นเบ้าเป็นเวลา 20 นาที อุณหภูมิลดลงมาที่ประมาณ 830°C

ขั้นตอนที่ 4 เริ่มอุ่นเบ้าอีกครั้ง อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 830°C อุณหภูมิสุดท้ายประมาณ 902°C

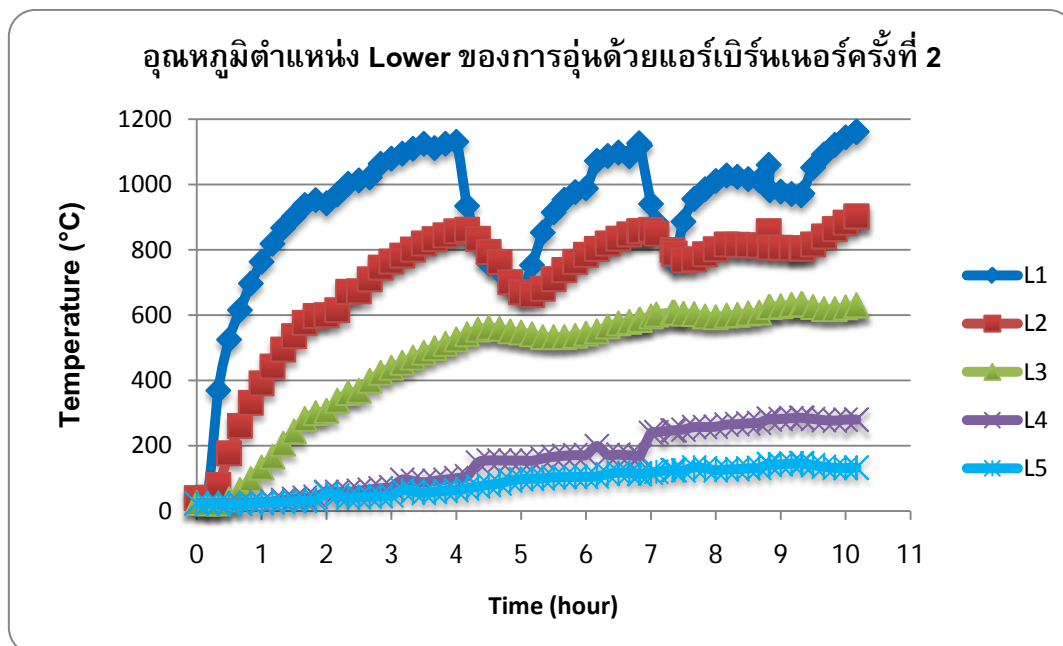
ที่ตำแหน่ง L3 จากขั้นตอนที่ 1-4 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากประมาณ 25 - 630°C

ที่ตำแหน่ง L4 จากขั้นตอนที่ 1-4 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากประมาณ 24 - 280°C

ที่ตำแหน่ง L5 จากขั้นตอนที่ 1-4 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากประมาณ 23 - 160°C



ภาพที่ 5.1 อุณหภูมิตำแหน่ง Lower ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1



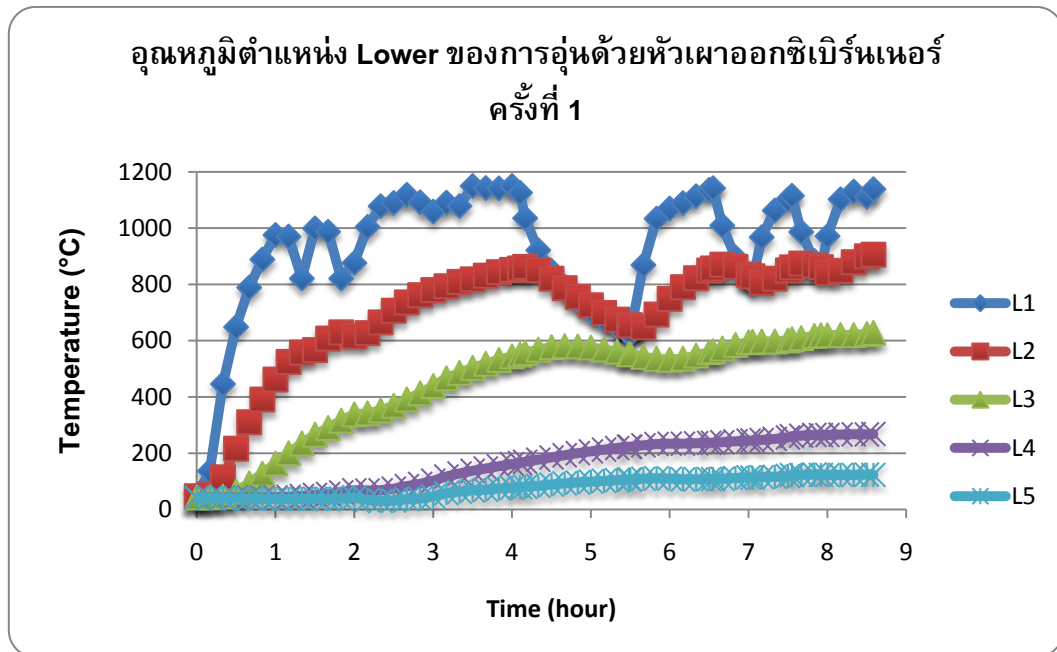
ภาพที่ 5.2 อุณหภูมิตำแหน่ง Lower ของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2

5.1.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์

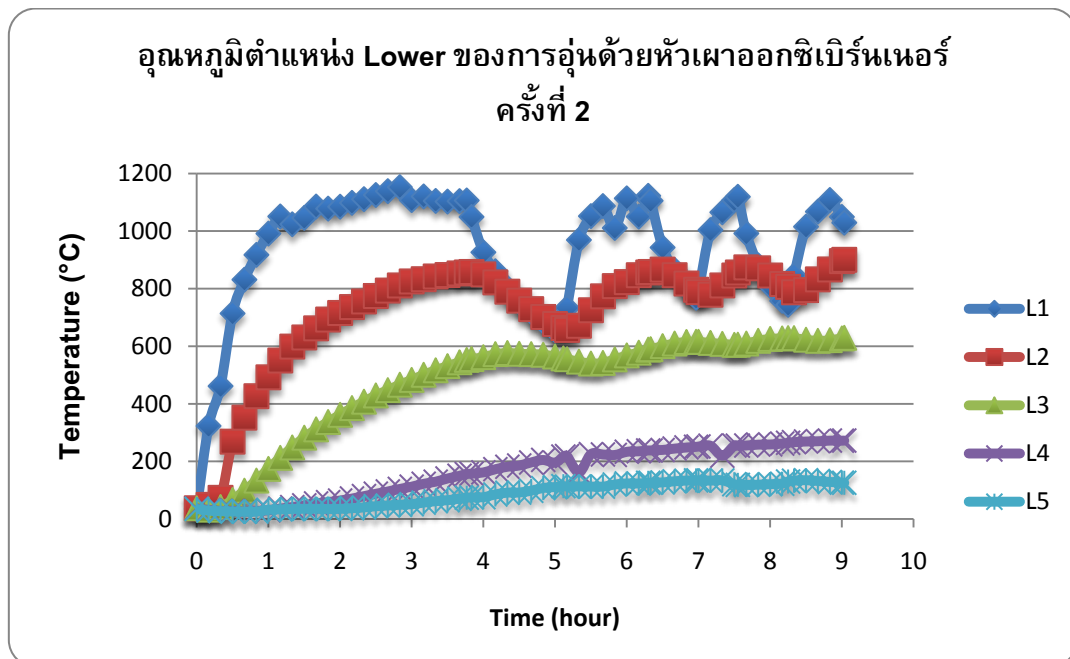
ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดย 2 ครั้งแรกอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยโหมดอัตโนมัติ ส่วนการทดลองในครั้งที่ 3 อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง (High Fire)

ภาพที่ 5.3 และ 5.4 เป็นผลการทดลองของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยโหมดอัตโนมัติของครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ การใช้โหมดอัตโนมัติทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 มีค่าไม่เกิน 1100 °C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิของการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

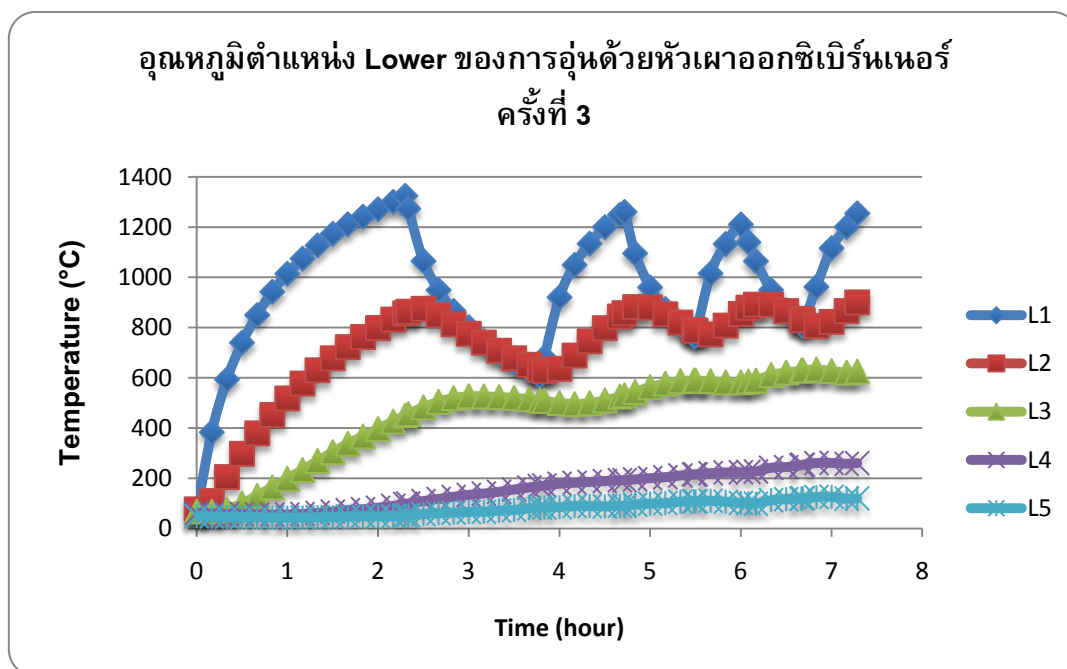
ภาพที่ 5.5 เป็นผลการทดลองของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง ตลอดการทดลอง ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 ประมาณ 1300 °C ซึ่งมากกว่าการทดลองใน 2 ครั้งแรกอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ใช้เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ลดลง โดยเฉพาะในขั้นตอนที่ 1 ที่ใช้เวลาลดลงครึ่งหนึ่ง



ภาพที่ 5.3 อุณหภูมิตำแหน่ง Lower ของการอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1



ภาพที่ 5.4 อุณหภูมิตำแหน่ง Lower ของการอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2



ภาพที่ 5.5 อุณหภูมิตำแหน่ง Lower ของการอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3

5.2 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (Energy consumption)

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์จะใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ส่วนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์จะใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ขั้นตอน ที่	อุ่นด้วยแอร์ เบอร์เนอร์ ครั้งที่ 1 (Litre)	อุ่นด้วยแอร์ เบอร์เนอร์ ครั้งที่ 2 (Litre)	อุ่นด้วยออกซิ เบอร์เนอร์ครั้งที่ 1 (Nm ³)	อุ่นด้วยออกซิ เบอร์เนอร์ครั้งที่ 2 (Nm ³)	อุ่นด้วยออกซิ เบอร์เนอร์ครั้งที่ 3 (Nm ³)
1	322.0	399.9	305.00	316.00	244.77
2	172.5	163.3	94.80	92.22	96.53
3	79.6	105	42.96	49.22	57.75
4	106.6	87.4	55.35	58.81	59.20

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในขั้นตอนที่ 1 จะมากที่สุด ขั้นตอนที่ 2 และ 3 จะลดลงตามลำดับ แต่ในขั้นตอนที่ 4 จะมากกว่าขั้นตอนที่ 3 เพราะต้องอุ่นให้ได้อุณหภูมิมากกว่าขั้นตอนที่ 3 ประมาณ 50 °C ผลการทดลองทั้ง 5 ครั้ง จากการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ 2 ครั้ง จากออกซิเบิร์นเนอร์ 3 ครั้ง มีแนวโน้มการใช้เชื้อเพลิงแบบเดียวกัน

แต่การอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์นั้น ใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ทั้ง 4 ขั้นตอน และเมื่อเปรียบเทียบการอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1-2 กับ ครั้งที่ 3 โดยเฉพาะขั้นตอนที่ 1 จะเห็นว่า ครั้งที่ 3 ใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าอย่างชัดเจน ส่วนในตอนที่ 2-4 นั้นปริมาณการใช้ใกล้เคียงกัน

5.3 สมดุลพลังงาน (Energy balance)

เมื่อนำอุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองมาพิจารณาค่าพลังงานทั้งขาเข้า (Input) และขาออก (Output) โดยมีเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นปริมาตรควบคุม (Control Volume) โดยจะแบ่งผลการคำนวณออกเป็น 2 กรณี คือ การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์และการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ ซึ่ง แต่ละกรณีจะแสดงผลออกเป็น 4 ขั้นตอนตามการทดลองและในรูปของแซงก์ไดอะแกรม โดย แซงก์ไดอะแกรม จะแสดงผลเฉพาะขั้นตอนที่ 1 ของแต่ละการทดลอง เพราะการทดลองในขั้นตอนที่ 1 นั้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้งานจริงมากที่สุด

ผลการทดลองจะแสดงถึงพลังงานความร้อนขาเข้าและพลังงานความร้อนออก ซึ่งพลังงานความร้อนขาเข้าประกอบด้วย ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง ส่วนความร้อนขาออกประกอบด้วยความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียและอื่นๆ ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด และความร้อนสูญเสียจากผิวของฝาปิดและผิวเบ้ารับน้ำเหล็ก พลังงานสะสมในเบ้าหรือเนื้ออิฐ ชั้นเหล็ก (Steel Shell) รวมถึงฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก

เนื่องจากว่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียไม่สามารถคำนวณค่าได้เนื่องจากปัญหาของบริเวณที่วัดออกซิเจนส่วนเกินใหญ่เกินไป ซึ่งก็คือ ช่องเปิดระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กกับฝาปิด ทำให้ไม่สามารถวัดปริมาณออกซิเจนส่วนเกินจากก๊าซเสียที่ถูกต้องได้ จึงได้นำค่าของความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียรวมกับค่าความร้อนสูญเสียอื่นๆ กลายเป็น ความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียและอื่นๆ

5.3.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

พิจารณาที่ความร้อนขาเข้า จะเห็นว่าค่า ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงนั้น เกิดจากการอุ่นเชื้อเพลิงซึ่งก็คือ น้ำมันเตา ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ เพื่อลดความหนืดของน้ำมันเตาลงและทำให้น้ำมันแตกเป็นฝอยขณะฉีดเข้าไปผสมกับอากาศก่อนการเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้การเผาไหม้ดียิ่งขึ้น

พิจารณาที่พลังงานขาออก ผลการทดลองครั้งที่ 1 ความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียและอื่นๆ ในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 55.5% 72.1% 63.3% และ 61% ตามลำดับ พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 36.7% 15% 18% และ 17.2% ตามลำดับ ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 3.5% 5.3% 5.7% และ 8.8% ตามลำดับ ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 2.3% 2.3% 5.2% และ 4.7% ตามลำดับ ส่วนพลังงานตัวอื่นๆ มีค่าดังตารางที่ 5.2 – 5.5

พิจารณาพลังงานขาออก ผลการทดลองครั้งที่ 2 ความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียและอื่นๆ ในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 62.5% 67% 65.4% และ 61.5% ตามลำดับ พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 30.6% 16.1% 13.2% และ 14.2% ตามลำดับ ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 2.6% 2.9% 4.5% และ 7.2% ตามลำดับ ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 2.5% 4.8% 5.3% และ 6.5% ตามลำดับ ส่วนพลังงานตัวอื่นๆ มีค่าดังตารางที่ 5.6 – 5.9

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของความร้อนขาออกในขั้นตอนที่ 1 เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ครั้ง สัดส่วนความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียและอื่นๆ มีค่าเป็น 59% พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าเป็น 33.7%

ตารางที่ 5.2 สมดุลพลังงานของการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 1

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	12593	99.8	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	7002	55.5
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	29	0.2	พลังงานสะสมภายในเป่ารับน้ำเหล็ก	4631	36.7
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	441	3.5
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	105	0.8
			ความร้อนสะสมในฝาเป่ารับน้ำเหล็ก	286	2.3
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	122	1.0
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	36	0.3
รวม	12623	100		12623	100

ตารางที่ 5.3 สมดุลพลังงานของการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 2

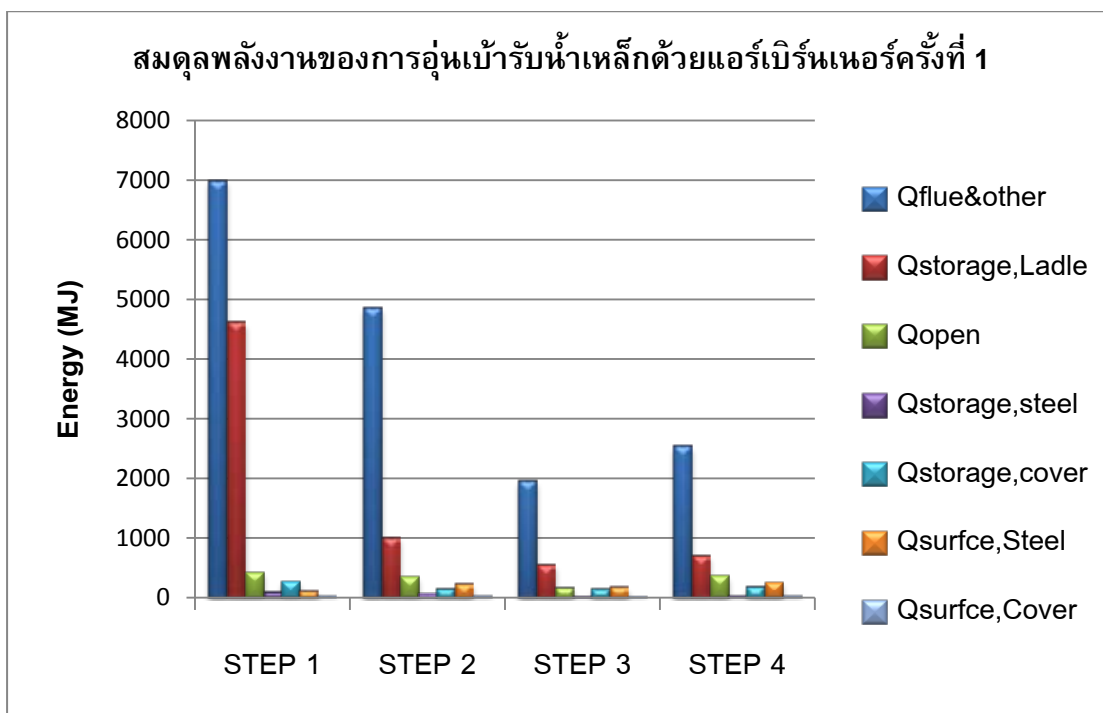
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	6746	99.7	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	4873	72.0
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	18	0.3	พลังงานสะสมภายในเป่ารับน้ำเหล็ก	1014	15.0
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	356	5.3
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	75	1.1
			ความร้อนสะสมในฝาเป่ารับน้ำเหล็ก	153	2.3
			การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	252	3.7
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	40	0.6
รวม	6764	100		6764	100

ตารางที่ 5.4 สมดุลพลังงานของการอุ่นน้ำรับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 3

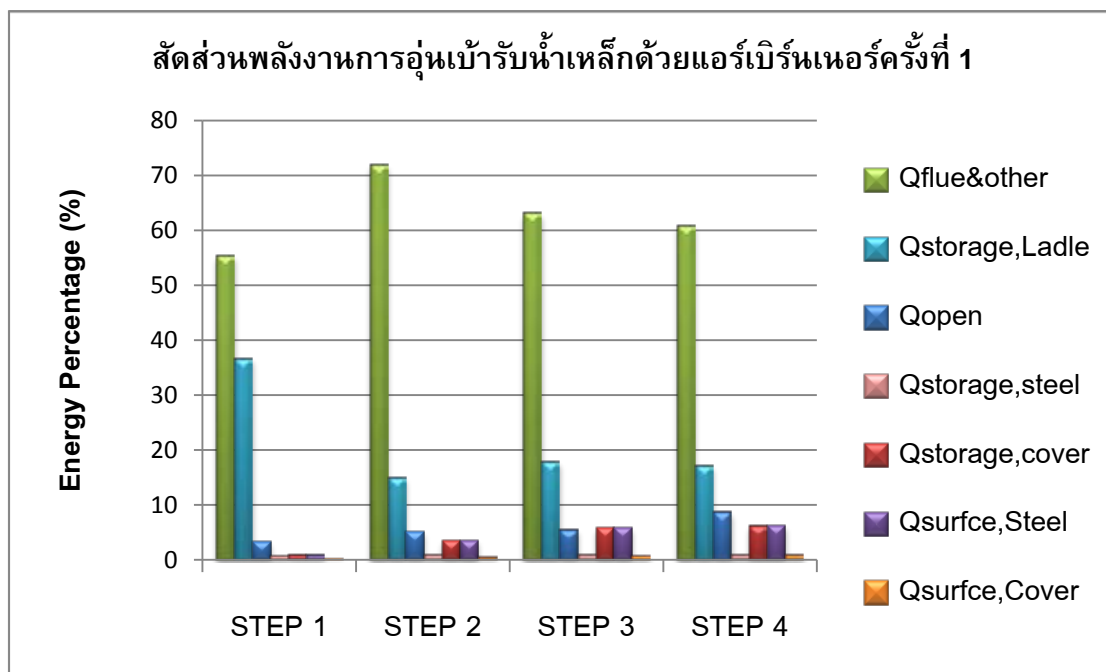
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	3113	99.7	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	1975	63.2
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	9	0.3	พลังงานสะสมภายในน้ำรับน้ำเหล็ก	560	17.9
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	178	5.7
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	32	1.0
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	162	5.2
			การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	187	6.0
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	27	0.9
รวม	3122	100		3122	100

