

การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ้งถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยการใช้
หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ



นายจักรวาล จรุงศารทูล

ศูนย์วิทยพัทยาการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF LADLE PREHEATING APPARATUS WITH
REGENERATIVE BURNERS



Mr. Jakkrawut Jaroonsaratul

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ้งถึงถ่ายน้ำ
เหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

โดย

นายจักรวาล จรรย์ศารทูล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ณัฐเดช เพ็ญวรวงค์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรรานนท์)

จักรวาล จริญญาทรกุล : การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถังถ้ำน้ำเหล็ก โดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ. (IMPROVEMENT OF LADLE PREHEATING APPARATUS WITH REGENERATIVE BURNERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. พงษ์ธร จริญญาทรกุล, 178 หน้า.

อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมแขนงหนึ่งที่มีการใช้พลังงานอย่างเข้มข้นและมีศักยภาพในการอนุรักษ์พลังงานค่อนข้างสูง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานในการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็ก (ladle) การอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบธรรมดาที่ปฏิบัติในปัจจุบัน มักจะควบคุมการอุ่นด้วยอุณหภูมิของไอเสียที่ปล่อยทิ้ง หรือ ไม่มีรูปแบบการควบคุมที่แน่นอน อุณหภูมิของไอเสียที่ปล่อยทิ้งมีค่าสูงสุดถึง $900-1,000^{\circ}\text{C}$ จึงมีการสูญเสียความร้อนออกไปกับไอเสียสูงมาก วิธีการสูญเสียที่มีความเหมาะสมคือการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟแทนหัวเผาแบบเดิม เพื่อให้มีการนำความร้อนปล่อยทิ้งมาอุ่นอากาศเผาใหม่

งานศึกษาวิจัยนี้ ทำการทดลองและวิเคราะห์การใช้พลังงานในการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง และ การทดลองการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ในโรงงานเหล็กแห่งหนึ่ง จากการทดลองพบว่า การอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดา มีการปล่อยทิ้งไอเสียที่อุณหภูมิระหว่าง $600-1,000^{\circ}\text{C}$ ซึ่งคิดเป็นความร้อนสูญเสียในไอเสียประมาณ 35-45%

ผลการทดลองเมื่อติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟแทนพบว่า หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟสามารถทำงานได้ดีกับน้ำมันเตา A อุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยทิ้งลดลงเหลือประมาณ 200°C เป็นผลให้สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้ 20-30% ของเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่เดิม นอกจากนี้ จากข้อมูลการทดลองพบว่า การใช้อุณหภูมิในผนังถังถ้ำน้ำเหล็กในการควบคุมการอุ่นแทนอุณหภูมิไอเสียจะมีความสอดคล้องกับสภาวะทางความร้อนของถังถ้ำน้ำเหล็กมากกว่า

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ฝายมือชื่อนิสิต ฝกรฐ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ฝายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2552

4970252221 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : LADLE PREHEATING / REGENERATIVE BURNER /
STEELMAKING LADLE / STEELMAKING PROCESS

JAKKRAWUT JAROONSARATUL : IMPROVEMENT OF LADLE
PREHEATING APPARATUS WITH REGENERATIVE BURNERS. ADVISOR
: ASSOC. PROF. DR. PONGTORN CHARUNYAKORN, Ph.D., 178 pp.

Steel industry is one of the industries that show high potential for energy conservation. This study focuses on improvement of energy utilization in ladle preheating. The conventional ladle preheating using simple burners is either controlled by exhaust gas temperature or without any specific control method. The maximum exhaust gas temperature is at around 900-1,000°C. The exhaust gas heat loss is evidently very high. One effective method to reduce this loss is to employ regenerative burners in place of conventional burners in order to recover waste heat for combustion air preheating.

In this study, experiments were conducted and the results were analyzed for energy consumption covering ladle preheating employing conventional burners firing diesel oil and heavy oil A, and employing a regenerative burner firing heavy oil A. It was found that exhaust gas temperature in the case of conventional burner was in the range of 600-1,000°C. This corresponds to flue gas loss of about 35-45%.

For ladle preheating employing a regenerative burner, the burner worked satisfactorily. The exhaust gas temperature was normally lower than 200°C and fuel consumption was reduced in the range of 20-30%. Furthermore, data from the experiments indicated that the ladle wall temperature closely reflects thermal condition of the ladle wall and should be used as a control parameter instead of exhaust gas temperature.

Department : Mechanical Engineering

Student's Signature *Jakkrawut*

Field of Study : Mechanical Engineering

Advisor's Signature *P. Charuny*

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จริญญาภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสสำคัญในการทำงานวิจัยฉบับนี้ รวมถึงการให้ความกรุณาถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ประสบการณ์อันล้ำค่าต่างๆ ที่มีคุณค่ายิ่ง อันเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ ดร. ณัฐเดช เพ็ญวรวงศ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยขึ้นนี้จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัทสยาม สตีล ซินติเกตจำกัด มหาชน ที่อำนวยความสะดวกทั้งในส่วนของการจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งห้วเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในงานวิจัยชุดนี้ ขอขอบพระคุณคุณบุญล้ำ ศรีพิชัย ผู้อำนวยการโรงงาน คุณพิษณุ เจริญสมศักดิ์ ผู้จัดการโรงงาน คุณวันชัย มนูญพานิชย์ ผู้จัดการส่วนโรงหลอม คุณธเนศ วงศ์ประยูร วิศวกรโรงหลอม ทีมวิศวกรและทีมช่างเทคนิคของบริษัทที่ช่วยให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยฉบับนี้ ผอ. วิกรม วัชรคุปต์ ผู้อำนวยการสถาบัน คุณหิน นววงศ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล เตียววณิชย์ ที่ปรึกษาสถาบัน คุณณัฐพล รัตนมาลี หัวหน้าแผนกวิจัยและพัฒนา คุณทศพล เจตรไชสง นักวิจัย คุณอนันต์ จิตรานูเคราะห์ และคุณพลพร จาติเสถียร ผู้ช่วยนักวิจัย พี่ๆ เพื่อนๆ ที่คอยแนะนำและคำปรึกษา และที่ขาดเสียมิได้ คุณศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น เพื่อนผู้ร่วมทำการทดลองและคอยช่วยเหลือทุกครั้งในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ทีมงานจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณแมนพงษ์ ตั้งตระกูล คุณอภิสิทธิ์ บุญเกิด และคุณตรงจิตต์ ชวหา ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งร่วมทำการทดลองทั้งในงานวิจัยนี้อีกด้วย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา อันคุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ครอบครัว ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.6 การนำเสนอผลงานวิจัย	4
บทที่ 2 เอกสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์	5
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
3.2 ถังถ้ำน้ำเหล็ก (Ladle).....	10
3.3 หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burner)	13
3.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	15
3.4.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer).....	15
3.4.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer).....	16
3.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer).....	18
3.5 สมดุลมวลและสมดุลพลังงานในถังถ้ำน้ำเหล็ก (Mass and Energy Balance).....	19
3.5.1 สมดุลมวลในถังถ้ำน้ำเหล็ก.....	19

	หน้า
3.5.2 สมดุลพลังงานถึงถ่ายน้ำเหล็ก.....	22
3.6 สมการการเผาไหม้ (Combustion Equation).....	32
3.6.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา	32
3.6.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้.....	32
3.7 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของถึงถ่ายน้ำเหล็ก (Thermal Efficiency).....	35
บทที่ 4 การตรวจวัดและเก็บข้อมูล	36
4.1 ข้อมูลเบื้องต้นและการทำงานของเครื่องถึงถ่ายน้ำเหล็กในปัจจุบัน.....	36
4.2 รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องทำการตรวจวัด.....	36
4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	38
4.3.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples).....	38
4.3.2 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (IR Thermometer).....	40
4.3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส.....	40
4.3.4 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger).....	41
4.3.5 เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer).....	41
4.4 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในผนังของถึงถ่ายน้ำเหล็ก.....	42
4.5 การตรวจวัดและเก็บข้อมูลการถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบเดิม ทั้งหัวเผา แบบธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง	44
4.6 การติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ.....	45
4.7 ข้อมูลเบื้องต้นการทำงานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	48
4.8 การถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ.....	48
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	49
5.1 ผลที่ได้จากการทดลอง	49
5.1.1 กราฟแสดงข้อมูลการทดลองที่เวลาต่างๆ.....	49
5.1.2 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในถึงถ่ายน้ำเหล็ก.....	53

5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	60
5.2.1 สมดุลมวล.....	60
5.2.2 สมดุลพลังงาน.....	61
5.2.3 ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก	74
5.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	75
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	78
6.1 สรุปผล.....	78
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต.....	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก ข้อมูลการตรวจวัด	83
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	130
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงาน	163
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	178

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1	ความสัมพัทธ์ของค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้กับอุณหภูมิไอเสีย.....28
ตารางที่ 3.2	องค์ประกอบของธาตุในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย.....32
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา32
ตารางที่ 4.1	ข้อมูลที่ต้องการตรวจวัดการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบเดิมทั้งการอุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง36
ตารางที่ 4.2	ข้อมูลที่ต้องการตรวจวัดการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ.....37
ตารางที่ 5.1	สมมูลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล.....60
ตารางที่ 5.2	สมมูลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ.....60
ตารางที่ 5.3	สมมูลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ.....61
ตารางที่ 5.4	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล รอบการอุ่นที่ 162
ตารางที่ 5.5	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล รอบการอุ่นที่ 262
ตารางที่ 5.6	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล รอบการอุ่นที่ 363
ตารางที่ 5.7	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล รอบการอุ่นที่ 463
ตารางที่ 5.8	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 1.....65
ตารางที่ 5.9	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 2.....66

ตารางที่ 5. 10	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดา ที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 3.....	66
ตารางที่ 5.11	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดา ที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 4.....	67
ตารางที่ 5. 12	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ รอบการอุ่นที่ 1	69
ตารางที่ 5. 13	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ รอบการอุ่นที่ 2	70
ตารางที่ 5.14	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ รอบการอุ่นที่ 3	71
ตารางที่ 5.15	สมมูลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ รอบการอุ่นที่ 4	72
ตารางที่ 5.16	ประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล.....	74
ตารางที่ 5.17	ประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ	74
ตารางที่ 5.18	ประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ	75
ตารางที่ 5.19	ปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก	76
ตารางที่ 5.20	ผลการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง	76
ตารางที่ 5.21	ปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงต่อตันเหล็ก.....	77

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงตำแหน่งในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟ 5
รูปที่ 2.2	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในการทดลองการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก..6
รูปที่ 2.3	การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็ก 7
รูปที่ 2.4	สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบธรรมดา 8
รูปที่ 3.1	ถังถ่ายน้ำเหล็ก 12
รูปที่ 3.2	หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟต้องติดตั้งเป็นคู่เพื่อให้ทำงานสลับกัน 13
รูปที่ 3.3	หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่เรียกว่า self-regenerative burner ทำงาน ที่ละชุดสลับกันซึ่งประกอบด้วยหัวฉีดน้ำมันหกหัว 14
รูปที่ 3.4	ลูกบอลเซรามิก(Ceramic ball) 14
รูปที่ 3.5	รังผึ้งเซรามิก (Ceramic honeycomb)..... 15
รูปที่ 3.6	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในผนังถังถ่ายน้ำเหล็กโดยการนำความร้อน... 16
รูปที่ 3.7	สมดุลมวลในปริมาตรควบคุมของถังถ่ายน้ำเหล็ก 19
รูปที่ 3.8	สมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผา ธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอ 22
รูปที่ 3.9	สมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผา แบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ..... 22
รูปที่ 3.10	ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด 29
รูปที่ 4.1	ลวดเทอร์โมคัปเปิลชนิด R 38
รูปที่ 4.2	เทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบเซรามิก 39
รูปที่ 4.3	เทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบตะเกียบ 39
รูปที่ 4.4	Infrared Thermometer 40
รูปที่ 4.5	Digital Thermometer 40
รูปที่ 4.6	เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ NI CPF-1804 41
รูปที่ 4.7	Flue gas Analyzer Testo 327-1 41
รูปที่ 4.8	ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก..... 42
รูปที่ 4.9	การกำหนดตำแหน่งเพื่อเจาะฝังเทอร์โมคัปเปิล..... 43
รูปที่ 4.10	ลักษณะของการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก 43

รูปที่ 4.11	การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลพร้อมกับการเก็บสายที่เรียบร้อยแล้ว.....	44
รูปที่ 4.12	หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟรุ่น RCB-FH20	46
รูปที่ 4.13	การติดตั้งและการวางระบบท่อ	46
รูปที่ 4.14	ชุดท่อน้ำมันของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	46
รูปที่ 4.15	ชุดท่ออากาศของระบบหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	47
รูปที่ 4.16	ชุดควบคุมการทำงานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	47
รูปที่ 4.17	หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว	47
รูปที่ 5.1	อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิไอเสียจากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซล	50
รูปที่ 5.2	ค่าความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในผนังและอุณหภูมิไอเสีย.....	50
รูปที่ 5.3	อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิไอเสียจากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ.....	51
รูปที่ 5.4	ค่าความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในผนังและอุณหภูมิไอเสีย.....	51
รูปที่ 5.5	อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิไอเสียจากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ.....	52
รูปที่ 5.6	ค่าความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในผนังและอุณหภูมิไอเสีย ...	53
รูปที่ 5.7	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 1	54
รูปที่ 5.8	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 2	54
รูปที่ 5.9	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 3	55
รูปที่ 5.10	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 4	55
รูปที่ 5.11	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 1	56

รูปที่ 5.12	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 2	56
รูปที่ 5.13	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 3	57
รูปที่ 5.14	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 4	58
รูปที่ 5.15	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 1	58
รูปที่ 5.16	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 2	59
รูปที่ 5.17	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 3	59
รูปที่ 5.18	การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 4	59
รูปที่ 5.19	สมดุลพลังงานของการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล.....	64
รูปที่ 5.20	แข่งกีโตะแกรมแสดงสมดุลพลังงานการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล	64
รูปที่ 5.21	สมดุลพลังงานของการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ.....	67
รูปที่ 5.22	แข่งกีโตะแกรมแสดงสมดุลพลังงานการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ	68
รูปที่ 5.23	สมดุลพลังงานของการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ.....	73
รูปที่ 5.24	แข่งกีโตะแกรมแสดงสมดุลพลังงานการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ.....	73
รูปที่ 5.25	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กโดยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล หัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอและหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ.....	75

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
a_{th}	อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อหนึ่งโมลของเชื้อเพลิง	$\text{kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_{\text{fuel}}$
A_{cover}	พื้นที่ของผิวด้านนอกของฝาถังถ้ำน้ำเหล็ก	m^2
$A_{opening}$	พื้นที่ของช่องเปิด	m^2
$A_{surface,regen}$	พื้นที่ของผิวด้านนอกของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	m^2
A_{wall}	พื้นที่ของผิวด้านนอกของเตาเผา	m^2
AF_{actual}	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ	$\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
AF_{stoic}	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี	$\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
C_t	ตัวคูณสำหรับปรับแก้ของสัดส่วนเวลาการเปิดปิดของช่องเปิด	-
$C_{p,brick}$	ค่าความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ SK38	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
$C_{p,ceramics}$	ค่าความร้อนจำเพาะของเซรามิก	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
$C_{p,steel}$	ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
\bar{C}_{p,CO_2}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
\bar{C}_{p,H_2O}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
\bar{C}_{p,N_2}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
\bar{C}_{p,O_2}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
\bar{C}_{p,SO_2}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
C_{billet}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
C_{fuel}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
h_m	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
k	ค่าสภาพการนำความร้อน	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
$m_{air,com}$	มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	kg
$m_{flue,ladle}$	มวลของไอเสียที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็ก	kg
m_{fuel}	มวลของเชื้อเพลิง	kg
$m_{ceramics}$	มวลของลูกบอลเซรามิกในหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	kg
m_{ladle}	มวลของถังถ้ำน้ำเหล็ก	kg
m_{regen}	มวลของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	kg
m_{steel}	มวลของชั้นเหล็กในถังถ้ำน้ำเหล็ก	kg

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$m_{CO_2, flue, furnace}$	มวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในไอเสีย	kg
$m_{H_2O, flue, furnace}$	มวลของไอน้ำภายในไอเสีย	kg
$m_{N_2, flue, furnace}$	มวลของก๊าซไนโตรเจนภายในไอเสีย	kg
$m_{O_2, flue, furnace}$	มวลของก๊าซออกซิเจนภายในไอเสีย	kg
$m_{SO_2, flue, furnace}$	มวลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในไอเสีย	kg
Nu_L	ค่า Nusselt number	-
Pr	ค่า Prandtl number	-
$\dot{Q}_{air, inlet}$	ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้าจาก recuperator	MJ
$\dot{Q}_{air, leak}$	ความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา	MJ
$\dot{Q}_{air, outlet}$	ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออกจาก recuperator	MJ
$\dot{Q}_{air, preheat}$	ความร้อนที่นำกลับมาใช้จากการ preheat	MJ
$\dot{Q}_{billet, sen}$	ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่ billet	MJ
\dot{Q}_{comb}	ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	MJ
Q_{flue}	ความร้อนสูญเสียของไอเสีย	MJ
Q_{fuel}	ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง	MJ
$Q_{fuel, sen}$	ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า	MJ
$Q_{opening}$	ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี	MJ
$Q_{other, ladle}$	ความร้อนสูญเสียในส่วนอื่นๆ	MJ
Q_{wall}	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังถึงถ่าน้ำเหล็ก	MJ
$Q_{storage, ceramics}$	ความร้อนที่สะสมในลูกบอลเซรามิก	MJ
$Q_{storage, cover}$	ความร้อนที่สะสมในฝาของชุดหัวเผา	MJ
$Q_{storage, ladle}$	ความร้อนที่สะสมภายในถังถ่าน้ำเหล็ก	MJ
$Q_{storage, regen}$	ความร้อนที่สะสมในหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	MJ
$Q_{storage, steel}$	ความร้อนที่สะสมในชั้นเหล็กของถังถ่าน้ำเหล็ก	MJ
$Q_{surface, cover}$	การถ่ายเทความร้อนจากฝาของหัวเผาไปยังสิ่งแวดล้อม	MJ
$Q_{surface, ladle}$	การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังถึงถ่าน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม	MJ
$Q_{surface, piping}$	การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวท่อส่งแก๊สร้อน	MJ
$Q_{surface, regen}$	ถ่ายเทความร้อนจากผิวของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟไปยังสิ่งแวดล้อม	MJ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
Ra_L	ค่า Rayleigh number	-
T_{amb}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	K
$T_{ceramics}$	อุณหภูมิของลูกบอลเซรามิก	K
T_{cover}	อุณหภูมิที่ผิวฝาถังถ่ายน้ำเหล็กด้านนอก	K
T_f	อุณหภูมิฟิล์ม	K
$T_{flue, furnace}$	อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย	K
$T_{fuel, in}$	อุณหภูมิของเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่นด้วย heater	K
T_{ladle}	อุณหภูมิภายในถังถ่ายน้ำเหล็ก	K
T_{pipe}	อุณหภูมิของท่อที่ทำการหุ้มฉนวนแล้ว	K
T_{regen}	อุณหภูมิของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	K
T_{wall}	อุณหภูมิที่ผิวเตาด้านนอก	K
V_{fuel}	ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง	litre
ρ_{fuel}	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	kg/m ³
β	ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงปริมาตร	K ⁻¹
$\mathcal{E}_{opening}$	ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด	-
\mathcal{E}_{wall}	ค่า Emissivity ของผนังถังถ่ายน้ำเหล็กด้านนอก	-
η_{ladle}	ประสิทธิภาพของการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก	%
λ	ตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน	-
ν	ค่า Kinematic viscosity	m ² /s
σ	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์	W/m ² .K ⁴

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

การอนุรักษ์พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ทั้งในแง่สิ่งแวดล้อมและการลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากพลังงานเป็นทรัพยากรที่มีจำกัด ซึ่งนับวันจะมีปริมาณเหลือน้อยลง ราคาพลังงานจึงสูงขึ้นเป็นเงาตามตัว ทำให้ต้นทุนพลังงานในอุตสาหกรรมต่างๆ มีสัดส่วนที่สูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การใช้พลังงานมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งทวีความรุนแรงขึ้นและปรากฏชัดขึ้นทุกขณะ ทำให้การประหยัดพลังงานไม่ใช่ทางเลือกแต่กลายเป็นสิ่งที่ต้องกระทำ

อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีการใช้พลังงานสูงมากในกระบวนการผลิตเหล็กในขั้นตอนต่างๆ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมเหล็กจึงเป็นสิ่งที่ได้รับสนใจและมีความจำเป็นเพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว ในขั้นตอนของการหลอมเหล็กประกอบด้วย การหลอมเศษเหล็กให้เป็นน้ำเหล็ก การถ่ายน้ำเหล็กลงไป ใน ถังถ่ายน้ำเหล็ก เพื่อเคลื่อนย้ายน้ำเหล็กไปเทลงในเบ้าหล่อ ในการนี้จำเป็นต้องอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก เพื่อปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมในการรับน้ำเหล็ก ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ที่ 1000°C โรงงานเหล็กส่วนมากใช้หัวเผาที่ใช้ น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กโดยการพ่นเปลวไฟจากหัวเผาเข้าไปตรงกลางของถังถ่ายน้ำเหล็ก แก๊สร้อนจากการเผาไหม้เมื่อปะทะกับก้นของถังถ่ายน้ำเหล็กก็จะแผ่ออกและไหลย้อนไปตามผนังออกมาที่ปากของถังถ่ายน้ำเหล็ก และถูกพ่นทิ้งออกไปจากขอบปากถังถ่ายน้ำเหล็กโดยตรง ไอเสียที่ปล่อยทิ้งมีอุณหภูมิสูงจึงมีการสูญเสียพลังงานในรูปของไอเสียที่พ่นทิ้งสูงมาก ซึ่งสามารถสังเกตด้วยตาเปล่าได้ว่าบางครั้งมีเปลวไฟแลบออกมากับไอเสียออกจากตัวถังถ่ายน้ำเหล็กด้วย

การปรับปรุงวิธีการในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กจึงเป็นวิธีที่จะช่วยลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กได้ทางหนึ่ง หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟเป็นอุปกรณ์ที่มีการนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยที่จะมีตัวกลางในการเก็บสะสมความร้อนไว้ เพื่อใช้ในการอุ่นอากาศเผาไหม้ จากการศึกษาเบื้องต้นพบข้อมูลที่น่าสนใจหลายประการโดยที่ Worrell et al.(1999) ได้ทำการประเมินภาพรวมการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก สำหรับอุตสาหกรรมเหล็กในสหรัฐอเมริกาว่า มีการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก 0.04 GJ/t หรือประมาณ 1 ลิตร น้ำมันต่อตันเหล็ก ซึ่งในเอกสารดังกล่าวประเมินว่ามีความเป็นไปได้ที่จะลดการใช้พลังงานส่วนนี้ลงได้ 50% โดยมีระยะเวลาคืนทุน 1.1 ปี และจากการเก็บข้อมูลในโรงงานในประเทศไทยพบว่า มีการใช้น้ำมันในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กประมาณ 4-8 ลิตร/ตันเหล็ก ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานค่อนข้างมากและจาก Tanaka(2006) ประเมินว่าการใช้หัว

เผาแบบหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟจะสามารถลดอุณหภูมิของไอเสียที่ปล่อยทิ้งจากถังถ่าน้ำเหล็กที่ 1000°C เหลือ 170°C และสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้ถึง 51%

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทยยังไม่มีการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในการอุ่นถ่าน้ำเหล็กและยังไม่มีเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการประเมินผลประหยัดพลังงานในส่วนนี้ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของการอุ่นวิธีนี้จึงเป็นแนวทางอีกแนวทางหนึ่งเพื่อที่จะช่วยลดการใช้พลังงานและสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับอุตสาหกรรมเหล็กต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานและสภาวะทางความร้อนในการอุ่นถ่าน้ำเหล็กตามแบบเดิมที่ใช้งานทั่วไป
2. เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอุ่นถ่าน้ำเหล็กโดยการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี การออกแบบ สร้าง และทดลองใช้งานจริง เพื่อบันทึกข้อมูลการทำงานจริงสำหรับเปรียบเทียบกับข้อมูลเดิมก่อนการปรับปรุง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาถ่าน้ำเหล็กขนาดกลางขนาด 25 ตัน โดยคำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติ ในทิศตั้งฉากกับผนังถ่าน้ำเหล็ก
2. ทำการออกแบบและสร้างฝาและอุปกรณ์อุ่นถ่าน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ
3. ทดลองใช้งานและบันทึกข้อมูลเพื่อหาประสิทธิภาพทางความร้อนทั้งการอุ่นแบบเดิมและแบบที่ใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ต้นแบบของอุปกรณ์และวิธีการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง พร้อมทั้งข้อมูลการทำงาน สำหรับใช้ในการสาธิตและอ้างอิงเพื่อส่งเสริมให้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเหล็กต่อไป

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับวิธีการและประสิทธิภาพในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ใช้ในปัจจุบัน ทั้งการค้นคว้าเชิงเอกสารและข้อมูลการใช้งานจริงในโรงงาน โดยจะเน้นที่ถึงถ่ายน้ำเหล็กขนาดกลาง (ประมาณ 25 ตัน) ซึ่งเป็นขนาดที่มีการใช้งานเป็นส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย

2. ออกแบบเบื้องต้นทั้งอุปกรณ์และวิธีการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงขึ้น

3. ตรวจสอบวัดและบันทึกสภาพการทำงาน เพื่อหาประสิทธิภาพการใช้พลังงานและสภาวะทางความร้อนของถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ใช้ในปัจจุบัน

4. ออกแบบโดยละเอียด อุปกรณ์และวิธีการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ ประกอบด้วยการวิเคราะห์ทั้งในเชิงทฤษฎี และ ในทางปฏิบัติ โดยการทำงานร่วมกับทีมงานของโรงงานเพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานจริงในทางปฏิบัติ

5. สร้าง ทดลองใช้งานและบันทึกข้อมูลเพื่อหาประสิทธิภาพและสภาวะทางความร้อน ตลอดจนแนวทางในการควบคุมการทำงานที่เหมาะสมที่สุด

6. สรุปผลและเผยแพร่ผลการศึกษาวิจัย

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 การนำเสนอผลงานวิจัย

1. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, 5th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT), 29 เมษายน – 1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก นำเสนอผลงานในหัวข้อวิจัยเรื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถังถายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Improvement of Ladle Preheating Apparatus with Regenerative Burners)

2. World Renewable Energy Congress 2009 – Asia, The 3rd International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2009)”, 19-22 May 2009, Bangkok, Thailand นำเสนอผลงานในหัวข้อวิจัยเรื่อง A Thermal Modeling of Ladle for Energy Conservation in Steelmaking Process

3. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6, 6th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT), 5-7 พฤษภาคม 2553 นำเสนอผลงานในหัวข้อวิจัยเรื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นถังถายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Improvement of Ladle Preheating Apparatus with Regenerative Burners)

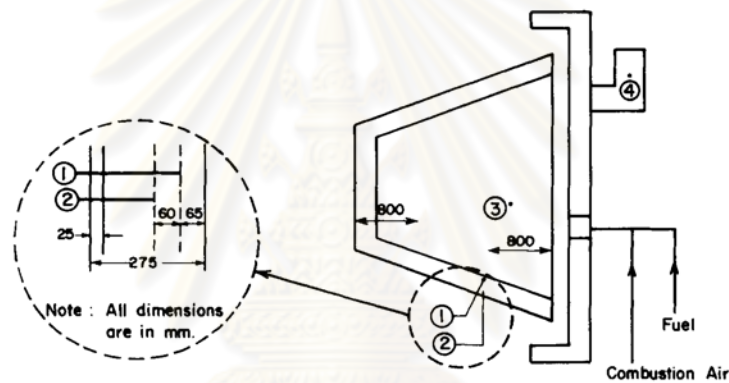
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mohanty และ Satayayut (1992) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองแบบจำลองของถังถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้ 1D Transient Heat Conduction Equation มาคำนวณหาค่าข้อมูลของอุณหภูมิ การสูญเสียจากไอเสีย และสมดุลพลังงาน ซึ่งความสัมพันธ์ของค่า Emissivity ได้มาจากการอ้างอิงตามวิธีของ Wimpress (1978) ที่ตำแหน่งของผนังข้างของถังรับน้ำเหล็กกันถังรับน้ำเหล็กและฝาของชุดอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก

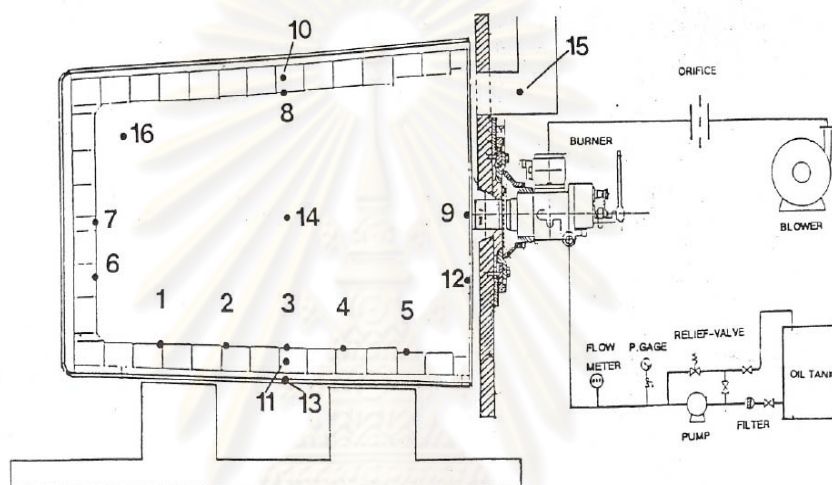


รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟ (Mohanty and Satayayut, 1992)

ผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีแนวโน้มของอุณหภูมิ ณ ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ฝังเทอร์โมคัปเปิลไว้ในชั้นอิฐทนไฟนั้นมีแนวโน้มของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางเดียวกัน มีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้ทำนายผลจากการทดลองและผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นจะเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลองที่ละน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับผลของอุณหภูมิไอเสียซึ่งจะมีความแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อยๆ อาจเป็นผลมาจากความผันผวนในการวัดอุณหภูมิไอเสียระหว่างการทดลอง

ผลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองมีความแตกต่างกันเนื่องมาจาก 2 เหตุผลคือสมมติฐานการพาความร้อนจากแก๊สจากการเผาไหม้ไปยังชั้นอิฐทนไฟและการนำความร้อนที่สมมติให้เป็นแบบ 1 มิติ ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนจริงมีลักษณะที่เป็น 2 มิติ

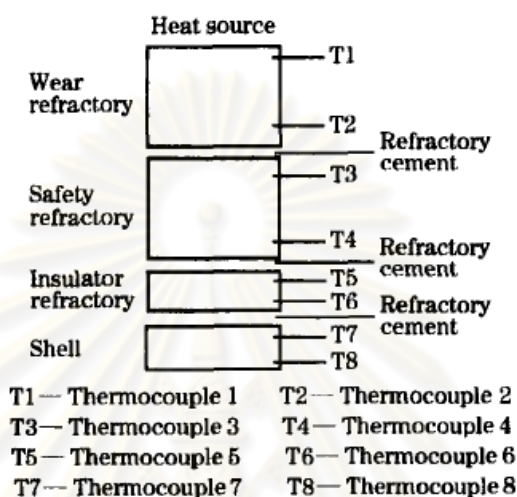
สมศักดิ์ คงโชติ (1993) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในถังถ่ายน้ำเหล็ก การทดลองการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กใน ทำการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในถังรับน้ำเหล็กโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง อิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนภายในถังจึงมีมาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้เน้นการศึกษาอิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนภายในถัง และศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการอุ่น เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนการแผ่รังสีของแก๊ส เพื่อทราบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนขณะอุ่นถังรับน้ำเหล็ก จากการศึกษาพบว่าผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองพอสมควร



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในการทดลองการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก
(สมศักดิ์ คงโชติ, 1993)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Zimmer et al. (2008) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในถังถ่ายน้ำเหล็ก การประเมินการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็กจากการวัดอุณหภูมิแต่ละจุดภายในถังถ่ายน้ำเหล็กทั้งในชั้นอิฐทนไฟและชั้นของผิวเหล็กทั้งหมดของกระบวนการปรุ้งน้ำเหล็ก เพื่อประเมินรูปโครงสร้างของอุณหภูมิระหว่างผิวร้อนและเย็นของถังถ่ายน้ำเหล็กโดยค่าที่ได้จากการทดลองนั้นจะไม่คิดค่า Contact Resistance



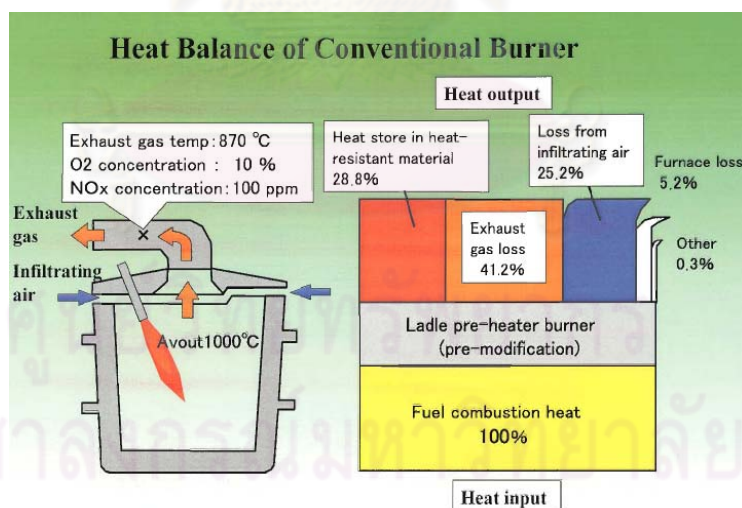
รูปที่ 2.3 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็ก (Zimmer et al., 2008)

อุณหภูมิที่ได้จากการวัดในแต่ละระยะเวลาจะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ยิ่งไปกว่านั้นแต่ละระยะเวลาของกระบวนการยังขึ้นอยู่กับกระบวนการก่อนหน้านั้นซึ่งจะทำให้การควบคุมอุณหภูมิภายในถังถ่ายน้ำเหล็กมีความยุ่งยากมากยิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Energy Conservation Center Japan (1998) กล่าวถึงการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก โดยที่การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบเดิมซึ่งไม่มีการนำความร้อนจากอากาศเสีย กลับมาใช้ใหม่ ประสิทธิภาพจะอยู่ที่ประมาณ 30% และอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟมีค่าไม่สม่ำเสมอ เมื่อทำการติดตั้งระบบหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ อุณหภูมิอากาศที่ใช้เผาใหม่จะมีค่าประมาณ 900°C อุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยทิ้งจะมีค่าประมาณ 170°C และนอกจากนั้นความแตกต่างของการแจกแจงของอุณหภูมิภายในผนังถึงถ่ายน้ำเหล็กนั้นได้ถูกพัฒนาขึ้นในระดับที่น้อยกว่า 30°C

Nippon Steel Corporation (2008) กล่าวถึงภาพรวมของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในปัจจุบัน สมดุลพลังงานของถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ใช้หัวเผาแบบธรรมดาในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กนั้นจะมีความร้อนสะสมในตัวถึงถ่ายน้ำเหล็กประมาณ 28.8% ค่าการสูญเสียทางความร้อนจากไอเสียประมาณ 41.2% และความร้อนสูญเสียจากอากาศที่ผ่านจากภายนอกเข้าทางช่องเปิดอยู่ที่ 25.2% ที่อุณหภูมิไอเสียประมาณ 870°C ปริมาณออกซิเจน 10% และปริมาณ NO_x 100 ppm หลังจากทำการเปลี่ยนระบบการอุ่นมาเป็นหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟแล้วนั้น จะพบว่าการแจกแจงทางความร้อนในถึงถ่ายน้ำเหล็กได้ดีกว่าการอุ่นแบบเดิม พลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ลดลง 46% ปริมาณ NO_x ลดลงเหลือประมาณ 60 ppm



รูปที่ 2.4 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบธรรมดา (Nippon Steel Corporation, 2007)

Tomita (2008) กล่าวถึงหลักการของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้กับถังถ่ายน้ำเหล็ก ซึ่งจะใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟชนิดคู่ที่มีหน่วยสะสมความร้อนภายในชุดหัวเผาแต่ละชุด เมื่อหัวเผาหัวหนึ่งทำการเผาไหม้ อีกหัวหนึ่งจะทำการสะสมความร้อนโดยใช้ไอเสีย ช่วงเวลาที่ใช้สะสมความร้อนอยู่ที่ประมาณ 20-60 วินาที ผลที่ได้หลังจากประมาณ 50 รอบการทำงานแล้วพบว่าการนำความร้อนจากอากาศเสียกลับมาใช้ใหม่นั้นจะอยู่ที่ประมาณ 50-90%

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2008) กล่าวถึงหลักการทำงานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟโดยที่จะมีการนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่เป็นอากาศเผาไหม้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ศักยภาพในการประหยัดพลังงานโดยการติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟนี้จะสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 40-50% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้หัวเผาแบบอากาศเย็นทั่วไป มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 2 ปี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นถึง ถ่ายน้ำเหล็ก ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้ประกอบไปด้วย ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ ถ่ายน้ำเหล็ก หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ การถ่ายเทความร้อน การเผาไหม้ รวมไปถึงสมดุลมวล และสมดุลพลังงานในถ่ายน้ำเหล็ก

3.2 ถ่ายน้ำเหล็ก (Ladle)

ในกระบวนการผลิตเหล็กนั้น ขั้นตอนหลังจากการหลอมเศษเหล็กโดยเตาหลอมเพื่อนำน้ำเหล็กที่หลอมได้ไปสู่กระบวนการหล่อบนแท่นหล่อนั้น การเคลื่อนย้ายน้ำเหล็กไปยังแท่นหล่อนั้นจะใช้ถ่ายน้ำเหล็กในการรับและส่งน้ำเหล็ก ถ่ายน้ำเหล็กที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นถ่ายขนาด 25 ตัน โดยถ่ายน้ำเหล็กนี้จะเป็นถ่ายรูปทรงกระบอก ด้านปากจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอก 2.17 เมตร ด้านก้นถ่าย 1.93 เมตร ความสูงตามแนวตั้งฉาก 2.50 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1

การจัดเรียงตัวของอิฐทนไฟที่ผนังด้านในของถ่ายนั้นจะแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยผนังด้านในสุดของถ่ายทำด้วยอิฐทนไฟ SK38 ซึ่งเรียกว่า Working lining มีส่วนผสมของ Alumina 85% ทางด้านผนังข้างและด้านก้นของถ่ายหนา 150 มิลลิเมตร ถัดออกมาเป็นชั้นอิฐทนไฟชนิดเดียวกันซึ่งเรียกว่าชั้น Safety lining ด้านผนังข้างของถ่ายหนา 64 มิลลิเมตร ด้านก้นถ่ายหนา 100 มิลลิเมตร ส่วนผนังด้านนอกสุด ผนังข้างเป็นเหล็กหนา 20 มิลลิเมตร ที่ก้นถ่ายหนา 25 มิลลิเมตร น้ำหนักถ่ายเปล่าประมาณ 15 ตัน รับน้ำเหล็กได้ประมาณครั้งละ 20-25 ตัน (จักรวาล จรุงศารทูล, 2008)

ก่อนที่จะนำถ่ายไปรับน้ำเหล็กนั้นต้องมีการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กนั้นจะแบ่งได้ตามลักษณะการใช้งานของถ่ายน้ำเหล็กเป็น 2 แบบคือ ถ่ายน้ำเหล็กใหม่หรือถ่ายเย็นและถ่ายน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้วหรือถ่ายร้อน

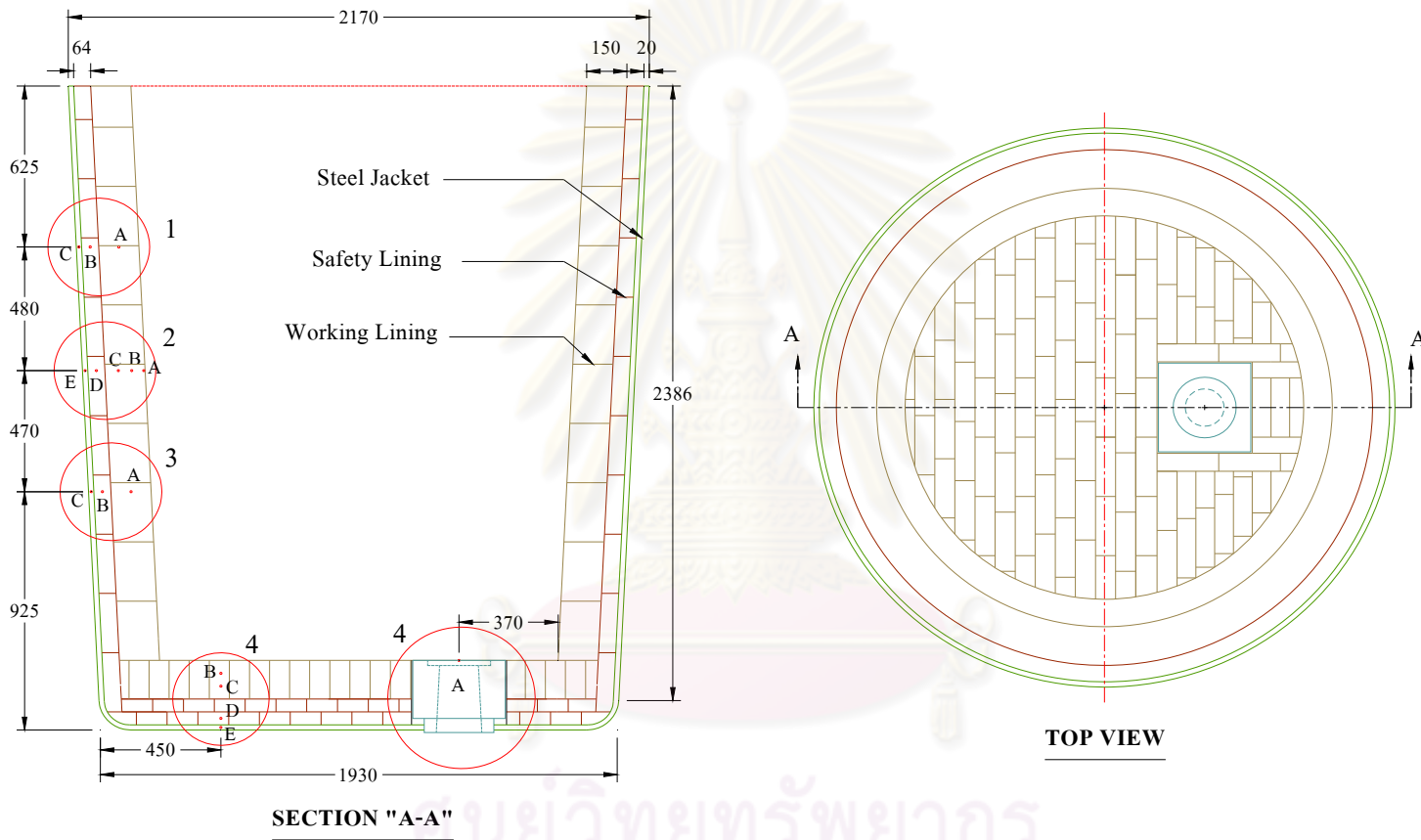
การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้งานได้ดีนั้นมี
เหตุผลหลัก 4 ประการดังนี้

1. เพื่อลดผลจากการสูญเสียความร้อนจากน้ำเหล็กไปสู่ถังถ่ายน้ำเหล็ก
2. เพื่อลด thermal shock ในชั้นของอิฐทนไฟ
3. เพื่อขจัดความชื้นที่สะสมในตัวถังถ่ายน้ำเหล็ก
4. เพื่อให้กระบวนการการผลิตเหล็กนั้นมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

ประโยชน์ที่ได้จากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก

1. ลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (Tapping temperature)
2. เพิ่มอายุการใช้งานของอิฐทนไฟ
3. ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมถังถ่ายน้ำเหล็ก
4. เพิ่มผลิตผลและคุณภาพในการหล่อเนื่องจากน้ำเหล็กมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



SECTION "A-A"

TOP VIEW

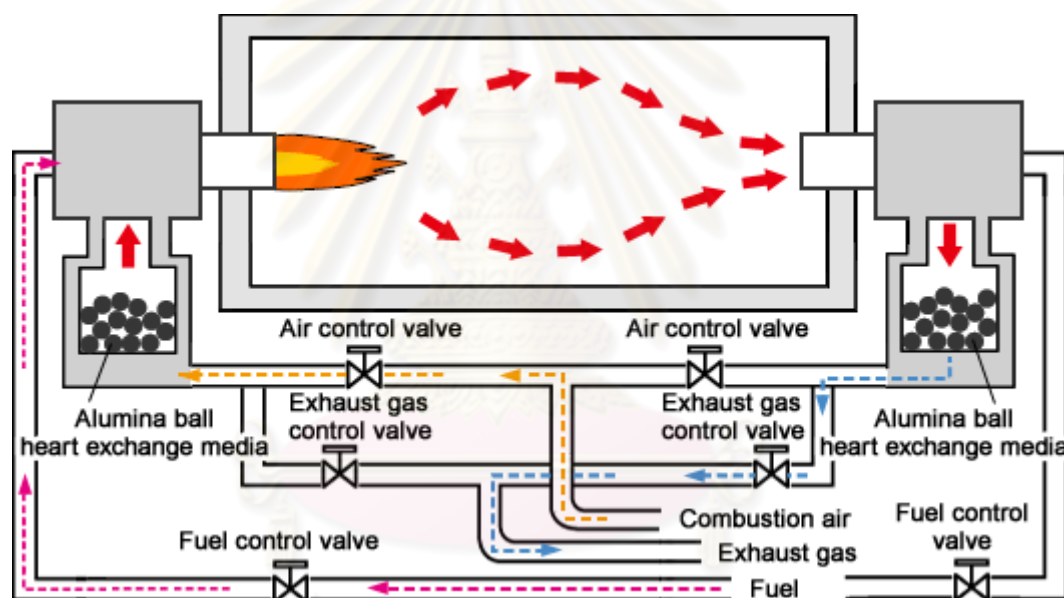
ALL DIMENSIONS IN MILLIMETER

รูปที่ 3.1 รูปทรงและมิติของถังถ่ายน้ำเหล็ก
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burner)

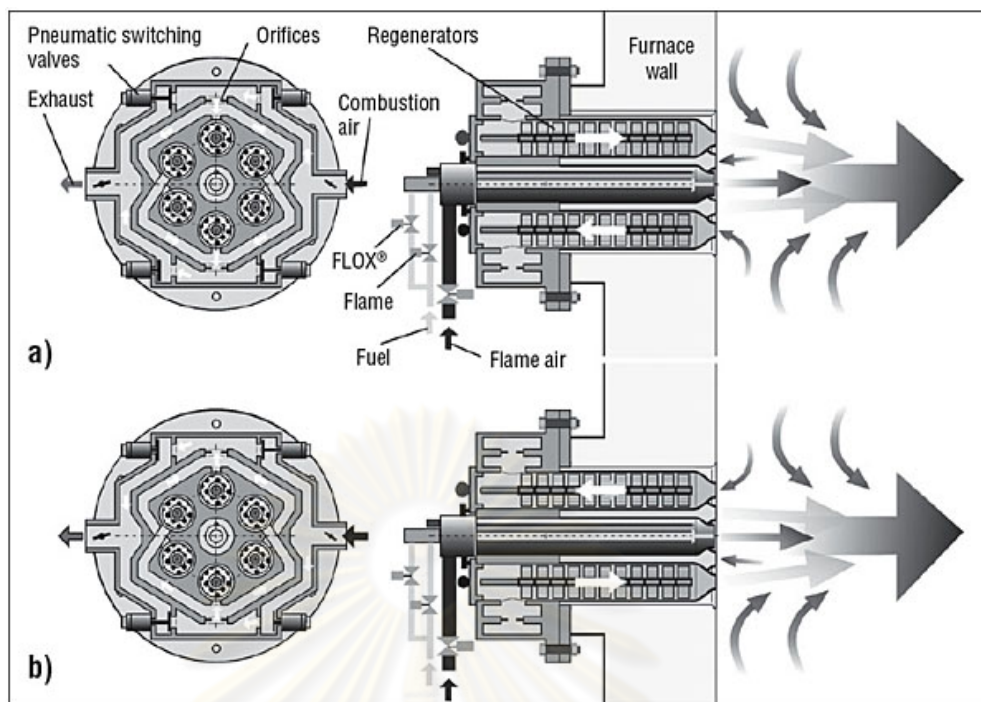
หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟเป็นหัวเผาที่มีการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่โดยที่จะนำความร้อนนั้นมาเก็บสะสมไว้ที่ห้องเก็บสะสมความร้อน ภายในห้องเก็บสะสมความร้อนนั้นจะมีวัสดุที่ใช้สะสมความร้อนเพื่อนำความร้อนที่สะสมไว้ไปใช้ในการอุ่นอากาศ

หัวเผาชนิดนี้ออกแบบมาเพื่อใช้ติดตั้งเป็นคู่ ในขณะที่หัวเผาตัวหนึ่งทำงาน หัวเผาอีกตัวหนึ่งจะไม่ทำงานแต่จะทำหน้าที่ให้อิเสียนผ่านวัสดุสะสมความร้อนเพื่อเก็บสะสมความร้อนไว้ และถ่ายเทความร้อนนั้นให้แก่อากาศที่ใช้เผาใหม่เมื่อถึงรอบที่หัวเผาตัวนี้ทำงาน



รูปที่ 3.2 หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟต้องติดตั้งเป็นคู่เพื่อให้ทำงานสลับกัน

การใช้งานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กนี้ การเลือกขนาดและชนิดของหัวเผามีความสำคัญต่อการติดตั้งเป็นอย่างมาก หัวเผาที่มีลักษณะกะทัดรัดและใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยดังเช่นหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่เรียกว่า self-regenerative burner เป็นหัวเผาที่มีวัสดุสะสมความร้อนสองชุดประกอบอยู่ในชุดหัวเผาชุดเดียว โดยที่หัวฉีดน้ำมันมีหัวเดียวซึ่งทำหน้าที่ฉีดน้ำมันเพื่อการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.3 อย่างไรก็ตาม หัวเผาชนิดนี้ที่ผลิตจำหน่ายในขณะนี้ ต้องใช้กับเชื้อเพลิงแก๊สเท่านั้น จึงไม่สามารถใช้กับโรงงานส่วนใหญ่ในประเทศไทยซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง

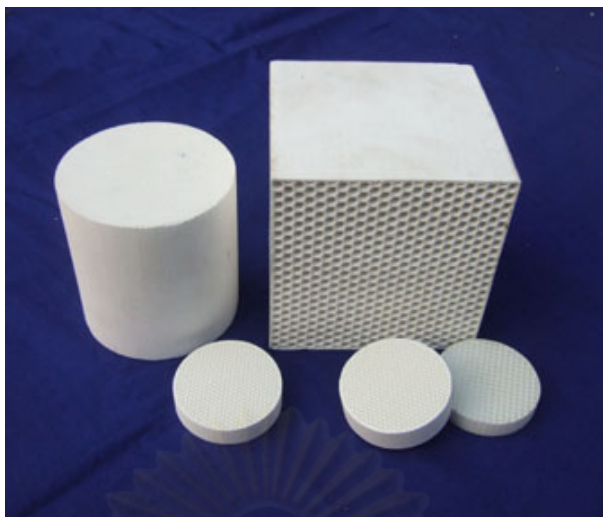


รูปที่ 3.3 หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่เรียกว่า self-regenerative burner ซึ่งมีกระบอกวัสดุสะสมความร้อนหกกระบอก แบ่งเป็นสองชุดๆละสามกระบอก

วัสดุที่ใช้สะสมความร้อนที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นมีอยู่ 3 ชนิดคือ ลูกบอลเซรามิก (ceramic ball) รังผึ้งเซรามิก (ceramic honeycomb) และ รังผึ้งสแตนเลส (stainless honeycomb) สำหรับลูกบอลเซรามิกมีข้อดีที่ค่อนข้างทนทาน เปลี่ยนทำความสะอาดง่าย ทนอุณหภูมิได้สูง และราคาถูก รังผึ้งเซรามิกได้เปรียบในแง่ของพื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรสูงกว่าลูกบอลเซรามิก แต่จะเปลี่ยนทำความสะอาดยากกว่า ราคาแพงกว่า ส่วนรังผึ้งสแตนเลสมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรสูงที่สุด แต่ทนอุณหภูมิได้ต่ำกว่าเซรามิก และราคาแพงที่สุดด้วย



รูปที่ 3.4 วัสดุสะสมความร้อนชนิดลูกบอลเซรามิก(Ceramic ball)



รูปที่ 3.5 วัสดุสะสมความร้อนชนิดรังผึ้งเซรามิก (Ceramic honeycomb)

3.4 การถ่ายเทความร้อนในถังถ่ายน้ำเหล็ก

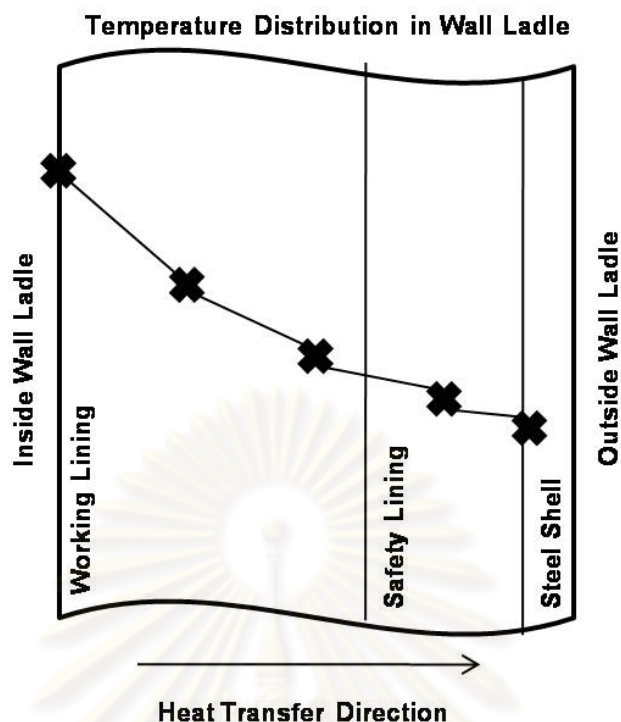
ในขณะที่มีการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกตัวถังถ่ายน้ำเหล็กทั้งการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบนี้ เราสามารถพิจารณาได้ดังนี้

3.4.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนในถังถ่ายน้ำเหล็กนั้น เราสามารถพิจารณาการนำความร้อนในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กที่เป็นการแจกแจงของอุณหภูมิภายในผนังถังถ่ายน้ำเหล็ก (Temperature Distribution) และนำการแจกแจงของอุณหภูมินี้มาพิจารณาในส่วนของพลังงานสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็ก (Energy Content) ซึ่งเป็นความร้อนใช้ประโยชน์โดยที่เราสามารถนำไปใช้หาประสิทธิภาพในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กได้ การพิจารณาการนำความร้อนในถังถ่ายน้ำเหล็กนี้ เราจะใช้ Fourier's Law มาพิจารณาการแจกแจงของอุณหภูมิภายในผนังถังถ่ายน้ำเหล็ก

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

เมื่อ	Q_{cond}	คือการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน (MJ)
	k	คือค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) (W/m-K)
	A_{cond}	คือพื้นที่ผิวของการนำความร้อน (m^2)
	$\frac{dT}{dx}$	คือค่าเกรเดียนต์อุณหภูมิภายในผนังถังถ่ายน้ำเหล็ก (K/m)



รูปที่ 3.6 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในผนังถึงถ่ายน้ำเหล็ก

3.4.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

การพาความร้อนในถึงถ่ายน้ำเหล็ก ในขณะที่ทำการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กนั้น มีการพาความร้อนจากผนังของถึงถ่ายน้ำเหล็กและผนังของชุดฝาปิดไปยังสิ่งแวดล้อม โดยการพาความร้อนนี้เป็นค่าความร้อนสูญเสียผ่านผนัง โดยจะกล่าวในส่วนของความร้อนสูญเสียในส่วนของสมดุลพลังงานต่อไป ดังนั้นสมการการพาความร้อนสามารถพิจารณาโดยใช้สมการการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection) ได้ดังนี้

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

- เมื่อ h_m คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย (W/m².K)
 A_{conv} คือพื้นที่ของการพาความร้อนของถึงถ่ายน้ำเหล็ก (m²)
 T_s คืออุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของถึงถ่ายน้ำเหล็กหรือชุดฝาปิด (K)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย (h_m)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยนั้น เราจะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ Average Nusselt number (\overline{Nu}) ที่ได้จากการทดลอง (Cengel, 2006) ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ของค่า Average nusselt number ดังสมการ

$$\overline{Nu} = \frac{hL_c}{k} = CRa_L^n \quad (3.3)$$

เมื่อ Ra_L คือค่า Rayleigh number โดยค่า Ra_L มีความสัมพันธ์กับค่า Prandtl numbers (Pr) ดังสมการ

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (3.4)$$

ν คือค่า kinematics viscosity ของของไหล (m^2/s)

L_c คือค่าความยาวของทรงกระบอก (m)

β คือค่า Coefficient of Volume Expansion (K^{-1})

C คือค่าคงที่ในรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวและระบบการไหลซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงของค่า Rayleigh number โดยปกติแล้ว จะมีค่าน้อยกว่า 1

n คือค่าคงที่ในรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวและระบบการไหลซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงของค่า Rayleigh number โดยปกติค่า n จะมีค่า 1/4 เมื่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และมีค่าเท่ากับ 1/3 เมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

Gr_L คือค่า Grashof Number โดยเราสามารถตรวจสอบชนิดของการไหลได้จากค่า Gr ถ้า Gr มีค่าไม่เกิน 10^9 ถือว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

พิจารณาลักษณะของพื้นผิวเพื่อนำไปใช้หา \overline{Nu} โดยที่ถ้าย่านน้ำเหล็กนั้นมีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอก ดังนั้นสมการที่นำมาใช้เพื่อหาค่า \overline{Nu} นั้นเราสามารถนำสมการที่ใช้กับ Vertical plate ซึ่งสามารถนำมาใช้กับทุกช่วงของค่า Rayleigh Number ตามสมการ

$$\overline{Nu} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.5)$$

โดยมีเงื่อนไขกำหนดเพื่อสามารถนำสมการนี้ไปใช้กับรูปทรงกระบอกได้คือ

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}} \quad (3.6)$$

3.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การแผ่รังสีความร้อนในถังถ่ายน้ำเหล็กในขณะที่ทำการอุ่นนั้น ความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นเป็นค่าความร้อนสูญเสียผ่านผนังและชุดฝาปิดเช่นเดียวกันกับการพาความร้อน ดังนั้นเราสามารถพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนได้ตามสมการการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวไปยังสิ่งแวดล้อมได้ดังนี้