ตารางที่ 5.5 สมดุลพลังงานของการอุ่นน้ำรับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 4

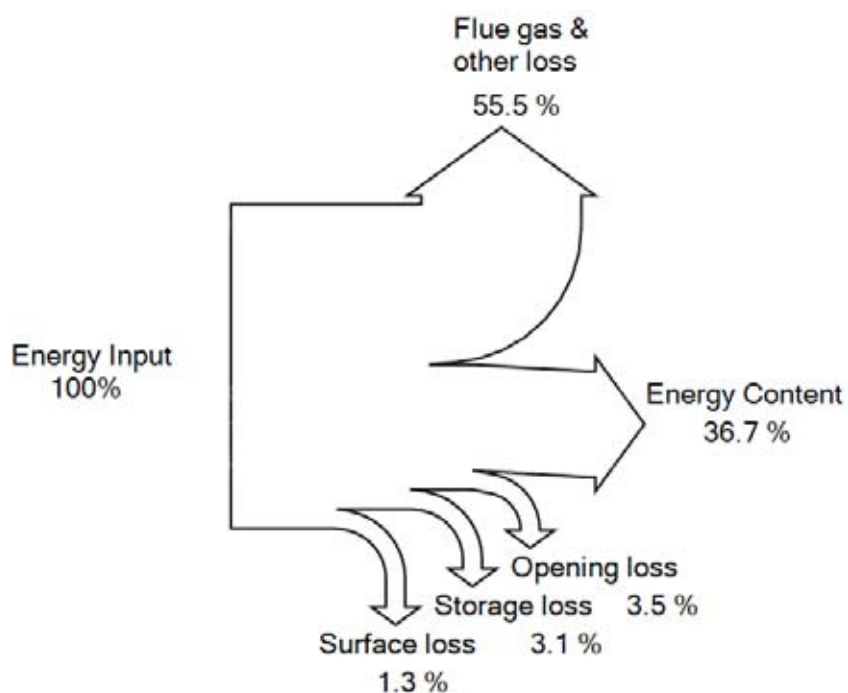
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	4169	99.8	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	2548	61.0
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	10	0.2	พลังงานสะสมภายในน้ำรับน้ำเหล็ก	720	17.2
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	370	8.8
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	40	1.0
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	196	4.7
			การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	266	6.4
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	40	1.0
รวม	4179	100		4179	100



ภาพที่ 5.6 สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1



ภาพที่ 5.7 สัดส่วนพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1



ภาพที่ 5.8 แซงก์ไออะแกรมสมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1
ขั้นตอนที่ 1

ตารางที่ 5.6 สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอนที่ 1

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	15640	99.8	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	9803	62.5
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	36	0.2	พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก	4800	30.6
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี ความร้อนผ่านช่องเปิด	406	2.6
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	134	0.9
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	396	2.5
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	126	0.8
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	11	0.1
รวม	15676	100		15676	100

ตารางที่ 5.7 สมดุลพลังงานของการอุ่นน้ำรับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอนที่ 2

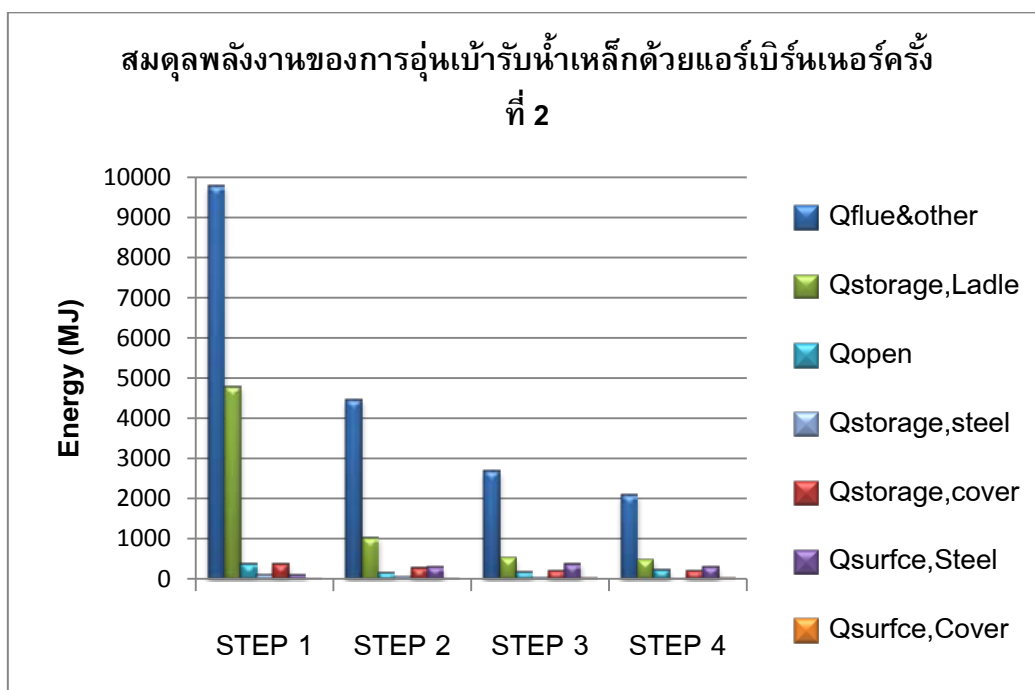
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	6387	99.8	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	4474	69.9
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	17	0.23	พลังงานสะสมภายในน้ำรับน้ำเหล็ก	1033	16.1
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	183	2.9
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	72	1.1
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	308	4.8
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	317	4.9
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	17	0.3
รวม	6403	100		6403	100

ตารางที่ 5.8 สมดุลพลังงานของการอุ่นน้ำรับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอนที่ 3

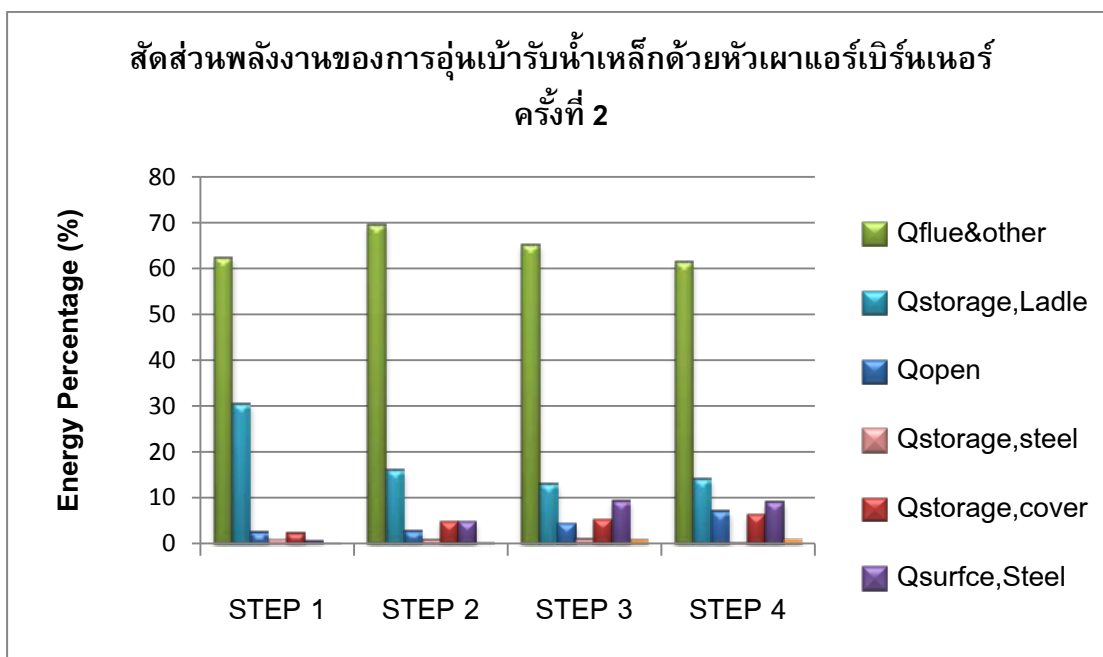
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	4107	99.7	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	2692	65.4
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	12	0.4	พลังงานสะสมภายในน้ำรับน้ำเหล็ก	543	13.2
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	185	4.5
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	48	1.2
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	221	5.4
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	391	9.5
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	36	0.9
รวม	3427	100		4118	100

ตารางที่ 5.9 สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอนที่ 4

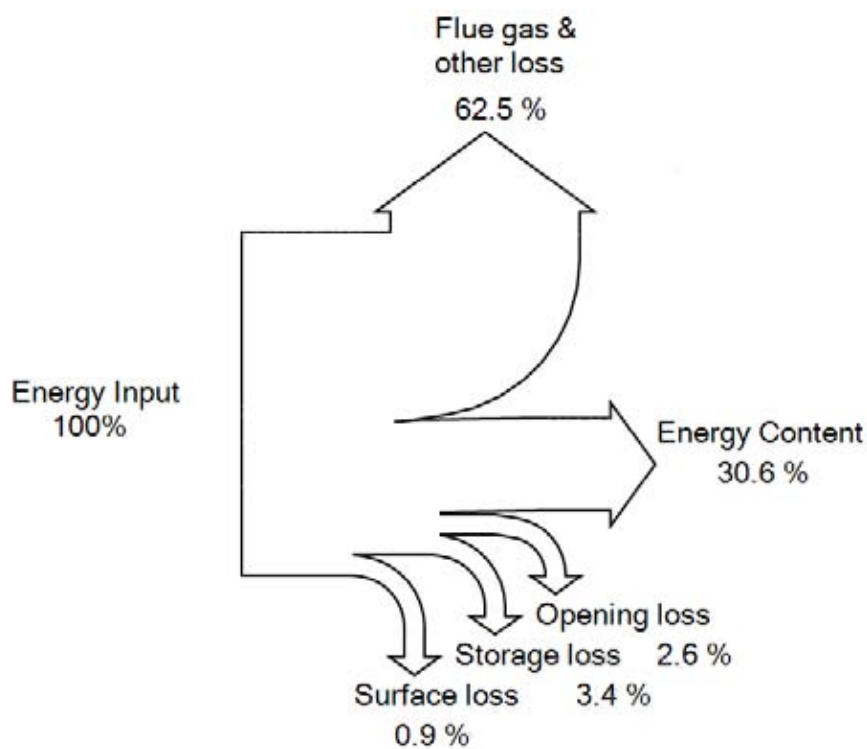
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	3418	99.8	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	2107	61.5
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	8	0.2	พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก	487	14.2
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	247	7.2
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	11	0.3
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	221	6.5
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	321	9.4
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	33	1.0
รวม	3427	100		3427	100



ภาพที่ 5.9 สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2



ภาพที่ 5.10 สัดส่วนพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2



ภาพที่ 5.11 แสงกึ่งไออะแกรมสมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2
ขั้นตอนที่ 1

5.3.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์

พิจารณาพลังงานขาเข้า ประกอบด้วย ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นพลังงานเพียงอย่างเดียวของพลังงานขาเข้า การ อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ จะไม่มีพลังงานจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง โดยผลการทดลองทั้ง 3 ครั้งของความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงมีค่าเป็นศูนย์ พลังงานขาเข้ามีค่าดังตารางที่ 5.10–5.13

พิจารณาพลังงานขาออก ผลการทดลองครั้งที่ 1 ความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสีย และอื่นๆ ในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 30.3% 48.1% 44% และ 55.2% ตามลำดับ พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 56.5% 33.7% 33.2% และ 23.8% ตามลำดับ ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 4% 4.4% 4.7% และ 5% ตามลำดับ ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 4.7% 5.5% 8.2% และ 7.8% ตามลำดับ ส่วนพลังงานตัวอื่นๆ มีค่าดังตารางที่ 5.10 – 5.13

พิจารณาพลังงานขาออก ผลการทดลองครั้งที่ 2 ความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสีย และอื่นๆ ในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 32.6% 34.5% 36.9% และ 42.1% ตามลำดับ พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 56.7% 41.1% 30.4% และ 28.8% ตามลำดับ ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 5.8% 4.4% 6.5% และ 6.8% ตามลำดับ ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 3.5% 7.8% 15.8% และ 12.3% ตามลำดับ ส่วนพลังงานตัวอื่นๆ มีค่าดังตารางที่ 5.14 – 5.17

พิจารณาพลังงานขาออก ผลการทดลองครั้งที่ 3 ความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสีย และอื่นๆ ในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 31.7% 43.9% 53.7% และ 49.9% ตามลำดับ พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 57.5% 36.6% 25.5% และ 26.8% ตามลำดับ ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 5.4% 6% 6.6% และ 6.5% ตามลำดับ ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1-4 มีค่าเป็น 3.5% 6.9% 5.9% และ 6.2% ตามลำดับ ส่วนพลังงานตัวอื่นๆ มีค่าดังตารางที่ 5.18 – 5.11

เมื่อพิจารณาสัดส่วนความร้อนขาออกเป็นค่าเฉลี่ยเฉพาะขั้นตอนที่ 1 ของการทดลอง 3 ครั้ง ความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียและอื่นๆ มีค่าเป็น 31.6% ส่วนพลังงานที่มีสัดส่วนมากที่สุดคือ พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 56.9% กล่าวอีกในหนึ่งคือ ประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์มีค่าเป็น 56.9% ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดมีค่าเป็น 4.3% ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าเป็น 3.9%

ตารางที่ 5.10 สมดุลพลังงานการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 1

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	8760	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	2657	30.3
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเป่ารับน้ำเหล็ก	4948	56.5
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	347	4.0
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	113	1.3
			ความร้อนสะสมในฝาเป่ารับน้ำเหล็ก	408	4.7
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	261	3.0
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	26	0.3
รวม	8760	100		8760	100

ตารางที่ 5.11 สมดุลพลังงานการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 2

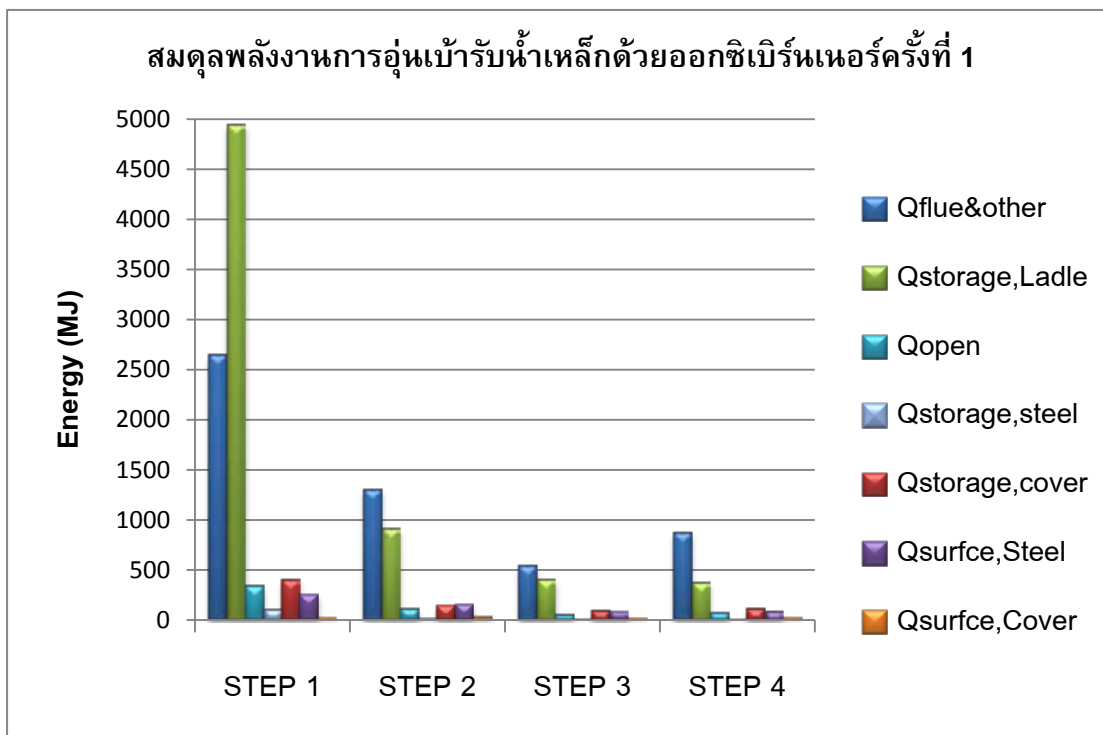
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	2723	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	1310	48.1
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเป่ารับน้ำเหล็ก	918	33.7
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	121	4.4
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	25	0.9
			ความร้อนสะสมในฝาเป่ารับน้ำเหล็ก	149	5.5
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	162	6.0
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	39	1.4
รวม	2723	100		2723	100

ตารางที่ 5.12 สมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 3

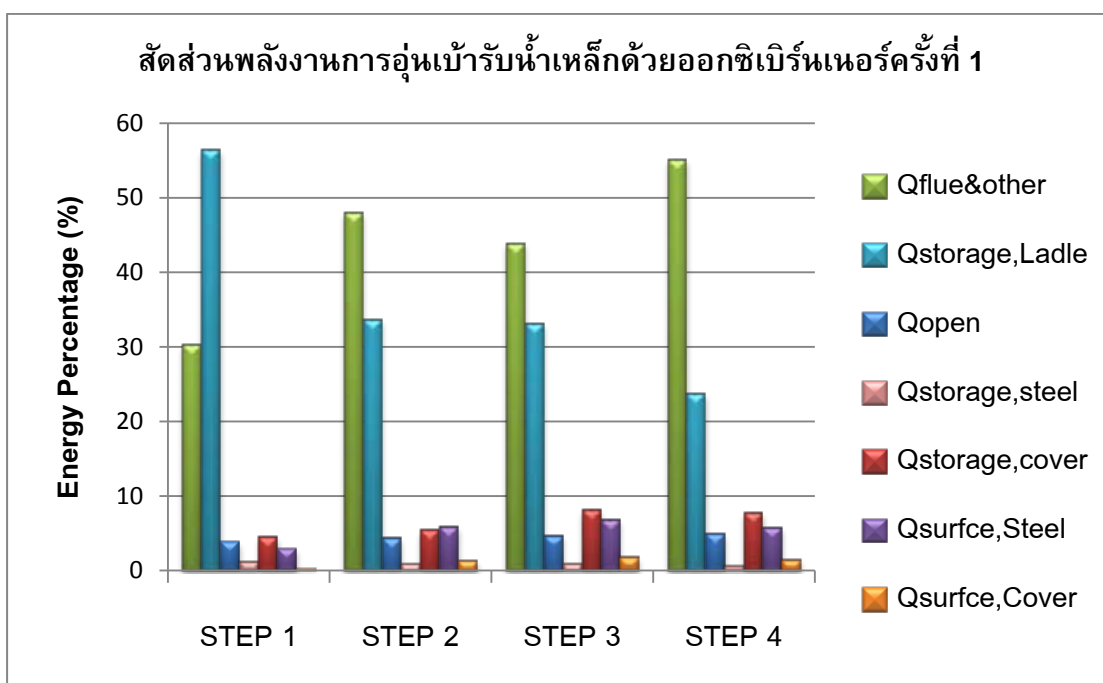
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1234	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	543	44.0
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก	410	33.2
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	58	4.7
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	12	1.0
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	102	8.2
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	86	7.0
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	23	1.9
รวม	1234	100		1234	100

ตารางที่ 5.13 สมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 4

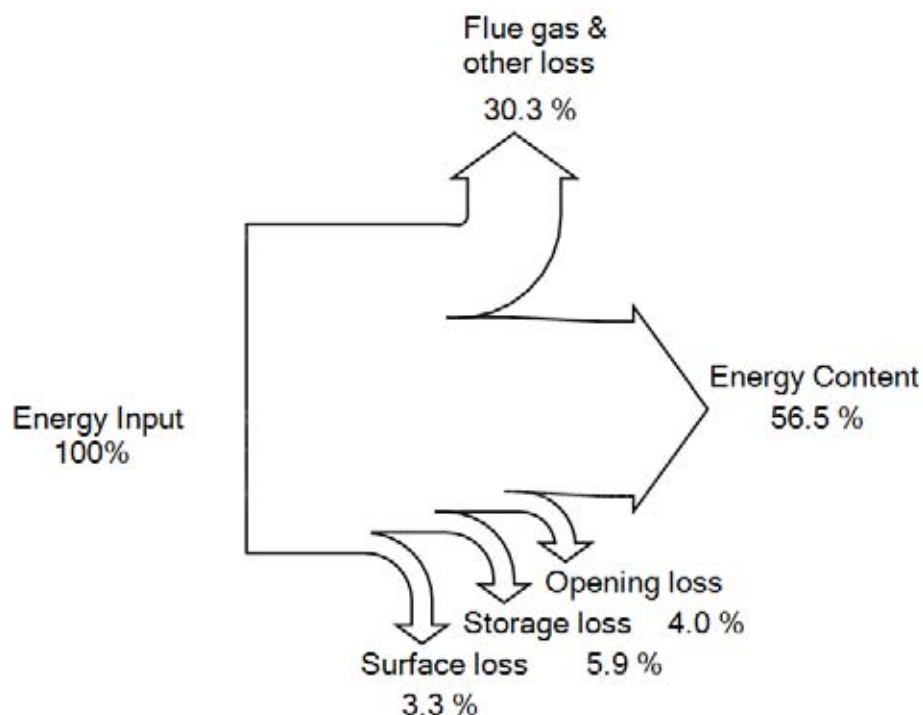
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1590	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	877	55.2
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก	379	23.8
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	80	5.0
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	11	0.7
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	124	7.8
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	94	5.9
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	25	1.6
รวม	1590	100		1590	100