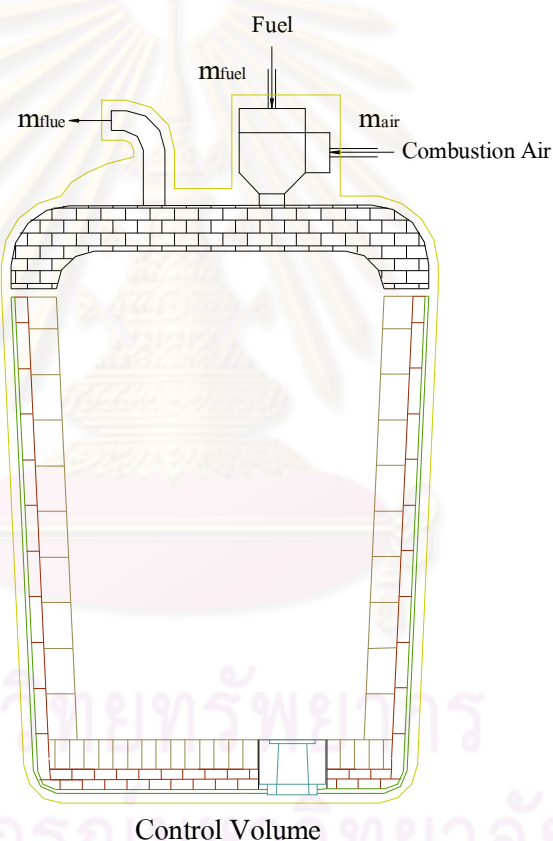
$$Q_{rad} = \varepsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (3.7)$$

- เมื่อ A_s คือพื้นที่ของการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวด้านนอกของถังถ่ายน้ำเหล็ก หรือชุดฝาปิด (m^2)
- T_s คืออุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของถังถ่ายน้ำเหล็กหรือชุดฝาปิด (K)
- ε_s คือค่า Emissivity ผิวนอกของถังถ่ายน้ำเหล็ก หรือชุดฝาปิด มีค่าประมาณ 0.80

3.5 สมดุลมวลและสมดุลพลังงานในถังถ่ายน้ำเหล็ก (Mass and Energy Balance)

การทำสมดุลพลังงานของถังถ่ายน้ำเหล็กนั้น จำเป็นต้องมีการพิจารณากฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์พลังงานควบคู่กัน ในการศึกษาเราจะพิจารณาในส่วนของสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของถังถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบของการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก สมดุลมวลของถังถ่ายน้ำเหล็กนั้นจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม แต่การพิจารณาสมดุลพลังงานนั้น เนื่องจากถังถ่ายน้ำเหล็กนั้นมีความร้อนสะสมอยู่ในตัวถังถ่ายน้ำเหล็ก เราจึงต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในปริมาตรควบคุมด้วย

3.5.1 สมดุลมวลในถังถ่ายน้ำเหล็ก



รูปที่ 3.7 แสดงสมดุลมวลในปริมาตรควบคุมของถังถ่ายน้ำเหล็ก

การทำสมดุลมวลในถังถ้ำน้ำเหล็ก พิจารณาปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 3.7 เราสามารถเขียนสมดุลมวลได้จากกฎการอนุรักษ์มวลดังนี้

มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ภายในปริมาตรควบคุม - มวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม
= การเปลี่ยนแปลงของมวลสุทธิภายในปริมาตรควบคุม

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

เมื่อ m_{in} คือมวลทั้งหมดที่เข้าสู่ภายในปริมาตรควบคุม (kg)
 m_{out} คือมวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม (kg)
 Δm_{CV} คือการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม (kg)

เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม ดังนั้นเราสามารถเขียนสมดุลมวลในรูปสมการได้ดังนี้

มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ถังถ้ำน้ำเหล็ก = มวลทั้งหมดที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็ก

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

ดังนั้นจากปริมาตรควบคุมของถังถ้ำน้ำเหล็กในรูปที่ 3.7 เราสามารถหาสมดุลมวลของปริมาตรควบคุมได้จาก

มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ถังถ้ำน้ำเหล็ก ประกอบด้วย

1. มวลของเชื้อเพลิง (m_{fuel})
2. มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($m_{air,comb}$)

มวลทั้งหมดที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็ก ประกอบด้วย

1. มวลของไอเสียที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็ก ($m_{flue,ladle}$)

ดังนั้นเมื่อแทนค่ามวลที่ไหลเข้าและไหลออกจากถังถ้ำน้ำเหล็กในสมการ(3.9) แล้วจัดรูปสมการสมดุลมวล เป็นดังนี้

$$m_{fuel} + m_{air,comb} = m_{flue,ladle} \quad (3.10)$$

1. มวลของเชื้อเพลิง (m_{fuel})

มวลของเชื้อเพลิงจะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมดซึ่งจะคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$m_{fuel} = \rho_{fuel} V_{fuel} \quad (3.11)$$

เมื่อ ρ_{fuel} คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/litre)
 V_{fuel} คือปริมาตรของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ (litre)

2. มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($m_{air,comb}$)

มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณออกซิเจนในไอเสีย จากนั้นนำปริมาณออกซิเจนที่ตรวจวัดได้มาคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (AF_{actual}) โดยรายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อการวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของการเผาไหม้ เมื่อทราบค่า AF_{actual} จะสามารถคำนวณมวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังสมการ

$$m_{air,comb} = AF_{actual} \times m_{fuel} \quad (3.12)$$

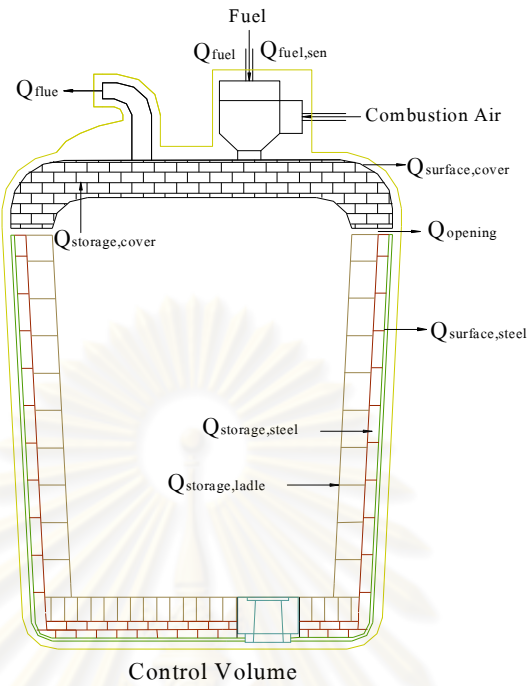
เมื่อ AF_{actual} คืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (kg_{air}/kg_{fuel})

3. มวลของไอเสียที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็ก ($m_{flue,ladle}$)

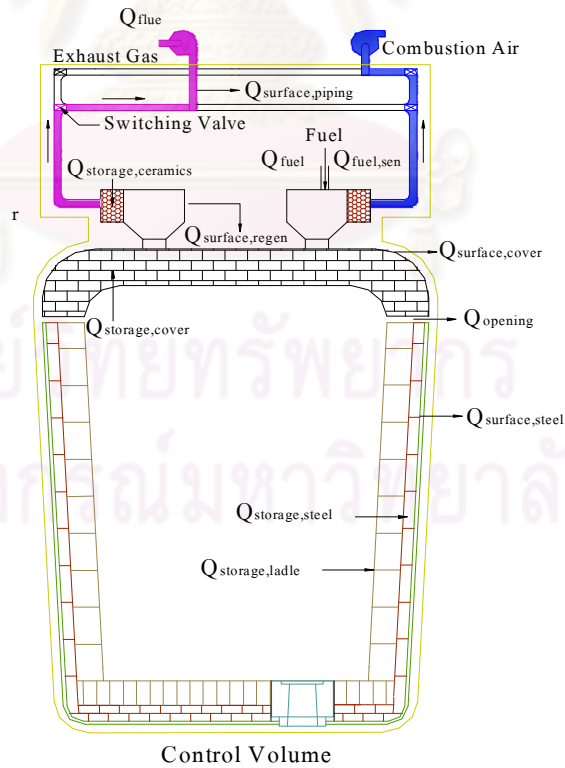
จากสมการสมดุลมวล สมการ(3.10) เราสามารถหาค่ามวลของไอเสียที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$m_{flue,ladle} = m_{fuel} + m_{air,comb} \quad (3.13)$$

3.5.2 สมดุลพลังงานถึงถ่ายน้ำเหล็ก



รูปที่ 3.8 แสดงสมดุลพลังงานในปริมาณควบคุมของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอ



รูปที่ 3.9 แสดงสมดุลพลังงานในปริมาณควบคุมของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

เราสามารถหาสมดุลพลังงานของถังถ่ายน้ำเหล็กได้จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบเปิด

$$Q - W_{CV} + \sum m_i e_i - \sum m_e e_e = \Delta E_{CV} \quad (3.14)$$

เมื่อ Q คือ การถ่ายเทความร้อนจากปริมาตรควบคุมไปยังสิ่งแวดล้อม

W_{CV} คืองานทั้งหมดที่ได้และให้กับปริมาตรควบคุม

$\sum m_i e_i$ คือพลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม

$\sum m_e e_e$ คือพลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุมไปยังสิ่งแวดล้อม

ΔE_{CV} คือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในปริมาตรควบคุม

พิจารณาที่ปริมาตรควบคุม เนื่องจากไม่มีงานที่เกิดจากระบบ ดังนั้น $W_{CV} = 0$ ดังนั้นจะได้สมการจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์คือ

$$Q + \sum m_i e_i - \sum m_e e_e = \Delta E_{CV} \quad (3.15)$$

การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม Q แบ่งออกเป็น

1. การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังถังถ่ายน้ำเหล็กไปยังสิ่งแวดล้อม

($Q_{surface,ladle}$)

2. การถ่ายเทความร้อนจากฝาของหัวเผาไปยังสิ่งแวดล้อม ($Q_{surface,cover}$)

3. การถ่ายเทความร้อนจากผิวของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟไปยังสิ่งแวดล้อม

($Q_{surface,regen}$)

4. การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวท่อส่งแก๊สร้อน ($Q_{surface,piping}$)

เมื่อวิเคราะห์จากสมดุลมวลแล้ว เราสามารถจำแนกพลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม ($\sum m_i e_i$) ได้ดังนี้

1. ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง Q_{fuel}

2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า $Q_{fuel,sen}$

และเมื่อพิจารณาพลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุม เราสามารถจำแนกพลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุม ($\sum m_e e_e$) ได้ดังนี้

1. ความร้อนสูญเสียของไอเสีย Q_{flue}

2. ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีของช่องเปิด $Q_{opening}$

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในปริมาตรควบคุม ΔE_{CV} จะพิจารณาเป็นพลังงานที่สะสมภายใน

1. พลังงานสะสมภายในถังถายน้ำเหล็ก ($Q_{storage,ladle}$, Energy Content)
2. ความร้อนที่สะสมในชั้นเหล็กของถังถายน้ำเหล็ก $Q_{storage,steel}$
3. ความร้อนที่สะสมในฝาของชุดหัวเผา $Q_{storage,cover}$
4. ความร้อนที่สะสมในลูกบอลเซรามิก $Q_{storage,ceramics}$
5. ความร้อนที่สะสมในหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ $Q_{storage,regen}$

ดังนั้นเมื่อนำมาแทนค่าลงในสมการของกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ในระบบเปิดข้างต้นจะได้

$$Q + \sum m_i e_i - \sum m_e e_e = \Delta E_{CV} \quad (3.16)$$

เมื่อพิจารณาสมการข้างต้น เราสามารถจำแนกรายละเอียดการคำนวณพลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมและออกจากปริมาตรควบคุมได้ดังนี้

การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม

1. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังถังถายน้ำเหล็ก ($Q_{surface,ladle}$)

$$Q_{surface,ladle} = h_m A_{surface} (T_{surface} - T_{amb}) + \varepsilon_{surface} \sigma A_{surface} (T_{surface}^4 - T_{amb}^4) \quad (3.17)$$

เมื่อ h_m คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย (W/m².K)

$A_{surface}$ คือพื้นที่ของผิวด้านนอกของถังถายน้ำเหล็ก (m²)

$T_{surface}$ คืออุณหภูมิที่ผิวถังถายน้ำเหล็กด้านนอก (K)

$\varepsilon_{surface}$ คือค่า Emissivity ของผนังถังถายน้ำเหล็ก มีค่าประมาณ 0.8

2. ความร้อนสูญเสียผ่านฝาถังถ่ายน้ำเหล็ก ($Q_{surface,cover}$)

$$Q_{surface,cover} = h_m A_{cover} (T_{cover} - T_{amb}) + \varepsilon_{cover} \sigma A_{cover} (T_{cover}^4 - T_{amb}^4) \quad (3.18)$$

- เมื่อ h_m คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย (W/m².K)
 A_{cover} คือพื้นที่ของผิวด้านนอกของฝาถังถ่ายน้ำเหล็ก (m²)
 T_{cover} คืออุณหภูมิที่ผิวถังถ่ายน้ำเหล็กด้านนอก (K)
 ε_{cover} คือค่า Emissivity ของฝาถังถ่ายน้ำเหล็ก มีค่าประมาณ 0.8

3. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ ($Q_{surface,regen}$)

$$Q_{surface,regen} = 2 \times (h_m A_{surface,regen} (T_{surface} - T_{amb}) + \varepsilon_{surface} \sigma A_{surface,regen} (T_{surface}^4 - T_{amb}^4)) \quad (3.19)$$

- เมื่อ h_m คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย (W/m².K)
 $A_{surface,regen}$ คือพื้นที่ของผิวด้านนอกของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (m²)
 $T_{surface}$ คืออุณหภูมิที่ผิวหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟด้านนอก (K)
 $\varepsilon_{surface}$ คือค่า Emissivity ของผนังถังถ่ายน้ำเหล็ก มีค่าประมาณ 0.8

4. การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวท่อส่งแก๊สร้อน ($Q_{surface,piping}$)

เนื่องจากท่อส่งแก๊สร้อนในชุดหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟมีการหุ้มฉนวน ซึ่งการคำนวณการสูญเสียความร้อนจากท่อที่มีฉนวนหุ้มสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{surface,pipe} = h_m A_{pipe} (T_{pipe} - T_{amb}) + \varepsilon_{pipe} \sigma A_{pipe} (T_{pipe}^4 - T_{amb}^4) \quad (3.20)$$

- เมื่อ T_{pipe} คืออุณหภูมิของท่อที่ทำการหุ้มฉนวนแล้ว (K)

พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ถึงถ่ายน้ำเหล็ก

1. ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

$$Q_{fuel} = V_{fuel} \times LHV \quad (3.21)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงต่อรอบการอุ่น (litre)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/litre)

2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า ($Q_{fuel, sen}$)

ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่น น้ำมันเชื้อเพลิงด้วย heater ก่อนจะป้อนเข้าสู่ burner โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความหนืดของ น้ำมันเชื้อเพลิง และสามารถทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นละอองฝอยได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้น้ำมันเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับอากาศได้ดีขึ้น โดย $Q_{fuel, sen}$ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{fuel, sen} = \rho_{fuel} \times V_{fuel} \times C_{fuel} (T_{fuel, in} - T_{amb}) / 1000 \quad (3.22)$$

เมื่อ ρ_{fuel} คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/liter)

C_{fuel} คือความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 1.884 kJ/kg-K

$T_{fuel, in}$ คืออุณหภูมิของเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่นด้วย heater (K)

T_{amb} คืออุณหภูมิบรรยากาศ (K)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พลังงานความร้อนที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็ก

1. ความร้อนสูญเสียของไอเสีย (Q_{flue})

$$Q_{flue} = m_{CO_2, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, CO_2} dT \right) + m_{H_2O, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, H_2O} dT \right) + m_{O_2, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, O_2} dT \right) + m_{N_2, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, N_2} dT \right) \quad (3.23)$$

เมื่อ $m_{CO_2, flue, ladle}$ คือมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย (kg)

$m_{H_2O, flue, ladle}$ คือมวลของไอน้ำในไอเสีย (kg)

$m_{SO_2, flue, ladle}$ คือมวลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในไอเสีย (kg)

$m_{O_2, flue, ladle}$ คือมวลของก๊าซออกซิเจนในไอเสีย (kg)

$m_{N_2, flue, ladle}$ คือมวลของก๊าซไนโตรเจนในไอเสีย (kg)

\bar{c}_{p, O_2} คือค่าความร้อนจำเพาะของออกซิเจน (kJ/kg-K)

\bar{c}_{p, CO_2} คือค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kJ/kg-K)

\bar{c}_{p, H_2O} คือค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg-K)

\bar{c}_{p, N_2} คือค่าความร้อนจำเพาะของไนโตรเจน (kJ/kg-K)

\bar{c}_{p, SO_2} คือค่าความร้อนจำเพาะของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (kJ/kg-K)

T_{flue} คืออุณหภูมิของแก๊สเสีย (K)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าความสัมพัทธ์ของค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้กับอุณหภูมิจำเพาะ (Van Wylen, (2003))

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

2. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดของถังถ้ำน้ำเหล็ก ($Q_{opening}$)

$$Q_{opening} = C_t \varepsilon_{opening} \sigma A_{opening} t (T_{ladle}^4 - T_{amb}^4) \quad (3.24)$$

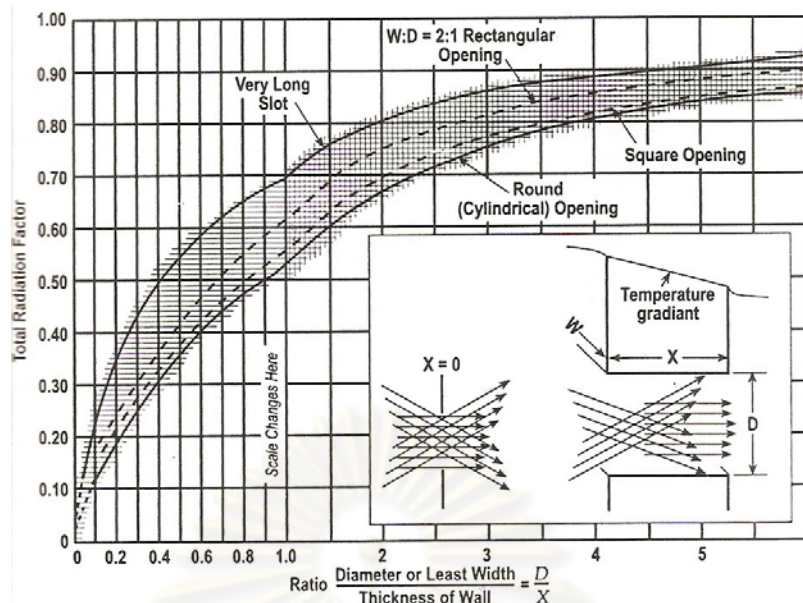
เมื่อ C_t คือตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของสัดส่วนเวลาในการเปิดปิดของช่องเปิดที่มีผลต่อการแผ่รังสีความร้อนในการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็กนั้นเราใช้ค่าตัวคูณปรับแก้เท่ากับ 1 เนื่องจากช่องเปิดมีการเปิดอยู่ตลอดเวลาของการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็ก

$\varepsilon_{opening}$ คือค่า Effective emissivity ของช่องเปิดสามารถหาได้จากรูปที่ 3.9

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

$A_{opening}$ คือพื้นที่ของช่องเปิด (m²)

T_{ladle} คืออุณหภูมิภายในถังถ้ำน้ำเหล็กเผาเหล็ก (K)



รูปที่ 3.9 ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด ($\epsilon_{opening}$)
(Bureau of Energy Efficiency, 2006)

พลังงานที่เปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุม

1. ความร้อนสะสมในถังถ้ำน้ำเหล็ก ($Q_{storage,ladle}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในตัวถังถ้ำน้ำเหล็กเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็ก จะสามารถหาได้จากสมการ

$$Q_{storage,ladle} = \int_{r_i}^{r_o} c_{p,brick} T(r) dm_{ladle} \tag{3.25}$$

- เมื่อ m_{ladle} คือมวลของถังถ้ำน้ำเหล็ก (kg)
- $c_{p,brick}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ SK38 มีค่าเท่ากับ 1.3kJ/kg-K
- $T(r)$ คืออุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟถังถ้ำน้ำเหล็กที่เป็นฟังก์ชันของรัศมี (K) โดย $T(r)$ นี้สามารถหาได้จากการแจกแจงตัวของอุณหภูมิภายในผนังของถังถ้ำน้ำเหล็กโดยการนำความร้อน

จากสมการที่ 3.25 เราสามารถนำมาทำการคำนวณหาพลังงานความร้อนที่สะสมในถังถ้ำน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$Q_{storage,ladle} = \int_{r_i}^{r_o} \bar{c}_{p,brick} T(r) dm_{ladle} = \int_{r_i}^{r_o} \bar{c}_{p,brick} T(r) \rho dV_{ladle} \quad (3.26)$$

จากปริมาตรของถังถายน้ำเหล็ก $dV_{ladle} = 2\pi rh dr$

เมื่อ h คือความสูงของถังถายน้ำเหล็ก (m)

$h_{refractory}$ คือความสูงของชั้นอิฐทนไฟ (m)

r_i คือรัศมีภายในของถังถายน้ำเหล็ก (m)

r_o คือรัศมีภายนอกของถังถายน้ำเหล็ก (m)

x_i คือความหนาเริ่มต้นของก้นถังถายน้ำเหล็ก (m)

x_o คือความหนาสุดท้ายของก้นถังถายน้ำเหล็ก (m)

ดังนั้นเราสามารถหาพลังงานความร้อนสะสมภายในถังถายน้ำเหล็กได้จากสมการ

พลังงานความร้อนสะสมภายในถังถายน้ำเหล็ก = พลังงานสะสมในผนังด้านข้างเบ้า + พลังงานสะสมภายในผนังตรงก้นเบ้า

$$Q_{storage,ladle} = 2\pi\rho c_{p,brick} h \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr + \pi\rho c_{p,brick} r_{bottom}^2 \int_{x_i}^{x_o} T(x) dx \quad (3.27)$$

2. ความร้อนที่สะสมในชั้นเหล็กของถังถายน้ำเหล็ก ($Q_{storage,steel}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในชุดหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟสามารถหาได้จาก

$$Q_{storage,steel} = \int_{r_i}^{r_o} c_{p,steel} T(r) dm_{steel} \quad (3.28)$$

เมื่อ m_{steel} คือมวลของชั้นเหล็กในถังถายน้ำเหล็ก (kg)

$c_{p,steel}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กมีค่าเท่ากับ 0.787 kJ/kg-K

$T(r)$ คืออุณหภูมิภายในชั้นเหล็กของถังถายน้ำเหล็กที่เป็นฟังก์ชัน

ของรัศมี (K) โดย $T(r)$ นี้สามารถหาได้จากการแจกแจงของอุณหภูมิภายในผนังของถังถายน้ำเหล็กโดยการนำความร้อน

3. ความร้อนที่สะสมในฝาของชุดหัวเผา ($Q_{storage,cover}$)

การหาค่าความร้อนสะสมในฝาของชุดหัวเผานั้น ทางผู้วิจัยได้ประเมินให้มีค่าเท่ากับค่าความร้อนที่สะสมในส่วนกันของถังถ่ายน้ำเหล็กเนื่องจากขนาดและความหนาของชุดฝานั้นมีความใกล้เคียงกับกันบ้าง

4. ความร้อนที่สะสมในลูกบอลเซรามิก ($Q_{storage,ceramics}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในลูกบอลเซรามิกสามารถหาได้จาก

$$Q_{storage,regen} = m_{ceramics} c_{p,ceramics} (T_{ceramics} - T_{amb}) \quad (3.29)$$

เมื่อ $m_{ceramics}$ คือมวลของลูกบอลเซรามิกในหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟซึ่งเท่ากับ 1,490 กิโลกรัม

$c_{p,ceramics}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของเซรามิกมีค่าเท่ากับ 1.3 kJ/kg-K

$T_{ceramics}$ คืออุณหภูมิของลูกบอลเซรามิก

5. ความร้อนสะสมในโครงสร้างหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ ($Q_{storage,regen}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในชุดหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟสามารถหาได้จาก

$$Q_{storage,regen} = m_{regen} c_{p,steel} (T_{regen} - T_{amb}) \quad (3.30)$$

เมื่อ m_{regen} คือมวลของลูกบอลเซรามิกในหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟซึ่งเท่ากับ 345 กิโลกรัม

$c_{p,steel}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กมีค่าเท่ากับ 0.787 kJ/kg-K

T_{regen} คืออุณหภูมิของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

6. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ (Q_{other})

ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่ไม่สามารถหาค่าได้ เช่น ความร้อนสูญเสียจากอากาศภายนอก เป็นต้น จึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อหาสมดุลพลังงานของถังถ่ายน้ำเหล็กตั้งสมการ

$$Q_{other} = Q_{fuel} - Q_{fuel, sen} - Q_{flue} - Q_{storage, ladle} - Q_{surface, ladle} - Q_{surface, cover} - Q_{surface, piping} - Q_{surface, regen} - Q_{opening} - Q_{storage, steel} - Q_{storage, cover} - Q_{storage, ceramics} - Q_{storage, regen} \quad (3.31)$$

3.6 สมการการเผาไหม้ (Combustion Equation)

3.6.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของธาตุในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย (วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์, 2006)

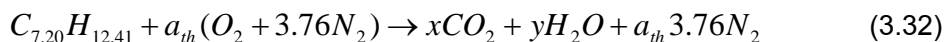
ชนิดเชื้อเพลิง	น้ำมันดีเซล	น้ำมันเตา
องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก	
C	86.5	84.4
H	12.51	11.85
S	-	2.0

3.6.2 การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

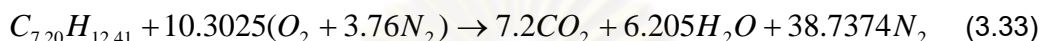
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลและน้ำมันเตา (วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์, 2006)

คุณสมบัติ	น้ำมันดีเซล	น้ำมันเตา	หน่วย
มวลโมเลกุล	99.01	98.25	kg/kmol
ความถ่วงจำเพาะ	0.87	0.95	kg/liter
ความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ	36.42	39.77	MJ/liter

สมการการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี



เมื่อทำการดุลสมการแล้วจะได้ $a_{th} = 10.3025$, $x = 7.2$, $y = 6.205$ ดังนั้นสมการการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลทางทฤษฎีจะได้เป็น

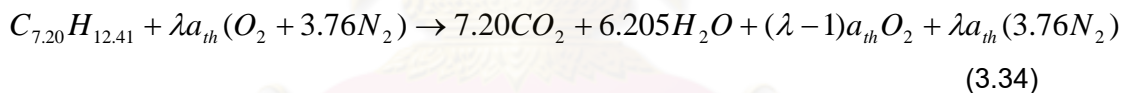


นำสมการที่ได้ข้างต้นมาคิดอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีได้จาก

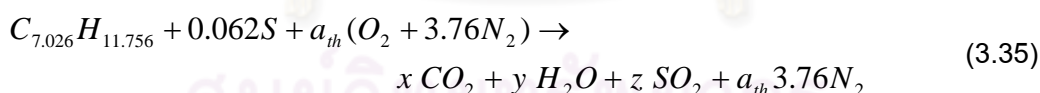
$$AF_{stoic} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

$$AF_{stoic} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{10.3025 \times (31.999 + 3.76 \times 28.013)}{(7.20 \times 12.011) + (12.41 \times 1.008)} = \frac{14148205}{99.01} = 14.289 \text{ kg}_{air} / \text{kg}_{fuel}$$

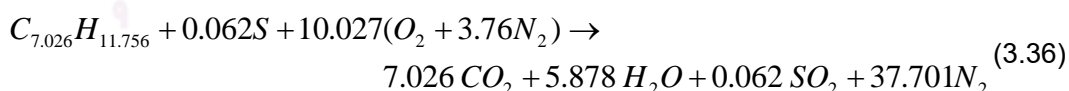
เนื่องจากสมการข้างต้นเป็นสมการการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลทางทฤษฎี ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วปริมาณอากาศที่ใช้จริงนั้นจะสูงกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกินจะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลได้ดังนี้



สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี



เมื่อทำการดุลสมการแล้วจะได้ $a_{th} = 10.027$, $x = 7.026$, $y = 5.878$, $z = 0.062$ ดังนั้นสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎีจะได้เป็น

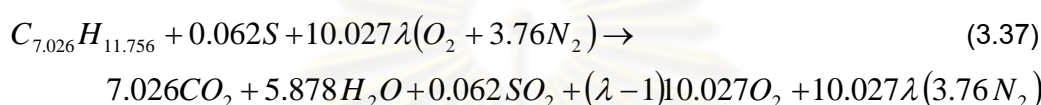


นำสมการที่ได้ข้างต้นมาคิดอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีได้จาก

$$AF_{stoic} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

$$AF_{stoic} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{10.027 \times (31.999 + 3.76 \times 28.013)}{(7.026 \times 12.011) + (5.878 \times 1.008) + (0.062 \times 32.064)} = \frac{1376.98}{92.30} = 14.91$$

เนื่องจากสมการข้างต้นเป็นสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎี ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วปริมาณอากาศที่ใช้จริงนั้นจะสูงกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกินจะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาได้ดังนี้



เมื่อ λ คือตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน โดยหากพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ จะเห็นได้ว่ามีปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมากับไอเสีย เท่ากับ $(\lambda - 1)a_{th}O_2$ ซึ่งในทางปฏิบัติจะสามารถวัดได้จากเครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer) อยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยโมล

เนื่องจากเครื่องมือวัดจะทำการวัดปริมาณออกซิเจนในลักษณะ dry basis ซึ่งหมายถึงไอเสียจะถูกดึงเอาไอน้ำและความชื้นออกไปก่อนจะทำการวิเคราะห์ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะต้องแปลงไปเป็นตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกินดังสมการ

สำหรับน้ำมันดีเซล

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{(\lambda - 1)a_{th}}{7.20 + (\lambda - 1)a_{th} + 3.76\lambda a_{th}} \quad (3.38)$$

เมื่อจัดรูปให้อยู่ในรูปสมการของ λ แล้วจะได้

$$\lambda = \frac{a_{th} + (7.20 - a_{th})\left(\frac{\%O_2}{100}\right)}{a_{th} - 4.76a_{th}\left(\frac{\%O_2}{100}\right)} \quad (3.35)$$

จากการหาสมดุลของสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงทางทฤษฎี ทราบว่า a_{th} มีค่าเท่ากับ 10.3025 ดังนั้น

$$\lambda = \frac{10.3025 - 3.1025 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{10.3025 - 49.0399 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.39)$$

สำหรับน้ำมันเตาชนิดเอ

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{SO_2} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{(\lambda - 1)a_{th}}{7.026 + 0.062 + (\lambda - 1)a_{th} + 3.76\lambda a_{th}} \quad (3.40)$$

เมื่อจัดรูปให้อยู่ในรูปสมการของ λ แล้วจะได้

$$\lambda = \frac{a_{th} + (7.088 - a_{th}) \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{a_{th} - 4.76a_{th} \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.41)$$

จากการหาสมดุลของสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงทางทฤษฎี ทราบว่า a_{th} มีค่าเท่ากับ 10.027 ดังนั้น

$$\lambda = \frac{10.027 - 2.939 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{10.027 - 47.728 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.42)$$

3.7 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของถังถายนํ้าเหล็ก (Thermal Efficiency)

ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของถังถายนํ้าเหล็กนั้น เราสามารถหาได้จากอัตราส่วนของความร้อนสะสมในถังถายนํ้าเหล็กหรือความร้อนใช้ประโยชน์กับความร้อนที่ให้กับถังถายนํ้าเหล็ก ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ในรูปสมการ

$$\eta_{ladle} = \frac{Q_{useful}}{Q_{input}} \times 100\% = \frac{Q_{storage, ladle}}{Q_{input}} \times 100\% \quad (3.43)$$

บทที่ 4

การทดลองและการตรวจวัดข้อมูล

4.1 ข้อมูลเบื้องต้นและการทำงานของเครื่องถ่ายภาพน้ำเหล็กในปัจจุบัน

การถ่ายภาพน้ำเหล็กเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปใช้รับน้ำเหล็กนั้น กระบวนการการถ่ายภาพน้ำเหล็กในปัจจุบันนั้นมีหลักใหญ่ในการถ่ายภาพน้ำเหล็กอยู่ 2 ประการ คือ การถ่ายภาพน้ำเหล็กใหม่หรือถึงเย็น ซึ่งในกรณีนี้จะทำการอุ่นโดยตั้งอุณหภูมิไอเสียไว้ที่ $1,000^{\circ}\text{C}$ หรือทำการอุ่นโดยใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ส่วนอีกหลักการคือการถ่ายภาพน้ำเหล็กที่ผ่านการรับน้ำเหล็กมาแล้วหรือถึงร้อน โดยจะทำการอุ่นโดยตั้งอุณหภูมิไอเสียไว้ที่ประมาณ 850°C ทั้งนี้การถ่ายภาพน้ำเหล็กก่อนที่จะนำไปรับน้ำเหล็กนั้นอาจเปลี่ยนแปลงตามระบบการทำงานของโรงหลอมได้

ดังนั้นการทดลองและตรวจวัดเพื่อเก็บข้อมูลการถ่ายภาพน้ำเหล็ก เพื่อนำมาวิเคราะห์พลังงานสะสมภายในถังถ่ายภาพน้ำเหล็กและทำสมดุลพลังงาน เพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพในการถ่ายภาพน้ำเหล็กนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลเบื้องต้นดังนี้

4.2 รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องทำการตรวจวัด

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ต้องการตรวจวัดการถ่ายภาพน้ำเหล็กแบบเดิม ทั้งการอุ่นด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง

ข้อมูลตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวแปร
1) อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายภาพน้ำเหล็ก	ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ภายในชั้นผนังอิฐทนไฟต่อสัญญาณจากอุปกรณ์วัดเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล	-
2) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการถ่ายภาพน้ำเหล็ก	อ่านจากมาตรวัดเชื้อเพลิง โดยค่าที่อ่านได้จะอยู่ในรูปของปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิง	V_{fuel}
3) อุณหภูมิเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่น	อ่านจากมิเตอร์โดยตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำมันเตาหลังจากการอุ่นด้วย heater ก่อนเข้าสู่ burner เพื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิง	$T_{fuel, in}$
4) อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายภาพน้ำเหล็ก	อ่านจากจอแสดงผลที่ชุดหัวเผา โดยการตรวจวัดอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายภาพน้ำเหล็ก	$T_{flue, ladle}$
5) อุณหภูมิผิวของชุดฝาหัวเผา	ตรวจวัดด้วยเครื่อง Contact Thermometer โดยวัดอุณหภูมิผิวของท่อในชุดฝาของหัวเผา	T_{cover}

ข้อมูลตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวแปร
6) อุณหภูมิของผิวถังถ่ายน้ำเหล็กด้านนอก	ตรวจวัดด้วยเครื่อง Infrared Thermometer โดยการยิงวัดอุณหภูมิของผิวถังถ่ายน้ำเหล็กด้านนอก ณ ตำแหน่งต่างๆ รอบถังถ่ายน้ำเหล็ก โดยข้อมูลที่ได้อาจจะทำการเฉลี่ยค่าของอุณหภูมิผิวของถังถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละด้าน	T_{wall}
7) อุณหภูมิอากาศผ่านช่องเปิด	ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตรงช่องว่างระหว่างปากถังและฝาของหัวเผา โดยต่อสัญญาณเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล	T_{open}
8) ปริมาณออกซิเจนในไอเสียที่ออกจากถังถ่ายน้ำเหล็ก	ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer) โดยมีองค์ประกอบสำคัญที่ต้องการตรวจวัด คือ ปริมาณของก๊าซออกซิเจนภายในไอเสีย	$\%O_2$
9) อุณหภูมิของอากาศภายนอก	ตรวจวัดด้วย Thermometer	$T_{ambient}$

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลที่ต้องการตรวจวัดการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบปริเจเนเนอเรทีฟ

ข้อมูลตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวแปร
10) อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็ก	ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ภายในชั้นผนังอิฐทนไฟต่อสัญญาณจากอุปกรณ์วัดเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล	-
11) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก	อ่านจากมาตรวัดเชื้อเพลิง โดยค่าที่อ่านได้จะอยู่ในรูปของปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิง	V_{fuel}
12) อุณหภูมิเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่น	อ่านจากมิเตอร์โดยตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำมันเตาหลังจากการอุ่นด้วย heater ก่อนเข้าสู่ burner เพื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิง	$T_{fuel, in}$
13) อุณหภูมิไอเสีย	ต่อสัญญาณจากตู้ควบคุมเพื่อบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์	$T_{exhaust}$
14) อุณหภูมิของภายในห้องเผาไหม้	ต่อสัญญาณจากตู้ควบคุมเพื่อบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์	$T_{furnace}$
15) อุณหภูมิผิวของชุดฝาหัวเผา	ตรวจวัดด้วยเครื่อง Contact Thermometer โดยวัดอุณหภูมิผิวของท่อในชุดฝาของหัวเผา	T_{cover}

ข้อมูลตรวจวัด	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวแปร
16) อุณหภูมิผิวของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	ตรวจวัดด้วยเครื่อง Contact Thermometer โดยวัดอุณหภูมิผิวของท่อในชุดหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	T_{regen}
17) อุณหภูมิผิวของท่อในชุดหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	ตรวจวัดด้วยเครื่อง Contact Thermometer โดยวัดอุณหภูมิผิวของท่อในชุดหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	T_{pipe}
18) อุณหภูมิอากาศผ่านช่องเปิด	ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตรงช่องว่างระหว่างปากถังและฝาของหัวเผา โดยต่อสัญญาณเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล	T_{open}
19) ปริมาณออกซิเจนในไอเสียที่ออกจากถังต้มน้ำเหล็ก	ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer) โดยมีองค์ประกอบสำคัญที่ต้องการตรวจวัด คือ ปริมาณของก๊าซออกซิเจนภายในไอเสีย	$\%O_2$
20) อุณหภูมิของอากาศภายนอก	ตรวจวัดด้วย Thermometer	$T_{ambient}$

4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

4.3.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples)

ชนิดและลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการตรวจวัดและเก็บข้อมูลมีดังนี้

ใส่เทอร์โมคัปเปิลชนิด R ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร หุ้มด้วยปลอกเซรามิก มีช่วงการวัดอุณหภูมิ 0 ถึง 1,600°C



รูปที่ 4.1 ลวดเทอร์โมคัปเปิลชนิด R

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของไอเสีย อุณหภูมิภายในถึงถ่ายน้ำเหล็กขณะทำการอุ่นคือเทอร์โมคัปเปิลชนิด K มีลักษณะเป็นโพรบหุ้มด้วยเซรามิกยาว 60 เซนติเมตรเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตรและมีช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 1,400°C



รูปที่ 4.2 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบเซรามิก

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในถึงขณะทำการอุ่นคือเทอร์โมคัปเปิลชนิด K มีลักษณะเป็นแบบตะเกียบ มีช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 1,400°C



รูปที่ 4.3 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบตะเกียบ

4.3.2 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (IR Thermometer)

Fluke 561 HVAC Pro เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ ทู อิน วัน วัดได้ทั้งแบบไม่สัมผัสด้วยอินฟราเรดและการวัดแบบสัมผัสด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โพรบ ปรับ Emissivity ได้ 3 ระดับ Low (0.3), Medium (0.7) และ High (0.95) มีเลเซอร์ชี้ตำแหน่งเพื่อเล็งจุดศูนย์กลางของพื้นที่วัด ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 550 °C และมีความละเอียดในการแสดงผลของอุณหภูมิอยู่ที่ 0.1 °C



รูปที่ 4.4 Infrared Thermometer

4.3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิบรรยากาศและพื้นผิวคือ Yokogawa 2455 Thermometer โดยจะมีหัววัดที่เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -50 - 600 °C และมีความละเอียดในการแสดงผลของอุณหภูมิอยู่ที่ 0.1 °C



รูปที่ 4.5 Digital Thermometer

4.3.4 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger)

เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจวัดคือ NI CPF-1804 ใช้งานกับโมดูล CPF-TC 120 ซึ่งจะมี 4 พอร์ตย่อย พอร์ตละ 8 ช่องรับสัญญาณ ง่ายต่อการซ่อมแซมและบำรุงรักษา ใช้งานร่วมกับโปรแกรมสำเร็จรูป LabView เพื่อบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.6 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ NI CPF-1804

4.3.5 เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer)

เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสียที่ใช้คือ Testo 327-1 เครื่องวัดสามารถทำการวัดปริมาณ O_2 , CO , CO_2 รวมทั้งประสิทธิภาพของการเผาไหม้ แสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยโมลแบบแห้ง (dry basis) เนื่องจากภายในมีเครื่องวัดความชื้นก่อนทำการวิเคราะห์ ในส่วนของการวัดอุณหภูมิไอเสียจะใช้ Thermocouple type K (NiCr - Ni) ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 600 °C และมีความละเอียดในการแสดงผลของอุณหภูมิอยู่ที่ 0.1 °C

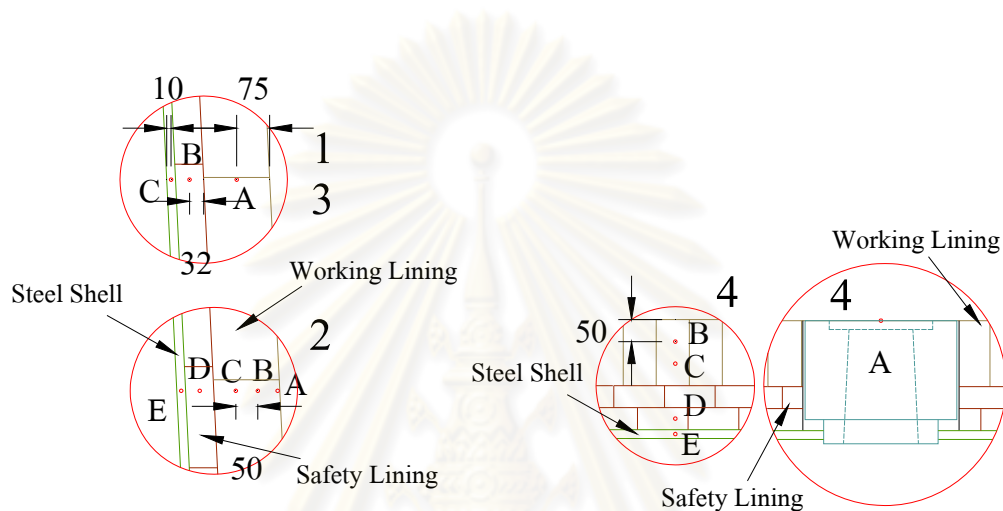


รูปที่ 4.7 Flue gas Analyzer Testo 327-1

4.4 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก

เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะทางความร้อนของถังถ่ายน้ำเหล็กและแก๊สไอเสีย จึงทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิทั้งในผนังถังถ่ายน้ำเหล็ก (Zimmer, 2008) และ อุณหภูมิไอเสีย ณ ตำแหน่งต่างๆ

การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กนั้น มีการติดตั้งทั้งหมด 4 ตำแหน่งหลักตามรูปที่ 2.1 แต่ละตำแหน่งยังแบ่งออกเป็นตำแหน่งย่อยดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก

ในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กนั้น จำเป็นต้องมีการเจาะอิฐทนไฟเพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลก่อนที่จะนำอิฐทนไฟนั้นไปก่อเข้ากับถังถ่ายน้ำเหล็ก ดังนั้นการติดตั้งนั้นจึงต้องใช้ความละเอียดและเป็นไปตามหลักการถ่ายเทความร้อน กล่าวคือ ต้องทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากหากติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในทิศทางเดียวกับการถ่ายเทความร้อนนั้น อุณหภูมิที่วัดได้อาจไม่ใช่ อุณหภูมิในเนื้ออิฐ แต่อาจจะเป็นอุณหภูมิอากาศก็ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 การกำหนดตำแหน่งเพื่อเจาะฝังเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 4.10 ลักษณะของการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก



รูปที่ 4.11 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลพร้อมกับการเก็บสายที่เรียบร้อยแล้ว

4.5 การตรวจวัดและเก็บข้อมูลในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบเดิม ทั้งหัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง

การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กของทางโรงงานนั้น เดิมทางโรงงานใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก ต่อมาเมื่อมีแนวคิดที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิงนั้น ทางโรงงานต้องการทราบถึงผลจากการใช้น้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง ทั้งปริมาณการใช้งานในแต่ละรอบการอุ่น ปัญหาต่างๆที่เกิดจากการใช้งาน จึงทำการทดลองติดตั้งหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิงเพื่อทดสอบใช้งานก่อนการนำเข้าและติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงมีข้อมูลในส่วนของการทดลองการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลและเป็นเชื้อเพลิงซึ่งนำมาใช้คำนวณประสิทธิภาพ สมดุลพลังงานและศักยภาพในการประหยัดพลังงาน เปรียบเทียบกับการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟดังแสดงไว้ในบทที่ 5 เพิ่มเติมเข้ามาอีกด้วย

ในการทดลองการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กนั้น ได้ควบคุมการอุ่นให้ใกล้เคียงกับสภาพการทำงานโดยทั่วไปของโรงงาน กล่าวคือ ได้ทำการทดลองทั้งในถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบเย็นและแบบร้อนรวม 5 ครั้ง โดยการทดลองจะเป็นไปตามแนวทางการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กจริงของโรงงานตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบเย็นโดยตั้งอุณหภูมิไอเสียไว้ที่ $1,000^{\circ}\text{C}$ หรืออุ่นถึงประมาณ 2 ชั่วโมงโดยติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูลไว้ทุกๆ 60 วินาที ทำการจดมิเตอร์น้ำมัน หลังจากนั้นทำการหยุดหัวเผาแล้วทำการพักถึงทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ทั้งนี้การพักถึงทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงนั้นเป็นการจำลองพักถึงหลังจากการอุ่นเพื่อให้ได้ถึงที่อยู่ในสภาพถึงอุ่นก่อนที่จะเริ่มการทดลองในรอบที่ 2 ซึ่งเป็นการจำลองการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบอุ่นต่อไป

2. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบอุ่นโดยตั้งอุณหภูมิไอเสียไว้ที่ 850°C ซึ่งจะมีการบันทึกข้อมูลทุกๆ 60 วินาทีและจดมิเตอร์น้ำมัน หลังจากนั้นทำการหยุดหัวเผาแล้วพักถึงทิ้งไว้ 30 นาที

3. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบร้อนโดยทดลองซ้ำแบบเดียวกันกับข้อ 2 ให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วพักถึงทิ้งไว้ 20 นาที ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งจนได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วพักถึง 10 นาทีจึงทำการทดลองซ้ำครั้งสุดท้าย

4.6 การติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหัวเผาของบริษัท Chugai Ro รุ่น RCB-FH20 ซึ่งใช้น้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง การติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในครั้งนี้ ทางผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยาม สตีล ซินดิเกต จำกัด มหาชน ให้เข้าไปทำงานร่วมกับทีมีวิศวกรในการดูแบบของระบบท่อน้ำมัน ท่ออากาศและท่อแก๊สซึ่งเป็นงานที่ต้องความละเอียดเป็นอย่างมาก การติดตั้งหัวเผา รีเจนเนอเรทีฟจะแบ่งเป็นการทำระบบท่อน้ำมัน ระบบไฟฟ้าและระบบควบคุมการทำงานของหัวเผา หลังการติดตั้งหัวเผาเรียบร้อยแล้ว ชุดของหัวเผาที่พร้อมใช้งานจะแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.12 หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟรุ่น RCB-FH20



รูปที่ 4.13 การติดตั้งและการวางระบบท่อ



รูปที่ 4.14 ชุดท่อน้ำมันของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ



รูปที่ 4.15 ชุดท่ออากาศของระบบหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ



รูปที่ 4.16 ชุดควบคุมการทำงานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ



รูปที่ 4.17 หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว

4.7 ข้อมูลเบื้องต้นการทำงานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

การใช้งานหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟของทางโรงงานนั้น มีการแบ่งการทำงานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟตามชนิดของถังก๊าซน้ำเหล็ก กล่าวคือการใช้งานของหัวเผาขึ้นอยู่กับลักษณะของถังก๊าซ แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ลักษณะหลักๆ ดังนี้

1. โปรแกรมที่ 1 เป็นโปรแกรมที่เหมาะสมสำหรับเผาถังก๊าซน้ำเหล็กที่เย็น ชั้นแรกจะเริ่มจากถังก๊าซน้ำเหล็กที่เย็น เมาจนอุณหภูมิในถังสูงถึง 800°C ในระยะเวลา 1 นาที ชั้นที่สองจะเริ่มเผาถังก๊าซน้ำเหล็กจากอุณหภูมิในถัง 800°C จนถึง 1,050°C ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง 20 นาที จนถึงขั้นสุดท้าย เมาเลี้ยงอุณหภูมิในถังถังก๊าซน้ำเหล็กประมาณ 1,050°C จนกระทั่งได้รับสัญญาณเรียกไปรับน้ำเหล็ก

2. โปรแกรมที่ 2 เป็นโปรแกรมที่เหมาะสมสำหรับเผาถังก๊าซน้ำเหล็กที่ร้อน ชั้นแรกจะเริ่มต้นจากถังก๊าซน้ำเหล็กที่ร้อนประมาณ 800°C เมาจนอุณหภูมิในถังสูงถึง 1,050°C ในระยะเวลา 30 นาที ชั้นที่สอง เมาเลี้ยงอุณหภูมิในถังถังก๊าซน้ำเหล็กประมาณ 1,050°C

4.8 การทดลองอุ่นถังก๊าซน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

ในการทดลองการอุ่นถังก๊าซน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟนั้น ได้ควบคุมการอุ่นให้ใกล้เคียงกับสภาพการทำงานของโรงงาน กล่าวคือ ได้ทำการทดลองทั้งในถังก๊าซน้ำเหล็กแบบเย็นและแบบร้อนรวม 4 ครั้งโดยการทดลองจะเป็นไปตามแนวทางการอุ่นถังก๊าซน้ำเหล็กจริงของโรงงานตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถังก๊าซน้ำเหล็กแบบเย็นโดยตั้งโปรแกรมที่ 1 หรืออุ่นถึงประมาณ 2 ชั่วโมงโดยติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูลไว้ทุกๆ 60 วินาที ทำการจดมิเตอร์น้ำมัน หลังจากนั้นทำการหยุดหัวเผาแล้วทำการพักถังทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

2. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถังก๊าซน้ำเหล็กแบบร้อนโดยตั้งโปรแกรมที่ 2 และใช้ตัวบ่งชี้ตัวอื่นเพิ่มเติมในการพิจารณาคือ อุณหภูมิภายในผนังเบ้าที่ตำแหน่ง 2A และ 2B โดยจะกำหนดความเหมาะสมของอุณหภูมิไว้ที่ 800°C และ 600°C ตามลำดับ ซึ่งจะมีการบันทึกข้อมูลทุกๆ 60 วินาทีและจดมิเตอร์น้ำมัน หลังจากนั้นทำการหยุดหัวเผาแล้วพักถังทิ้งไว้ 30 นาที

3. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถังก๊าซน้ำเหล็กแบบร้อนโดยทดลองซ้ำแบบเดียวกันกับข้อ 2 ให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วพักถังทิ้งไว้ 15 นาที จึงทำการทดลองซ้ำครั้งครั้งสุดท้าย

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

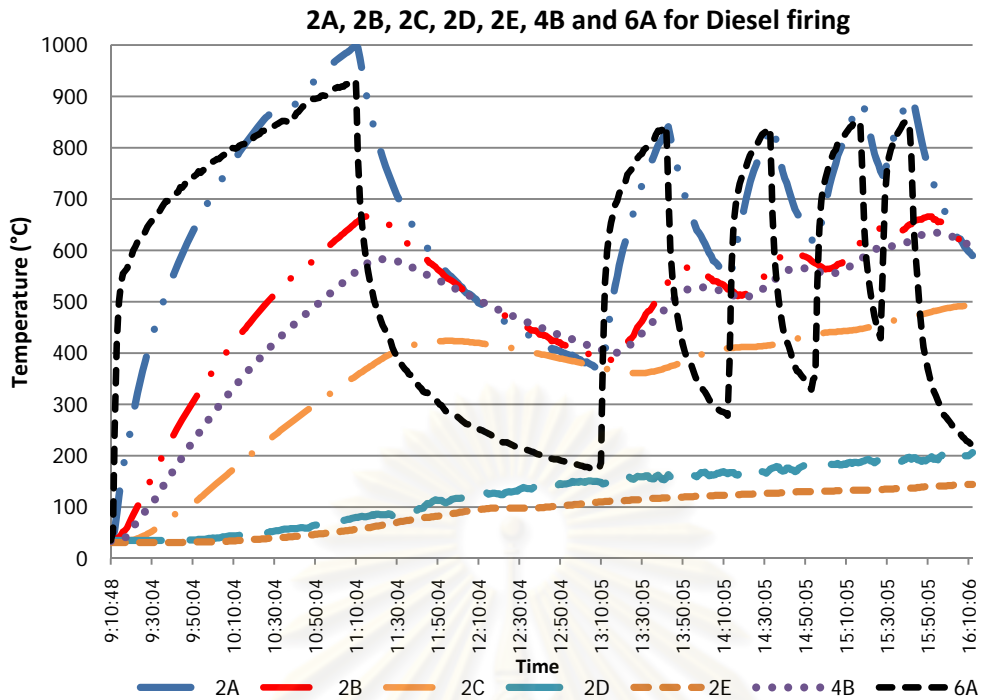
5.1 ผลที่ได้จากการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีรายละเอียดในส่วนของผลการทดลองจากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก 3 ส่วนคือ การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ และการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ โดยทดลองตามเงื่อนไขการใช้งานจริงของทางโรงงานตามรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.5 และ 4.8 ตามลำดับ ข้อมูลที่ทำการบันทึกนั้นได้จากการบันทึกทุกๆ 1 นาที ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก ความร้อนสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็ก สมดุลมวล สมดุลพลังงาน ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กและศักยภาพในการประหยัดพลังงาน

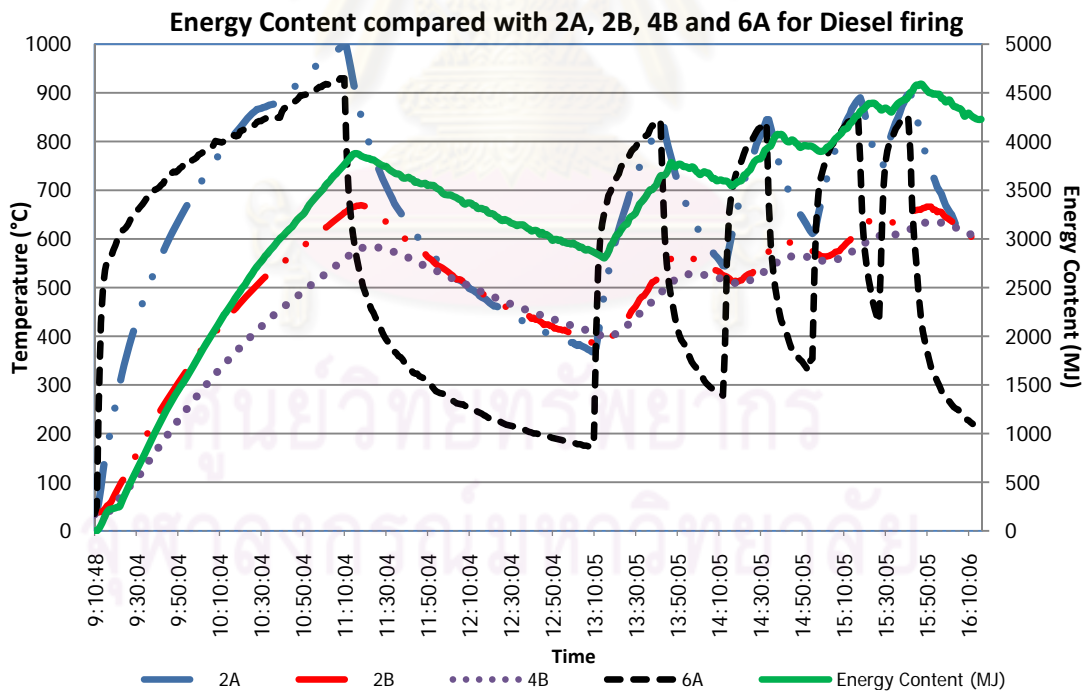
5.1.1 กราฟแสดงข้อมูลการทดลองที่เวลาต่าง ๆ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในภาคผนวก ก ถูกพล็อตเพื่อแสดงอุณหภูมิภายในชั้นผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ข้อมูลที่ได้จากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลแสดงใน รูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟเปรียบเทียบกับอุณหภูมิไอเสีย โดยที่ตำแหน่ง 2A, 2B นั้นทางผู้วิจัยได้เลือกที่จะใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสมของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กแทนการใช้อุณหภูมิไอเสีย (6A) อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 2A และ 2B ในส่วนของการอุ่นถึงด้วยน้ำมันดีเซลนั้นมีค่าประมาณ 800°C และ 600°C ตามลำดับ และอุณหภูมิภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กจะใช้ในการคำนวณค่าความร้อนสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็ก (Energy Content) ในทุกๆช่วงเวลาของการอุ่น ค่าความร้อนสะสมจะถูกพล็อตเพื่อแสดงเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 2A, 2B, 4B และ 6A ดังแสดงในรูปที่ 5.2

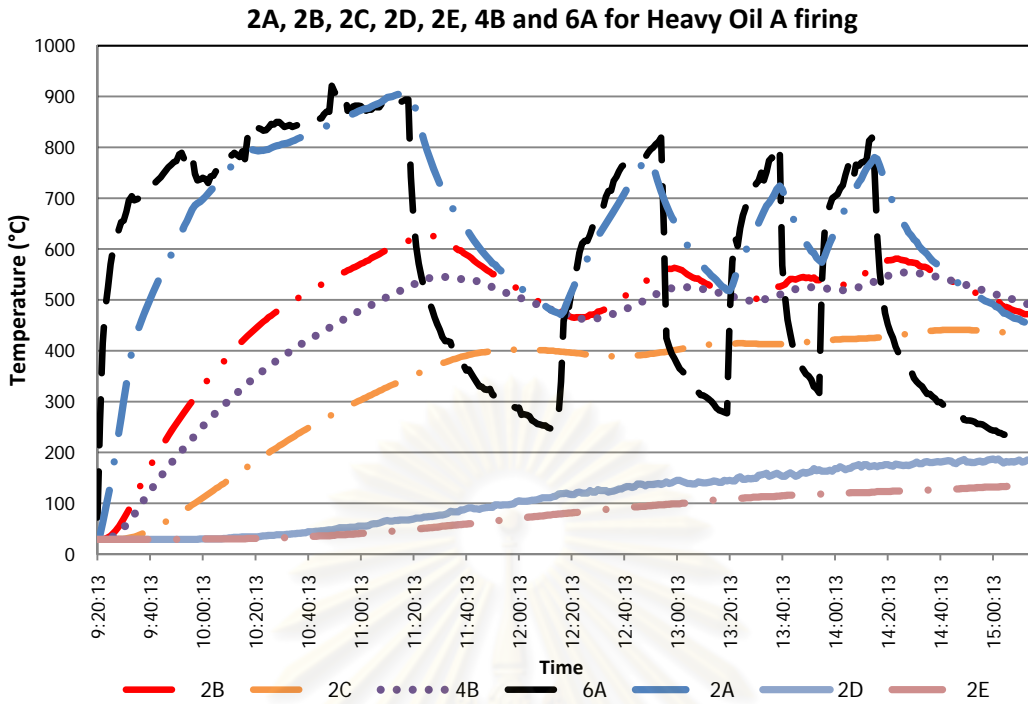
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



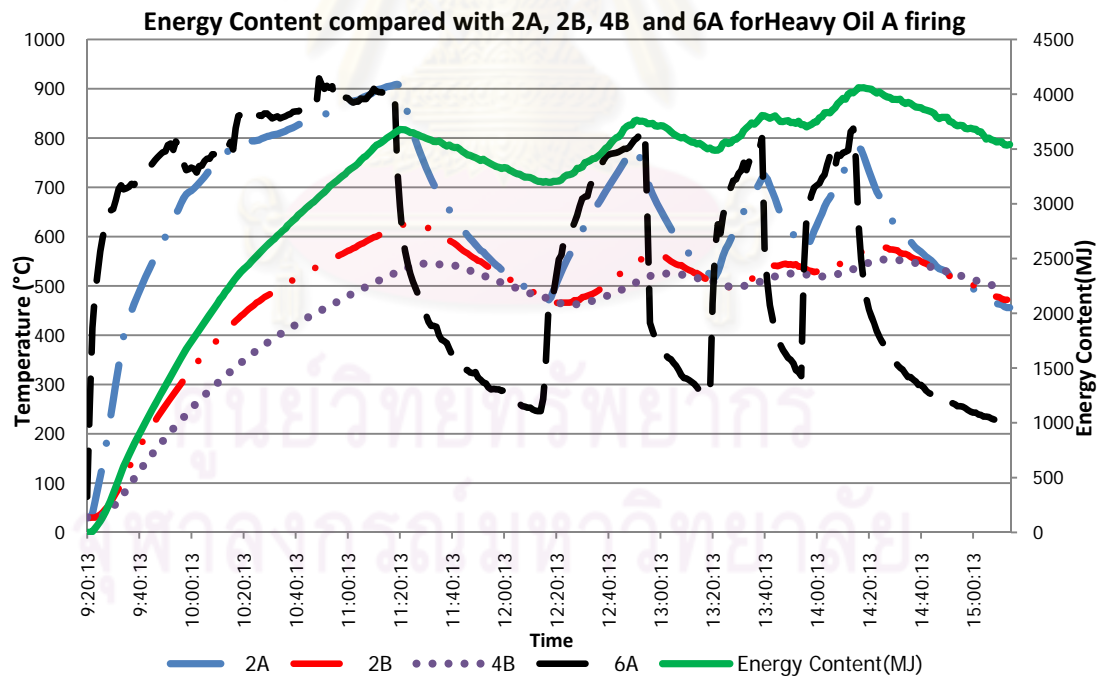
รูปที่ 5.1 อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิไอเสียจากการอุ่นถึง ถ่าน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซล



รูปที่ 5.2 ค่าความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่าน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมัน ดีเซลเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในผนังและอุณหภูมิไอเสีย



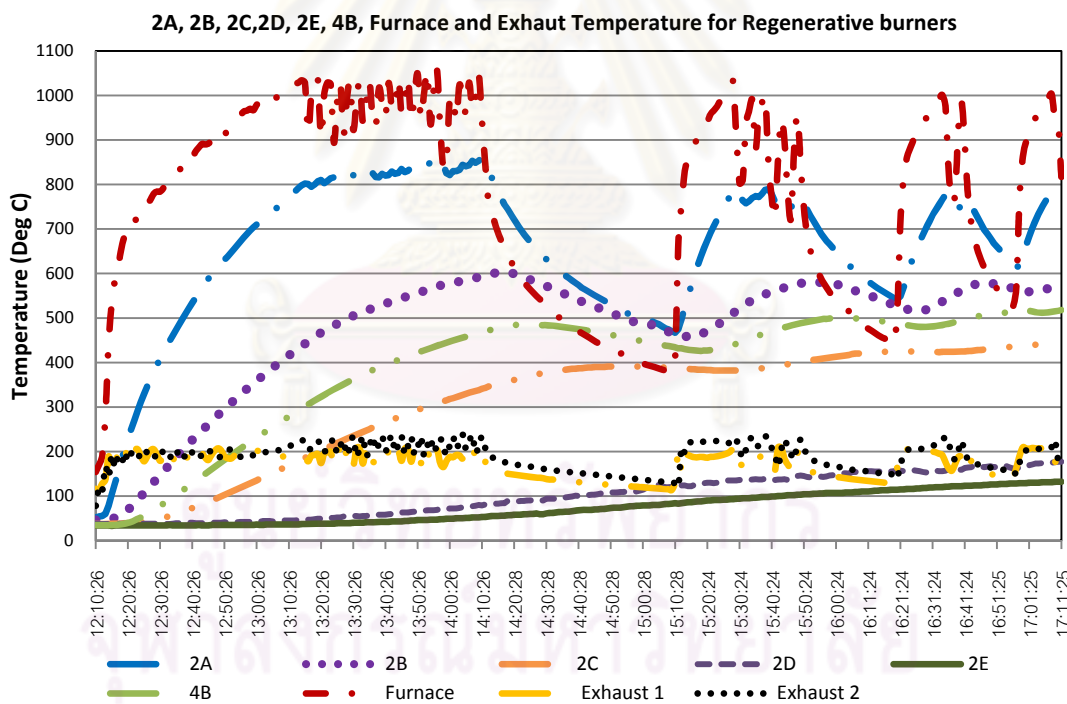
รูปที่ 5.3 อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิไอเสียจากการอุ่นถึง ถ่าน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ



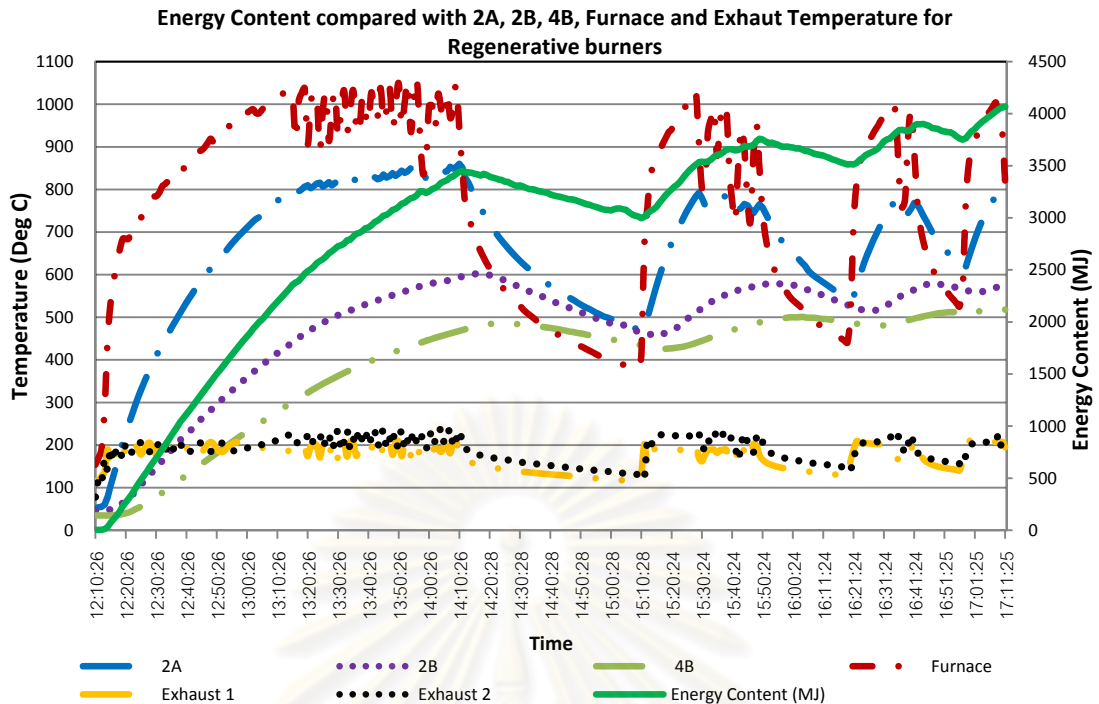
รูปที่ 5.4 ค่าความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่าน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในผนังและอุณหภูมิไอเสีย

รูปที่ 5.3 แสดงถึงอุณหภูมิภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กเทียบกับอุณหภูมิไอเสียที่เวลาต่างๆ จากการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ โดยที่อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 2B และ 4B ยังคงมีความสอดคล้องกันเช่นเดียวกับการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง และค่าความร้อนสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิไอเสียเมื่อใช้น้ำมันเตาชนิดเอนั้น มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล ดังรูปที่ 5.4

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอมาพล็อตเปรียบเทียบกับอุณหภูมิไอเสียตามรูปที่ 5.5 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 2B และ 4B มีการเปลี่ยนแปลงไปจากการอุ่นด้วยหัวเผาแบบธรรมดาเล็กน้อย กล่าวคือ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 4B มีค่าต่ำกว่า 2B ประมาณ 50°C ซึ่งเมื่อนำมาคิดค่าความร้อนสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็กแล้วนั้น พบว่าค่าความร้อนสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็กมีความใกล้เคียงกับการอุ่นด้วยหัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้ทั้ง น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิไอเสียจากการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

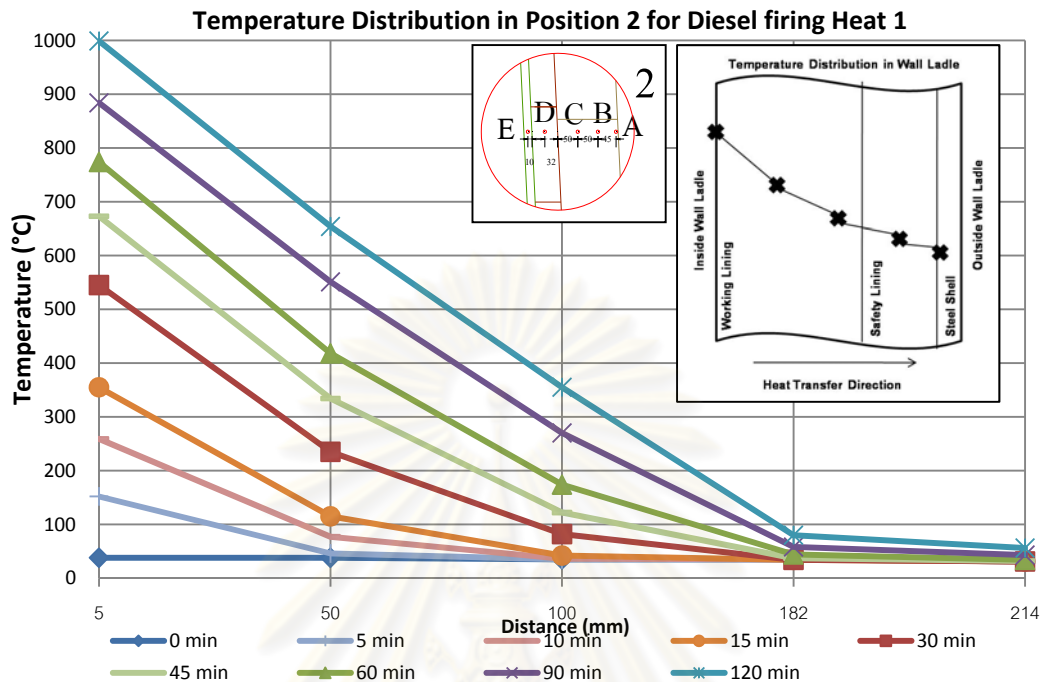


รูปที่ 5.6 ค่าความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในผนังและอุณหภูมิไอเสีย

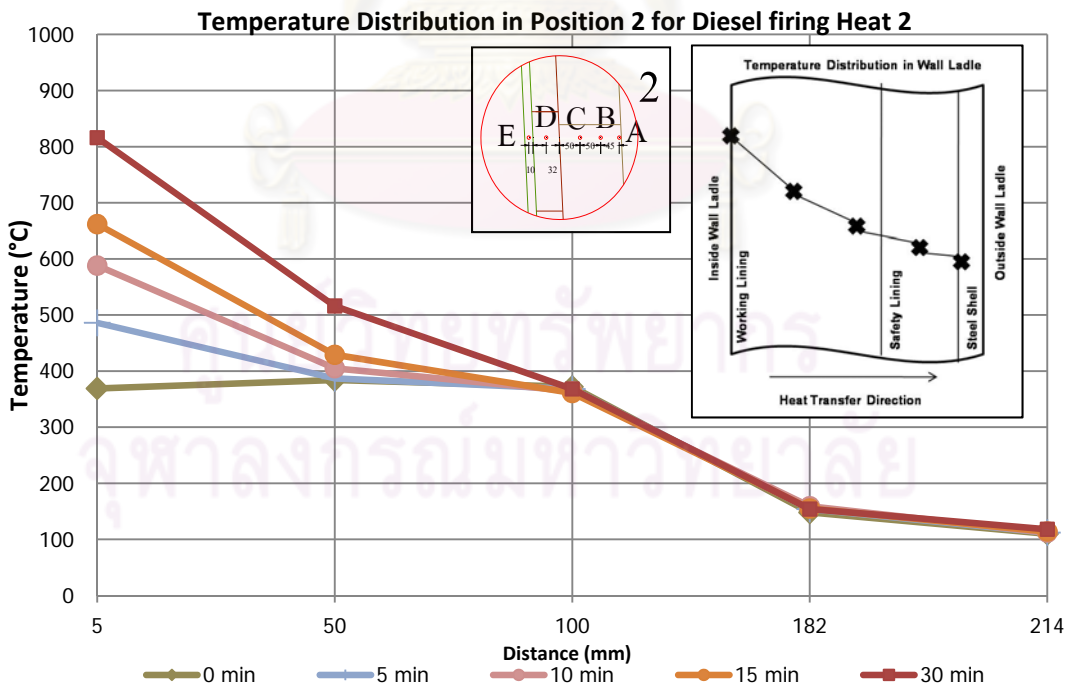
5.1.2 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในถังถ่ายน้ำเหล็ก

เมื่อนำข้อมูลภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กที่ตำแหน่งที่ 2 มาพล็อตกราฟการแจกแจงของอุณหภูมิในแต่ละรอบการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก การแจกแจงของอุณหภูมิภายในถังถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงถูกแสดงไว้รูปที่ 5.7-5.10 ซึ่งแสดงถึงการแจกแจงของอุณหภูมิในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลที่เวลาต่างๆ ในรอบการอุ่นที่ 1-4 รูปที่ 5.11-5.14 แสดงถึงการแจกแจงของอุณหภูมิภายในถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอในรอบการอุ่นที่ 1-4 และรูปที่ 5.15-5.18 แสดงถึงการแจกแจงของอุณหภูมิภายในถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในรอบการอุ่นที่ 1-4

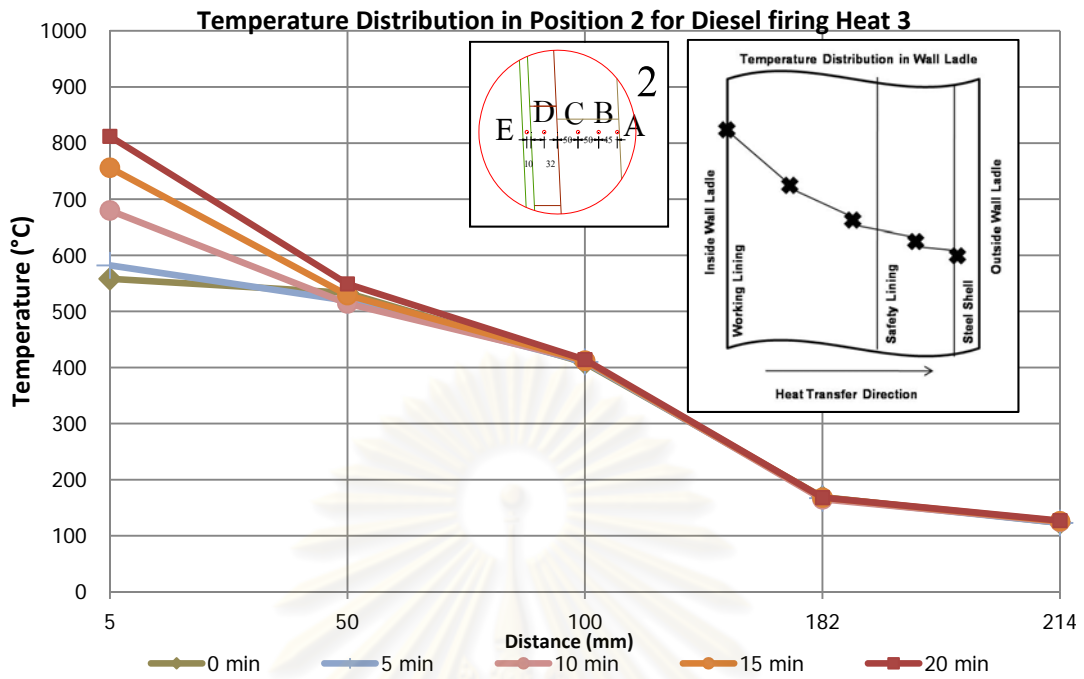
5.1.2.1 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซล



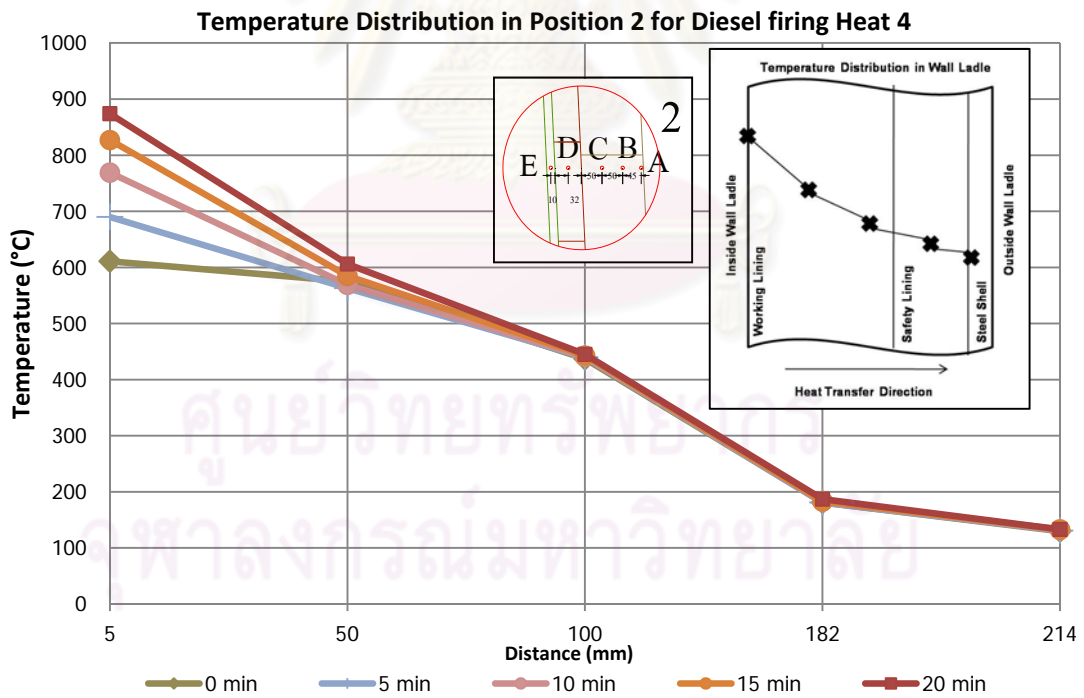
รูปที่ 5.7 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซลที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 1



รูปที่ 5.8 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซลที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 2

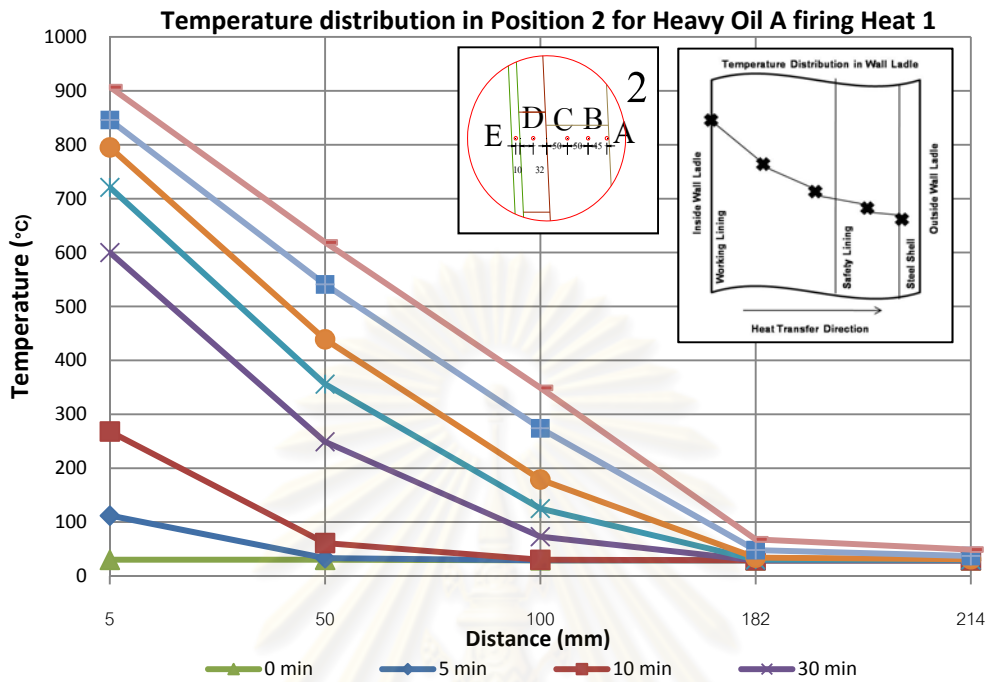


รูปที่ 5.9 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซลที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 3

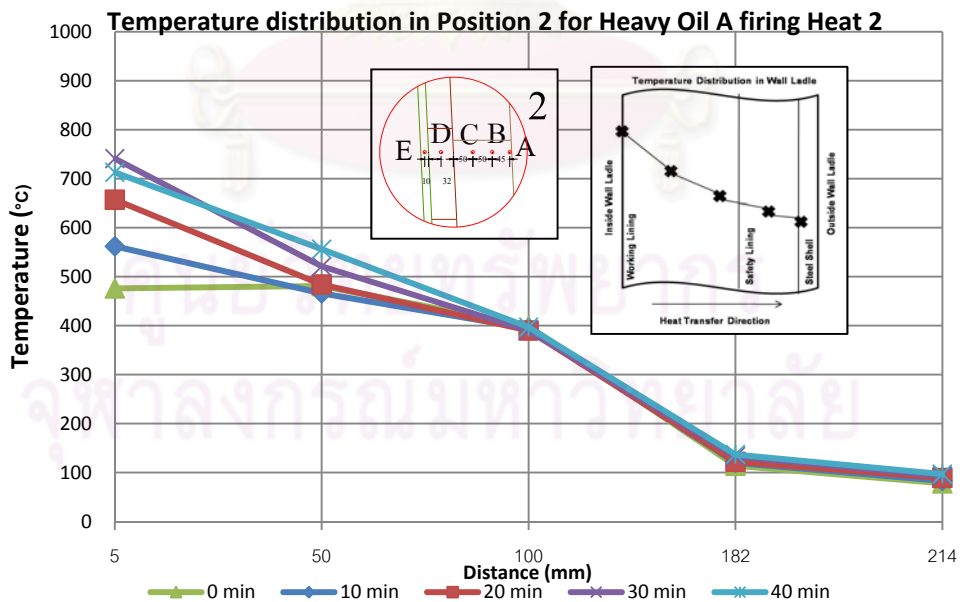


รูปที่ 5.10 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซลที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 4

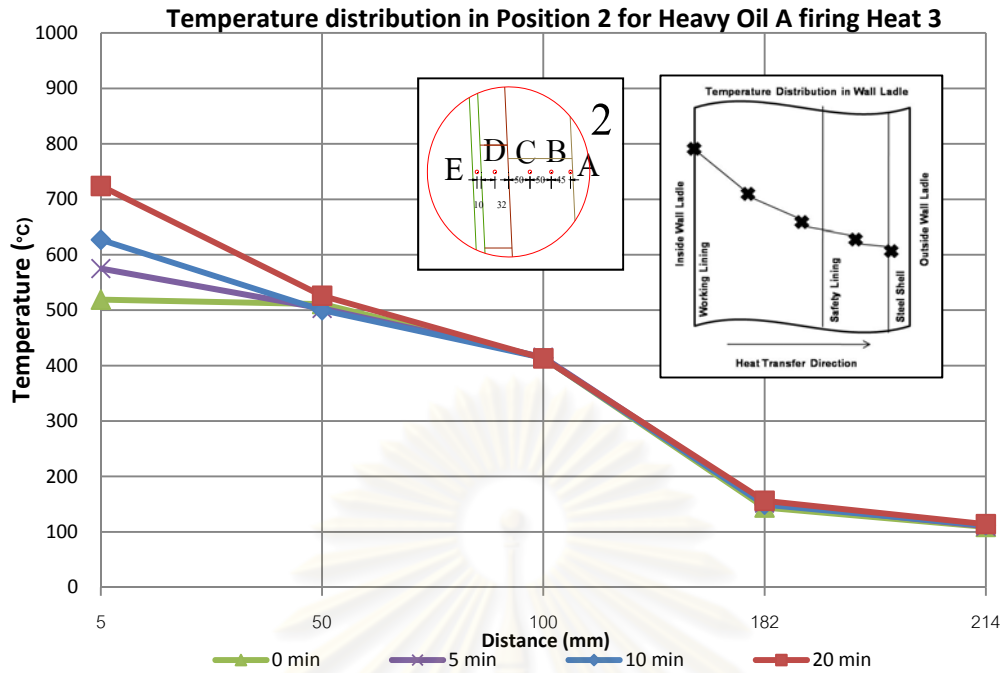
5.1.2.2 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ



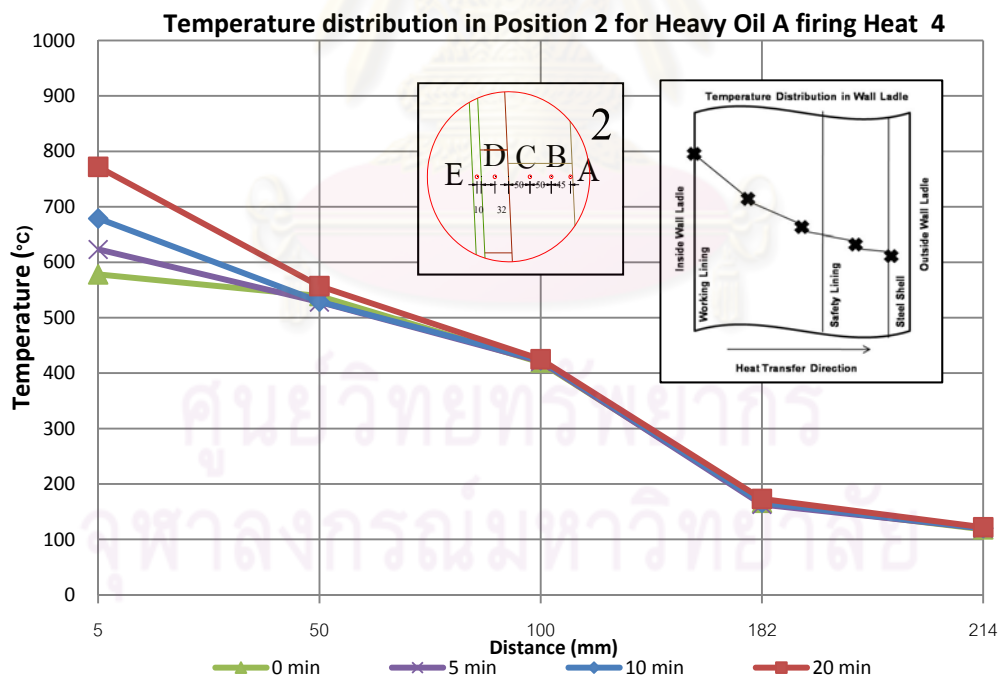
รูปที่ 5.11 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 1



รูปที่ 5.12 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 2

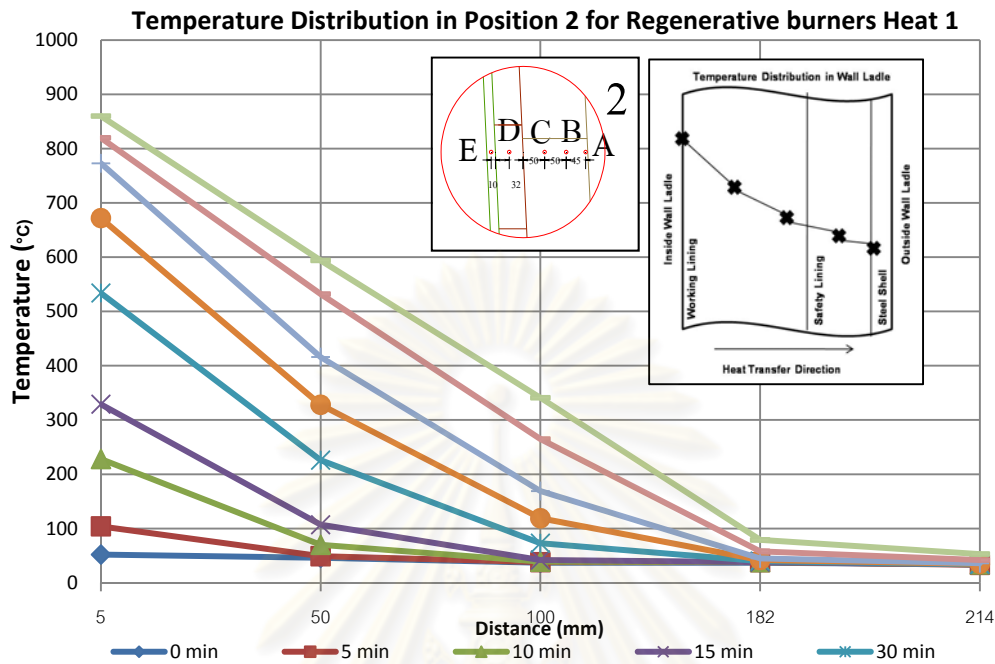


รูปที่ 5.13 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผา
ธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 3