ภาพที่ 5.12 สมดุพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1



ภาพที่ 5.13 สัดส่วนพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1



ภาพที่ 5.14 แซงก์ไออะแกรมสมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 1

ตารางที่ 5.14 สมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอนที่ 1

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	9076	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	2962	32.6
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก	5142	56.7
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	327	3.6
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	113	1.2
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	319	3.5
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	184	2.0
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	28	0.3
รวม	9076	100		9076	100

ตารางที่ 5.15 สมดุลพลังงานการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอนที่ 2

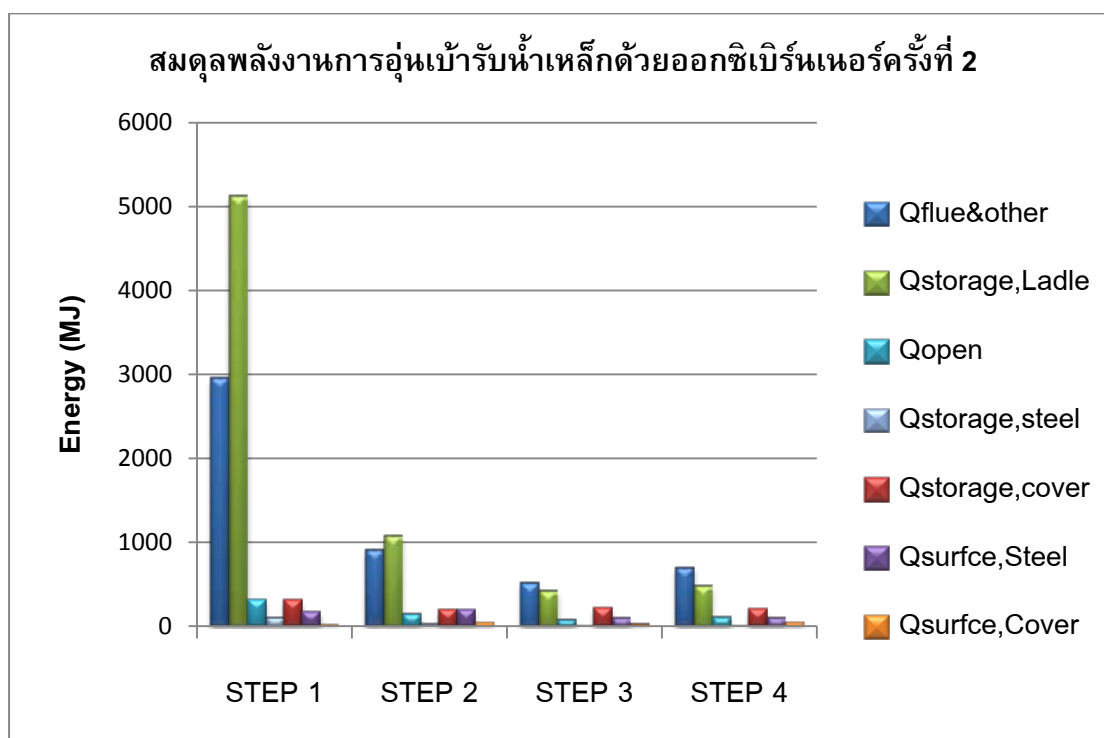
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	2649	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	915	34.5
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเป่ารับน้ำเหล็ก	1090	41.1
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	152	5.7
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	32	1.2
			ความร้อนสะสมในฝาเป่ารับน้ำเหล็ก	207	7.8
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	206	7.8
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	47	1.8
รวม	2649	100		2649	100

ตารางที่ 5.16 สมดุลพลังงานการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอนที่ 3

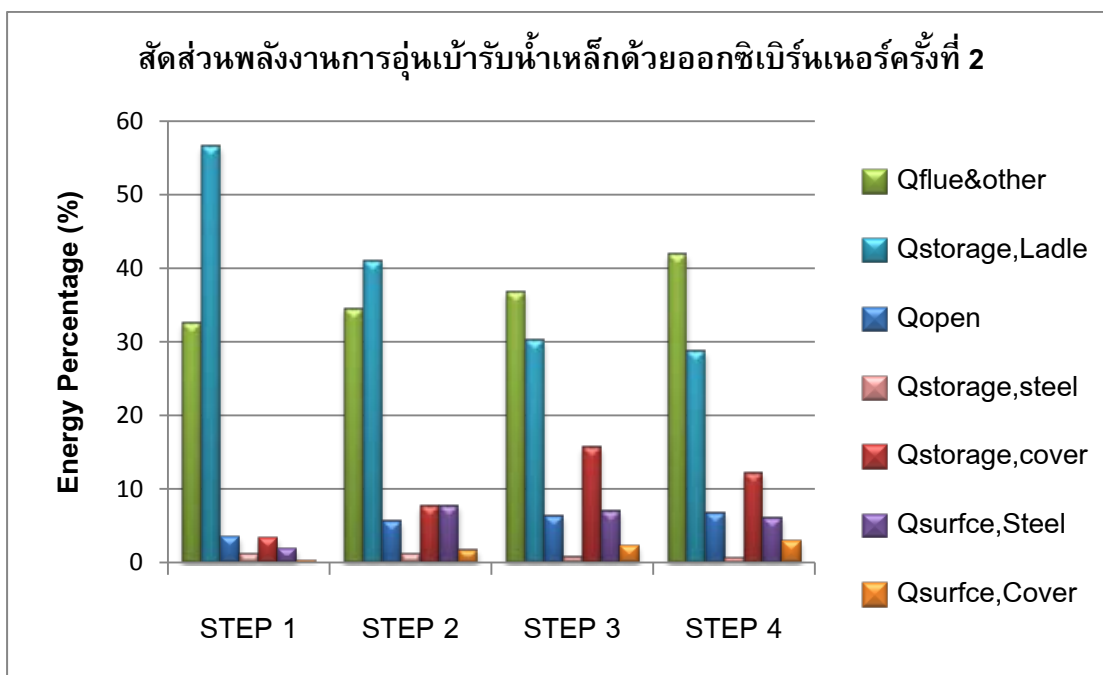
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1414	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	522	36.9
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเป่ารับน้ำเหล็ก	430	30.4
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	91	6.5
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	12	0.8
			ความร้อนสะสมในฝาเป่ารับน้ำเหล็ก	223	15.8
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	101	7.2
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	33	2.4
รวม	1414	100		1414	100

ตารางที่ 5.17 สมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2 ขั้นตอนที่ 4

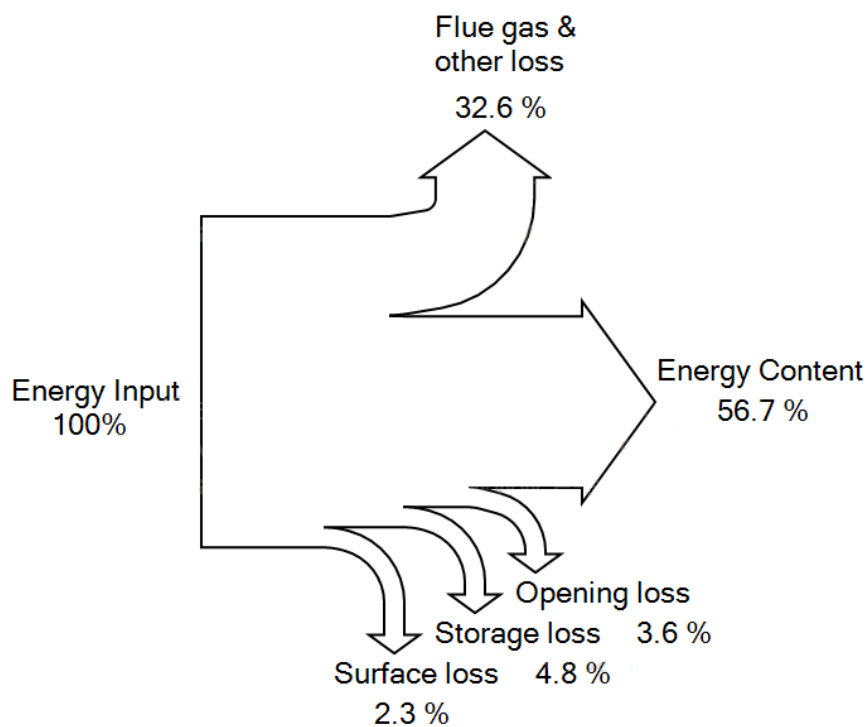
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1689	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	711	42.1
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก	487	28.8
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	116	6.8
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	12	0.7
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	208	12.3
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	105	6.2
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	51	3.0
รวม	1689	100		1689	100



ภาพที่ 5.15 สมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2



ภาพที่ 5.16 สัดส่วนพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2



ภาพที่ 5.17 แชนจ์ไออะแกรมสมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2
ขั้นตอนที่ 1

ตารางที่ 5.18 สมดุลพลังงานการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3 ขั้นตอนที่ 1

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	7030	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	2231	31.7
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเป่ารับน้ำเหล็ก	4040	57.5
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	380	5.4
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	24	0.3
			ความร้อนสะสมในฝาเป่ารับน้ำเหล็ก	243	3.5
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	99	1.4
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	13	0.2
รวม	7030	100		7030	100

ตารางที่ 5.19 สมดุลพลังงานการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3 ขั้นตอนที่ 2

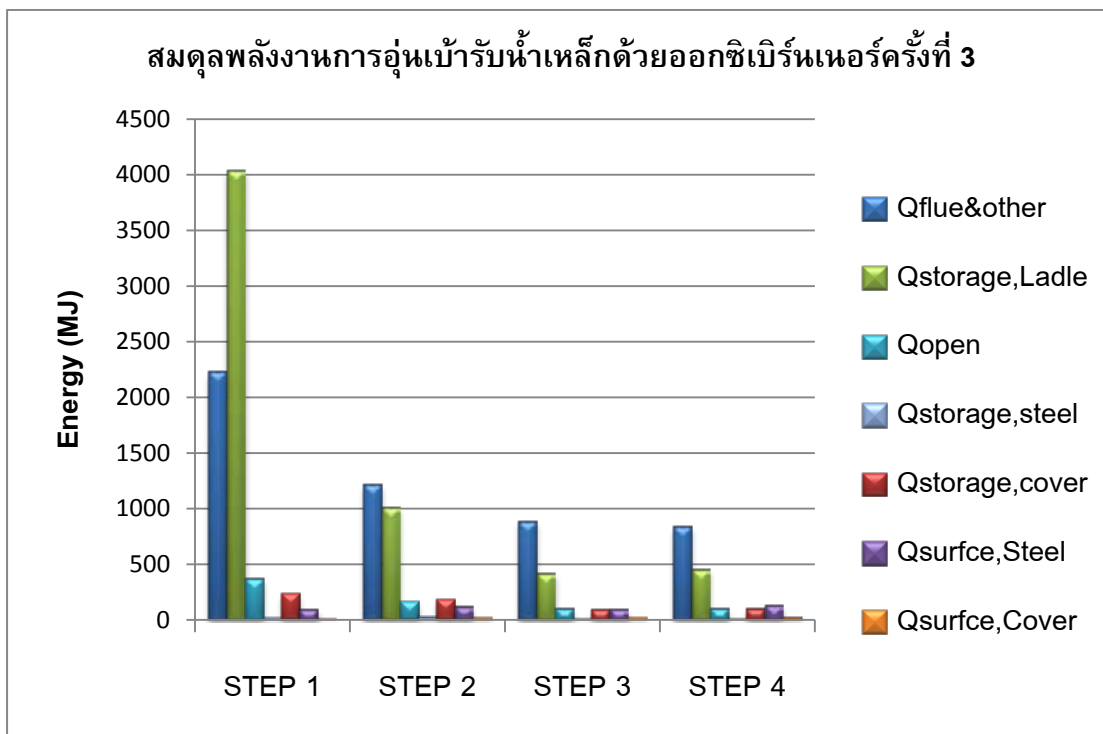
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	2772	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	1218	43.9
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเป่ารับน้ำเหล็ก	1014	36.6
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	166	6.0
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	34	1.2
			ความร้อนสะสมในฝาเป่ารับน้ำเหล็ก	191	6.9
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	123	4.4
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเป่ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	27	1.0
รวม	2772	100		2772	100

ตารางที่ 5.20 สมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3 ชั้นตอนที่ 3

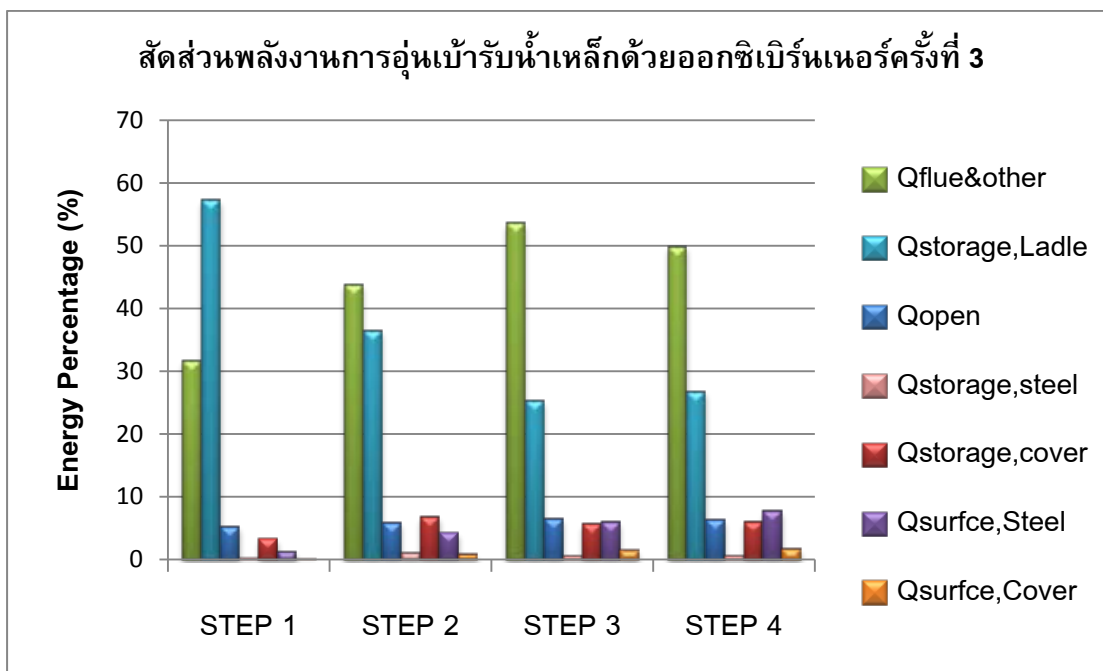
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1659	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	890	53.7
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก	423	25.5
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	109	6.6
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	12	0.7
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	98	5.9
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	101	6.1
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	26	1.5
รวม	1659	100		1659	100

ตารางที่ 5.21 สมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3 ชั้นตอนที่ 4

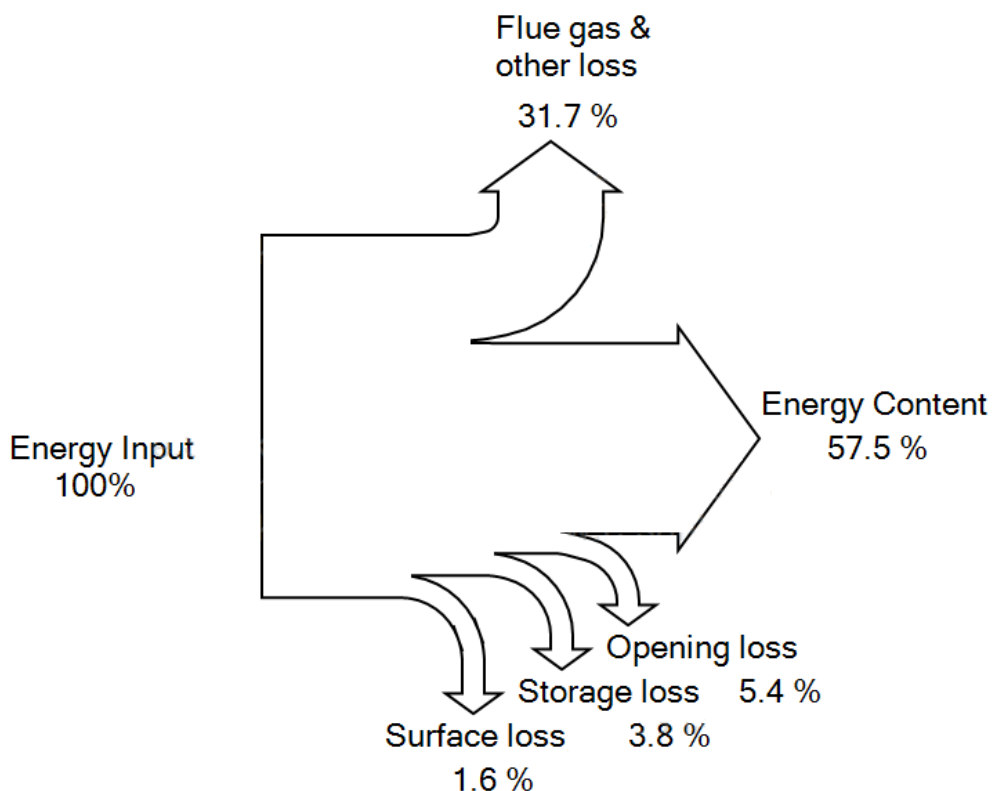
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1700	100	ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ	848	49.9
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	0	0	พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก	456	26.8
			ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด	111	6.5
			ความร้อนสะสมในชั้นเหล็ก	13	0.8
			ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก	105	6.2
			การถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	134	7.9
			การถ่ายเทความร้อนจากฝาของเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	32	1.9
รวม	1700	100		1700	100



ภาพที่ 5.18 สมดุพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3



ภาพที่ 5.19 สัดส่วนพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3



ภาพที่ 5.20 แชนจ์ไออะแกรมสมดุลพลังงานการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3
ขั้นตอนที่ 1

5.4 เวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์จะใช้เวลาในการทดลองประมาณ 8 ชั่วโมง โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนที่ 1 ประมาณ 4 ชั่วโมง ขั้นตอนที่ 2 ประมาณ 2 ชั่วโมง ขั้นตอนที่ 3 ประมาณ 1 ชั่วโมง ขั้นตอนที่ 4 ประมาณ 1 ชั่วโมง ซึ่งการทดลองทั้ง 2 ครั้ง นั้น ใช้เวลาที่ใกล้เคียงกัน

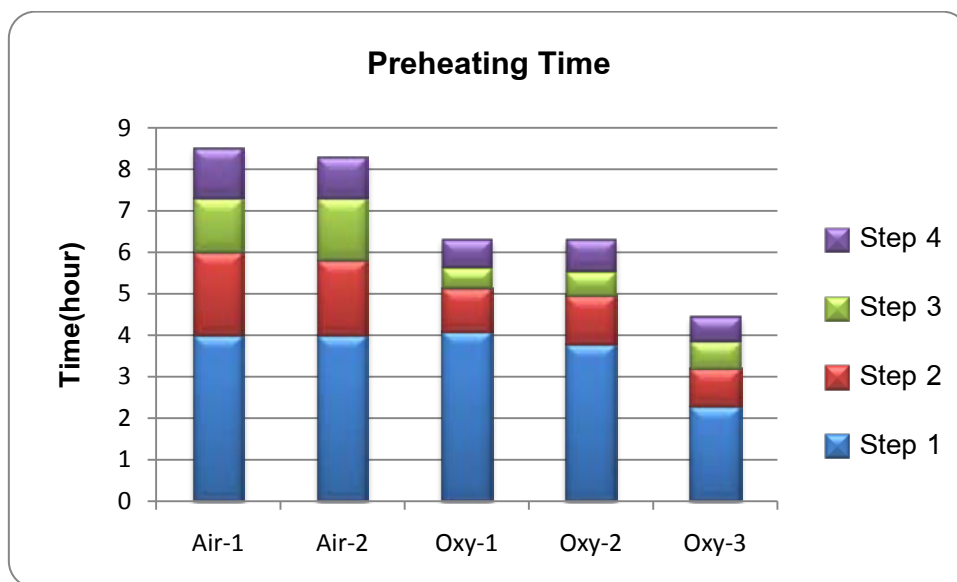
ส่วนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ในครั้งที่ 1 และ 2 ที่ใช้โหมดอัตโนมัติ ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันคือ ใช้เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งหมดประมาณ 6 ชั่วโมง โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนที่ 1 ประมาณ 4 ชั่วโมง ขั้นตอนที่ 2 ประมาณ 1 ชั่วโมง ขั้นตอนที่ 3 ประมาณ 30 นาที ขั้นตอนที่ 4 ประมาณ 40 นาที