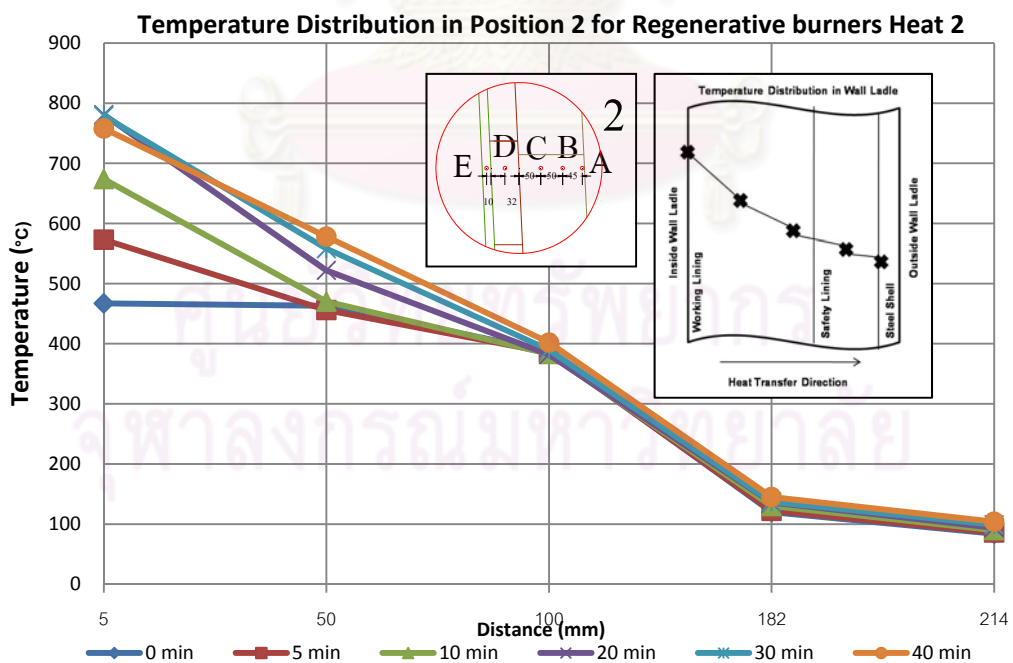


รูปที่ 5.14 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผา
ธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 4

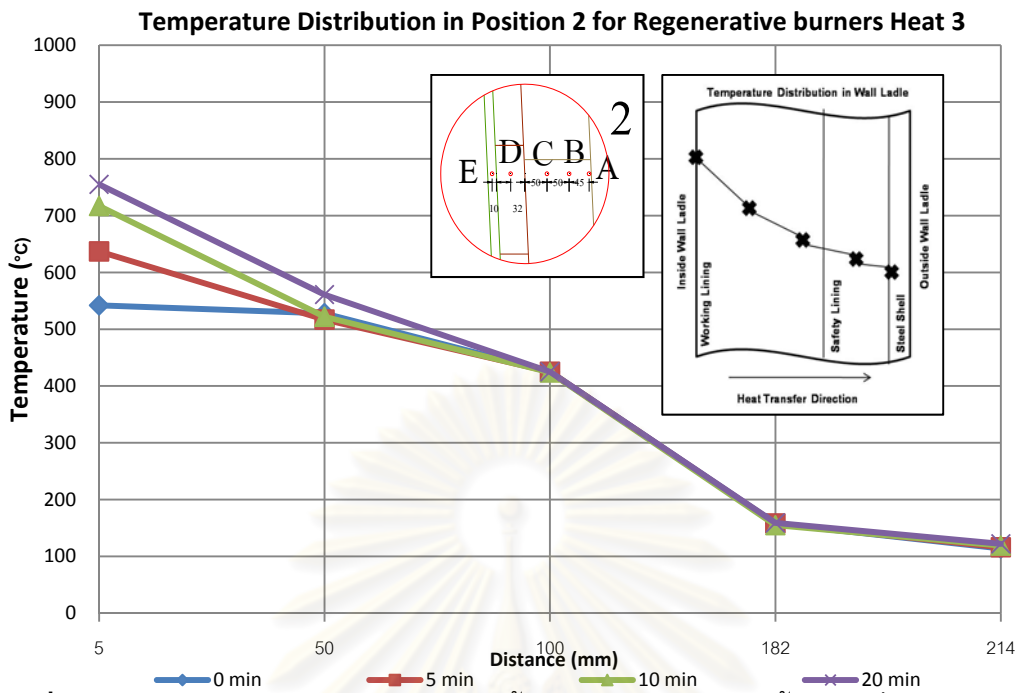
5.1.2.3 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ



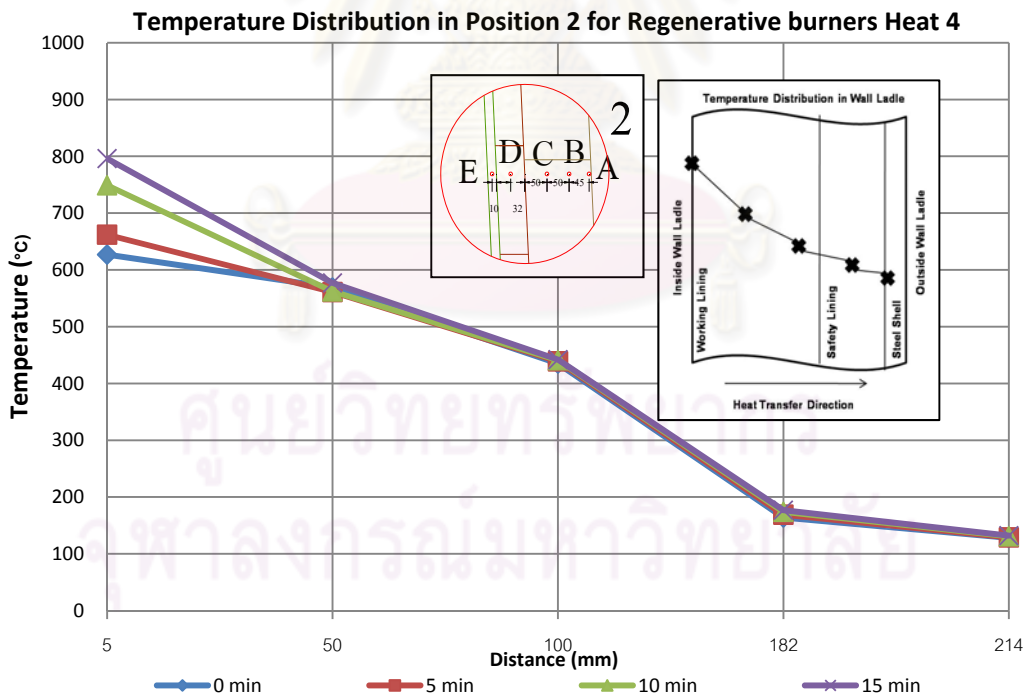
รูปที่ 5.15 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 1



รูปที่ 5.16 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 2



รูปที่ 5.17 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 3



รูปที่ 5.18 การแจกแจงของอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟของถังถ่ายน้ำเหล็กที่อุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอที่เวลาต่างๆ ของรอบการอุ่นที่ 4

5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ข้อมูลดิบจากการตรวจวัดและเก็บข้อมูลดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก จะนำมาเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาสมมูลมวล สมดุลพลังงาน และประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก ทั้งกรณีการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซล หัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ และหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ โดยตัวอย่างของวิธีการคำนวณจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข ซึ่งมีรายละเอียดของผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล ดังนี้

5.2.1 สมมูลมวล

ตารางที่ 5.1-5.3 แสดงถึงสมมูลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซล หัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ และหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ ในรอบการอุ่นต่างๆ

ตารางที่ 5.1 สมมูลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซล

สมมูลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยน้ำมันดีเซล			
รอบการอุ่น	m_{fuel} (kg)	m_{air} (kg)	m_{flue} (kg)
1	226.0	4863.0	5089.0
2	64.3	1379.0	1443.3
3	38.4	852.0	890.3
4	45.1	959.5	1004.6

ตารางที่ 5.2 สมมูลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

สมมูลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ			
รอบการอุ่น	m_{fuel} (kg)	m_{air} (kg)	m_{flue} (kg)
1	205.4	3938.6	4144.0
2	50.3	925.8	976.1
3	28.9	544.6	573.5
4	31.4	631.7	663.1

ตารางที่ 5.3 สมดุลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ
ที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

สมดุลมวลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ ที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ			
รอบการอุ่น	m_{fuel} (kg)	m_{air} (kg)	m_{flue} (kg)
1	205.0	5178.0	5383.0
2	42.8	1113.2	1156.0
3	26.1	658.6	684.7
4	18.1	434.2	452.3

5.2.2 สมดุลพลังงาน

5.2.2.1 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผา ธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณสมดุลพลังงานดังตัวอย่าง
การคำนวณที่แสดงไว้ในภาคผนวก ข สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผา
ธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลในแต่ละรอบการอุ่นถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.4-5.7 จากผลการคำนวณ
สมดุลพลังงานที่ได้ พบว่าความร้อนหลักที่สูญเสียมากที่สุดจากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กคือความ
ร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย โดยที่ในแต่ละรอบการอุ่นจะอยู่ในช่วง 45-50% รูปที่ 5.19 แสดงกราฟ
สรุปสมดุลพลังงานทั้ง 4 รอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซล
ในรอบการอุ่นที่ 1

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	9494.69	100.00	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	3865.10	40.71
			ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	4606.25	48.51
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	33.41	0.35
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	38.17	0.40
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	25.08	0.26
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	727.90	7.67
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	195.89	2.06
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	2.90	0.03
รวม	9494.69	100.00		9494.69	100.00

ตารางที่ 5.5 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซล
ในรอบการอุ่นที่ 2

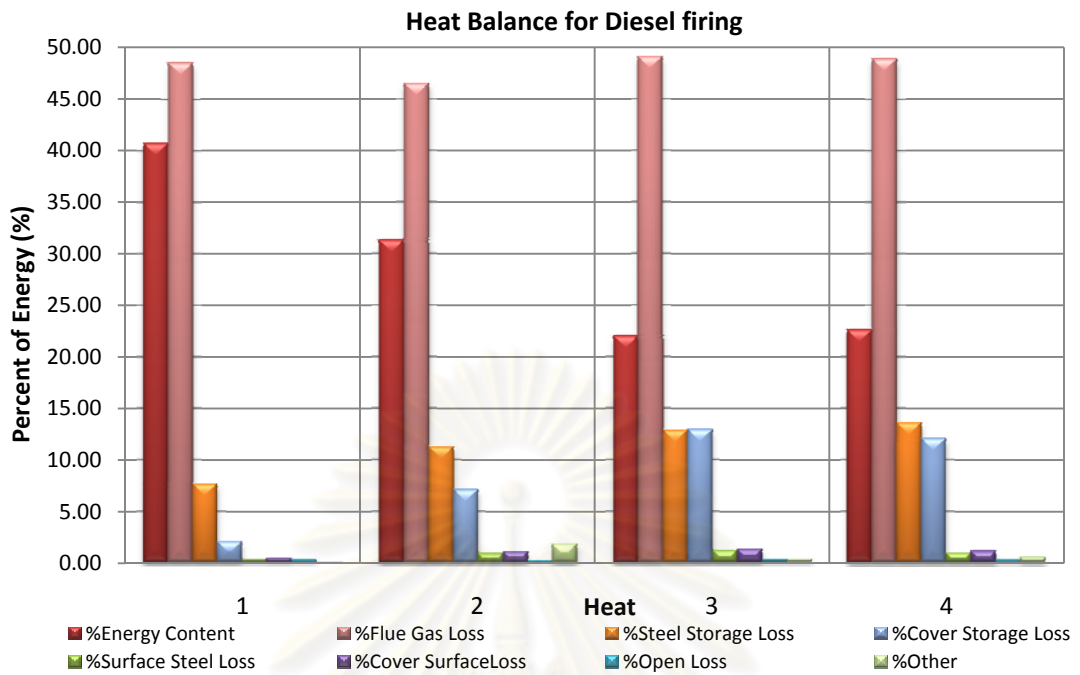
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	2692.89	100.00	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	842.47	31.28
			ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	1251.35	46.47
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	23.61	0.88
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	28.93	1.07
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	6.14	0.23
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	302.00	11.21
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	190.34	7.07
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	48.06	1.78
รวม	2692.89	100.00		2692.89	100.00

ตารางที่ 5.6 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซล
ในรอบการอุ่นที่ 3

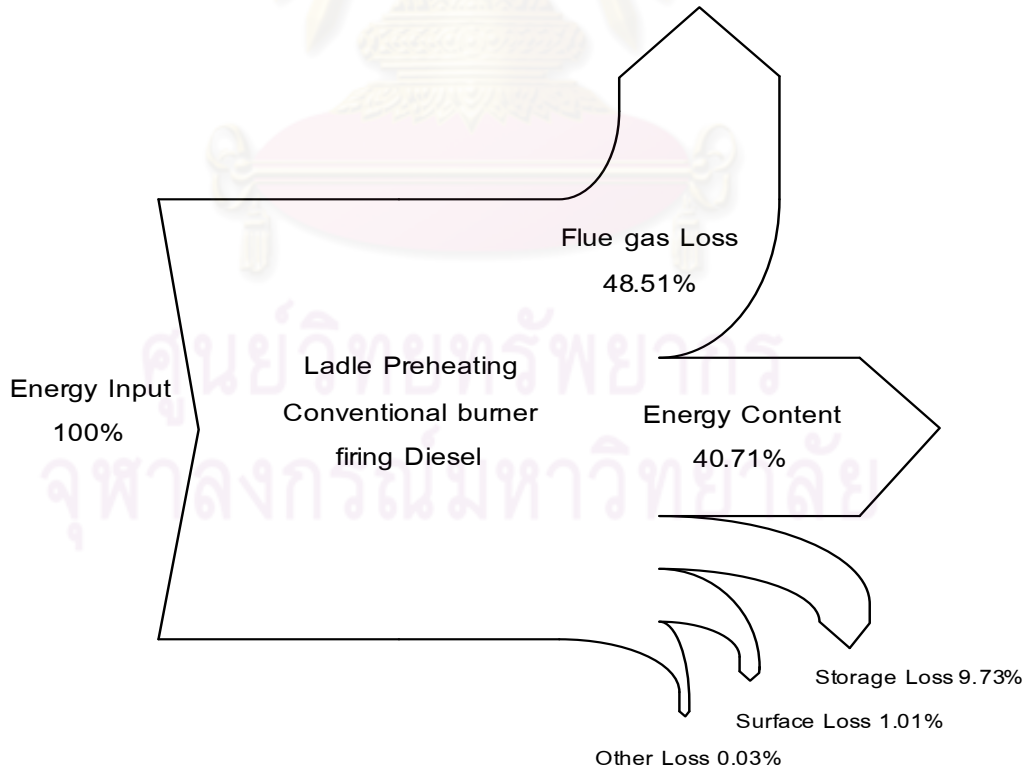
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1605.39	100.00	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	353.25	22.00
			ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	787.83	49.07
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	19.47	1.21
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	21.26	1.32
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	5.23	0.33
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	206.00	12.83
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	207.59	12.93
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	4.78	0.30
รวม	1605.39	100.00		1605.39	100.00

ตารางที่ 5.7 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซล
ในรอบการอุ่นที่ 4

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1886.56	100.00	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	426.80	22.62
			ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	922.19	48.88
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	18.17	0.96
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	21.05	1.12
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	4.62	0.24
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	257.00	13.62
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	227.37	12.05
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	9.35	0.50
รวม	1886.56	100.00		1886.56	100.00



รูปที่ 5.19 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซล



รูปที่ 5.20 แชนจ์ไดอะแกรมแสดงสมดุลพลังงานการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

รูปที่ 5.20 แสดงแรงกักไคอะแกรมของสมดุลพลังงานการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง จากไคอะแกรมแสดงถึงพลังงานความร้อนขาเข้า พลังงานความร้อนขาออกซึ่งประกอบไปด้วยพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในถังถ่ายน้ำเหล็ก ความร้อนสูญเสียจากไอเสีย ความร้อนสูญเสียจากการสะสม ความร้อนจากการสูญเสียผ่านพื้นผิวและความร้อนสูญเสียอื่นๆ

5.2.2.2 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณสมดุลพลังงานดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ ในแต่ละรอบการอุ่นถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.8-5.11 จากผลการคำนวณสมดุลพลังงานที่ได้พบว่าความร้อนหลักที่สูญเสียมากที่สุดจากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กคือความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย โดยที่ในแต่ละรอบการอุ่นจะอยู่ในช่วง 35-45% โดยรูปที่ 5.21 จะแสดงกราฟสรุปสมดุลพลังงานทั้ง 4 รอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ และรูปที่ 5.22 แสดงถึงแรงกักไคอะแกรมของสมดุลพลังงานการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิงในรอบการอุ่นที่ 1

ตารางที่ 5.8 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 1

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	8599.47	99.77	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	3677.81	42.67
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	19.58	0.23	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	3899.44	45.24
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	32.48	0.38
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	38.17	0.44
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	4.48	0.05
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	572.50	6.64
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	156.96	1.82
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	237.21	2.75
รวม	8619.05	100.00		8619.05	100.00

ตารางที่ 5.9 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดา
ที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 2

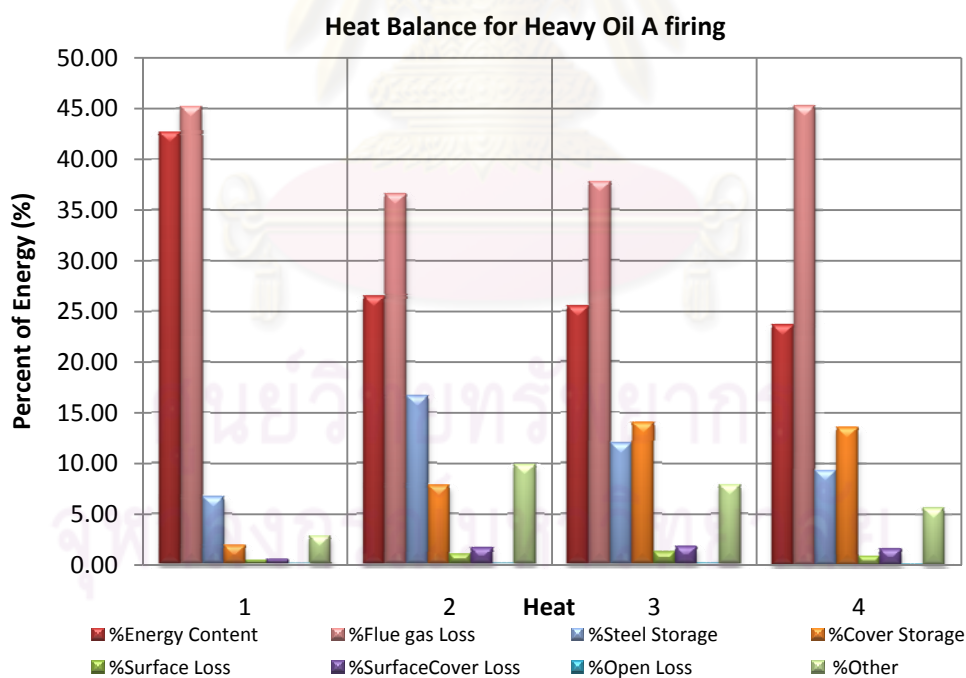
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	2105.03	99.74	ความร้อนสะสมภายในผนังของถึงถ่ายน้ำเหล็ก	558.95	26.48
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	5.46	0.26	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	771.72	36.57
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถึงถ่ายน้ำเหล็ก	21.18	1.00
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	33.55	1.59
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	1.35	0.06
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถึงถ่ายน้ำเหล็ก	351.00	16.63
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	164.48	7.79
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	208.26	9.87
รวม	2110.48	100.00		2110.48	100.00

ตารางที่ 5.10 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดา
ที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 3

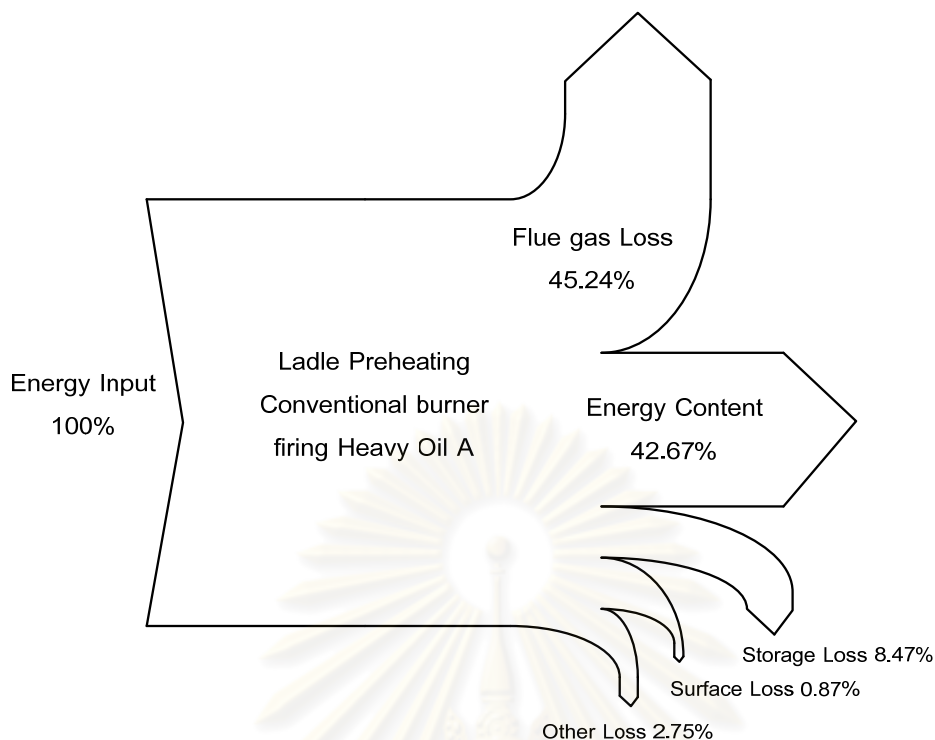
ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1210.20	99.72	ความร้อนสะสมภายในผนังของถึงถ่ายน้ำเหล็ก	308.65	25.43
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	3.34	0.28	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	458.18	37.76
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถึงถ่ายน้ำเหล็ก	14.37	1.18
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	21.13	1.74
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	1.11	0.09
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถึงถ่ายน้ำเหล็ก	145.00	11.95
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	169.56	13.97
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	95.53	7.87
รวม	1213.54	100.00		1213.54	100.00

ตารางที่ 5.11 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดา
ที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 4

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1314.00	99.76	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	311.82	23.67
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	3.19	0.24	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	596.50	45.29
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	11.47	0.87
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	21.13	1.60
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	1.36	0.10
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	123.00	9.34
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	178.70	13.57
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	73.23	5.56



รูปที่ 5.21 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ



รูปที่ 5.22 แชนจ์ก็ไดอะแกรมแสดงสมดุลพลังงานการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง

5.2.2.3 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณสมดุลพลังงานดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาเอในแต่ละรอบการอุ่นถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.12-5.15 จากผลการคำนวณสมดุลพลังงานที่ได้ พบว่าความร้อนหลักที่สูญเสียมากที่สุดจากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กคือความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย โดยที่ในแต่ละรอบการอุ่นจะอยู่ในช่วง 35-45% โดยรูปที่ 5.23 จะแสดงกราฟสรุปสมดุลพลังงานทั้ง 4 รอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ และรูปที่ 5.24 แสดงถึงแชนจ์ก็ไดอะแกรมของสมดุลพลังงานการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอในรอบการอุ่นที่ 1

ตารางที่ 5.12 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ
ที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอรอบการอุ่นที่ 1

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	6144.47	99.64	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	3441.96	55.81
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	22.34	0.36	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	960.90	15.58
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	33.80	0.55
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	33.19	0.54
			ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิวของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	48.48	0.79
			ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิวของชุดท่อ	12.87	0.21
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	4.48	0.07
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	439.60	7.13
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	137.95	2.24
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในโครงสร้างหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	193.70	3.14
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในลูกบอลเซรามิก	468.00	7.59
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	391.88	6.35
รวม	6166.81	100.00		6166.81	100.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5. 13 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ
ที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 2

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1789.65	99.67	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	762.31	42.46
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	5.92	0.33	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	227.44	12.67
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	27.30	1.52
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	30.56	1.70
			ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิวของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	12.40	0.69
			ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิวของชุดท่อ	3.42	0.19
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	1.57	0.09
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	340.00	18.94
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	155.26	8.65
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในโครงสร้างหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	38.74	2.16
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในลูกบอลเซรามิก	187.20	10.43
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	9.37	0.52
รวม	1795.57	100.00		1795.57	100.00

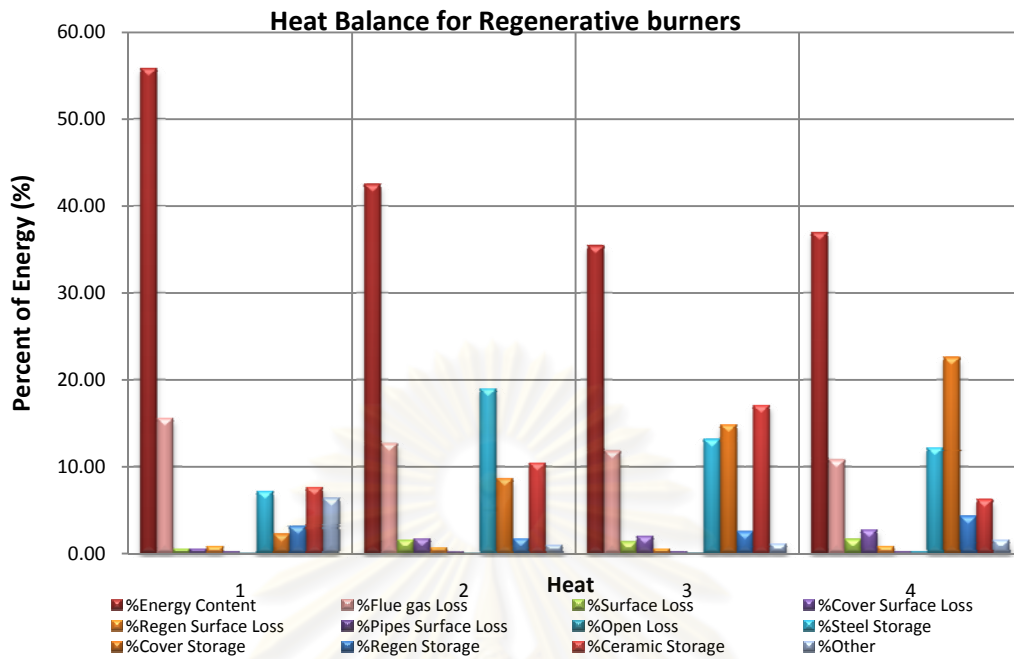
ตารางที่ 5. 14 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ
ที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 3

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	1093.68	99.65	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	387.95	35.35
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	3.80	0.35	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	129.50	11.80
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	14.75	1.34
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	22.18	2.02
			ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิวของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	6.15	0.56
			ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิวของชุดท่อ	2.12	0.19
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	1.17	0.11
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	144.00	13.12
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	162.60	14.82
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในโครงสร้างหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	38.74	3.53
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในลูกบอลเซรามิก	187.20	17.06
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	1.12	0.10
รวม	1097.48	100.00		1097.48	100.00

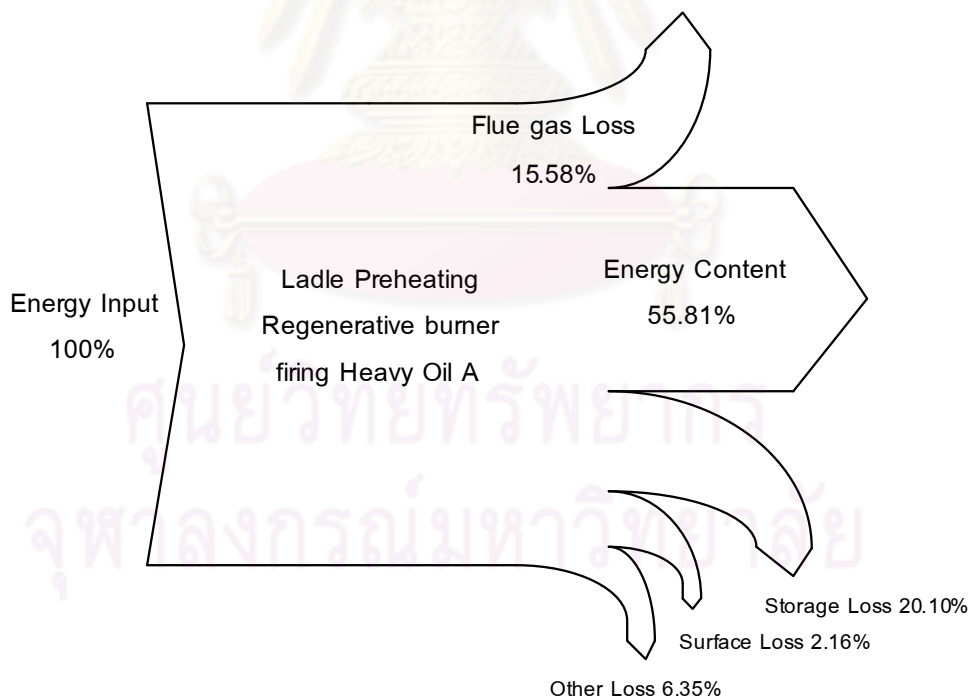
ตารางที่ 5. 15 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ
ที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ รอบการอุ่นที่ 4

ความร้อนขาเข้า	MJ	%	ความร้อนขาออก	MJ	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	755.63	99.68	ความร้อนสะสมภายในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก	279.70	36.90
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	2.42	0.32	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	81.74	10.78
			ความร้อนสูญเสียผ่านผิวถังถ่ายน้ำเหล็ก	12.63	1.67
			ความร้อนสูญเสียผ่านฝาชุดหัวเผา	20.81	2.75
			ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิวของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	6.15	0.81
			ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิวของชุดท่อ	1.50	0.20
			ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	1.61	0.21
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก	92.00	12.14
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในชุดฝาของหัวเผา	171.23	22.59
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในโครงสร้างหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ	38.74	5.11
			ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในลูกบอลเซรามิก	46.80	6.17
			ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	5.15	0.68
รวม	758.05	100.00		758.05	100.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.23 สมดุลพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ



รูปที่ 5.24 แชนจ์ที่ไดอะแกรมแสดงสมดุลพลังงานการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง

5.2.3 ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก

ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซล หัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ และหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอในแต่ละรอบการอุ่น ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.16-5.18 โดยการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบเย็นในรอบการอุ่นที่ 1 นั้น ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซล หัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ และหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอเท่ากับ 40.71%, 42.67% และ 55.81% ตามลำดับ ในรอบการอุ่นที่ 2 หลังจากที่พักถึงไว้ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงเท่ากับ 31.28%, 26.48% และ 42.45%

การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในรอบที่ 3 และ 4 ซึ่งถือว่าการอุ่นถึงร้อนนั้น ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซลมีค่าประมาณ 22% ประสิทธิภาพการอุ่นถึงด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอเท่ากับประมาณ 25% และ ประสิทธิภาพการอุ่นถึงด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอเท่ากับประมาณ 35% ตามลำดับ

ตารางที่ 5. 16 ประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซล

รอบการอุ่น	ประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก ด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันดีเซล
1	40.71%
2	31.28%
3	22.00%
4	22.62%

ตารางที่ 5. 17 ประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

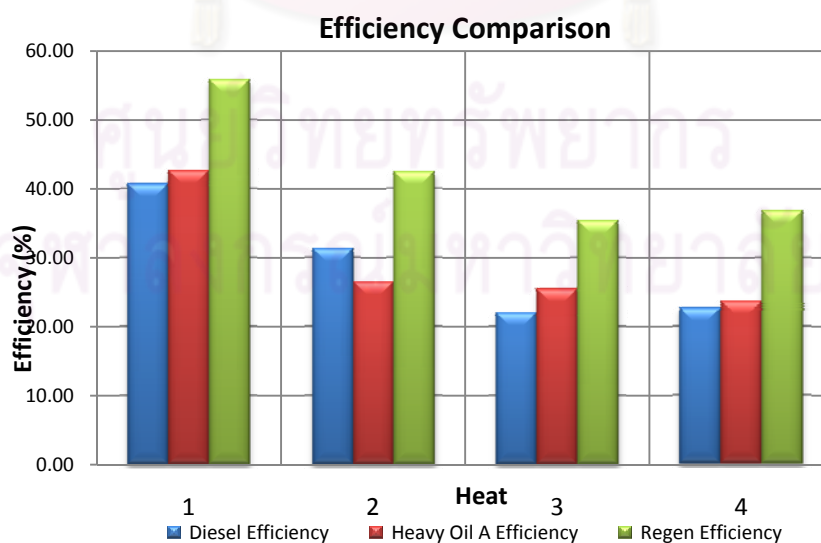
รอบการอุ่น	ประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก ด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ
1	42.66%
2	26.48%
3	25.45%
4	23.66%

ตารางที่ 5. 18 ประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

รอบการอุ่น	ประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ
1	55.81%
2	42.45%
3	35.36%
4	36.90%

5.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล หัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ และหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ สำหรับรอบการอุ่นทั้งสี่รอบ ถูกแสดงในรูปที่ 5.22 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอสูงกว่าการอุ่นที่ใช้ หัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอโดยเฉลี่ยประมาณ 10% เนื่องจากความร้อนสูญเสียจากไอเสียที่ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิไอเสียปล่อยทิ้งต่ำลง ซึ่งเป็นผลจากการนำความร้อนมาอุ่นอากาศเผาไหม้ให้สูงขึ้น จะสังเกตเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการอุ่นในกรณีที่ใช้หัวเผาธรรมดาจะมีค่าต่ำลงในการอุ่นรอบหลัง เนื่องจากมีการปล่อยทิ้งไอเสียที่อุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 5. 25 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล หัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ และหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล หัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ และหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ เมื่อนำปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในแต่ละรอบการอุ่นมาเปรียบเทียบศักยภาพในการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง โดยทำการคิดค่าถ่วงน้ำหนักของถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบเย็น แบบอุ่นและแบบร้อน ในแต่ละแบบอยู่ที่ 10%, 30% และ 30% ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.20 และเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำมันที่ใช้อุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กต่อตันน้ำเหล็กทั้ง 3 กรณีในตารางที่ 5.21 พบว่าการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอให้ผลประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการอุ่นด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอ

ตารางที่ 5. 19 ปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก

รอบการอุ่น	ปริมาณการใช้ น้ำมัน (ลิตร)		
	หัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล	หัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ	หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ
1	260.7	216.2	154.5
2	73.9	52.9	45.0
3	44.1	30.4	27.5
4	51.8	33.0	19.0

ตารางที่ 5. 20 ผลการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง

รอบการอุ่น	ผลประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง	
	หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอเปรียบเทียบกับน้ำมันเตาชนิดเอ
1	40.74%	28.55%
2	39.14%	14.98%
3	37.61%	9.63%
4	63.32%	42.49%
ค่าเฉลี่ย	45.20%	23.91%

ตารางที่ 5. 21 ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงต่อตันเหล็ก

ชนิดหัวเผา	ปริมาณการใช้น้ำมันต่อตันเหล็ก (ลิตร/ตันเหล็ก)		
	หัวเผาแบบธรรมดา		หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ
รอบการอุ่น	น้ำมันดีเซล	น้ำมันเตาชนิดเอ	น้ำมันเตาชนิดเอ
1	10.43	8.65	6.18
2	2.96	2.12	1.80
3	1.76	1.22	1.10
4	2.07	1.32	0.76
ค่าเฉลี่ย	3.08	2.26	1.72



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ โดยการศึกษาเริ่มต้นจากการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาโดยใช้น้ำมันดีเซล และ น้ำมันเตาชนิดเอ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับ ผลการอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟโดยใช้น้ำมันเตาเอ การทดลองดำเนินไปภายใต้เงื่อนไขของการทำงานของโรงงานตัวอย่าง เพื่อนำมาคำนวณและวิเคราะห์ สมดุลพลังงาน ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก และศักยภาพในการประหยัดพลังงาน

การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยหัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิงนั้น พบว่าประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยหัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นถึงเย็นอยู่ที่ 40.71% และ 42.66% ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยหัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นถึงอุ่นอยู่ที่ 31.28% และ 26.48% และในส่วนของถึงร้อน ประสิทธิภาพของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กจะอยู่ที่ประมาณ 22.31% และ 24.55% ตามลำดับ ในกรณีของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟนั้น ประสิทธิภาพในการอุ่นถึงเย็นและถึงอุ่นนั้นจะอยู่ที่ 55.81% และ 42.45% ส่วนในกรณีถึงร้อนนั้น ประสิทธิภาพในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กจะอยู่ที่ประมาณ 36.13%

พิจารณาในส่วนของสมดุลพลังงาน ความร้อนหลักที่สูญเสียไปจากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันเตาชนิดเอคือความร้อนที่สูญเสียจากไอเสียประมาณ 40-50% โดยเมื่อเปลี่ยนระบบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กมาเป็นหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟแล้ว ความร้อนสูญเสียจากไอเสียจะลดลงเหลือประมาณ 10-15% ทำให้การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ศักยภาพในการประหยัดพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก เมื่อทำการเปรียบเทียบศักยภาพในการประหยัดพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟกับน้ำมันดีเซล ศักยภาพในการประหยัดพลังงานจะอยู่ที่ 45.20% ส่วนศักยภาพในการประหยัดพลังงานของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเตาชนิดเอ ศักยภาพในการประหยัดพลังงานจะอยู่ที่ 23.91%

ตัวบ่งชี้ความเหมาะสมของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก จากเดิมทางโรงงานใช้ อุณหภูมิไอเสีย (6A) เป็นตัวบ่งชี้ เมื่อเปลี่ยนระบบการอุ่นมาเป็นหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟแล้ว อุณหภูมิไอเสียมีค่าประมาณ 200 องศาเซลเซียส จึงไม่สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ได้ เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมของตัวบ่งชี้อื่น พบว่าอุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่จุด 2B มีการเปลี่ยนแปลงที่บ่งชี้ความร้อนสะสมในผนังถึงรับน้ำเหล็กได้ใกล้เคียงกว่าตัวแปรตัวอื่น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นตัวชี้วัดสถานะการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กได้เป็นอย่างดี

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต

จากการตรวจวัดการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก มีข้อมูลบางส่วนที่ทำการตรวจวัดได้ยาก เช่น อุณหภูมิของลูกบอลเซรามิก เนื่องจากต้องทำการเจาะตัวหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ ทำให้ยากที่จะทำการตรวจวัด อุณหภูมิของผนังด้านในของชุดหัวเผา จึงควรทำการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นก่อนเพื่อหาวิธีทำการตรวจวัด

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการปรับปรุงการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากการใช้น้ำมันเตากับการทำงานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟยังมีประสิทธิภาพในการใช้งานจริงน้อย จึงควรมีการติดตามและประเมินผลการทำงานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในระยะยาวเพื่อเป็นข้อมูลในการส่งเสริมการใช้งานในประเทศไทย

ในอนาคตควรจะมีการศึกษาในทำนองเดียวกันนี้สำหรับการอุ่นด้วยเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น ก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่คาดว่า จะมีการใช้งานกว้างขวางขึ้นในอุตสาหกรรม ซึ่งในกรณีที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊ส ควรจะศึกษาความเหมาะสมในการนำหัวเผา รีเจนเนอเรทีฟชนิด Self-Regenerative burner มาใช้แทน เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย และมีน้ำหนักเบา

นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในถังถ่ายน้ำเหล็กขนาดเล็ก การอุ่นได้ด้วยไฟฟ้ามีข้อดีที่ไม่มีการปล่อยทิ้งไอเสีย ซึ่งนอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้ว ยังช่วยให้สิ่งแวดล้อมโดยรอบดีขึ้นด้วย การอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ควรมีการศึกษากีวิธีหนึ่งคือ การอุ่นด้วยหัวเผาที่ใช้ออกซิเจนแทนอากาศ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ลดการปล่อยทิ้งความร้อนออกไปกับไอเสีย และไม่สร้างไนโตรเจนออกไซด์ ซึ่งเป็นสารมลพิษที่ทำลายสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ข้อมูลเทคโนโลยีเชิงลึกหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ. โครงการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจ, 2551

จักรวาล จรูญศรทูลและพงษ์ธร จริญญากรณ์ . ใน การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ . การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก, 2552.

วีรินทร์ หวังจิรินันตร์. Overall properties (LEAP-TED Database). บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) : การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย, 2551.

ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น, จักรวาล จรูญศรทูลและพงษ์ธร จริญญากรณ์. ใน การจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อการประหยัดพลังงาน. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก, 2552.

สมศักดิ์ คงโชติ . การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในการอุ่นถึงรับน้ำเหล็กในอุตสาหกรรมโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536.

ภาษาอังกฤษ

Avallone, E.A and Baumeister, T. Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers. 9th Edition. New York. McGraw-Hill Book Company, 1987.

Baukal, C.E. Heat Transfer in Industrial Combustion. New York. CRC Press, 2000.

Bureau of Energy Efficiency. Data Sheet for Energy Control. Japan, 2006.

Cheanklin S., Jaroonsaratul, J. and Charunyakorn, P. A Thermal Modeling of Ladle in the Preheating and the Holding Period for Energy Conservation in Steelmaking Process. Proceeding of International Conference, SEASI 2009, Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.

Energy Conservation Center Japan. Ladle Heating Apparatus with Regenerative burner.
Energy Saving. Vol. 50, 26-32 1998.

Hideyuki T. Overview EE&C of Steel Industry in Japan. The Energy Conservation
Center of Japan, November 2006.

Incropera, P.F. and Dewitt, D.P. Introduction to Heat Transfer. 5th Edition. New York.
John Wiley & Son, 2007.

Jaroonsaratul J., Cheanklin, S. and Charunyakorn P. A Thermal Modeling of Ladle for
Energy Conservation in Steelmaking Process, Proceeding of International
Conference. World Renewable Energy Congress 2009 – Asia, Bangkok,
Thailand, 2009.

Keating, E.L. Applied Combustion II. New York. CRC Press, 2007.

Mohanty B. and Satayayut, J. Dynamic Model for Ladle Preheater Performance
Evolution. International Journal of Energy Research. Vol. 16, 51-60, 1992.

Nippon Steel Corporation. Commercialization of Self-Regenerative burner using Metal
Honeycomb. Nagoyaworks, 2008.

Trinks, W., Mawhinney, M., Shannon, R.A., and Gravey, J.R. Industrial Furnace. 6th
Edition. New York. John Wiley & Son, 2004.

Worell E., Martin, N., and Price, L. Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions
Reduction Opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector. Ernest Orlando
Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.

Yukio, T. Practical Examples of Heat Regenerative System at Steelmaking Works.
Nisshin Steel Company Limited. 2nd India-Japan Energy Forum : Delhi, 2008.

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,
International, 15(3),11-14, 60, 2008.



ภาคผนวก (Appendices)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก (Appendix A)

ข้อมูลการตรวจวัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ข้อมูลการตรวจวัดการอุ้มถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล

ตาราง ก. 1 ข้อมูลดิบจากการอุ้มถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันดีเซล

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
9:10:48	36	36	32	38	38	35	35	31	37	35	31	36	34	34	33	30	31	35
9:11:48	36	35	32	38	38	35	35	31	37	35	31	173	34	34	33	30	41	50
9:12:48	36	35	32	58	38	35	35	31	37	35	31	722	34	34	33	30	147	266
9:13:48	36	35	32	88	39	35	35	31	37	35	31	845	34	34	33	30	304	427
9:14:48	36	36	32	122	41	35	35	31	37	35	31	872	34	34	33	30	419	500
9:15:48	36	34	32	152	46	35	35	31	38	35	31	882	36	34	33	30	489	536
9:16:48	36	34	32	181	52	35	35	31	38	35	31	894	39	34	33	30	531	555
9:17:14	37	34	32	192	55	35	35	31	38	35	31	902	40	34	33	30	546	560
9:18:04	37	32	32	213	60	35	35	31	39	34	31	910	44	34	33	30	569	565
9:19:04	38	32	32	236	69	35	35	31	41	34	31	917	49	34	33	30	591	577
9:20:04	40	33	32	259	77	36	35	31	44	35	31	925	54	34	33	30	607	587
9:21:04	41	33	32	281	85	36	35	31	48	35	31	936	60	35	33	30	616	600
9:22:04	43	32	32	301	93	37	35	31	51	35	31	944	67	36	33	30	630	607
9:23:04	45	32	32	320	101	39	35	31	55	35	31	951	72	36	33	30	640	616
9:24:04	48	32	32	338	107	40	35	31	58	34	31	967	78	38	33	30	656	619
9:25:04	50	31	32	355	115	42	35	31	62	34	31	975	83	39	33	30	673	623
9:26:04	53	32	32	371	122	44	35	31	66	34	31	979	88	40	33	30	682	629
9:27:04	56	32	32	386	131	45	35	31	71	35	31	991	92	42	33	30	693	638
9:28:04	59	32	32	401	140	48	35	31	75	35	31	997	97	44	33	30	705	646
9:29:04	62	32	32	415	148	50	35	31	80	35	31	1004	103	46	33	30	706	652

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
9:30:04	65	31	32	429	156	52	35	31	84	34	31	1012	107	48	33	30	716	657
9:31:04	68	31	32	442	164	55	35	31	89	34	31	1020	111	50	33	30	725	661
9:33:04	75	31	32	468	181	60	35	31	98	34	31	1031	123	55	33	30	738	671
9:34:04	78	31	32	480	189	63	35	31	103	34	31	1035	130	58	33	30	753	677
9:35:04	82	32	32	492	197	66	35	31	108	35	31	1044	136	60	33	30	759	684
9:36:04	85	32	32	503	205	69	35	31	113	35	31	1050	143	63	33	30	761	690
9:37:04	89	32	32	514	213	73	35	31	118	35	31	1056	149	65	33	30	756	696
9:38:04	93	31	32	525	220	76	35	31	122	34	31	1061	155	68	33	30	768	696
9:39:04	97	31	32	535	228	79	35	31	127	34	31	1065	161	71	33	30	779	701
9:40:04	101	31	32	545	235	82	35	31	132	34	31	1070	167	74	33	30	794	703
9:41:04	104	31	32	555	242	85	35	31	138	35	31	1076	173	77	34	30	803	706
9:42:04	108	32	32	565	250	87	35	31	143	35	31	1082	179	80	34	30	815	711
9:43:04	112	32	32	574	257	90	35	31	148	35	31	1089	185	82	34	30	821	714
9:44:04	117	32	32	584	264	92	36	31	153	36	31	1091	191	85	34	30	826	723
9:45:04	120	31	32	593	271	94	36	31	157	35	31	1096	197	88	34	30	834	722
9:46:04	124	31	32	602	277	96	36	32	162	35	31	1099	203	91	35	30	835	727
9:47:04	128	32	32	611	284	98	36	32	167	36	31	1105	209	93	35	30	836	735
9:48:04	132	31	33	619	290	100	36	32	172	36	31	1113	215	95	35	30	825	738
9:49:04	136	30	33	626	296	103	36	32	175	34	31	1113	221	96	36	30	831	737
9:50:04	140	31	33	635	303	105	36	32	181	35	31	1116	226	97	36	30	849	740
9:51:04	144	31	33	643	310	108	36	32	186	35	31	1122	232	98	36	30	852	745
9:52:04	148	31	33	651	316	112	36	32	191	36	31	1123	238	98	37	30	865	748
9:53:04	153	31	33	658	322	115	37	32	196	36	31	1132	243	99	38	30	862	754
9:54:04	157	31	33	666	328	119	37	32	200	36	31	1131	249	99	38	30	875	751

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
9:55:04	161	31	33	673	334	122	37	32	205	37	31	1132	254	100	39	30	885	755
9:56:04	165	31	33	681	341	126	37	32	210	38	31	1137	260	102	40	30	894	759
9:58:04	173	32	33	696	353	133	39	32	219	38	31	1146	271	109	42	31	906	764
9:59:04	177	32	33	703	359	136	39	32	224	38	31	1148	276	112	43	31	912	767
10:00:04	181	32	33	710	365	140	40	32	229	39	31	1153	281	116	44	31	918	773
10:01:04	185	31	34	716	370	143	39	33	233	39	32	1158	286	120	45	31	919	775
10:02:04	189	32	34	722	376	147	40	33	238	40	32	1159	292	123	47	31	916	778
10:03:04	193	32	34	729	381	150	40	33	242	40	32	1161	297	127	48	31	923	778
10:04:04	196	32	34	736	387	153	41	33	247	41	32	1166	302	129	49	31	931	782
10:05:04	201	32	34	742	392	157	42	33	251	41	32	1167	307	133	51	31	936	785
10:06:04	204	32	34	749	398	160	42	33	256	42	32	1174	312	136	52	31	936	787
10:07:04	208	32	35	756	403	163	43	33	260	42	32	1178	317	139	53	31	925	792
10:08:04	212	32	35	762	409	167	44	34	265	43	32	1179	322	142	54	31	922	801
10:09:04	216	31	35	768	413	170	44	34	269	43	32	1183	327	145	55	31	932	800
10:10:04	220	31	35	774	418	174	44	34	273	43	32	1184	331	149	56	31	938	799
10:11:04	224	31	36	779	423	177	44	34	277	43	32	1191	336	152	57	31	948	798
10:12:04	228	30	36	785	428	181	43	35	281	43	33	1189	341	155	58	31	959	800
10:13:04	231	32	36	791	434	184	45	35	285	44	33	1194	346	158	58	31	960	804
10:14:04	235	32	36	797	439	187	46	35	290	45	33	1193	350	161	59	31	962	806
10:15:04	239	31	37	803	444	190	46	35	294	46	33	1198	355	165	59	31	968	807
10:16:04	242	31	37	808	448	194	46	36	298	46	33	1201	359	168	60	31	970	808
10:17:04	246	32	37	814	454	197	47	36	302	47	33	1201	364	171	60	31	972	813
10:18:04	250	31	38	819	458	200	46	36	305	47	34	1205	369	174	61	31	980	811
10:19:04	253	31	38	824	463	204	47	36	310	47	34	1208	373	177	61	31	983	812

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
10:20:04	257	32	38	829	468	207	49	37	314	49	34	1209	377	180	62	31	981	821
10:21:04	261	32	38	835	473	210	49	37	318	49	34	1214	382	183	62	32	989	823
10:23:04	268	32	39	845	483	217	51	37	327	51	35	1218	390	190	63	32	1001	827
10:24:04	272	32	39	850	487	220	51	38	330	52	35	1221	395	193	63	32	999	832
10:25:04	275	32	40	855	492	223	51	38	334	52	35	1222	399	196	64	32	1000	833
10:26:04	279	31	40	859	496	226	51	38	338	52	35	1227	403	199	64	32	1008	832
10:27:04	282	31	41	862	500	230	50	39	341	52	36	1218	407	202	65	32	1009	835
10:28:04	286	31	41	866	505	233	52	39	345	53	36	1215	411	205	65	32	1006	840
10:29:04	289	31	41	867	509	236	52	39	349	54	36	1214	415	208	66	32	1002	842
10:30:04	293	31	42	868	514	239	53	39	353	55	36	1215	419	211	66	32	1005	842
10:31:04	296	32	42	870	518	242	54	40	357	56	36	1215	424	214	67	32	1005	845
10:32:04	299	32	42	871	522	245	54	40	361	57	37	1213	427	217	67	32	1007	847
10:33:04	303	32	43	873	526	249	55	41	365	58	37	1215	431	221	68	32	1005	850
10:34:04	306	32	43	875	531	252	56	41	369	59	37	1214	435	224	68	33	1007	852
10:35:04	310	32	43	876	534	255	57	41	372	59	37	1213	439	227	69	33	1011	852
10:36:04	313	32	44	877	538	258	57	41	375	60	38	1214	443	230	69	33	1011	851
10:37:04	316	32	44	879	541	261	57	42	379	60	38	1209	446	233	70	33	1004	851
10:38:04	319	32	45	880	545	264	58	42	382	61	38	1210	450	236	70	33	994	849
10:39:04	323	32	45	882	548	267	58	42	386	62	39	1212	453	239	71	33	998	849
10:40:04	326	32	45	884	551	270	58	43	389	62	39	1251	457	242	71	33	1013	861
10:41:04	329	31	46	887	553	273	58	43	392	62	39	1255	461	245	72	33	1032	868
10:42:04	332	31	46	893	557	276	59	43	395	63	40	1265	464	248	72	34	1045	870
10:43:04	335	32	47	898	561	279	60	44	399	64	40	1267	468	251	73	34	1047	875
10:44:04	338	32	47	904	564	282	60	44	402	65	40	1271	471	254	73	34	1052	880

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
10:45:04	341	31	48	908	566	285	59	45	405	65	41	1274	474	257	74	34	1060	882
10:46:04	344	30	48	912	568	288	59	45	407	65	41	1277	478	260	75	34	1062	882
10:48:04	350	32	49	921	576	294	62	46	414	68	42	1283	484	265	76	35	1068	889
10:49:04	353	33	49	927	581	297	64	46	418	70	42	1285	488	268	76	35	1069	895
10:50:04	356	32	50	931	584	300	65	47	421	71	42	1283	491	271	77	35	1079	895
10:51:04	359	32	50	936	588	303	65	47	425	72	43	1287	494	274	78	36	1085	896
10:52:04	362	33	51	940	591	305	66	48	428	73	43	1293	498	277	79	36	1088	897
10:53:04	365	33	51	944	595	308	67	48	431	74	44	1294	502	280	79	36	1092	901
10:54:04	368	33	52	947	598	311	67	48	434	74	44	1294	505	283	80	37	1098	902
10:55:04	371	34	52	951	601	314	67	49	436	74	44	1296	508	286	81	37	1099	901
10:56:04	374	33	53	954	605	317	67	49	440	76	45	1298	512	288	81	38	1101	905
10:57:04	377	34	53	958	609	320	70	50	443	78	45	1301	515	291	82	38	1104	909
10:58:04	380	34	54	962	613	322	71	50	447	79	46	1303	518	294	82	38	1107	912
10:59:04	383	34	54	965	616	325	70	51	449	80	46	1301	522	296	83	39	1108	912
11:00:04	386	34	55	969	620	328	72	51	453	81	47	1307	525	299	84	39	1107	916
11:01:04	389	34	55	972	623	331	73	52	456	82	47	1305	528	302	85	40	1111	918
11:02:04	392	35	56	975	626	333	73	52	459	83	47	1311	531	304	85	40	1110	917
11:03:04	395	34	56	978	630	336	73	53	462	84	48	1312	535	307	86	41	1113	919
11:04:04	397	34	57	981	633	339	74	53	465	85	48	1314	538	309	87	41	1117	919
11:05:04	401	35	57	984	637	341	75	54	468	86	49	1312	541	311	87	42	1120	923
11:06:04	403	34	58	986	640	344	76	54	471	87	49	1316	545	313	88	43	1123	924
11:07:04	406	34	58	989	643	347	76	55	474	88	50	1317	548	317	88	43	1125	924
11:08:04	409	35	59	993	647	350	78	55	478	90	51	1321	551	320	89	43	1128	930
11:09:04	412	35	59	996	650	352	79	56	481	91	51	1321	555	322	90	44	1130	930

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
11:10:04	415	37	60	999	654	355	80	56	484	92	52	1278	558	325	90	44	1129	930
11:11:04	418	34	60	995	656	358	80	56	486	93	52	1005	562	328	91	45	1025	789
11:13:04	424	37	61	952	663	363	82	58	492	95	54	876	568	334	92	46	848	652
11:14:04	426	36	62	929	665	366	81	58	495	96	54	843	571	336	92	46	787	613
11:15:04	429	36	63	907	666	369	81	59	498	96	56	811	573	339	92	46	741	585
11:16:04	432	36	63	887	668	371	82	60	501	97	56	789	576	342	92	47	705	559
11:17:04	435	35	64	869	668	374	83	60	503	99	57	763	578	344	93	47	672	538
11:18:04	437	38	65	853	669	376	85	61	506	100	57	744	580	347	93	47	642	521
11:19:04	440	38	65	837	668	379	84	62	509	102	58	726	582	349	94	48	620	502
11:20:04	442	36	66	823	667	382	86	63	511	103	59	712	582	351	94	48	599	490
11:21:04	445	37	66	809	665	384	86	63	514	104	60	695	582	354	94	48	582	478
11:22:04	447	36	67	795	662	387	85	64	516	105	61	679	583	356	95	49	564	466
11:23:04	449	37	67	782	659	389	85	65	517	106	61	663	583	358	95	49	548	455
11:24:04	450	38	68	770	656	392	85	66	518	107	62	649	583	361	96	49	530	448
11:25:04	452	39	69	759	653	394	85	66	519	108	63	639	583	363	96	49	516	438
11:26:04	453	38	69	749	651	396	87	67	521	110	63	626	582	366	96	50	502	430
11:27:04	454	43	70	738	647	398	86	68	522	111	64	616	582	368	96	50	491	423
11:28:04	455	51	71	728	643	400	83	69	523	112	65	605	581	370	97	50	482	410
11:29:04	456	58	71	718	639	402	83	69	523	112	66	594	580	372	97	51	472	401
11:30:04	457	61	72	708	635	404	83	70	523	113	67	584	579	374	97	51	463	394
11:31:04	457	55	73	700	631	406	83	71	523	114	68	576	578	377	98	51	454	388
11:32:04	458	72	73	692	628	407	87	72	524	116	68	567	576	378	98	51	443	380
11:33:04	458	70	74	683	624	409	87	72	523	116	69	558	575	380	98	52	433	374
11:34:04	458	59	75	673	617	411	85	73	522	114	70	549	573	381	98	52	425	369

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
11:35:04	458	76	76	666	614	412	87	74	522	116	71	542	573	384	99	52	418	365
11:36:04	458	55	76	660	612	413	91	74	522	118	72	534	570	386	99	52	410	359
11:38:04	458	44	77	647	605	415	95	76	521	121	73	524	566	389	99	53	398	352
11:39:04	458	44	78	639	601	417	96	76	520	122	74	514	565	391	99	53	390	345
11:40:04	457	54	79	631	596	417	94	77	519	121	75	508	563	392	99	53	386	340
11:41:04	457	49	80	627	594	418	97	78	519	123	76	503	561	393	99	54	380	335
11:42:04	456	44	80	621	590	419	97	78	518	124	77	496	559	394	99	54	376	331
11:43:04	456	47	81	615	587	420	98	79	517	125	78	490	557	395	99	54	370	325
11:44:04	455	55	81	610	584	420	103	80	517	127	79	487	554	396	100	54	365	323
11:45:04	454	56	82	605	581	421	107	80	516	128	80	481	552	397	100	54	358	323
11:46:04	454	47	82	599	576	421	106	80	514	128	80	476	550	397	100	55	354	318
11:47:04	453	57	83	595	574	422	109	81	513	130	81	470	548	398	101	55	349	316
11:48:04	452	49	83	590	571	422	112	81	513	132	82	466	546	400	101	55	343	314
11:49:04	451	46	84	586	568	423	114	82	512	133	83	459	545	401	102	55	337	310
11:50:04	451	50	84	580	563	423	113	82	509	132	83	453	543	401	103	56	334	305
11:51:04	450	50	85	575	560	423	113	83	508	132	84	449	541	402	104	56	331	300
11:52:04	449	49	85	570	557	423	113	84	506	133	84	446	539	403	105	56	328	298
11:53:04	448	71	86	564	552	423	110	84	504	133	85	441	537	404	107	56	326	292
11:54:04	447	57	87	559	548	424	108	85	503	135	86	436	534	404	109	57	323	287
11:55:04	446	56	87	555	545	424	110	86	501	135	86	432	533	405	111	57	320	285
11:56:04	444	61	88	551	543	424	112	87	501	137	87	428	530	405	112	57	318	283
11:57:04	443	49	88	548	541	424	115	87	500	139	88	425	529	405	114	57	314	282
11:58:04	442	52	89	544	538	423	116	88	498	139	88	421	527	405	115	57	310	281
11:59:04	441	49	89	540	535	423	117	88	497	140	89	416	525	406	117	58	305	278