แต่การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3 ที่อุ่นแบบอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง ใช้เวลาในการอุ่นทั้งหมดประมาณ 4 ชั่วโมง โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนที่ 1 ประมาณ

2 ชั่วโมง ชั้นตอนที่ 2 ประมาณ 1 ชั่วโมง ชั้นตอนที่ 3 ประมาณ 30 นาที และชั้นตอนที่ 4 ประมาณ 30 นาที

เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์กับออกซิเบิร์นเนอร์ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี กรณีที่ 1 เปรียบเทียบระหว่างแอร์เบิร์นเนอร์กับออกซิเบิร์นเนอร์ที่ใช้โหมดอัตโนมัติ (ออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1 และ 2) จะเห็นว่า การอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ใช้เวลารวมทั้งหมด (4 ชั้นตอน) น้อยกว่าการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ประมาณ 2 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาเวลาในแต่ละชั้นตอนจะเห็นว่า ชั้นตอนที่ 1 จะใช้เวลาใกล้เคียงกัน ส่วนเวลาที่ลดลงนั้นจะมาจากชั้นตอนที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งลดลงไปชั้นตอนละประมาณ 30-40 นาที ส่วนในกรณีที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างแอร์เบิร์นเนอร์กับออกซิเบิร์นเนอร์ที่ใช้โหมดอัตรา การจ่ายเชื้อเพลิงสูง (ออกซิเบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3) จะเห็นว่า การอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ใช้เวลา รวมทั้ง 4 ชั้นตอน น้อยกว่าการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ประมาณ 4 ชั่วโมง โดยเวลาในชั้นตอนที่ 1 ลดลงประมาณครึ่งหนึ่งหรือประมาณ 2 ชั่วโมง ส่วนชั้นตอนที่ 2, 3 และ 4 ลดลงชั้นตอนละ ประมาณ 30-40 นาที



ภาพที่ 5.21 เปรียบเทียบเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์กับออกซิเบิร์นเนอร์

5.5 ปริมาณ NOx ในก๊าซเสีย

ปริมาณของ NOx ที่วัดได้จากก๊าซเสียบริเวณช่องเปิดระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กกับฝาปิด มีค่าดังตารางที่ 5.22 ซึ่งแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลองด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ 2 ครั้ง และค่าเฉลี่ยของการทดลองด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ 3 ครั้ง

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีปริมาณ NOx เป็น 65.5 ppm ส่วนการอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์มีปริมาณ NOx เป็น 1107.9 ppm ส่วนค่าของคาร์บอนมอนนอกไซด์ มีค่าใกล้เคียงกันทั้งการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์และออกซิเบิร์นเนอร์

ตารางที่ 5.22 ปริมาณของ CO และ NOx ที่วัดได้จากก๊าซเสีย

COMPONENT	AIR BURNER	OXY BURNER	UNIT
CO	1172.65	1036.68	ppm
NOx	65.50	1107.90	ppm

บทที่ 6

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้การทดลองแบ่งออกเป็น 2 กรณี กรณีที่ 1 เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง โดยทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง กรณีที่ 2 เป็นการอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 และ 2 เป็นการอุ่นด้วยโหมดอัตโนมัติ การทำงานของโหมดอัตโนมัติสามารถเปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง (High fire) เป็นอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำ (Low fire) ส่วนครั้งที่ 3 เป็นการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงตลอดการทดลอง

การวิเคราะห์จะแบ่งเป็น การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ และการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ ซึ่งในกรณีของออกซิเบิร์นเนอร์ จะแบ่งการวิเคราะห์ในโหมดอัตโนมัติกับโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงเพื่อให้เห็นความแตกต่างกัน

และจะพิจารณาในลักษณะของเบ้าเย็น (Cold ladle) กับเบ้าร้อน สำหรับเบ้าเย็น คือ การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 1 ส่วนเบ้าร้อน เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนที่ 2 – 4 โดยค่าความร้อนต่างๆ ของเบ้าร้อนจะเป็นการใช้ค่าเฉลี่ยของขั้นตอนที่ 2-4

6.1 อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง Lower (L1 – L5)

6.1.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

การทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ทั้ง 2 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 5.1 และ 5.2 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง L1 อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงเร็วที่สุด เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวอยู่ใกล้แหล่งความร้อนมากที่สุด ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Fourier's law ก็คือการถ่ายเทความร้อนแปรผกผันกับระยะทางจากแหล่งความร้อน ซึ่งตำแหน่งของ L1 มีระยะใกล้กับแหล่งความร้อนมากที่สุด ทำให้มีอุณหภูมิสูงที่สุดนั่นเอง ส่วนตำแหน่ง L2 ซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในเนื้อของอิฐทนไฟ มีระยะทางจากแหล่งความร้อนมากกว่าจึงมีอุณหภูมิต่ำกว่า แต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับตำแหน่ง L1

ช่วงเวลาที่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 และ L2 จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเมื่อหยุดอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กอุณหภูมิก็จะลดลง กราฟของอุณหภูมิที่ได้จึงมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็น 4 ช่วง ตามรูปแบบการทดลองที่มี 4 ขั้นตอน

ส่วนอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L3 L4 และ L5 นั้น อุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้แต่ในช่วงที่หยุดอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก อุณหภูมิก็ยังเพิ่มขึ้น แตกต่างจาก ตำแหน่ง L1 และ L2 ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุ่นเบ้าและลดลงเมื่อหยุดอุ่นเบ้า เนื่องจากเวลาที่หยุดอุ่นน้อยเกินไป คือเวลาที่หยุดอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 และ L2 ยังมีค่ามากกว่าที่ L3 L4 และ L5 ดังนั้นจึงยังมีการถ่ายเทความร้อนจากตำแหน่ง L1 และ L2 ไปสู่ตำแหน่ง L3 L4 และ L5 ทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

จากภาพที่ 5.1 และ 5.2 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 ซึ่งเป็นตัวแทนของอุณหภูมิผิวอิฐทนไฟ มีค่าเข้าใกล้ 1200°C และมีแนวโน้มคงที่ แสดงว่าด้วยอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง (Firing rate) นี้จะทำให้อิฐทนไฟมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1200°C ดังนั้นถ้าใช้เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนานเพียงพอ จะทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 L3 L4 และ L5 มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น เพราะความร้อนจะกระจายตัวออกไปตามอิฐทนไฟ แต่ในทางปฏิบัติหรือการใช้งานจริงนั้น ต้องการให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L2 มีค่าประมาณ $800 - 900^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น ไม่จำเป็นต้องให้อิฐมีอุณหภูมิสูงสุดหรือเท่ากันทั่วทั้งก้อน ซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

ในการทดลองครั้งที่ 1 ก่อนการทดลองเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิประมาณ 125°C แต่ในการทดลองครั้งที่ 2 มีอุณหภูมิเริ่มต้นการอุ่นเบ้าประมาณ 39°C สาเหตุที่การทดลองครั้งที่ 1 มีอุณหภูมิก่อนการทดลองมากกว่าการทดลองครั้งที่ 2 นั้นเนื่องจากว่าในการทดลองครั้งที่ 1 เบ้ารับน้ำเหล็กเป็นเบ้าใหม่ (Cold ladle) ซึ่งต้องมีการก่ออิฐทนไฟใหม่ จึงต้องมีการอุ่นเบ้าเพื่อให้เนื้ออิฐประสานกันหรือยึดกันเสียก่อน โดยจะต้องอุ่นเบ้าในแนวตั้งเท่านั้น ป้องกันไม่ให้อิฐร่วงหรือหล่นเมื่อนำเบ้ามาอุ่นในแนวนอนซึ่งเป็นการอุ่นก่อนใช้งานจริง

โดยทั่วไปการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นนิยมอุ่นในแนวนอนเพราะจะทำให้เบ้าได้รับความร้อนได้ดีกว่าการอุ่นในแนวตั้ง เนื่องจากการอุ่นในแนวตั้ง ความร้อนจะลอยขึ้นด้านบนและไหลออกปากเบ้าออกสู่ภายนอก ทำให้อิฐได้รับความร้อนไม่เต็มที่ แต่ถ้าอุ่น เบ้าในแนวนอน ความร้อนลอยขึ้นด้านบน ซึ่งเป็นบริเวณด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดแนว ก่อนจะไหลออกบริเวณปากเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้เบ้ารับน้ำเหล็กได้รับความร้อนได้มากกว่าการอุ่นแนวตั้ง

ในการทดลองครั้งที่ 1 ขั้นตอนที่ 2 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 นั้นไม่ได้เพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง เหมือนการทดลองครั้งที่ 2 ในขั้นตอนเดียวกัน แต่อุณหภูมิจะคงที่ที่ประมาณ 1000°C เนื่องจากขณะทดลองได้มีการเปิดใช้งานเครื่องอุ่นเบ้าอีกตัว ซึ่งต่อท่อเชื้อเพลิงและอากาศร่วมกัน ทำให้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงน้อยกว่าปกติ ทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 ในขั้นตอนนี้น้อยกว่าขั้นตอนอื่นๆ

ในขั้นตอนที่ 2 และ 3 แนวโน้มอุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 จะมีค่าใกล้เคียงกับขั้นตอนที่ 1 แต่ในขั้นตอนที่ 4 อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 จะมีค่ามากกว่าขั้นตอนที่ 1 เล็กน้อย เนื่องจากว่า ขั้นตอนนี้ เราต้องการให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งอ้างอิงหรือ L2 มีค่ามากกว่าขั้นตอนอื่นๆ ประมาณ 50°C เพื่อจำลองขั้นตอนการอุ่นเบียร์รับน้ำเหล็กจนมีอุณหภูมิมากกว่าที่ต้องการ

6.1.2 การอุ่นเบียร์รับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์

การทดลองของการอุ่นเบียร์รับน้ำเหล็กครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ด้วยโหมดอัตโนมัติ นั้น ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ การอุ่นเบียร์รับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ในโหมดอัตโนมัติทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 มีค่าไม่เกิน 1100°C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของการอุ่นด้วยแอร์เบรินเนอร์ เพื่อให้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ยังอยู่ในเงื่อนไขเดียวกัน ก็คือ เพื่อให้การทดลองอุ่นเบียร์ด้วยแอร์เบรินเนอร์หรือออกซิเบรินเนอร์ มีแหล่งความร้อนที่ให้กับเบียร์รับน้ำเหล็กมีค่าใกล้เคียงกัน

จากภาพที่ 5.3 ขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิตำแหน่ง L1 มีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นช่วงๆ เนื่องจากว่าการตั้งระบบควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงในโหมดอัตโนมัตินั้นเอง จึงเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึงที่ตั้งไว้ (ในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรกใช้ อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง (High fire = 1000°C) อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำ (Low fire = 800°C) ระบบก็จะเปลี่ยนมาใช้ อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำแทน อุณหภูมิจึงลดลง แต่ในช่วงชั่วโมงที่ 3 ของการทดลองก็มีการตั้งค่าอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงใหม่ โดยให้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงเป็น 1100°C อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำเป็น 1000°C ทำให้ชั่วโมงที่ 3-4 มีอุณหภูมิสูงขึ้น และความแตกต่างของอุณหภูมิช่วงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงและต่ำจึงลดลง

จากภาพที่ 5.4 ขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิตำแหน่ง L1 มีลักษณะคล้ายกับการทดลองครั้งที่ 1 ในช่วงเวลาชั่วโมงที่ 3-4 คือ อุณหภูมิในช่วงของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงกับต่ำมีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่แตกต่างกัน

ส่วนการทดลองครั้งที่ 3 อุ่นเบียร์ด้วยอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงตลอดการทดลอง ดังภาพที่ 5.5 อุณหภูมิที่ตำแหน่ง L1 มีค่าสูงสุดประมาณ 1300°C สูงกว่าการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ประมาณ 200°C เวลาในการอุ่นเบียร์รับน้ำเหล็กจึงน้อยลง

การอุ่นเบียร์รับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ มีอุณหภูมิเปลวที่สูงกว่า ทำให้เวลาที่ใช้ในการอุ่นเบียร์น้อยลง จากภาพที่ 5.21 ในขั้นตอนที่ 1 การอุ่นเบียร์ด้วยแอร์เบรินเนอร์ใช้เวลาอุ่นเบียร์ใกล้เคียงกันกับการอุ่นด้วยออกซิเบรินเนอร์ด้วยโหมดอัตโนมัติ แต่การอุ่นเบียร์รับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบรินเนอร์ครั้งที่ 3 ใช้เวลาดลดลงประมาณ 50% เนื่องจากการอุ่นด้วยออกซิเบรินเนอร์

ครั้งที่ 3 นี้ให้อุณหภูมิเปลวที่สูงกว่าและต่อเนื่องมากกว่า จึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนไปที่ตำแหน่ง L2 ซึ่งเป็นตำแหน่งอ้างอิงหรือตำแหน่งที่เป็นตัวกำหนดการทดลองที่มากกว่า เวลาที่ใช้อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจึงลดลง

เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอุ่นในขั้นตอนที่ 2 3 และ 4 แล้ว การอุ่นด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ทั้ง 3 ครั้งใช้เวลาใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ การอุ่น เบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ ใช้เวลาน้อยกว่าประมาณ 50% ซึ่งเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการปฏิบัติงานในโรงงานเป็นอย่างยิ่ง

6.2 สมดุลพลังงาน (Energy balance)

ผลการทดลองจะแสดงถึงพลังงานความร้อนขาเข้า (Input) และพลังงานความร้อนขาออก (Output) ซึ่งพลังงานความร้อนขาเข้าประกอบด้วย ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง ส่วนความร้อนขาออกประกอบด้วยความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด และความร้อนสูญเสียจากผิวของเบ้าและฝา อีกส่วน นหนึ่งเป็นพลังงานสะสมที่เบ้ารับน้ำเหล็กหรือเนื้ออิฐทนไฟตัวถัง (Steel Shell) รวมถึงฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยเราจะให้ความสนใจที่ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ และความร้อนสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นหลัก

6.2.1 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

ด้านพลังงานขาเข้ามี 2 ส่วนคือ พลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นพลังงานหลัก และพลังงานที่ได้จากการอุ่นน้ำมันเตาก่อนการเผาไหม้ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง พลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในขั้นตอนที่ 1 หรือเบ้าเย็น (Cold ladle) มีค่ามากที่สุด เนื่องจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิต่ำ เพราะไม่ได้ผ่านการใช้งานหรืออุ่นมาก่อน ดังนั้นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจนกระทั่งได้อุณหภูมิที่กำหนด จึงใช้เชื้อเพลิงมากกว่าขั้นตอนอื่นๆ ส่วนขั้นตอนที่ 2 3 และ 4 หรือการอุ่นเบ้าร้อน (Hot ladle) พลังงานที่ใช้จะลดลงตามลำดับเพราะมีพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กอยู่ส่วนหนึ่ง และพลังงานสะสมเพิ่มก็จะน้อยลง

เมื่อพิจารณาแยกตามขั้นตอนการทดลอง ขั้นตอนที่ 2 มีอุณหภูมิเริ่มต้นการอุ่นที่สูงกว่าขั้นตอนที่ 1 จึงใช้พลังงานน้อยกว่า ขั้นตอนที่ 3 ก็เช่นเดียวกัน คือ มีอุณหภูมิเริ่มต้นการอุ่นที่สูงกว่าขั้นตอนที่ 2 เพราะการหยุดอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กของขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลา 30 นาที ขั้นตอนที่ 3 ใช้เวลา 20 นาที เวลาที่หยุดน้อยกว่าอุณหภูมิจึงยังสูงกว่า ทำให้ขั้นตอนต่อไปใช้

พลังงานน้อยกว่านั่นเอง แต่ในขั้นตอนที่ 4 กำหนดให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งอ้างอิงมากกว่าในขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนนี้จึงใช้พลังงานมากกว่านั่นเอง

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของความร้อนขาออก จะเห็นว่า ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ เป็นสัดส่วนที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความร้อนตัวอื่นๆ ซึ่งมีค่าประมาณ 60–70% เนื่องจากว่า การเผาไหม้แบบใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับเชื้อเพลิงนั้นพลังงานจะถูกพาออกไปพร้อมกับไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศ ทำให้พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งเป็นพลังงานใช้ประโยชน์ มีค่าน้อย

กรณีการอุ่นเบ้าเย็น มีพลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กประมาณ 33.6% ซึ่งมากกว่าการอุ่นเบ้าร้อนซึ่งมีพลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กประมาณ 15.6% เนื่องจากว่า เบ้าร้อนมีพลังงานสะสมมาจากการใช้งานหรือผ่านการอุ่นมาก่อนแล้ว จึงทำให้ เบ้าร้อนมีพลังงานสะสมเพิ่มน้อยลง เมื่อการอุ่นเบ้าร้อนมีพลังงานสะสมในเบ้าเพิ่มน้อยลง จึงทำให้มีพลังงานสูญเสียไปกับก๊าซเสียเพิ่มมากขึ้นตามทฤษฎีการอนุรักษ์พลังงาน การอุ่นเบ้าเย็นมีความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ ประมาณ 59% เบ้าร้อนมีความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ ประมาณ 65.5% ดังตารางที่ 6.2

ส่วนความร้อนสูญเสียที่สำคัญอีกอย่าง คือ ความร้อนสูญเสีย บริเวณช่องเปิด ซึ่งมีอุณหภูมิที่สูงเพราะเป็นบริเวณที่ก๊าซเสียถูกปล่อยออกมาจากเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดเวลา ขณะที่อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้ความร้อนที่แผ่ออกไปมีค่าสูงด้วย และมีอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้ความร้อนสูญเสียคือ พื้นที่ของช่องเปิดนั่นเอง ยิ่งช่องเปิดมีพื้นที่มาก ความร้อนสูญเสียยิ่งจะมากตามไปด้วย ดังนั้น เมื่อมีเหตุการณ์ที่ทำให้ต้องหยุดอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก การปิดฝาเบ้า รับน้ำเหล็กจะช่วยลดพลังงานสูญเสียลงได้ หรือถ้าต้อง มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ก็จะทำให้ลดการใช้พลังงานลงได้

ตารางที่ 6.1 ค่าเฉลี่ยสมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

AVG AIR BURNER	STEP 1		STEP 2		STEP 3		STEP 4	
	MJ	%	MJ	%	MJ	%	MJ	%
ENERGY INPUT								
Fuel	14117	99.77	6567	99.74	3610	99.72	3794	99.75
Sensible heat of fuel	33	0.23	17.31	0.26	10.13	0.32	9.37	0.22
ENERGY OUTPUT								
Flue gas & other loss	8403	59.00	4674	70.96	2333	64.31	2328	61.23
Ladle storage	4715	33.65	1024	15.56	552	15.57	604	15.72
Opening loss	424	3.04	270	4.06	182	5.11	308	8.02
Steel shell storage	119	0.84	74	1.12	40	1.11	25	0.64
Cover storage	341	2.40	230	3.53	192	5.29	209	5.57
Steel shell surface loss	124	0.89	284	4.33	289	7.74	293	7.86
Cover surface loss	23	0.18	29	0.43	32	0.88	36	0.96

ความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็กถือว่าเป็นความร้อนสูญเสียเช่นกัน ที่ด้านในของฝาเบ้ารับน้ำเหล็กได้รับความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ถึงแม้จะไม่ใช้บริเวณที่เปลวพุ่งเข้าหาแต่ก็อยู่ใกล้กับช่องเปิดที่ก๊าซเสียไหลผ่านซึ่งมีอุณหภูมิที่สูง จึงทำให้ฝาเบ้ารับน้ำเหล็กมีความร้อนสะสมที่ฝาด้วย โดยมีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับ ความร้อนสูญเสียที่ช่องเปิด เมื่อเปรียบเทียบกับความร้อนสะสมในเบ้าหรือที่กันเบ้ารับน้ำเหล็ก ถือว่ามีค่าน้อยกว่ามาก เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซเสียมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิเปลว จึงทำให้อุณหภูมิที่สะสมที่ฝาเบ้ามีค่าน้อยกว่า

ส่วนพลังงานสูญเสียตัวอื่นๆ เช่น ความร้อนสูญเสียช่องเปิดและความร้อนสะสมในฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก พลังงานสูญเสียที่ผิว ของเบ้ารับน้ำเหล็กและผิวของฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก มีการสูญเสียที่น้อยกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ และพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก เพราะบริเวณผิวของฝาและตัวเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากระยะทางอยู่ไกลจากแหล่งความร้อนมากกว่า ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Fourier's law และเมื่ออุณหภูมิผิวมีค่าน้อยจึงทำให้การสูญเสียความร้อนมีค่าน้อยด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

ตารางที่ 6.2 ค่าเฉลี่ยสมดุลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์เมื่อพิจารณาแบบเบ้าเย็นกับเบ้าร้อน

AVG AIR BURNER	COLD LADLE		HOT LADLE	
ENERGY INPUT	MJ	%	MJ	%
Fuel	14117	99.77	4657	99.74
Sensible heat of fuel	33	0.23	12	0.27
ENERGY OUTPUT				
Flue gas & other loss	8403	59.00	3112	65.50
Ladle storage	4715	33.65	726	15.62
Opening loss	424	3.04	253	5.73
Steel shell storage	119	0.84	46	0.95
Cover storage	341	2.40	210	4.80
Steel shell surface loss	124	0.89	289	6.65
Cover surface loss	23	0.18	32	0.76

6.2.2 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์

เมื่อพิจารณาพลังงานขาเข้า จากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง จะเห็นว่าความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ไม่มีการอุ่นเชื้อเพลิงหรือก๊าซธรรมชาติ เพราะก๊าซธรรมชาติมีสถานะเป็นก๊าซซึ่งมีความหนืดน้อย จึงไม่จำเป็นต้องอุ่น เหมือนกับการทดลองที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงซึ่งน้ำมันเตามีสถานะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงกว่าก๊าซ จึงจำเป็นต้องให้ความร้อนกับน้ำมันเตาเพื่อลดความหนืดและเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้ดีขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ ออกซิเบิร์นเนอร์ในโหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง ดังตารางที่ 6.4 จะเห็นว่า การอุ่นเบ้าด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ในโหมดอัตโนมัติสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 41% อุ่นเบ้าด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ในโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 50% เมื่อเปรียบเทียบกับ การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ เนื่องจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ ทำให้เปลวมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีเสถียรภาพมากขึ้น จึงทำ

ให้ความร้อนถ่ายเทจากแหล่งความร้อนสู่อิวทไฟหรือที่ตำแหน่งอ้างอิงได้มากกว่า และความ
ร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียก็ลดลงทำให้มีความร้อนใช้ประโยชน์มากขึ้น ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจึง
น้อยลง

ซึ่งจะเห็นว่าในกรณีเป่าเย็น การอุ่นเป่า ใช้น้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ใน
โหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงสามารถประหยัดได้มากกว่าโหมดอัตโนมัติเนื่องจากการอุ่นเป่า
ด้วยโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงเป็นการอุ่นที่ให้อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1300°C) อย่าง
ต่อเนื่อง แต่การอุ่นด้วยโหมดอัตโนมัติจะควบคุมให้อุณหภูมิที่ผิวอิฐทนไฟ (ประมาณ 1100°C)
เป็นไปตามที่กำหนด โดยสลับให้เป็นโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงกับต่ำ ทำให้ช่วงเวลาที่เป่า
โหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำ จะทำให้อุณหภูมิในเป่ารับน้ำเหล็กลดลง ซึ่งเป็นการสูญเสีย
พลังงาน จึงทำให้ต้องใช้พลังงานในการอุ่นมากขึ้น

กรณีเป่าร้อน (Hot Ladle) การอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ในโหมด
อัตโนมัติสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 58% โหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงสามารถ
ประหยัดพลังงานได้ประมาณ 56% ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากว่าการอุ่นเป่าร้อนใช้เวลา
ในการอุ่นน้อยกว่าอุ่นเป่าเย็น การอุ่นเป่าด้วยโหมดอัตโนมัติจึงมี เฉพาะช่วงของอัตราการจ่าย
เชื้อเพลิงสูง ยังไม่ถึงเงื่อนไขให้สลับมาที่โหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงต่ำ ก็ทำให้เป่ารับน้ำเหล็ก
มีอุณหภูมิตามที่กำหนด นั่นหมายความว่าการทำงานก็จะเหมือนกับการอุ่นด้วยโหมดเผาไหม้
สูง ดังนั้นการใช้เชื้อเพลิงหรือการประหยัดพลังงานจึงใกล้เคียงกัน

ส่วนความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ จากการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กด้วยออก
ซิเบิร์นเนอร์มีค่าลดลง เนื่องมาจากปริมาณของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาเผาไหม้
ของเชื้อเพลิงกับตัวออกซิไดซ์ลดลง ซึ่งไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซเสีย เมื่อ
ปริมาณไนโตรเจนลดลง ปริมาณของก๊าซเสียก็ลดลงด้วย ความร้อนที่ถูกพาออกไปกับก๊าซเสียก็
มีสัดส่วนที่ลดลงตามไปด้วยเช่นกัน ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.3 การประหยัดพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์เทียบกับออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง

ENERGY CONSUMPTION				ENERGY SAVING					
STEP	AIR	OXY (AUTO)	OXY (HIGH FIRE)	AIR		OXY (AUTO)		OXY (HIGH FIRE)	
	MJ	MJ	MJ	MJ	%	MJ	%	MJ	%
1	14149	8288	7030	-	-	5861	41%	7120	50%
2	6584	2715	2772	-	-	3869	59%	3812	58%
3	3620	1435	1659	-	-	2185	60%	1961	54%
4	3803	1660	1700	-	-	2143	56%	2103	55%

ตารางที่ 6.4 การประหยัดพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

ENERGY SAVING		
	COLD LADLE	HOT LADLE
AIR-OXY(AUTO)	41%	58%
AIR-OXY(HIGH FIRE)	50%	56%

กรณีเบ้าเย็นหรือในขั้นตอนที่ 1 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ จากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีค่าประมาณ 59% ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติมีค่าประมาณ 31% และโหมดเผาไหม้สูงมีค่าประมาณ 32% ดังตารางที่ 6.6

กรณีเบ้าร้อนหรือในขั้นตอนที่ 2-4 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ จากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีค่าประมาณ 65% ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติมีค่าประมาณ 43% และโหมดเผาไหม้สูงมีค่าประมาณ 49% ตามลำดับ ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.5 ความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียและอื่นๆ ของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง

FLUE GAS & OTHER LOSS			
STEP	AIR	OXY(AUTO)	OXY(HIGH FIRE)
1	59%	31%	32%
2	71%	41%	44%
3	64%	40%	54%
4	61%	49%	50%

ตารางที่ 6.6 ความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียและอื่นๆ ของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงของเบ้าเย็นและร้อน

FLUE GAS & OTHER LOSS		
	COLD LADLE	HOT LADLE
AIR	59%	65%
OXY(AUTO)	31%	43%
OXY(HIGH FIRE)	32%	49%

เมื่อปริมาณความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียลดลง จึงมีความร้อนใช้ประโยชน์มากขึ้น คือ มีปริมาณของพลังงานที่สะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กมากขึ้น เมื่อเทียบกับการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ ดังตารางที่ 6.7

พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กกรณีเบ้าเย็นหรือขั้นตอนที่ 1 ของการอุ่นเบ้าด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีค่าประมาณ 34% ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติมีค่าประมาณ 57% โหมดเผาไหม้สูงมีค่าประมาณ 57% ตามลำดับ ดังตารางที่ 6.8 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดเผาไหม้สูงมีพลังงานที่สะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากัน เนื่องจากการอุ่นเบ้าร้อนใช้เวลาในการอุ่นน้อยกว่าอุ่นเบ้าเย็น การอุ่นเบ้าด้วยโหมดอัตโนมัติจึงมีเฉพาะช่วงของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ในกรณีเบ้าร้อน พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีค่าประมาณ 16% ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติมีค่าประมาณ 31% และโหมดเผาไหม้สูงมีค่าประมาณ 30% จะเห็นว่า การอุ่นเบ้าด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดเผาไหม้สูงมีพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กใกล้เคียงกัน เหตุผลเช่นเดียวกับการอุ่นเบ้าเย็น

ดังนั้น การอุ่นเบ้า ด้วยออกซิเบิร์นเนอร์มีพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กในสัดส่วนที่มากกว่าการอุ่นเบ้าด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ ทั้งกรณีของเบ้าเย็นและเบ้าร้อน

ตารางที่ 6.7 พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตโนมัติการจ่ายเชื้อเพลิงสูง

ENERGY CONTENT			
STEP	AIR	OXY(AUTO)	OXY(HIGH FIRE)
1	34%	57%	57%
2	16%	37%	37%
3	16%	30%	25%
4	16%	26%	27%

พลังงานสูญเสียตัวอื่นๆ เช่น ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด ความร้อนสูญเสียผ่านผิวฝาและเบ้ารับน้ำเหล็ก เป็นต้น มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียและอื่นๆ มีค่าดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.8 พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ ออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตโนมัติการจ่ายเชื้อเพลิงสูงของเบ้าเย็นและร้อน

ENERGY CONTENT		
	COLD LADLE	HOT LADLE
AIR	34%	16%
OXY(AUTO)	57%	31%
OXY(HIGH FIRE)	57%	30%

ตารางที่ 6.9 ค่าสมมูลพลังงานของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ ออกซิเบิร์นเนอร์ โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง

AVERAGE	COLD LADLE			HOT LADLE		
	AIR	OXY (AUTO)	OXY (HIGH FIRE)	AIR	OXY (AUTO)	OXY (HIGH FIRE)
ENERGY INPUT	%	%	%	%	%	%
Fuel	99.77	100	100	99.74	100	100
Sensible heat of fuel	0.23	0	0	0.27	0	0
ENERGY OUTPUT						
Flue gas & other loss	59.00	31.51	31.74	65.50	43.36	49.17
Ladle storage	33.65	56.58	57.46	15.62	31.84	29.63
Opening loss	3.04	3.78	5.41	5.73	5.57	6.36
Steel shell storage	0.84	1.26	0.34	0.95	0.89	0.91
Cover storage	2.40	4.08	3.46	4.80	9.68	6.33
Steel shell surface loss	0.89	2.50	1.41	6.65	6.65	6.14
Cover surface loss	0.18	0.30	0.18	0.76	2.02	1.46

6.3 ปริมาณ NOx ในก๊าซเสีย

ปริมาณของ NOx ที่วัดได้จากก๊าซเสียที่ปล่อยออกมาบริเวณช่องเปิดระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กกับฝาปิด มีค่าดังตารางที่ 5.22

ตามทฤษฎีแล้ว ค่า NOx ที่ได้จากการอุ่นเบ้าด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ต้องมีค่าน้อยกว่าการอุ่นเบ้าด้วยแอร์เบิร์นเนอร์เพราะว่าการอุ่นเบ้าด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ไม่มีปริมาณของไนโตรเจนในตัวออกซิไดซ์เลย เนื่องจากใช้ออกซิเจนเข้มข้น 100% ดังนั้นจึงไม่ควรปรากฏ NOx ออกมา หรือ อาจจะมีเนื่องจากเชื้อเพลิงหรือก๊าซธรรมชาติ เพราะในก๊าซธรรมชาติมีองค์ประกอบที่เป็นไนโตรเจนด้วย แต่มีปริมาณไม่มาก

แต่จากผลการทดลองที่ได้ ปรากฏว่าค่า NOx ของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีค่าประมาณ 65.5 ppm ส่วนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์มีค่าประมาณ 1107.9 ppm ซึ่งถือว่ามีค่ามากกว่ามาก

สาเหตุมาจากขณะที่ทำการทดลอง มีอากาศส่วนหนึ่งได้ไหลเข้าไปภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้เกิด NOx ขึ้น และการอุ่นเบ้าด้วยออกซิเบิร์นเนอร์นั้น ให้อุณหภูมิเปลวที่สูงกว่า ด้วยสาเหตุนี้ยังทำให้เกิด NOx ได้มากขึ้น

โดยอากาศที่ไหลเข้าไปในเบ้ารับน้ำเหล็กส่วนใหญ่ จะเข้าที่ด้านล่างของช่องเปิดระหว่างเบ้ากับฝาปิดเพราะที่ด้านบนจะเป็นบริเวณที่ก๊าซเสียไหลออกไปด้านนอก การแก้ไขปัญหานี้คือ ใช้ฉนวนกันความร้อนปิดที่บริเวณด้านล่างของช่องเปิดนี้คิดเป็นพื้นที่ประมาณครึ่งหนึ่งของช่องเปิดทั้งหมด แต่ก็ไม่สามารถป้องกันไม่ให้อากาศไหลเข้าไปได้ 100% ดังนั้นจึงมีปริมาณ NOx เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอุ่นด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย

7.1 สรุปผลการวิจัย

7.1.1 การอุ่นเบ้าเย็น (ขั้นตอนที่ 1)

1) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติ สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 41% โหมดการเผาไหม้สูงสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 50% เมื่อเปรียบเทียบกับ การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

2) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ ประมาณ 59% การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงมีความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ ประมาณ 30%

3) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีพลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กประมาณ 34% การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง มีพลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กประมาณ 57%

7.1.2 การอุ่นเบ้าร้อน (ขั้นตอนที่ 2 – 4)

1) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 58% และโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง 56% เมื่อเทียบกับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์

2) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูงมีความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ ประมาณ 46% ส่วนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียและอื่นๆ ประมาณ 65%

3) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์โหมดอัตโนมัติและโหมดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงสูง มีพลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กประมาณ 30% ส่วนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์มีพลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กประมาณ 16%

7.2 ข้อเสนอแนะ

1) การเลือกชนิดของเทอร์มอคัปเปิล (Thermocouple) ต้องเหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ช่วงของอุณหภูมิ ขนาด ซึ่งต้องให้แน่ใจว่าสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แตกต่างกันมากๆ ได้ โดยที่เทอร์มอคัปเปิลยังอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้

2) การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิล ต้องให้แน่ใจว่าอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการหรือไม่ เพราะถ้าหากว่าตำแหน่งติดตั้งคาดเคลื่อนไป จะทำให้ได้อุณหภูมิที่คาดเคลื่อนไป ซึ่งจะส่งผลต่อการคำนวณค่าพลังงานได้

3) การวัดก๊าซเสียควรเลือกตำแหน่งหรือบริเวณที่จะวัดให้มีความเหมาะสมโดยไม่มีออกซิเจนจากภายนอกเข้าเครื่องตรวจวัด เพราะจะทำให้ไม่สามารถตรวจวัดค่าออกซิเจนส่วนเกินได้

4) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์ ระยะของฝาปิดจะน้อยกว่าของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ หรือประมาณ 10 เซนติเมตร หรือใช้ฉนวนกันความร้อนปิดช่องเปิดบริเวณครึ่งล่างของช่องร่วมด้วย จะสามารถป้องกันไม่ให้อากาศไหลเข้าได้ดียิ่งขึ้น เพราะถ้าระยะของฝาปิดมากกว่าที่กำหนดนี้ จะทำให้อากาศภายนอกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำไหลเข้าไปในเบ้ารับน้ำเหล็ก ส่งผลให้ต้องใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้าในปริมาณที่มากขึ้น และยังส่งผลให้เกิด NOx เพิ่มขึ้นอีกด้วย หรือใช้การควบคุมความดันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กให้สูงกว่าภายนอกเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศไหลเข้าไปนั่นเอง

5) เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกไหลเข้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งอาจทำให้เกิด NOx ได้ ควรปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กให้สนิทแล้วทำช่องให้ก๊าซเสีย (Flue gas) ไหลออกตามท่อที่ทำขึ้นโดยเฉพาะ

รายการอ้างอิง

- [1] Slavejkov, A.G, Zurecki Z, Joshi, M.L, Nabors K.J. Method and apparatus for oxy-fuel heating with lowered NOx in high temperature corrosive environments. U.S. Patent 5,346,390 Sep 13, 1994 : 6-9.
- [2] Joshi, L.M., Jurcik, J.B., Simon, J.F. Oxidizing oxygen-fuel burner firing for reducing NOx emissions from high temperature furnaces. U.S. Patent 5,954,498 Sep 21, 1999 : 1,4.
- [3] Battles, D. D. Ladle heating system. U.S. Patent 4,223,873 Sep 23, 1980 : 1,5.
- [4] จักรวรุช จรุงธรรมกุล, พงษ์ธร จริญญากรณ์. การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถึงถ่ายนำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5 (2552): 1.
- [5] Magnusson, Klas B. O. Ladle Preheater. U.S. Patent 4,394,566 Jul 19, 1983 : 1,3.
- [6] มโน จันทร์กระจ่าง, พงษ์ธร จริญญากรณ์. การอนุรักษ์พลังงานในการอุ่นเข้ารับนำเหล็กขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 (ตุลาคม 2553): 1.
- [7] Mohanty B. and Satayayut, J. Dynamic Model for Ladle Preheater Performance Evolution. International Journal of Energy Research. Vol. 16, 1992 : 51-60.
- [8] Zimmer, A., Lima, A Trommer, R.M., Braganca, C.A. and Bergmann, C.P. Heat Transfer in Steelmaking Process. Journal of Iron and Steel Research (2008) : 11-14, 60.
- [9] Charles E. Baukal, Jr. OXYGEN-ENHANCED COMBUSTION. N.W., Boca Raton, Florida, 33431 : CRC Press LLC, 1998.
- [10] Wales, J. Standard conditions for temperature and pressure. USA : Wikipedia foundation, 2010.
- [11] Stephen R, Turns. An introduction to combustion. singapore : McGraw-Hill, 2000.
- [12] Incropera, Dewitt, Bergman, Lavine. Introduction to heat transfer. 5. USA: John Wiley & Sons Pte Ltd, 2007.
- [13] Richard E. Sonntag, Claus Borgnakke, Gordon J. Van Wylen. Fundamentals of thermodynamics. USA : John Wiley & Sons, 2003.
- [14] National Certificate Examination for EnergyManagers and Energy Auditors, Guide Book 4: Energy Performance Assessment for Equipment and Utility Systems, Chapter 2: Furnaces, National Productivity Council of India, 2006.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อุณหภูมิต่าง ๆ ในกาารอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ตารางที่ ก-1 การอุ่นเข้รับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
11:54:35	62.0	73.1	73.9	55.6	56.2	105.6	80.3	65.1	77.2	62.9	407.5
12:04:35	415.6	117.6	75.5	54.2	56.2	429.7	131.7	65.7	76.8	62.7	431.5
12:14:35	531.0	182.5	89.2	53.2	56.3	562.6	214.1	78.9	76.3	62.7	424.9
12:24:35	609.3	231.9	110.5	52.3	56.6	662.3	284.9	101.2	75.9	62.6	424.0
12:34:35	627.4	275.3	133.7	52.6	56.7	697.5	345.4	127.2	75.6	62.2	435.5
12:44:35	649.2	310.3	157.4	53.7	56.9	730.3	391.4	153.7	75.9	62.0	444.3
12:54:35	675.6	341.4	179.5	55.3	57.2	764.5	430.3	178.8	76.7	62.2	479.2
13:04:35	700.7	370.6	200.8	58.3	57.7	795.6	465.5	204.0	78.0	62.2	487.6
13:14:35	754.3	400.4	221.5	63.1	58.3	853.6	499.7	228.2	80.1	61.9	504.4
13:24:35	789.9	432.9	241.8	68.2	59.2	892.8	535.8	251.1	82.8	62.3	507.4
13:34:35	816.6	464.4	262.3	74.4	61.6	921.8	569.6	272.7	86.1	62.9	513.0
13:44:35	842.6	494.3	283.0	82.1	63.4	948.9	600.6	296.7	90.2	63.9	520.3
13:54:35	863.0	522.3	303.4	88.7	65.0	969.7	629.0	317.0	95.0	64.6	532.3
14:04:35	882.6	548.6	323.3	95.8	67.3	988.9	654.9	338.4	100.4	66.1	524.3

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
14:14:35	901.5	573.1	342.7	102.9	70.3	1007.3	678.9	358.7	106.2	67.3	534.8
14:24:35	919.0	596.7	361.7	116.7	72.6	1023.7	701.4	382.1	112.7	68.2	541.0
14:34:35	933.5	618.4	380.2	125.8	76.0	1036.9	721.8	401.5	119.5	70.5	533.9
14:44:35	948.8	638.4	398.2	137.7	78.7	1051.4	741.0	426.7	126.8	71.7	534.9
14:54:35	961.7	656.8	415.4	146.1	83.0	1063.2	758.3	441.9	134.3	75.6	538.8
15:04:35	971.6	673.6	431.9	152.7	86.9	1072.8	774.8	457.7	142.0	78.8	545.6
15:14:35	979.9	689.5	447.7	161.5	90.9	1080.5	790.1	473.4	149.8	81.9	547.8
15:24:35	988.6	704.5	462.8	172.1	94.6	1088.5	804.4	489.6	157.8	84.9	547.2
15:34:35	996.4	718.7	477.3	179.7	98.7	1095.4	817.7	503.1	165.8	88.2	538.0
15:44:35	1002.7	732.4	491.3	189.2	102.9	1100.7	830.4	517.7	174.1	91.8	543.8
15:54:35	1008.0	744.9	504.7	198.3	108.1	1105.3	842.2	530.9	182.4	95.8	538.8
15:54:55	1008.2	745.3	505.2	198.6	108.3	1105.4	842.5	531.3	182.7	95.9	543.8
16:04:35	807.3	747.8	517.6	210.7	112.4	900.4	840.9	546.3	190.9	98.5	407.5
16:14:35	708.4	721.0	528.0	221.9	116.2	789.8	802.4	557.9	199.1	102.9	543.8
16:24:35	644.1	686.9	532.8	229.6	120.5	715.2	758.0	560.5	207.4	106.3	275.2
16:34:35	598.2	653.7	531.8	240.2	119.8	661.4	716.9	560.4	215.7	109.6	230.5

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
16:44:35	561.2	623.2	526.9	248.9	123.4	618.3	680.3	554.6	223.9	113.3	229.2
16:54:35	530.0	596.0	519.8	255.3	127.2	582.1	648.1	545.4	231.8	117.5	214.1
16:56:50	524.3	590.3	518.1	256.1	127.7	575.5	641.5	542.7	233.6	118.4	187.9
17:04:35	724.0	578.7	511.3	258.5	130.7	777.4	632.1	533.1	239.3	121.3	464.5
17:14:35	831.4	596.5	503.8	265.4	135.1	902.1	667.2	525.1	246.3	124.7	506.8
17:24:35	874.7	626.3	502.2	267.7	138.1	957.0	708.6	521.6	252.6	129.1	472.3
17:34:35	849.1	651.6	506.3	267.0	142.0	937.4	739.9	522.7	258.2	133.2	454.5
17:44:35	836.5	665.6	513.2	269.5	144.2	927.7	756.8	529.9	263.3	136.2	450.8
17:54:35	825.2	673.5	520.7	271.6	147.2	918.4	766.7	537.8	268.2	139.8	421.7
18:04:35	820.1	675.1	527.2	273.8	149.9	913.6	768.6	545.5	272.7	142.8	476.0
18:14:35	854.6	681.8	532.5	276.7	152.3	950.7	777.9	552.1	277.1	145.7	476.5
18:24:35	854.5	692.7	537.9	281.6	154.3	952.4	790.6	560.4	281.4	148.5	467.6
18:34:35	855.4	701.3	544.1	281.7	157.9	953.9	799.8	562.9	285.8	151.8	459.8
18:44:35	852.6	708.6	550.1	283.7	160.6	951.1	807.1	569.8	290.0	154.0	461.1
18:54:35	851.1	714.2	556.3	288.0	162.4	949.4	812.5	577.5	294.3	156.0	458.4
18:57:30	852.8	715.4	558.1	289.6	162.3	951.1	813.7	580.5	295.6	156.9	464.7

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
19:04:35	776.5	717.8	562.1	291.0	164.4	854.5	815.5	582.7	298.5	159.2	283.7
19:14:35	702.5	703.0	566.7	292.6	165.2	741.0	791.5	586.1	302.5	161.2	228.7
19:24:35	647.1	677.1	568.3	295.0	167.9	673.0	755.0	586.5	306.8	163.4	223.9
19:30:25	523.5	661.2	567.2	298.3	169.0	645.8	734.0	588.2	309.3	164.4	213.4
19:34:45	572.8	649.7	565.6	300.2	169.7	628.6	719.0	587.2	310.9	165.6	202.7
19:44:35	638.5	629.5	560.2	303.4	171.5	704.1	693.8	581.3	315.0	167.3	201.3
19:54:35	697.2	631.1	553.7	305.5	172.5	807.8	696.2	573.1	318.9	169.4	424.1
20:04:35	756.3	646.8	549.9	306.6	173.6	903.7	723.4	566.1	322.6	170.9	451.9
20:14:35	808.5	669.2	550.0	307.6	175.8	952.9	756.5	565.9	325.5	173.2	465.1
20:24:35	840.8	691.2	553.9	308.1	177.5	983.3	785.3	570.2	328.5	175.3	470.1
20:34:35	864.6	711.5	560.3	307.8	179.0	1004.1	809.4	575.7	331.0	176.7	482.0
20:39:00	871.6	719.9	563.6	307.8	178.6	1006.9	818.9	578.4	332.1	177.8	483.5
20:44:35	806.0	728.0	568.0	308.3	179.3	873.2	827.1	581.0	333.3	178.8	480.6
20:54:35	718.4	717.3	575.9	311.3	180.6	751.1	805.9	587.6	335.4	181.7	276.0
21:01:30	677.9	700.4	579.2	313.4	181.9	698.6	781.4	590.3	337.1	182.3	236.7
21:04:35	698.2	692.3	579.8	313.9	182.4	772.0	770.4	591.9	337.7	182.4	224.9

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
21:14:35	801.8	687.0	579.2	317.1	184.2	928.2	770.0	596.1	339.8	183.1	429.4
21:24:35	858.6	707.1	578.9	315.6	184.1	989.9	798.7	593.3	342.2	185.2	498.4
21:34:35	896.7	731.3	582.2	315.3	184.7	1026.4	827.2	597.3	344.5	185.5	508.5
21:44:35	928.2	754.7	588.6	316.6	186.7	1049.4	851.8	602.3	346.8	187.6	522.3
21:54:35	951.9	776.1	596.9	317.3	187.8	1064.5	872.5	608.3	348.9	189.1	523.7
22:04:35	966.8	795.3	606.5	318.1	189.2	1077.5	890.6	617.2	351.1	190.2	529.4
22:14:35	982.5	812.7	616.4	321.4	190.3	1090.9	906.0	629.2	353.2	190.9	548.5
22:15:55	991.6	815.0	617.8	322.0	190.5	1092.6	908.1	630.8	353.6	191.2	557.0

	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
11:54:34	125.4	79.2	62.4	49.8	36.5	105.0	86.1	88.1	68.0	41.6
12:04:34	461.6	121.0	62.1	46.7	35.4	351.6	121.0	88.4	67.9	40.1
12:14:34	646.8	200.8	72.6	44.9	35.1	507.9	189.6	97.6	67.8	39.3
12:24:34	750.3	277.9	93.3	45.1	33.7	617.3	258.2	116.7	67.5	38.5
12:34:34	787.3	343.3	120.1	46.1	32.7	681.4	319.2	141.4	67.2	38.0
12:44:34	823.8	394.5	147.7	45.2	31.4	726.5	370.0	168.2	67.2	37.4
12:54:34	859.6	437.3	173.8	45.5	30.1	766.1	412.8	194.6	67.3	36.5
13:04:34	890.3	475.1	200.3	47.0	29.5	800.8	450.6	220.4	67.4	36.5
13:14:34	943.0	510.3	225.6	47.9	29.1	842.8	485.4	245.1	67.8	35.6
13:24:34	977.7	546.0	249.7	50.7	28.8	878.5	519.3	268.8	68.0	35.7
13:34:34	1004.8	579.3	272.2	62.3	30.4	908.8	551.4	291.7	68.5	34.9
13:44:34	1027.8	609.8	296.7	67.9	31.3	935.0	581.2	314.3	69.3	35.5
13:54:34	1047.3	637.4	317.2	70.9	31.4	957.7	608.7	336.2	70.3	34.7
14:04:34	1065.0	662.5	338.6	76.7	32.0	978.1	634.3	357.5	71.7	35.4
14:14:34	1080.7	685.6	358.7	76.2	32.0	996.9	658.2	378.2	73.3	35.4

	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
14:24:34	1093.6	707.2	382.5	84.7	33.9	1013.2	680.7	398.4	75.4	35.6
14:34:34	1104.2	727.1	401.8	91.4	36.1	1027.3	701.9	417.8	77.6	37.3
14:44:34	1114.5	745.6	424.5	101.4	39.6	1040.3	721.6	436.8	80.4	39.5
14:54:34	1123.9	762.5	441.2	109.1	41.8	1052.3	739.9	455.0	83.2	42.6
15:04:34	1131.8	778.6	456.9	114.0	43.0	1063.6	757.4	472.6	86.3	44.0
15:14:34	1140.0	793.3	472.3	120.8	44.6	1074.4	773.8	489.4	89.4	46.1
15:24:34	1146.2	807.1	490.0	130.0	46.9	1083.7	789.5	505.7	92.9	48.0
15:34:34	1152.1	820.1	503.2	136.1	48.0	1092.8	804.3	521.5	96.9	48.3
15:44:34	1158.1	832.3	516.5	141.7	50.1	1101.4	818.4	536.6	101.0	49.8
15:54:56	1162.8	844.2	530.4	148.3	51.6	1109.8	832.3	551.9	105.3	51.7
16:04:34	954.9	847.7	547.2	159.3	54.0	976.7	839.1	565.0	109.3	55.2
16:14:34	838.8	817.8	559.4	165.9	57.9	869.6	819.7	577.4	113.6	56.7
16:24:34	761.7	776.7	562.8	188.1	58.0	795.5	787.0	585.5	118.0	57.2
16:34:34	703.5	736.2	564.6	198.2	61.6	738.9	752.6	588.2	122.6	59.4
16:44:34	657.8	699.1	559.9	205.7	64.5	693.6	719.8	586.5	127.3	61.0
16:54:34	620.1	665.9	551.3	211.9	66.3	655.1	689.5	581.9	132.3	62.6

	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
16:56:40	613.2	659.4	548.8	212.5	66.4	648.2	683.7	580.8	133.3	62.4
17:04:34	838.7	644.2	539.2	215.6	66.8	785.4	667.7	575.1	137.8	62.7
17:14:34	959.5	671.4	531.5	223.3	68.2	894.1	684.7	568.1	143.5	64.9
17:24:34	1016.0	709.5	527.5	225.3	70.0	954.7	715.2	565.8	148.6	65.8
17:34:34	1010.6	741.4	527.5	223.8	68.2	968.0	743.8	569.0	153.9	64.2
17:44:34	1004.6	761.6	533.4	225.2	67.8	970.3	763.8	576.2	159.0	64.3
17:54:34	997.1	774.3	541.0	226.2	68.6	967.1	777.3	584.9	164.1	66.1
18:04:34	998.0	779.1	548.4	227.7	68.5	960.1	783.8	593.6	168.9	67.4
18:14:34	1035.1	787.4	556.2	233.4	69.4	996.3	792.4	601.5	173.4	68.6
18:24:34	1034.9	800.6	564.3	238.1	71.8	1000.9	805.2	609.1	177.6	71.2
18:34:34	1042.0	810.7	569.3	238.8	71.2	1008.6	815.7	617.0	181.7	72.0
18:44:34	1039.6	819.0	576.8	243.2	70.9	1009.4	824.5	624.9	186.0	73.8
18:54:34	1036.9	825.1	584.3	247.2	72.2	1008.7	831.4	632.6	190.1	75.5
18:57:00	1037.7	826.3	587.0	249.5	72.9	1009.5	832.9	634.4	191.1	76.2
19:04:34	936.8	829.3	590.6	249.7	73.1	950.1	836.6	639.8	194.0	76.7
19:14:34	819.6	812.3	594.3	250.2	72.9	849.6	825.0	646.4	197.2	76.5

	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
19:24:34	749.4	778.6	595.4	251.7	72.6	783.7	798.1	650.5	200.3	78.0
19:34:44	696.7	742.7	597.3	261.2	74.2	733.1	767.6	650.5	203.7	81.1
19:36:38	688.3	736.3	596.5	261.7	74.7	725.0	762.0	650.0	204.3	81.3
19:44:34	794.6	714.5	592.9	266.7	76.0	803.0	742.4	647.0	207.5	83.9
19:54:34	901.7	714.9	584.5	269.1	77.1	874.7	742.7	641.3	211.9	84.9
20:04:34	998.2	737.2	577.7	270.1	77.0	951.1	759.7	637.4	216.0	85.6
20:14:34	1045.2	767.7	578.4	273.6	78.5	996.0	783.9	637.3	219.6	88.2
20:24:34	1075.5	795.3	582.2	273.3	78.7	1027.1	807.5	641.0	223.0	89.3
20:34:34	1098.4	819.1	587.0	271.9	77.6	1051.2	828.9	647.4	226.3	89.0
20:37:46	1104.6	825.9	588.7	271.1	77.4	1057.9	835.1	649.9	227.4	88.6
20:44:34	966.0	838.0	591.6	268.2	76.9	980.8	846.5	655.3	229.0	87.2
20:54:34	840.8	825.5	598.9	265.7	75.9	871.8	840.0	663.8	231.0	86.6
21:01:26	787.0	803.9	603.1	267.8	75.7	820.8	823.6	668.3	232.2	87.4
21:04:34	871.6	792.9	604.0	268.5	75.6	859.4	814.7	669.7	233.0	87.8
21:14:34	1015.5	784.4	607.9	277.2	78.1	967.6	805.5	671.3	236.7	92.4
21:24:34	1075.0	806.3	605.2	277.3	78.2	1025.1	821.8	671.4	239.7	92.1

	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
21:34:34	1110.6	831.4	608.5	280.5	78.3	1062.3	843.1	673.9	242.5	95.3
21:44:34	1133.7	853.9	611.9	279.3	79.2	1089.1	864.0	679.2	245.0	96.4
21:54:34	1152.6	873.3	617.7	279.0	78.3	1110.4	883.2	686.4	247.6	95.8
22:04:34	1165.6	890.3	625.1	280.6	78.5	1126.7	900.4	694.8	250.0	97.6
22:14:10	1174.7	904.6	635.4	279.9	79.1	1139.1	915.2	703.5	252.3	100.1

หมายเหตุ : อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าประมาณ 33°C

ตารางที่ ก-2 การอุ่นเข้รับน้ำเหล็กด้วยแอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
10:00:00	26	39	39	24	38	26	40	25	39	38	39	40	25	24	23	44	38	38	36	23	442	
10:10:00	35	41	40	22	39	35	41	25	39	38	49	41	23	24	23	55	47	39	36	25	452	
10:20:00	323	75	41	21	40	328	81	25	39	39	369	80	23	24	22	394	329	40	36	25	482	
10:30:00	469	150	55	20	40	484	164	38	40	39	525	177	36	24	22	555	400	53	36	25	513	
10:40:00	576	221	79	21	41	593	238	63	40	39	616	261	65	24	22	646	433	78	37	27	520	
10:50:00	646	280	108	23	41	668	302	93	40	39	697	331	99	25	24	727	475	109	37	28	538	
11:00:00	704	332	138	26	42	730	358	123	41	40	763	391	133	27	25	793	515	143	37	29	551	
11:10:00	755	379	168	31	43	783	407	153	42	40	819	443	166	29	26	859	552	176	37	30	651	
11:20:00	803	430	206	41	46	832	460	191	48	42	867	495	206	34	28	907	589	216	39	33	651	
11:30:00	839	472	244	48	48	868	502	228	54	44	902	536	244	37	30	942	621	255	41	34	650	
11:40:00	875	514	282	55	51	904	544	266	59	46	937	577	282	40	32	977	654	293	43	36	649	
11:50:00	891	536	301	61	54	920	566	284	64	48	952	598	300	44	33	992	667	312	45	38	648	
12:00:00	942	600	307	68	55	942	600	299	69	55	942	600	307	59	55	982	656	313	60	60	647	

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
12:10:00	970	615	339	80	60	970	615	329	77	55	970	615	338	59	48	1010	700	346	56	52	646	
12:20:00	945	614	364	92	65	975	644	345	86	55	1003	672	362	58	41	1053	708	377	53	45	645	
12:30:00	984	644	369	100	68	999	659	360	91	57	1013	673	368	62	42	1063	716	376	55	47	644	
12:40:00	995	683	401	107	70	1010	698	390	97	59	1022	710	399	66	44	1072	720	408	57	49	643	
12:50:00	1010	691	427	115	73	1040	722	405	102	61	1064	745	424	70	46	1114	760	442	59	51	642	
13:00:00	1026	711	442	123	76	1056	741	421	108	63	1079	764	439	73	48	1129	773	458	61	53	641	
13:10:00	1042	730	458	121	65	1073	761	436	113	65	1094	782	455	96	65	1144	786	474	90	70	640	
13:20:00	1058	750	474	137	76	1089	780	451	121	68	1110	801	470	92	60	1160	799	490	79	65	640	
13:31:20	1075	769	490	153	87	1105	800	466	130	71	1125	819	485	88	55	1175	812	506	69	60	639	
13:40:00	1063	784	504	162	91	1093	814	480	138	74	1112	833	499	93	59	1162	800	521	73	63	640	
13:47:38	1075	794	517	169	95	1104	823	492	145	78	1123	842	510	96	62	1173	814	533	77	66	649	
13:50:00	1077	797	521	171	96	1106	826	495	147	79	1125	845	512	96	62	1175	817	537	78	67	626	
14:00:00	1085	811	536	179	101	1113	839	509	157	83	1131	857	526	101	64	1181	828	554	83	69	303	
14:10:00	885	812	550	193	106	912	840	524	166	87	934	862	542	107	69	974	641	569	88	74	271	
14:20:00	777	780	562	206	109	801	804	538	176	91	831	834	556	149	75	861	579	582	93	80	241	

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
14:20:48	585	777	563	207	67	794	800	539	177	91	863	831	556	149	76	528	615	583	93	80	241
14:30:00	706	741	567	218	114	726	762	544	185	95	759	794	562	155	80	779	555	591	98	85	537
14:40:00	686	713	563	226	117	705	732	539	193	99	736	763	558	155	84	756	561	587	101	89	538
14:50:00	647	656	554	242	120	662	672	528	208	106	692	701	551	155	93	712	571	580	106	98	538
15:04:36	627	628	550	250	126	641	642	522	216	110	669	670	547	155	98	689	585	585	117	102	538
15:10:00	713	622	545	254	129	727	636	517	221	113	753	662	542	154	99	778	672	581	121	104	558
15:20:00	812	640	537	260	132	829	657	509	228	117	853	681	533	161	100	883	746	574	127	105	577
15:30:00	872	668	535	265	137	891	687	510	235	121	915	710	533	166	103	945	776	572	134	108	582
15:40:00	910	695	538	268	140	930	715	514	241	125	953	738	533	169	104	983	791	576	139	108	578
15:50:00	933	719	544	269	143	954	740	524	247	129	977	763	537	171	104	1007	797	583	145	109	599
16:00:00	943	740	553	270	149	965	762	535	253	133	988	785	544	172	105	1018	796	592	150	109	605
16:10:00	965	757	563	272	152	987	779	545	258	137	1072	803	550	199	106	1112	872	602	156	110	607
16:20:00	982	774	573	279	155	1005	797	547	263	140	1088	820	566	172	113	1128	881	613	160	118	602
16:30:00	994	788	583	284	157	1018	811	558	268	144	1098	834	575	173	118	1138	886	623	130	123	578
16:38:36	707	800	592	283	159	1011	823	562	272	147	1096	846	579	170	116	1136	882	632	144	120	622

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
16:40:00	977	801	593	283	160	1001	825	563	272	147	1086	848	580	170	116	1126	872	633	144	120	453
16:50:00	1009	811	603	285	162	1032	835	569	277	150	1120	857	586	169	114	1160	906	643	144	118	284
17:00:00	826	812	612	292	165	849	835	580	282	153	941	861	596	239	117	971	733	654	178	121	217
17:00:52	844	810	613	293	166	838	833	581	282	153	931	860	597	239	117	971	725	655	179	121	211
17:05:24	771	798	617	296	167	792	820	585	284	155	884	850	602	241	120	914	693	659	180	125	495
17:20:00	671	749	621	305	169	689	766	588	291	158	777	799	609	247	126	807	645	667	185	131	524
17:30:00	769	722	618	309	172	785	737	585	296	161	886	768	604	250	125	916	785	667	189	129	544
17:40:00	835	727	612	316	173	860	745	581	301	162	956	771	603	257	134	986	848	663	194	139	573
17:50:00	863	742	610	317	175	889	761	577	305	165	986	787	596	257	131	1016	860	661	199	136	584
18:00:00	887	757	610	316	176	915	777	577	309	167	1011	802	594	258	125	1041	871	662	203	130	589
18:10:00	910	771	614	319	180	935	792	582	313	169	1028	816	599	265	127	1058	877	666	208	132	609
18:20:00	921	781	619	322	181	945	802	588	317	171	1024	816	601	266	128	1074	874	666	212	133	603
18:30:00	931	791	624	326	182	954	812	595	320	173	1017	814	605	269	131	1067	872	670	216	135	597
18:40:00	941	801	630	330	184	964	823	602	324	175	1013	813	608	270	132	1063	872	672	220	137	592
18:49:52	952	811	635	334	185	974	833	608	327	176	1060	857	625	283	144	1110	892	689	224	149	586

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
18:50:00	917	787	632	333	185	940	808	604	326	176	982	807	625	280	142	1022	865	689	226	146	588	
19:00:00	883	764	629	332	185	905	784	600	325	176	979	806	627	282	143	1019	864	692	228	148	591	
20:04:52	756	778	645	345	189	734	798	622	334	180	820	830	639	289	148	866	864	703	230	84	593	
19:20:00	860	757	644	345	190	881	775	617	337	182	973	804	633	285	147	1013	874	705	233	147	595	
19:30:00	929	773	641	343	192	960	793	610	340	184	1052	817	625	282	149	1092	938	703	237	149	605	
19:40:00	963	796	641	340	192	998	819	605	343	186	1092	841	619	278	151	1132	954	703	240	151	625	
19:50:00	991	819	645	340	194	1026	843	606	346	188	1122	864	619	277	153	1172	964	706	243	153	612	
20:00:00	1018	839	652	339	196	1050	864	614	349	189	1145	884	624	280	154	1195	973	712	246	154	605	
20:10:00	1029	857	660	340	197	1067	883	620	351	191	1161	901	630	280	156	1211	979	720	249	156	616	
20:10:32	1030	858	660	340	197	1067	884	620	351	191	1162	902	630	280	156	1212	980	720	249	156	617	

หมายเหตุ : อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าประมาณ 33°C

ตารางที่ ก-3 การอุ่นเข้รับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 1

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
13:54:50	50	47	46	45	38	51	48	46	45	44	50	47	43	43	41	50	47	49	42	40	42
14:04:50	101	55	47	44	39	140	57	46	45	44	137	54	43	43	41	131	49	50	40	41	136
14:14:50	276	98	51	43	39	446	115	50	45	44	446	115	46	43	40	402	70	62	40	43	483
14:24:50	427	167	66	43	39	638	206	66	45	44	648	216	64	43	39	520	88	92	40	45	640
14:34:50	557	237	89	43	39	771	292	94	45	44	789	310	93	43	39	612	133	120	40	46	709
14:44:50	659	304	118	44	40	867	370	126	46	44	889	391	128	42	38	689	191	171	40	46	756
14:54:50	754	367	150	46	40	954	440	160	47	44	976	462	164	43	37	760	246	216	41	46	355
15:04:50	800	428	182	50	40	948	503	194	48	44	970	525	200	45	38	744	299	261	40	44	744
15:14:50	702	462	214	56	39	795	532	228	50	44	821	558	235	48	38	606	342	299	41	43	539
15:24:50	805	478	243	63	42	977	544	257	53	45	999	567	266	52	38	810	377	335	41	47	790
15:34:50	846	519	267	69	49	968	589	280	57	46	987	608	290	55	37	785	406	359	41	46	683
15:44:50	734	542	292	78	50	798	607	305	62	46	821	630	316	61	39	626	435	386	42	47	116

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
15:54:50	729	534	314	87	54	851	590	328	68	48	876	615	339	68	43	718	457	411	43	46	693
16:04:50	835	551	330	84	58	987	610	334	74	51	1004	627	342	67	34	846	469	425	45	44	825
16:14:50	896	587	346	86	62	1064	650	347	81	54	1078	665	352	68	30	902	489	442	46	45	832
16:24:50	938	627	364	92	66	1076	694	362	88	57	1089	707	369	74	32	898	515	463	48	44	861
16:34:50	954	658	385	104	70	1104	722	385	96	60	1118	736	391	83	36	925	543	489	50	45	893
16:44:50	948	685	406	115	74	1078	747	408	104	63	1092	762	413	91	39	899	568	513	52	45	657
16:54:50	953	706	426	129	78	1045	766	431	112	66	1059	780	439	103	46	869	590	534	53	46	112
17:04:50	981	722	446	150	81	1076	780	456	121	69	1091	794	467	117	58	907	610	555	54	58	225
17:14:50	989	739	464	163	85	1065	795	475	130	72	1079	809	486	128	63	898	628	573	55	63	107
17:24:50	1030	750	481	175	89	1136	804	492	139	75	1150	818	503	138	68	977	646	591	57	68	124
17:34:50	1024	765	496	187	93	1128	817	508	148	78	1142	831	518	146	71	972	661	607	59	71	798
17:44:50	1030	778	511	197	98	1128	830	522	157	82	1141	844	532	154	74	973	676	620	62	74	720
17:54:50	1037	789	525	207	102	1136	838	535	166	86	1150	852	544	161	77	987	689	635	64	77	722
17:56:20	1049	790	528	209	103	1152	840	537	167	86	1165	853	547	163	78	1004	691	637	64	78	735
18:04:50	981	801	539	217	107	1022	849	548	175	90	1035	863	557	169	81	873	701	646	66	81	535

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
18:14:50	883	790	552	227	111	903	832	559	184	94	922	850	569	177	85	781	710	656	68	85	101	
18:24:50	815	764	560	238	116	827	799	567	193	98	848	820	577	185	89	739	711	661	70	89	119	
18:34:50	763	736	564	247	120	770	766	570	201	102	791	787	581	193	93	708	704	661	72	93	195	
18:44:50	721	708	564	256	125	724	735	568	210	106	745	755	580	200	96	682	693	655	74	96	196	
18:54:50	684	683	561	264	129	685	706	564	218	110	705	726	576	207	99	659	680	647	79	99	186	
19:04:50	656	659	556	271	133	655	680	557	226	114	674	699	569	213	102	641	666	637	84	102	177	
19:14:50	635	639	550	277	137	633	658	549	234	118	650	675	561	219	104	626	651	626	90	104	170	
19:24:50	611	621	543	282	141	608	638	541	241	122	624	654	552	223	106	608	638	614	94	106	161	
19:25:18	612	620	542	282	141	610	637	540	241	122	626	653	551	224	107	610	637	614	94	107	161	
19:34:50	762	617	535	287	144	860	639	532	247	126	869	648	543	228	109	847	625	604	96	109	333	
19:44:50	908	655	530	291	147	1030	690	526	253	129	1034	693	536	233	111	966	625	599	99	111	388	
19:54:50	963	703	533	290	150	1066	745	525	259	134	1069	749	533	234	110	963	642	606	102	110	373	
20:04:50	991	741	543	285	155	1084	786	531	264	138	1089	790	536	234	107	963	664	622	98	107	365	
20:14:50	1017	772	555	285	160	1108	817	543	268	141	1114	822	547	235	108	978	687	640	102	108	366	
20:24:50	1042	799	570	287	163	1131	844	556	273	145	1136	849	559	237	108	995	708	656	104	108	386	

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
20:27:58	1048	806	574	288	164	1136	851	560	274	146	1142	857	563	237	108	1000	715	662	106	108	392	
20:34:50	967	820	584	291	166	1002	864	570	277	148	1009	871	573	239	109	865	727	672	107	109	300	
20:44:50	866	810	597	295	168	882	848	583	281	151	896	863	586	242	112	774	741	685	108	112	250	
20:54:50	797	786	607	298	171	805	817	591	285	154	823	835	595	245	114	732	744	692	105	114	222	
21:04:50	870	762	611	303	173	952	790	593	290	157	968	806	597	247	115	902	740	694	106	115	217	
21:14:50	971	778	611	308	176	1056	813	593	294	159	1063	820	597	251	116	978	736	693	108	116	324	
21:24:50	1015	805	615	312	178	1096	844	597	299	161	1102	850	601	256	119	995	744	697	110	119	359	
21:27:46	1028	815	619	317	182	1109	855	602	303	163	1115	861	605	261	122	1004	749	702	113	122	375	
21:34:50	950	828	623	318	182	980	868	606	304	164	986	874	609	262	123	868	756	706	113	123	381	
21:44:50	857	820	631	323	183	870	854	615	309	166	883	868	617	265	125	782	766	715	114	125	294	
21:49:40	823	808	634	323	184	831	840	616	310	167	853	861	619	265	123	759	767	716	115	123	243	
21:54:50	883	796	636	324	185	956	825	617	312	168	972	841	620	265	122	899	768	720	117	122	232	
22:04:50	1010	806	638	328	187	1096	842	617	316	171	1102	849	620	266	123	1018	764	718	120	123	324	
22:14:50	1052	833	639	331	181	1124	873	615	319	169	1130	879	620	267	123	1022	770	718	98	123	390	
22:24:50	1048	853	646	332	184	1105	893	623	323	171	1112	900	624	267	124	995	784	726	98	124	394	

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
22:29:56	1071	863	653	336	187	1138	903	629	327	174	1143	909	630	271	125	1026	792	734	100	125	372	

ตารางที่ ก-4 การอุ่นเข้รับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 2

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
09:46:02	34	43	43	37	42	42	44	39	43	40	35	38	38	37	35	42	44	42	39	37	44	
09:56:02	344	70	44	28	43	354	81	35	43	40	323	49	33	32	29	354	81	43	40	31	86	
10:06:02	525	137	54	27	44	560	172	41	42	40	462	74	42	28	27	560	172	66	40	30	95	
10:16:02	654	209	76	25	44	706	261	68	43	40	714	269	66	28	26	722	277	95	40	28	108	
10:26:02	759	280	104	26	45	820	341	99	43	42	831	352	98	26	25	842	363	138	40	28	212	
10:36:02	837	346	136	28	46	906	414	132	44	42	918	426	134	28	26	930	438	185	41	28	291	
10:46:02	907	408	169	39	46	979	479	172	45	42	992	492	174	30	32	1004	505	233	41	34	361	
10:56:02	965	465	202	46	46	1038	538	208	47	41	1051	550	212	36	33	1064	563	276	41	36	419	

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
11:06:02	940	515	235	54	47	1009	584	244	50	40	1024	599	249	41	35	1039	614	316	42	37	393	
11:16:02	967	551	267	64	49	1030	615	277	54	41	1046	630	283	48	35	1061	646	353	43	38	420	
11:26:02	1010	586	297	71	51	1072	649	306	59	43	1085	662	312	54	35	1099	675	384	44	38	463	
11:36:02	1005	620	325	80	54	1064	679	331	64	42	1078	693	337	59	35	1092	707	413	46	37	458	
11:46:02	1015	646	351	89	57	1071	702	356	71	43	1085	716	362	64	35	1099	730	440	48	38	468	
11:56:02	1031	669	376	100	61	1085	723	380	78	43	1098	736	386	71	37	1111	750	465	50	40	484	
12:06:02	1047	692	399	112	64	1098	743	402	86	44	1111	756	408	79	40	1124	768	489	53	43	500	
12:16:02	1063	713	420	125	69	1113	763	423	94	44	1125	775	429	88	44	1137	787	512	55	47	516	
12:26:02	1078	733	440	136	73	1127	782	442	102	45	1139	793	448	96	47	1150	805	532	58	49	531	
12:36:02	1093	752	460	147	78	1142	801	460	112	46	1153	811	466	105	49	1163	822	551	61	52	547	
12:46:02	1049	767	478	159	83	1096	813	478	121	44	1108	825	483	112	51	1119	837	570	65	54	503	
12:56:02	1065	777	495	171	89	1110	822	496	130	45	1121	833	501	122	57	1131	844	588	69	59	518	
13:06:02	1050	788	511	184	94	1092	830	511	140	45	1105	842	517	130	62	1117	854	605	73	64	503	
13:16:02	1051	796	525	196	99	1090	835	525	150	45	1102	847	531	141	65	1115	860	619	78	68	504	
13:26:02	1055	803	539	209	105	1092	840	537	159	46	1104	853	545	150	70	1117	865	632	83	73	508	

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
13:32:26	1058	808	546	217	108	1094	844	546	165	48	1106	856	553	157	74	1119	868	640	86	76	513	
13:36:02	1002	811	551	219	110	1037	846	549	169	49	1049	858	555	158	75	1062	870	641	88	77	516	
13:46:02	879	803	562	227	114	911	834	556	178	45	926	850	562	162	76	942	866	650	80	78	508	
13:56:02	816	778	571	240	118	842	804	570	188	44	861	822	573	173	85	879	840	659	84	88	483	
14:06:02	763	749	574	250	123	785	771	574	197	46	803	790	577	182	91	822	808	658	88	94	454	
14:16:02	717	721	574	258	129	736	740	570	206	46	754	758	574	186	92	772	776	651	92	94	426	
14:26:02	686	696	571	270	131	702	712	570	215	45	719	729	573	197	98	736	746	649	97	101	401	
14:36:02	655	672	565	282	136	669	686	566	223	44	686	702	571	205	108	702	718	643	122	110	377	
14:46:02	627	650	559	290	140	640	662	559	230	46	655	677	564	196	111	670	692	632	90	113	355	
14:53:10	635	636	553	293	142	647	648	552	235	48	662	664	558	217	114	678	679	624	83	117	301	
14:56:02	708	632	551	294	143	720	644	549	238	44	733	657	555	219	113	745	670	621	82	115	412	
15:06:02	944	646	544	299	149	965	667	542	245	48	969	671	546	162	113	973	676	609	60	116	533	
15:16:02	1017	690	542	137	154	1051	724	533	250	125	1052	725	540	225	112	1053	726	609	146	115	569	
15:26:02	1046	733	547	299	157	1085	771	535	256	129	1087	774	542	224	112	1089	776	619	151	115	606	
15:36:02	967	766	558	304	159	1006	805	546	261	132	1011	809	555	223	120	1015	813	635	157	122	544	

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
15:46:20	1071	780	571	308	163	1108	818	560	266	136	1114	823	568	233	123	1119	828	652	162	126	621	
15:56:02	1007	804	582	310	165	1046	843	569	270	138	1050	847	578	235	123	1055	851	663	166	126	557	
16:04:32	1080	814	593	313	167	1117	851	581	274	140	1123	856	588	238	126	1128	862	676	170	128	630	
16:06:02	1063	816	595	314	167	1100	853	583	275	141	1105	858	590	238	126	1110	863	678	171	128	613	
16:16:02	900	823	606	318	170	935	858	592	279	145	943	866	600	240	127	952	875	688	175	129	450	
16:26:02	823	804	616	323	172	852	834	604	284	146	865	847	610	245	131	879	860	696	179	133	373	
16:36:02	767	779	621	328	174	792	803	609	288	148	806	818	615	248	133	821	832	698	184	136	317	
16:44:00	730	758	621	332	175	752	779	608	292	151	768	796	616	251	134	785	813	696	187	137	280	
16:46:02	755	752	621	333	176	776	773	608	293	152	791	788	616	252	135	806	803	696	188	137	305	
16:56:02	972	748	618	335	179	997	772	601	297	154	1004	779	611	255	137	1011	786	690	192	140	522	
17:06:02	1029	775	616	338	183	1062	808	598	302	157	1065	812	608	220	140	1069	815	687	196	142	579	
17:16:02	1068	806	620	335	187	1104	842	596	306	160	1108	846	605	255	143	1111	849	690	201	145	618	
17:19:26	1104	816	622	335	188	1116	853	597	308	161	1119	856	605	255	144	1122	860	692	202	146	654	
17:26:02	950	832	627	337	190	988	870	602	311	163	992	874	610	255	146	996	878	697	205	148	500	
17:36:02	838	827	636	342	192	870	860	611	315	165	882	871	619	258	148	893	882	708	209	151	38	

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
17:46:02	763	804	643	346	195	796	832	616	319	168	810	846	626	259	151	824	860	712	213	153	313	
17:56:02	711	778	645	349	196	744	802	618	322	170	758	816	627	262	153	773	831	711	217	156	261	
18:01:42	701	764	644	354	196	723	785	616	325	171	744	807	629	265	154	765	828	711	218	157	251	
18:06:02	811	753	642	356	198	832	774	615	326	173	846	787	628	267	156	859	801	711	220	158	361	
18:16:02	983	763	638	360	199	1011	791	609	330	174	1015	795	623	269	157	1019	799	702	224	160	533	
18:26:02	1030	795	636	360	203	1065	830	607	334	176	1068	833	619	270	159	1070	835	700	228	162	580	
18:36:02	1067	825	640	361	205	1106	865	610	337	178	1108	867	621	272	161	1111	870	707	231	163	616	
18:46:02	1006	852	648	362	207	1046	893	617	341	180	1049	896	628	272	163	1052	899	715	235	166	555	
18:48:36	1049	857	651	362	208	1025	896	619	341	180	1029	900	630	273	163	1033	904	717	236	166	599	

หมายเหตุ : อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าประมาณ 33°C

ตารางที่ ก-5 การอุ่นเข้รับน้ำเหล็กด้วยออกซิเบิร์นเนอร์เบิร์นเนอร์ครั้งที่ 3

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
09:27:08	59	69	69	63	57	66	76	69	71	58	66	76	68	62	49	40	85	76	68	38	44	
09:37:08	371	96	70	61	57	387	113	68	71	59	384	110	67	60	48	40	88	76	68	41	264	
09:47:08	553	165	80	59	56	592	204	78	71	58	593	205	77	58	46	40	113	92	69	43	293	
09:57:08	678	236	100	59	57	734	292	102	70	58	740	298	100	58	46	41	156	125	69	45	317	
10:07:08	776	305	127	58	57	841	370	132	70	59	850	379	131	56	45	40	205	165	69	45	336	
10:17:08	860	370	158	61	57	932	442	165	71	58	942	452	164	56	44	38	256	209	69	46	351	
10:27:08	928	432	190	61	57	1002	507	198	71	58	1014	518	198	56	43	39	305	251	69	46	365	
10:37:08	988	490	222	64	58	1063	566	231	73	58	1074	577	233	58	43	37	352	295	69	45	377	
10:47:08	1042	545	255	74	59	1116	619	267	75	58	1127	630	269	62	45	37	397	337	69	46	399	
10:57:08	1091	596	288	83	61	1162	668	301	78	58	1173	678	304	68	45	39	440	376	70	47	414	
11:07:08	1132	643	320	92	62	1201	712	335	82	59	1211	722	338	73	47	54	481	413	71	46	421	
11:17:08	1166	686	352	97	65	1232	753	363	88	60	1242	762	367	77	49	65	520	448	72	48	429	
11:27:08	1199	726	382	109	68	1263	790	394	93	62	1271	799	397	83	48	100	556	481	73	47	437	
11:37:08	1232	764	412	122	72	1293	824	424	100	63	1301	832	426	90	49	164	590	513	75	47	444	

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
11:45:04	1259	792	435	135	75	1317	850	448	106	64	1324	857	450	98	52	167	616	539	77	50	448
11:47:08	1209	799	441	138	75	1267	856	454	107	64	1274	863	456	100	53	52	622	544	77	52	382
11:57:08	1002	811	469	151	80	1052	862	481	115	66	1065	875	483	109	57	47	649	569	80	56	307
12:07:08	889	789	493	163	84	931	831	502	124	69	949	849	505	118	61	43	665	589	82	60	274
12:17:08	811	757	509	176	89	846	792	517	133	71	867	813	520	126	63	42	669	600	86	62	248
12:27:08	751	725	517	186	94	780	754	522	142	75	801	775	527	134	66	42	664	602	89	65	229
12:37:08	700	694	520	195	99	725	719	521	152	79	746	740	526	139	66	42	654	599	93	65	215
12:47:08	658	665	519	205	104	680	688	518	161	83	700	708	524	146	71	42	641	593	98	70	194
12:57:08	624	640	516	219	109	644	660	516	171	86	663	678	520	155	74	42	627	587	102	72	187
13:07:08	595	616	511	228	114	613	635	508	180	91	630	652	515	164	81	42	613	577	107	80	171
13:14:14	574	601	507	234	118	592	618	503	186	94	608	634	510	168	84	42	603	571	110	82	176
13:17:08	649	595	505	236	119	666	611	502	188	95	681	627	508	171	84	41	600	569	112	83	263
13:27:08	889	605	498	243	124	914	629	495	197	99	921	636	500	178	85	44	589	558	118	84	341
13:37:08	1011	650	496	246	129	1046	686	490	204	104	1050	689	496	182	90	48	595	558	123	88	367
13:47:08	1091	702	503	250	134	1132	743	494	211	108	1134	745	499	185	89	60	615	569	128	88	390

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
13:57:08	1154	752	516	253	139	1198	796	507	218	113	1200	798	510	189	88	79	641	587	133	87	404
14:07:08	1202	798	533	257	143	1247	843	523	224	117	1249	844	526	192	91	123	671	610	138	89	378
14:10:12	1214	811	539	257	144	1259	856	528	226	118	1260	858	530	192	90	104	680	616	139	89	419
14:17:08	1049	836	553	263	147	1092	879	541	230	121	1095	882	544	196	96	43	698	631	143	94	304
14:27:08	914	833	573	271	151	950	869	559	236	124	960	880	563	200	99	44	720	652	147	98	266
14:37:08	830	809	588	277	153	859	838	572	242	127	874	853	577	204	101	44	729	664	151	100	227
14:47:08	772	779	596	286	157	796	804	582	247	131	813	820	587	211	107	43	728	671	156	106	216
14:56:18	728	753	598	291	159	749	774	584	253	133	766	790	589	216	108	43	721	671	160	107	188
14:57:08	730	750	598	291	159	751	771	584	253	133	767	788	589	216	108	43	721	671	160	107	210
15:07:08	982	740	597	296	162	1006	763	582	259	136	1015	773	587	220	110	48	711	668	165	109	343
15:17:08	1097	772	596	298	168	1129	804	578	265	140	1133	808	582	223	113	64	711	664	170	112	356
15:27:08	1171	815	601	297	172	1209	853	580	271	143	1210	854	582	224	116	97	725	671	174	115	376
15:32:54	1101	840	607	297	173	1139	878	584	275	145	1140	879	585	225	118	53	735	676	177	117	339
15:37:08	1024	852	612	301	174	1062	889	589	277	146	1064	892	589	227	119	48	744	682	179	117	316
15:47:08	909	850	625	321	177	940	881	615	283	147	949	891	612	242	120	46	760	701	183	119	272

	U1	U2	U3	U4	U5	M1	M2	M3	M4	M5	L1	L2	L3	L4	L5	B1	B2	B3	B4	B5	Flue gas	
Time	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
15:57:08	830	827	635	322	180	855	852	622	288	152	869	866	621	245	125	45	766	708	188	123	244	
16:07:08	777	798	639	336	182	799	820	632	293	152	814	835	629	252	125	44	762	714	192	124	233	
16:08:56	769	793	640	339	183	791	814	633	294	152	805	829	630	254	125	44	760	714	193	124	230	
16:17:08	929	773	639	347	184	949	792	635	298	154	962	806	633	260	127	47	754	713	197	125	354	
16:27:08	1083	789	636	347	188	1111	817	626	303	158	1116	822	627	261	131	56	747	705	202	130	392	
16:37:08	1163	829	637	346	191	1199	864	619	308	161	1200	866	621	258	134	98	755	705	206	133	402	
16:44:50	1216	862	642	352	193	1254	900	628	312	162	1254	900	625	261	136	159	768	713	209	134	401	

หมายเหตุ : อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าประมาณ 33°C

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณค่าพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก

การคำนวณพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก

พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก สามารถคำนวณได้จากการแจกแจงของอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็ก (Temperature distribution) โดยพลังงานความร้อนที่สะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กจะสะสมในผนังด้านข้างและบริเวณก้นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็น ตามสมการด้านล่าง ดังนี้

พลังงานความร้อนสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก = พลังงานสะสมในผนังข้างเบ้า + พลังงานสะสมภายในก้นเบ้า

$$Q_{storage,ladle} = Q_{side,storage,ladle} + Q_{bottom,storage,ladle}$$

$$Q_{storage,ladle} = 2\pi h \rho \bar{c}_{brick} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr + \pi r_{bottom}^2 \rho \bar{c}_{brick} \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx$$

เมื่อ $Q_{storage,ladle}$ คือ ความร้อนสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (MJ)

c_{brick} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ SK38 มีค่าเท่ากับ 1.3 kJ/kg·K

h คือ ความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

ρ คือ ความหนาแน่นของอิฐทนไฟ (kg/m³)

r_i คือ รัศมีภายในของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

r_o คือ รัศมีภายนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

x_i คือ ความหนาเริ่มต้นของก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

x_o คือ ความหนาสุดท้ายของก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

$\int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก

$\int_{x_i}^{x_o} T(x) dx$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก

เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ขึ้น เราจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานสะสมในผนังข้างเบ้า กับ พลังงานสะสมภายในก้นเบ้า

ส่วนแรกพลังงานสะสมในด้านข้างเบ้า จากสมการจะเห็นว่าฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิติดอยู่ในรูปของอินทิเกรต เพื่อให้สามารถคำนวณค่าได้ง่ายขึ้น เราจึงอาศัยการประยุกต์ระเบียบเชิงเลข (Numerical method) เข้ามาช่วยแก้ปัญหา

$$\int_{r_i}^{r_o} T(r)rdr$$

จากพจน์ของฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิต้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก สามารถนำกฎเศษหนึ่งส่วนสามของซิมป์สัน (Simpson's 1/3) มาประยุกต์ใช้ โดยมีค่าประมาณอินทิเกรตดังสมการนี้

$$T(r) \approx I \approx \frac{(b-a)}{6} [T(r_0) + 4T(r_1) + T(r_2)]$$

เมื่อ I คือ ค่าประมาณอินทิเกรต

$b-a$ คือ ความหนาของผนัง Ladle ในระดับชั้นที่สนใจ

$T(r_0)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิของระดับชั้นที่สนใจที่ตำแหน่งแรก

$T(r_1)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิของระดับชั้นที่สนใจที่ตำแหน่งกลาง

$T(r_2)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิของระดับชั้นที่สนใจที่ตำแหน่งปลาย

เนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กมีการแจกแจงอุณหภูมิกายใน 3 ช่วง จึงต้องทำการอินทิเกรตเพื่อหาผลรวมของพลังงานความร้อนสะสมภายในของผนังด้านข้าง 3 ช่วง

$$\int_{r_i}^{r_o} T(r)rdr = \int_{r_i}^{r_{m1}} T(r)rdr + \int_{r_{m1}}^{r_{m2}} T(r)rdr + \int_{r_{m2}}^{r_o} T(r)rdr$$

เมื่อ r_{m1} คือ รัศมีของเบ้ารับน้ำเหล็กตำแหน่งที่ 1 จากรัศมีในสุด

r_{m1} คือ รัศมีของเบ้ารับน้ำเหล็กตำแหน่งที่ 2 จากรัศมีในสุด

สามารถแจกแจงได้ดังนี้

$$\int_{r_i}^{r_{m1}} T(r)rdr \approx \frac{(b-a)}{6} \left[T(r_i)r + 4T\left(\frac{r_i+r_{m1}}{2}\right)r + T(r_{m1})r \right]$$

$$\int_{r_{m1}}^{r_{m2}} T(r)rdr \approx \frac{(b-a)}{6} \left[T(r_{m1})r + 4T\left(\frac{r_{m1}+r_{m2}}{2}\right)r + T(r_{m2})r \right]$$

$$\int_{r_{m2}}^{r_o} T(r)rdr \approx \frac{(b-a)}{6} \left[T(r_{m2})r + 4T\left(\frac{r_{m2}+r_o}{2}\right)r + T(r_o)r \right]$$

โดยฟังก์ชันการแจกแจงของอุณหภูมิสามารถหาได้จากอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล โดยนำค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ มาสร้างฟังก์ชันการแจกแจงของอุณหภูมิ ซึ่งจะประมาณว่ามีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้น

$$T(r) = a_o + a_1 r$$

ดังนั้น $T(r)r = a_o r + a_1 r^2$

พลังงานสะสมตัวที่ 2 คือ พลังงานสะสมที่กันเบ้ารับน้ำเหล็ก ลักษณะการคำนวณก็เหมือนกับการคำนวณหาพลังงานสะสมที่ด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยประยุกต์ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ดังนี้

$$\int_{x_i}^{x_o} T(x)dx$$

จะเห็นว่า ฟังก์ชันในการอินทิเกรตเป็นสมการเชิงเส้นซึ่งไม่มีตัวแปรมาคูณ เหมือนกับในการคำนวณของพลังงานสะสมด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข “กฎสี่เหลี่ยมคางหมู” มาช่วยในการหาค่าอินทิเกรตได้ ดังสมการนี้

$$T(x) \approx I \approx \frac{(b-a)}{2} [T(x_0) + T(x_1)]$$

เมื่อ I คือ ค่าประมาณอินทิเกรต

$b-a$ คือ ความหนาของกัน Ladle ในระดับชั้นที่สนใจ

$T(x_0)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิของตำแหน่งต้น

$T(x_1)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิของตำแหน่งปลาย

เนื่องจากบริเวณกันของเบ้ารับน้ำเหล็กมีการแจกแจงอุณหภูมิภายใน 3 ช่วง เช่นเดียวกับบริเวณผนังด้านข้าง จึงต้อง อินทิเกรตเพื่อหาผลรวมของพลังงานความร้อนสะสม ภายในบริเวณกันเบ้ารับน้ำเหล็ก 3 ช่วง

$$\int_{x_i}^{x_o} T(x)dx = \int_{x_i}^{x_{m1}} T(x)dx + \int_{x_{m1}}^{x_{m2}} T(x)dx + \int_{x_{m2}}^{x_o} T(x)dx$$

โดยแจกแจงเป็น 3 เทอม ดังนี้

$$\int_{x_i}^{x_{m1}} T(x)dx \approx \frac{(b-a)}{2} [T(x_i) + T(x_{m1})]$$

$$\int_{x_{m1}}^{x_{m2}} T(x)dx \approx \frac{(b-a)}{2} [T(x_{m1}) + T(x_{m2})]$$

$$\int_{x_{m2}}^{x_o} T(x)dx \approx \frac{(b-a)}{2} [T(x_{m2}) + T(x_o)]$$

เช่นเดิม ฟังก์ชันการแจกแจงของอุณหภูมิสามารถหาได้จากอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล โดยนำค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ มาสร้างฟังก์ชันการแจกแจงของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถประมาณได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้น

$$T(x) = a_o + a_1 x$$

ตัวอย่างการคำนวณพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก

$$Q_{storage,ladle} = Q_{side,storage,ladle} + Q_{bottom,storage,ladle}$$

$$Q_{side,storage,ladle} = 2\pi h \rho \bar{c}_{brick} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr$$

$$Q_{bottom,storage,ladle} = \pi r_{bottom}^2 \rho \bar{c}_{brick} \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx$$

ให้ $\rho = 2.75 \text{ g/cm}^3$ $\bar{c}_{brick} = 1.3 \text{ kJ/kg-k}$

$h = 1.784 \text{ m}$ $r_i = 0.727 \text{ m}$

$r_{m1} = 0.772 \text{ m}$ $r_{m2} = 0.822 \text{ m}$

$r_o = 0.94 \text{ m}$ $x_i = 0 \text{ m}$

$$x_{m1} = 0.05 \text{ m}$$

$$x_{m2} = 0.1 \text{ m}$$

$$x_o = 0.268 \text{ m}$$

$$T(L1) = 125^\circ\text{C}$$

$$T(L2) = 79^\circ\text{C}$$

$$T(L3) = 62^\circ\text{C}$$

$$T(L4) = 49^\circ\text{C}$$

$$T(B1) = 105^\circ\text{C}$$

$$T(B2) = 86^\circ\text{C}$$

$$T(B3) = 88^\circ\text{C}$$

$$T(B4) = 68^\circ\text{C}$$

เราจะพิจารณาที่ด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็กก่อน

$$\int_{r_i}^{r_o} T(r)rdr = \int_{r_i}^{r_{m1}} T(r)rdr + \int_{r_{m1}}^{r_{m2}} T(r)rdr + \int_{r_{m2}}^{r_o} T(r)rdr$$

เริ่มต้นด้วยการหาฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างตำแหน่งวัด L1 ถึง L2 จากสมการเส้นตรง

$$T(r) = a_o + a_1 r$$

ดังนั้น จากข้อมูลที่ให้มาจะได้ว่า

$$125 = a_o + a_1 0.727$$

$$79 = a_o + a_1 0.772$$

แก้สมการหาค่าคงที่ a_o และ a_1 จะได้

$$a_o = 871.787$$

$$a_1 = -1026.67$$

ดังนั้น ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กช่วง L1 ถึง L2 คือ

$$T(r) = 871.787 - 1026.67r$$

เมื่อนำฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิที่ได้ แทนลงในอินทิเกรต

$$\int_{r_i}^{r_{i+1}} T(r) r dr = \int_{r_i}^{r_{i+1}} 871.787r - 1026.67r^2 dr$$

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข กฎเศษหนึ่งส่วนสามของซิมป์สัน (Simpson's 1/3)

$$\int_{0.727}^{0.772} 871.787r - 1026.67r^2 dr = \frac{(0.045)}{6} \left[T(0.727) + 4T\left(\frac{1.499}{2}\right) + T(0.772) \right]$$

$$\text{โดยที่ } T(0.727) = (871.787 \times 0.727) - (1026.67 \times 0.727^2) = 91.164$$

$$T(0.75) = (871.787 \times 0.75) - (1026.67 \times 0.75^2) = 76.67$$

$$T(0.772) = (871.787 \times 0.772) - (1026.67 \times 0.772^2) = 61.14$$

แทนค่าอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งลงไปก็จะได้

$$\int_{0.727}^{0.772} 871.787r - 1026.67r^2 dr = \frac{(0.045)}{6} [91.16 + (4 \times 76.67) + 61.14] = 3.44$$

แทนค่าที่คำนวณได้จากฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิในสมการหลัก ก็จะได้พลังงานสะสมด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างตำแหน่ง L1 ถึง L2 ดังนี้

$$Q_{side, storage, ladle, L1 \rightarrow L2} = 2\pi h \rho C_{brick} \int_{0.727}^{0.772} T(r) r dr = 2\pi \times 1.784 \times 2.75 \times 1.3 \times 3.44 = 137.85 \text{ MJ}$$

ในส่วนของการคำนวณระหว่างตำแหน่ง L2 ถึง L3 และ L3 ถึง L4 ก็ใช้วิธีการในการคำนวณเช่นเดียวกัน ซึ่งได้ค่าดังนี้

ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิ L2 ถึง L3

$$\int_{0.772}^{0.822} T(r) r dr = 2.82$$

ดังนั้น พลังงานสะสมด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างตำแหน่ง L2 ถึง L3 มีค่าเป็น

$$Q_{side, storage, ladle, L2 \rightarrow L3} = 2\pi \times 1.784 \times 2.75 \times 1.3 \times 2.82 = 113 \text{ MJ}$$

ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิ L3 ถึง L4

$$\int_{0.822}^{0.94} T(r) r dr = 5.82$$

ดังนั้น พลังงานสะสมด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างตำแหน่ง L2 ถึง L3 มีค่าเป็น

$$Q_{side,storage,ladle,L2 \rightarrow L3} = 2\pi \times 1.784 \times 2.75 \times 1.3 \times 5.81 = 232.82 \text{ MJ}$$

พลังงานสะสมผนังข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} Q_{side,storage,ladle} &= Q_{side,storage,ladle,L1 \rightarrow L2} + Q_{side,storage,ladle,L2 \rightarrow L3} + Q_{side,storage,ladle,L3 \rightarrow L4} \\ &= 137.85 + 113 + 232.82 \\ &= 483.67 \text{ MJ} \end{aligned}$$

การคำนวณพลังงานสะสมบริเวณกันเบ้ารับน้ำเหล็ก

$$Q_{bottom,storage,ladle} = \pi r_{bottom}^2 \rho \bar{C}_{brick} \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx$$

$$\text{โดยที่ } \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx = \int_{x_i}^{x_{m1}} T(x) dx + \int_{x_{m1}}^{x_{m2}} T(x) dx + \int_{x_{m2}}^{x_o} T(x) dx$$

$$\text{ซึ่ง } \int_{x_i}^{x_{m1}} T(x) dx \approx \frac{(b-a)}{2} [T(x_i) + T(x_{m1})]$$

$$\int_{x_{m1}}^{x_{m2}} T(x) dx \approx \frac{(b-a)}{2} [T(x_{m1}) + T(x_{m2})]$$

$$\int_{x_{m2}}^{x_o} T(x) dx \approx \frac{(b-a)}{2} [T(x_{m2}) + T(x_o)]$$

หาฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิภายในบริเวณกันเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างตำแหน่ง B1 ถึง B2

$$T(x) = a_o + a_1 x$$

ดังนั้น จากข้อมูลที่ให้มาจะได้ว่า

$$105 = a_o + a_1(0)$$

$$86 = a_o + a_1(0.05)$$

แก้สมการหาค่าคงที่ a_0 และ a_1 จะได้

$$a_0 = 105$$

$$a_1 = -378$$

ดังนั้น ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิภายในเข็มนาฬิกาช่วง B1 ถึง B2 คือ

$$T(x) = 105 - 378x$$

เมื่อนำฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิที่ได้ แทนลงในอินทิเกรต

$$\int_0^{0.05} T(x) dx = \int_0^{0.05} (105 - 378x) dx$$

ประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของสี่เหลี่ยมคางหมู

$$\int_0^{0.05} (105 - 378x) dx = \frac{(0.05 - 0)}{2} [T(0) + T(0.05)]$$

$$\text{ซึ่ง } T(0) = 105 - 378(0) = 105$$

$$T(0.05) = 105 - 378(0.05) = 86.1$$

$$\begin{aligned} \int_0^{0.05} (105 - 378x) dx &= \frac{(0.05 - 0)}{2} [T(0) + T(0.05)] \\ &= \frac{(0.05)}{2} [105 + 86.1] \\ &= 4.78 \end{aligned}$$

ด้วยวิธีเดียวกันนี้ สามารถ หาฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิภายในบริเวณต้นเข็มนาฬิการะหว่างตำแหน่ง B2 ถึง B3 และ B3 ถึง B4 ตามลำดับ

$$\int_{0.05}^{0.1} T(x) dx = 4.36$$

$$\int_{0.1}^{0.268} T(x) dx = 13.11$$

ดังนั้นพลังงานสะสมบริเวณกันเข็มนาฬิกา

$$\begin{aligned}
Q_{bottom,storage,ladle} &= \pi r_{bottom}^2 \rho \bar{C}_{brick} \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx \\
&= \pi r_{bottom}^2 \rho \bar{C}_{brick} \left\{ \int_0^{0.05} T(x) dx + \int_{0.05}^{0.1} T(x) dx + \int_{0.1}^{0.268} T(x) dx \right\} \\
&= \pi (0.987^2) (2.75) (1.3) (4.78 + 4.36 + 13.11) \\
&= 243.44 \text{ MJ}
\end{aligned}$$

พลังงานสะสมด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากับ 483.67 MJ

พลังงานสะสมที่บริเวณก้นของเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากับ 243.44 MJ

ดังนั้น พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากับ 727.11 MJ

ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย

จากสมการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection)

$$q_{conv} = h_m A_{conv} (T_s - T_{amb})$$

เมื่อ q_{conv} คือ การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (W)

h_m คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$)

A_{conv} คือ พื้นที่ของการพาความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กหรือชุดฝาเบ้า(K)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

การจะคำนวณหาค่าการพาความร้อน (q_{conv}) ได้นั้น สิ่งสำคัญคือ ต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย (h_m) ซึ่งเราจะอาศัยความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ยกับนัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)

$$\overline{NU} = \frac{hL_c}{k} \quad \text{หรือ} \quad h = \frac{k}{L_c} \overline{NU}$$

เมื่อ k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ (thermal conductivity, $W/m \cdot K$)

L_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเบ้ารับน้ำเหล็ก (Characteristic length, m)

\overline{NU} คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)

เราสามารถหาค่า k ได้จากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิฟิล์ม (T_{film}) ของอากาศที่อยู่ล้อมรอบเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยอุณหภูมิฟิล์มหาได้จาก

$$T_{film} = \frac{T_s + T_{amb}}{2}$$

โดยที่ T_s คือ อุณหภูมิผิวเบ้ารับน้ำเหล็ก และ T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จากนั้น นำ ค่า T_{film} ที่คำนวณได้ไปเปิดตารางคุณสมบัติทางความร้อนของอากาศ [12] (Thermophysical properties of gas at atmospheric pressure) หาค่า ν , k และ Pr

นัสเซลท์นัมเบอร์หาได้จาก พิจารณาให้ เบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก โดยจะ ใช้สมการที่ใช้กับ vertical plate ซึ่งสามารถใช้ได้กับทุกช่วงของค่า Rayleigh number ดังสมการ

$$\overline{NU} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6} L}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{8/27} \right]} \right\}^2$$

แต่ต้องอยู่ในเงื่อนไขด้านล่างนี้ เพื่อให้สามารถนำสมการ \overline{NU} ไปใช้กับรูปทรงกระบอกได้

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}}$$

เมื่อ Ra คือ Rayleigh number

Pr คือ Prandtl number

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเบ้ารับน้ำเหล็ก

L คือ ความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก

Gr_L คือ ค่า Grashof number โดยสามารถตรวจสอบชนิดของการไหลได้ ถ้า Gr มีค่าไม่เกิน 10^9 ถือว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)

โดย ค่า Rayleigh number หาได้จากสมการ

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_C^3}{\nu^2} Pr$$

และ

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_C^3}{\nu^2}$$

โดยที่ ν คือ ค่า kinematics viscosity ของของไหล (m²/s)

L_C คือ ค่าความยาวของทรงกระบอก (m)

β คือ ค่า coefficient of volume expansion (K⁻¹)

g คือ แรงโน้มถ่วงโลก $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

สรุปขั้นตอนการหา h เริ่มต้นด้วยการหาค่า ν β k และ Pr จาก T_{film} นำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหา Ra_L จากนั้นเราก็จะนำ Ra_L และ Pr ไปคำนวณหา \overline{NU} ขั้นตอนสุดท้ายนำ \overline{NU} และ k ไปคำนวณหา h เราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย

$$\text{ให้ } T_{\text{surface}} = 68.3^\circ\text{C} \qquad T_{\text{amb}} = 33^\circ\text{C}$$

$$L = 1.99 \text{ m}$$

หาอุณหภูมิฟิล์ม

$$T_{\text{film}} = \frac{68.3 + 33}{2} = 50.65^\circ\text{C} = 323.65 \text{ K}$$

เปิดตารางคุณสมบัติทางความร้อนของอากาศ (Thermophysical properties of gas at atmospheric pressure) หาค่า ν k และ Pr ได้ค่าดังนี้

$$\nu = 1.827 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0.0281 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$$

$$Pr = 0.704$$

นำค่าไปแทนในสมการหาค่า Rayleigh number

$$\begin{aligned} Ra_L &= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_C^3}{\nu^2} Pr \\ &= \frac{(9.81)(0.0031)(68.3 - 33)(1.99^3)}{(1.827 \times 10^{-5})^2} (0.704) \\ &= 1.78 \times 10^{10} \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่า Rayleigh number แทนในสมการหาค่า \overline{NU}

$$\begin{aligned}
 \overline{NU} &= \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6} L}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{8/27} \right]} \right\}^2 \\
 &= \left\{ 0.825 + \frac{(0.387)(1.78 \times 10^{10})^{1/6} (1.99)}{\left[1 + (0.492 / 0.704)^{8/27} \right]} \right\}^2 \\
 &= 464.12
 \end{aligned}$$

นำค่า Nusselt number ที่ได้ไปแทนในสมการหาค่า h

$$h = \frac{k}{L_c} \overline{NU} = \frac{(0.0281)}{1.99} (464.12) = 6.55 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

ภาคผนวก ง

ข้อมูลทางเทคนิคของวัสดุทนไฟที่ใช้ก่อผนังเตารับน้ำเหล็ก

SK 38

Classification	High-Alumina Brick ASTM C 27, 80% Alumina		
Physical Properties	Refractoriness	Orton Cone	38
	Bulk Density	kg/m ³	2750
	Apparent Porosity	%	18.5
	Cold Crushing Strength	kg/cm ²	750
	Modulus of Rupture	kg/cm ²	125
	Permanent Linear Change After Heating at 1600 °C	%	1.00
Chemical Composition	Alumina (Al ₂ O ₃)	%	80.0
	Silica (SiO ₂) %		14.5
	Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	%	1.6
	Titania (TiO ₂)	%	2.9
Thermal Expansion	400 °C	%	0.33
	800 °C	%	0.51
	1000 °C	%	0.69
	1200 °C	%	0.87
	1400 °C	%	1.05
Thermal Conductivity	400 °C	(W/m.K)	2.20
	600 °C	(W/m.K)	2.09
	800 °C	(W/m.K)	2.03
	1000 °C	(W/m.K)	2.00

The above data are typical properties of 9" commercial straight brick. The data are subjected to reasonable variations and should not be used for specification purposes. ASTM test methods, and SRIC's written procedure, where applicable, used for determination of data.

THE SIAM REFRACTORY INDUSTRY CO., LTD.

1 Siam Cement Road, Bangsue, Bangkok 10800 Thailand Tel. (+66 2) 586-3242-53 Fax. (+66 2) 586-2982, 587-2149



SRIC 19/2013

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิริยะ โชติขันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 เคยทำงานที่ บริษัท เอ็น.ที.เอส สตีล กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) ระหว่างปี พ.ศ. 2549 – 2552 ตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า ส่วนซ่อมบำรุง งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 และการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25