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
12:00:04	440	61	90	536	532	423	117	89	494	140	89	413	523	406	118	58	303	275
12:01:04	439	61	91	531	528	423	117	90	493	141	90	409	521	406	120	58	300	272
12:03:04	437	70	92	521	520	422	116	91	489	141	91	400	516	407	122	59	293	265
12:04:04	436	71	92	517	517	422	115	92	488	142	92	397	514	405	123	59	291	262
12:05:04	435	65	93	516	517	422	119	92	487	144	92	394	513	406	125	59	289	261
12:06:04	434	56	93	514	516	421	122	93	486	146	92	391	511	406	126	59	285	260
12:07:04	432	50	94	511	513	421	124	93	485	147	92	388	509	406	127	59	281	260
12:08:04	431	57	94	507	509	420	123	94	483	148	93	384	507	406	128	60	278	257
12:09:04	430	51	95	504	507	420	124	94	482	149	93	379	505	406	129	60	275	254
12:10:04	429	58	95	498	501	420	122	95	478	146	94	375	503	406	131	60	272	253
12:11:04	428	68	96	496	500	419	124	95	478	149	95	373	501	405	132	60	269	250
12:12:04	426	47	96	494	500	418	126	96	478	152	95	371	499	405	133	60	266	249
12:13:04	425	47	96	491	497	418	126	96	475	151	96	370	497	405	134	60	264	247
12:14:04	424	48	97	489	495	417	128	97	475	153	96	367	495	405	135	60	262	245
12:15:04	423	66	97	483	490	417	125	97	472	152	97	362	493	405	136	61	258	243
12:16:04	422	55	98	480	487	416	126	98	469	151	98	358	491	405	137	61	250	241
12:17:04	420	48	98	478	486	416	127	98	469	154	98	355	490	404	138	61	246	238
12:18:04	419	50	98	476	484	415	127	98	467	155	98	354	488	403	139	61	244	236
12:19:04	418	49	98	472	480	414	126	98	466	155	98	351	486	404	140	62	242	233
12:20:04	417	58	98	468	478	414	126	98	462	153	98	349	484	403	141	62	241	230
12:21:04	415	52	98	465	474	413	124	98	460	153	98	346	482	403	142	62	240	228
12:22:04	414	55	98	462	473	412	124	98	460	156	98	343	480	403	143	62	239	226
12:23:04	413	48	98	462	473	412	128	98	460	158	98	342	479	402	144	62	238	226
12:24:04	412	51	98	460	470	411	129	98	458	159	98	340	477	402	145	63	237	226

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
12:25:04	411	47	98	457	468	410	130	98	457	161	98	337	475	401	145	63	235	224
12:26:04	410	58	98	453	464	410	129	98	456	161	98	335	473	401	146	63	232	222
12:28:04	407	64	98	448	460	408	131	98	451	161	98	329	470	400	148	64	226	218
12:29:04	406	50	98	445	458	407	131	98	449	161	98	326	468	399	149	64	224	217
12:30:04	405	51	98	445	458	407	134	98	450	164	98	326	466	398	150	64	223	216
12:31:04	404	49	98	444	457	406	136	98	449	166	98	326	465	398	150	64	222	215
12:32:04	402	44	98	443	456	405	138	98	449	169	98	324	464	397	151	64	220	214
12:33:04	401	44	98	440	453	404	137	98	446	167	98	321	462	397	152	65	219	213
12:34:04	400	52	98	437	450	403	136	98	445	169	98	319	460	397	153	65	218	211
12:35:04	399	47	99	434	447	403	136	98	443	168	98	317	458	396	153	65	216	210
12:36:04	398	66	99	430	444	402	135	98	440	167	99	313	456	395	154	65	216	208
12:37:04	397	52	99	430	444	401	138	98	441	172	99	311	455	394	155	65	213	207
12:38:04	396	47	99	429	444	400	140	98	441	173	99	309	454	394	156	65	210	205
12:39:04	395	40	99	426	441	399	141	98	439	173	99	307	452	394	157	65	206	203
12:40:04	393	45	100	421	436	398	138	99	434	169	100	305	450	393	157	66	204	202
12:41:04	392	41	100	423	438	397	143	99	436	174	100	303	449	392	158	66	203	200
12:42:04	391	43	101	419	434	397	140	99	434	174	100	302	447	391	159	66	203	200
12:43:04	390	38	101	418	434	396	142	100	431	173	100	302	446	391	159	66	203	199
12:44:04	389	42	101	416	431	395	142	100	431	175	101	300	444	391	160	67	203	198
12:45:04	388	45	101	413	428	394	141	100	429	175	101	298	443	390	160	67	202	196
12:46:04	387	52	102	407	423	393	138	101	428	175	102	296	441	389	161	67	202	194
12:47:04	385	42	102	408	424	392	141	101	427	176	102	294	440	388	162	67	201	193
12:48:04	384	45	102	407	424	391	143	101	425	177	102	294	437	387	162	68	201	193
12:49:04	383	58	103	405	421	390	143	102	423	176	103	290	437	387	163	68	199	193

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
12:50:04	382	39	103	404	421	389	146	102	424	180	103	289	435	386	163	68	196	191
12:51:04	381	42	103	400	416	389	144	103	420	176	104	287	434	386	164	68	192	190
12:53:04	379	45	104	398	414	387	145	103	419	180	104	284	431	384	165	69	189	188
12:54:04	378	44	104	397	414	386	146	104	416	178	105	285	429	383	165	69	189	187
12:55:04	377	44	104	395	412	385	147	104	417	182	105	284	428	382	166	69	188	186
12:56:04	376	41	104	396	413	384	150	104	417	184	105	281	427	382	166	69	186	185
12:57:05	374	40	105	393	410	384	148	105	414	182	106	279	426	381	167	70	185	185
12:58:05	373	45	105	391	408	383	149	105	413	183	106	279	424	381	167	70	184	183
12:59:05	372	48	106	387	404	382	148	105	410	181	107	275	422	380	167	70	181	182
13:00:05	371	47	106	387	404	381	150	106	410	183	107	273	421	379	168	70	166	181
13:01:05	370	46	106	383	401	380	149	106	406	180	108	271	420	379	168	70	148	180
13:02:05	369	48	107	381	399	379	148	107	405	181	108	271	418	377	169	71	133	178
13:03:05	368	39	106	383	400	378	150	107	407	186	108	271	416	376	169	71	118	178
13:04:05	367	38	107	380	398	377	151	107	405	185	108	268	415	376	169	71	105	177
13:05:05	366	36	107	378	396	376	151	108	403	184	109	266	414	375	170	71	95	175
13:06:05	365	37	108	376	393	376	150	108	400	181	109	264	413	374	170	71	88	175
13:07:05	364	39	108	373	391	375	150	109	397	180	110	261	411	373	171	72	83	174
13:08:05	363	39	109	371	389	374	150	109	397	182	110	261	410	373	171	72	78	173
13:09:05	362	39	109	368	387	373	149	110	397	183	111	259	409	372	171	72	75	173
13:10:05	361	38	109	369	384	372	148	110	395	182	111	492	407	371	171	72	76	186
13:11:05	360	40	110	376	382	371	145	110	393	182	112	888	405	371	172	72	153	394
13:12:05	359	49	110	402	381	370	146	111	391	180	112	964	404	370	172	73	288	535
13:13:05	358	55	111	432	380	369	148	111	389	180	113	993	402	369	172	73	402	598
13:14:05	357	39	110	462	385	369	153	111	393	188	112	1016	401	367	173	72	456	632

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
13:16:05	355	95	110	510	391	367	158	112	391	188	113	1048	398	365	173	73	487	670
13:18:05	354	39	110	550	396	365	157	112	392	192	113	1077	401	364	174	73	463	697
13:19:05	353	44	110	571	401	364	159	112	392	193	113	1088	402	363	174	73	436	711
13:20:05	353	43	110	588	405	364	159	112	391	192	113	1097	404	364	174	73	432	718
13:21:05	353	43	110	605	410	363	158	112	392	193	113	1109	406	362	175	73	478	727
13:22:05	353	42	111	618	412	362	155	113	391	190	114	1118	408	361	175	74	520	734
13:23:05	353	45	111	636	421	362	159	113	394	194	114	1130	412	361	175	73	530	748
13:24:05	353	40	111	650	426	361	158	113	395	194	114	1142	415	361	176	74	542	753
13:25:05	354	41	111	662	429	361	155	114	395	193	114	1147	418	360	176	74	586	758
13:26:05	354	41	112	674	434	361	154	114	395	191	115	1150	422	360	176	74	616	766
13:27:05	355	43	112	690	443	361	157	114	397	191	115	1156	427	359	176	74	636	771
13:28:05	357	47	112	704	451	361	160	114	401	194	115	1168	429	358	176	74	610	780
13:29:05	358	41	112	715	456	361	159	114	402	194	115	1171	434	359	177	74	604	785
13:30:05	359	39	113	726	461	361	159	115	403	190	116	1179	438	359	177	75	647	788
13:31:05	361	39	113	738	468	361	159	115	406	191	116	1183	442	359	177	75	676	796
13:32:05	362	40	113	749	476	361	161	115	407	189	116	1189	447	360	177	75	692	799
13:33:05	364	42	113	759	481	362	161	116	412	193	116	1195	450	360	177	75	681	805
13:34:05	366	41	114	766	483	363	156	116	411	189	117	1202	455	361	178	75	698	807
13:35:05	368	40	114	775	489	364	155	117	412	186	117	1204	459	361	178	76	723	812
13:36:05	370	45	115	784	495	364	155	117	418	190	118	1208	463	362	178	76	733	815
13:37:05	372	44	115	795	504	365	160	117	422	193	118	1215	467	361	178	75	702	826
13:38:05	374	43	115	805	511	366	162	117	428	196	117	1220	472	362	178	75	638	833
13:39:05	376	45	115	811	513	367	158	117	430	194	118	1224	476	364	178	76	651	832
13:40:05	379	44	116	816	516	368	154	118	429	189	119	1227	480	364	178	76	710	835

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
13:43:05	386	46	116	841	540	372	163	118	444	197	119	912	493	367	179	76	635	715
13:44:05	389	41	116	823	542	374	159	118	446	196	119	808	498	368	179	76	528	605
13:45:05	391	39	116	800	544	375	157	119	447	193	120	757	501	369	179	77	447	549
13:46:05	394	49	116	785	553	376	161	119	451	195	120	723	506	371	179	77	383	510
13:47:05	396	45	117	769	559	378	163	119	456	197	120	696	510	372	179	76	332	482
13:48:05	399	45	117	752	562	379	164	119	459	198	120	669	513	373	179	77	291	461
13:49:05	401	44	117	735	563	381	161	119	461	195	120	645	516	375	180	77	262	437
13:50:05	404	46	117	721	565	383	162	119	464	195	120	628	519	376	180	77	239	418
13:51:05	406	45	118	708	566	384	162	120	467	196	121	611	521	377	180	77	220	403
13:52:05	409	49	118	695	566	386	161	120	470	196	121	595	523	378	180	77	205	392
13:53:05	411	44	118	686	568	388	166	120	474	199	121	581	525	380	180	77	190	386
13:54:05	413	49	118	675	568	389	166	120	477	199	121	568	526	381	180	77	176	380
13:55:05	415	48	119	661	563	391	162	120	476	197	121	553	527	383	181	77	166	368
13:56:05	417	40	119	650	560	392	161	121	476	194	122	540	528	384	181	77	159	357
13:57:05	418	42	119	639	557	394	159	121	476	191	122	529	528	386	181	78	154	347
13:58:05	420	43	119	634	559	395	163	121	480	195	122	521	529	387	181	78	149	341
13:59:05	421	44	119	628	560	397	167	121	484	199	122	514	529	388	181	78	142	336
14:00:05	422	45	119	620	558	398	167	121	486	200	122	504	528	389	181	78	134	329
14:01:05	423	44	119	613	556	400	168	121	488	202	122	496	528	391	181	77	127	324
14:02:05	424	44	120	604	551	401	164	122	486	199	123	490	527	393	182	78	122	317
14:03:05	424	44	120	595	547	402	161	122	485	197	123	484	526	394	182	78	119	309
14:04:05	425	44	120	589	545	403	163	122	485	196	123	478	526	394	182	78	117	303
14:05:05	425	41	121	580	540	404	162	122	485	196	124	468	525	396	182	79	114	299
14:06:05	426	41	121	577	540	405	163	123	487	198	124	463	524	398	182	79	112	295

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
14:08:05	426	42	121	567	536	407	166	123	488	201	124	449	522	398	183	79	107	288
14:09:05	426	42	121	563	535	407	168	123	488	202	124	443	522	399	183	79	103	286
14:10:05	426	179	121	558	533	408	169	123	488	201	124	440	520	400	183	79	99	285
14:11:05	426	179	121	552	529	409	167	123	486	200	124	438	518	400	183	79	96	283
14:12:05	426	177	121	545	524	409	165	123	486	200	124	434	517	401	184	79	94	278
14:13:05	425	178	121	544	524	410	167	123	486	202	124	868	515	403	184	79	107	380
14:14:05	425	179	121	560	522	410	167	123	486	204	124	1023	513	403	184	79	185	570
14:15:05	425	180	121	582	519	410	167	123	487	205	124	1063	512	404	184	79	281	653
14:16:05	424	179	122	602	515	411	163	124	484	203	125	1087	511	405	185	79	392	689
14:17:05	424	177	122	622	511	411	162	124	481	199	125	1105	510	404	185	80	487	712
14:18:05	423	180	122	645	514	411	167	124	482	202	125	1122	509	405	185	80	515	730
14:19:05	423	179	122	662	512	412	165	125	482	203	125	1135	508	405	186	80	534	743
14:20:05	422	179	122	680	514	412	165	125	479	200	126	1146	508	406	186	80	579	751
14:21:05	422	178	122	697	515	412	164	125	479	201	126	1156	508	408	186	80	619	761
14:22:05	422	181	122	715	520	412	168	125	481	204	126	1169	510	406	187	80	630	774
14:23:05	422	182	122	732	524	412	171	125	481	205	126	1178	511	407	187	80	599	785
14:24:05	422	181	123	745	527	412	170	125	480	204	126	1181	513	408	187	80	594	792
14:25:05	422	180	123	756	529	412	168	126	481	204	126	1188	515	408	188	80	634	798
14:26:05	422	175	124	766	529	412	164	126	477	199	127	1201	517	409	188	81	676	803
14:27:05	423	179	124	778	535	413	164	126	482	204	127	1207	518	407	188	81	699	811
14:28:05	424	181	124	793	543	413	169	126	483	205	127	1212	521	408	189	81	680	819
14:29:05	424	182	124	803	546	413	169	126	485	206	127	1221	524	408	189	81	679	826
14:30:05	425	181	124	812	549	414	168	127	483	202	128	1224	527	409	190	81	705	829
14:31:05	426	178	125	820	553	414	166	127	483	200	128	1230	530	410	191	81	724	832

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
14:33:05	429	185	124	845	568	415	174	127	491	207	128	1059	537	410	191	81	651	829
14:34:05	430	186	124	845	574	416	176	127	493	208	128	872	540	410	191	81	553	674
14:35:05	432	187	124	829	578	417	177	127	495	208	128	798	543	412	192	81	456	587
14:36:05	434	188	124	811	584	418	179	127	499	211	127	751	546	413	192	81	383	540
14:37:05	435	186	125	792	587	418	178	127	500	210	128	717	549	414	193	81	330	503
14:38:05	437	181	125	772	586	419	172	128	500	206	128	695	552	414	193	82	292	477
14:39:05	439	181	125	754	588	420	170	128	501	205	129	670	555	417	193	82	264	451
14:40:05	441	184	125	740	591	421	171	128	502	204	129	651	558	416	194	82	242	432
14:41:05	443	186	125	731	596	422	176	128	508	209	128	631	560	418	194	82	221	422
14:42:05	444	186	126	718	596	424	176	128	509	209	129	616	562	419	195	82	203	413
14:43:05	446	184	126	705	594	425	173	129	510	208	129	603	562	419	195	83	188	400
14:44:05	448	184	126	692	593	426	172	129	510	204	129	591	563	421	195	83	177	386
14:45:05	449	184	127	680	589	427	169	129	513	207	130	579	564	421	196	83	169	374
14:46:05	451	186	127	673	591	428	171	130	514	206	130	567	565	424	196	83	162	365
14:47:05	452	188	127	666	592	429	176	130	518	211	130	556	565	425	196	83	154	363
14:48:05	453	188	127	658	591	430	178	130	519	211	130	543	565	425	197	83	147	357
14:49:05	454	190	127	651	589	431	180	130	520	212	130	536	565	426	197	83	139	352
14:50:05	455	191	127	645	588	432	182	130	521	213	130	526	565	427	198	83	132	348
14:51:05	455	192	127	638	586	433	183	130	523	214	130	516	564	427	198	83	126	342
14:52:05	456	191	127	631	584	434	182	130	524	216	130	510	563	428	198	83	120	336
14:53:05	456	190	128	623	580	435	181	130	524	215	130	502	563	430	199	83	116	329
14:54:05	457	190	128	616	577	436	180	130	523	214	131	505	561	432	199	83	113	349
14:55:05	457	190	128	611	575	437	181	130	522	212	131	663	561	432	200	83	114	354
14:56:05	457	190	128	615	573	438	181	130	522	213	131	1001	560	433	200	83	163	540

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
14:58:05	457	191	128	654	568	439	182	131	523	216	131	1094	557	434	201	83	368	698
14:59:05	457	191	129	672	565	439	181	131	522	216	131	1108	555	435	201	84	430	725
15:00:05	457	191	129	690	563	440	181	131	522	216	131	1126	555	435	202	84	490	741
15:01:05	457	192	129	709	564	440	182	131	521	216	132	1135	554	437	202	84	493	756
15:02:05	456	192	128	726	564	441	184	131	523	219	132	1150	554	436	202	84	513	770
15:03:05	456	192	129	742	565	441	183	131	522	218	132	1160	554	437	203	84	511	781
15:04:05	456	192	129	756	567	441	183	131	521	219	132	1166	555	438	204	84	512	791
15:05:05	456	192	129	769	569	441	183	132	520	217	132	1177	556	439	204	84	555	796
15:06:05	456	193	129	784	573	442	185	132	522	221	132	1187	557	438	204	84	521	809
15:07:05	456	193	129	794	574	442	182	132	521	219	132	1192	558	439	205	84	554	812
15:08:05	457	191	129	804	575	442	182	132	520	218	133	1204	560	440	205	84	559	818
15:09:05	457	194	129	816	581	443	184	132	518	214	133	1204	562	440	206	85	594	822
15:10:05	457	193	129	827	585	443	183	133	521	218	133	1210	564	441	206	85	612	829
15:11:05	458	196	129	839	590	443	186	132	523	220	133	1217	566	440	207	85	598	834
15:12:05	459	196	130	848	594	444	187	133	526	222	133	1225	569	441	207	85	607	840
15:13:05	460	195	130	856	597	444	185	133	527	222	133	1229	571	442	208	85	632	842
15:14:05	461	196	129	867	603	445	187	133	528	223	133	1233	574	442	208	85	614	851
15:15:05	462	195	130	874	606	445	187	133	530	224	133	1220	577	443	209	85	581	851
15:16:05	463	196	130	881	610	446	186	133	531	222	133	1212	580	444	209	85	589	851
15:17:05	465	197	130	886	615	447	187	133	532	222	134	1211	583	444	210	85	599	848
15:18:05	466	198	130	890	620	447	189	133	536	225	134	935	585	445	210	85	543	754
15:19:05	468	199	130	877	624	448	190	133	537	224	134	846	588	445	211	85	459	640
15:20:05	470	200	130	860	630	449	192	133	539	225	134	795	591	446	211	85	385	582
15:21:05	471	201	130	842	634	450	193	133	542	226	133	759	594	448	212	85	328	546

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
15:23:05	475	198	131	806	637	452	189	133	544	224	134	713	599	450	213	86	257	494
15:24:05	477	193	132	788	636	453	186	134	544	222	135	684	601	452	214	86	237	471
15:25:05	479	198	132	776	639	454	189	134	548	224	135	668	603	452	214	86	221	454
15:26:05	480	201	131	766	643	455	193	134	551	226	134	650	605	452	214	86	203	440
15:27:05	482	201	131	754	642	456	194	134	553	227	134	636	606	453	215	86	186	429
15:28:05	484	200	132	746	640	457	191	134	555	227	135	1036	607	455	215	86	208	563
15:29:05	485	197	132	752	636	458	186	135	554	225	135	1114	608	455	216	86	339	698
15:30:05	486	200	132	768	636	459	189	135	555	225	135	1141	608	457	216	86	429	754
15:31:05	487	201	132	785	636	460	191	135	557	225	136	1165	608	458	217	86	479	781
15:32:05	489	201	132	801	635	462	192	135	559	227	136	1179	608	459	217	86	460	797
15:33:05	490	201	133	815	635	463	191	135	559	227	136	1188	608	460	217	87	492	807
15:34:05	490	200	133	827	633	464	190	136	560	227	136	1203	608	461	218	86	571	815
15:35:05	491	199	133	839	633	465	189	136	561	228	136	1209	609	461	218	87	580	826
15:36:05	492	200	134	848	632	466	186	136	560	225	137	1216	610	461	218	87	644	832
15:37:05	493	200	134	859	635	466	188	137	560	225	137	1227	611	463	219	87	681	839
15:38:05	493	203	134	872	640	467	192	137	563	229	137	1225	612	465	220	87	649	847
15:39:05	494	202	134	880	642	468	192	137	564	228	137	1224	614	465	221	87	636	850
15:40:05	495	204	134	891	647	469	196	137	566	231	137	1206	616	466	221	87	586	850
15:41:05	496	204	134	897	650	470	197	137	567	232	137	1206	618	467	222	87	545	850
15:42:05	497	202	134	899	651	471	193	137	566	229	138	965	620	466	222	88	531	783
15:43:05	498	205	134	891	656	472	196	137	568	230	137	857	622	469	223	88	465	658
15:44:05	500	205	134	873	659	473	196	137	570	231	138	805	624	470	223	88	396	596
15:45:05	501	202	135	853	659	474	192	138	569	228	138	749	626	471	224	88	346	547
15:46:05	502	201	135	833	660	474	191	138	566	222	139	694	628	471	224	87	315	488

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
15:48:05	505	204	136	797	663	476	191	139	570	224	139	628	631	473	225	88	274	411
15:49:05	506	202	136	781	664	477	190	140	572	224	140	609	633	475	226	88	259	390
15:50:05	508	206	137	768	666	478	193	140	576	229	140	588	634	477	226	88	246	370
15:51:05	509	206	137	755	666	479	195	140	578	231	140	572	635	477	227	88	234	353
15:52:05	510	208	137	744	666	480	198	140	581	233	140	553	635	479	227	88	220	336
15:53:05	511	204	138	729	660	482	193	140	582	234	140	545	635	479	228	88	209	326
15:54:05	512	207	137	718	660	482	195	141	581	231	141	530	635	480	228	88	201	317
15:55:05	513	204	138	706	655	483	192	141	581	230	141	523	634	482	229	88	193	307
15:56:06	514	209	138	699	656	484	198	141	584	234	141	507	634	482	229	88	186	298
15:57:06	515	211	138	692	655	485	201	141	586	237	141	497	633	483	230	88	178	288
15:58:06	515	208	138	680	649	486	197	141	585	235	141	491	632	484	230	88	170	279
15:59:06	515	207	138	669	644	487	195	141	583	233	142	483	631	485	231	89	165	275
16:00:06	515	207	139	662	642	488	196	142	581	231	142	476	629	485	231	89	162	270
16:01:06	515	210	139	655	639	488	197	142	583	234	142	467	628	488	231	89	159	265
16:02:06	515	211	139	649	636	489	198	142	584	236	142	458	627	488	232	89	156	259
16:03:06	515	209	140	639	631	490	197	143	583	235	143	452	624	489	232	89	153	254
16:04:06	515	206	140	627	622	490	191	143	579	231	143	450	623	490	233	89	150	251
16:05:06	514	210	140	624	622	491	195	143	580	234	144	442	621	489	233	89	148	249
16:06:06	514	213	140	622	623	491	201	143	583	239	143	434	620	491	234	89	144	243
16:07:06	513	212	141	615	618	491	201	143	581	237	144	431	617	492	234	89	140	237
16:08:06	512	211	140	608	614	492	200	144	578	236	144	423	616	492	235	90	138	234
16:09:06	512	211	141	603	611	492	200	144	578	237	144	418	613	492	235	90	135	229
16:10:06	511	213	141	598	608	492	200	144	577	238	145	411	611	493	236	90	133	227

ข้อมูลการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

ตาราง ก.2 ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้
น้ำมันดีเซลในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ปริมาณการใช้น้ำมัน (ลิตร)
1	260.7
2	73.94
3	44.08
4	51.8

ข้อมูลปริมาณออกซิเจนในไอเสีย

ตาราง ก.3 ปริมาณออกซิเจนในไอเสียของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่
ใช้น้ำมันดีเซลในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	% O ₂
1	7.3
2	7.3
3	7.8
4	7.2

ข้อมูลอุณหภูมิผิวของถึงถ่ายน้ำเหล็กและชุดฝาหัวเผา

ตาราง ก.4 อุณหภูมิผิวของถึงถ่ายน้ำเหล็กและชุดฝาของหัวเผา

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิว ของถึงถ่ายน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิผิว ของกันถึงถ่ายน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิผิว ของฝาชุดหัวเผา (องศาเซลเซียส)
1	77.7	38.7	67.8
2	128.5	69.6	117.0
3	146.4	72.7	124.1
4	140.3	73.4	123.4

2. ข้อมูลดิบการอ่านถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

ตาราง ก.5 ข้อมูลดิบจากการอ่านถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
9:20:13	29	49	29	30	30	29	29	29	29	29	30	30	30	30	29	29	105	31
9:21:13	29	49	29	30	30	29	29	29	29	29	30	134	30	30	29	29	146	72
9:22:13	29	49	29	37	30	29	29	29	29	29	30	490	30	30	29	29	170	262
9:23:13	29	49	29	61	30	29	29	29	29	28	30	697	30	30	29	29	202	415
9:24:13	29	49	29	87	30	29	29	29	29	28	30	752	30	30	29	29	214	482
9:25:13	29	49	29	112	33	29	29	29	29	28	30	791	31	30	29	29	245	525
9:26:13	29	49	29	138	36	29	29	29	29	28	30	855	32	30	29	29	278	570
9:27:13	30	49	29	169	41	29	29	29	30	28	30	895	35	30	29	29	302	600
9:28:13	30	49	29	201	47	29	29	29	31	28	30	931	38	30	29	29	321	623
9:29:13	31	49	29	235	53	30	29	29	33	29	30	961	42	30	29	29	336	636
9:30:13	32	48	29	268	61	30	29	29	35	28	30	984	47	30	29	29	357	653
9:31:13	34	49	29	302	70	30	29	29	37	28	30	1009	52	31	29	29	363	656
9:32:13	35	49	29	335	79	31	29	29	40	28	30	1024	58	31	29	29	353	674
9:33:13	38	48	29	368	88	32	29	29	43	28	30	1061	65	32	29	29	352	696
9:34:13	40	48	29	398	98	33	29	29	47	28	30	1036	71	33	29	29	360	704
9:35:13	43	48	29	421	109	34	29	29	51	28	30	1007	78	34	29	29	364	696
9:36:13	46	48	29	436	120	36	29	29	55	28	30	1007	86	35	29	29	367	698
9:37:13	50	48	29	449	131	38	29	29	60	28	30	1016	94	36	29	29	367	701
9:38:13	53	48	29	463	142	40	29	29	64	28	30	1022	101	38	29	29	383	707
9:39:13	57	48	29	476	153	42	29	29	69	28	30	1020	109	40	29	29	390	705

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
9:40:13	61	48	29	489	163	44	29	29	75	28	30	1026	117	42	29	29	412	713
9:41:13	66	48	29	501	172	46	29	29	80	28	30	1037	124	44	29	29	417	722
9:43:13	74	48	29	525	191	52	29	29	91	28	30	1044	139	48	29	29	433	731
9:44:13	79	48	29	536	200	55	29	29	97	28	30	1048	145	50	29	29	447	736
9:45:13	83	48	29	547	208	58	29	29	102	28	30	1051	153	53	29	30	444	741
9:46:13	88	48	29	558	217	61	29	29	107	28	30	1057	159	55	29	30	460	748
9:47:13	93	48	29	569	225	64	29	29	113	28	30	1063	166	58	29	30	457	755
9:48:13	97	48	29	579	234	67	29	29	118	28	30	1070	172	60	29	30	472	761
9:49:13	102	48	29	589	242	70	29	29	123	28	30	1083	179	63	29	30	465	766
9:50:13	106	48	29	600	249	73	29	29	129	28	30	1087	185	66	30	30	478	771
9:51:13	111	48	29	611	257	76	29	29	134	28	30	1094	191	69	30	30	465	773
9:52:13	116	48	29	622	265	80	29	29	139	28	30	1106	197	72	30	30	478	786
9:53:13	120	48	29	633	272	83	29	29	144	28	30	1108	203	75	30	30	473	789
9:54:13	125	48	29	646	279	87	29	29	149	28	30	1102	210	78	30	30	488	776
9:55:13	129	48	29	655	287	90	29	29	154	28	30	1115	215	81	30	30	479	793
9:56:13	134	48	29	667	294	93	29	29	159	28	30	1115	222	84	30	30	496	786
9:57:13	138	48	29	678	301	97	29	29	164	28	30	1111	227	87	30	30	490	785
9:58:13	143	48	29	686	309	100	29	30	169	28	30	1085	233	90	30	30	509	748
9:59:13	148	49	29	690	316	104	29	30	174	29	30	1085	239	93	30	30	502	735
10:00:13	152	49	29	693	323	107	30	30	179	29	30	1088	245	96	30	30	516	737
10:01:13	157	49	30	698	330	111	30	30	185	29	30	1097	251	99	31	30	508	740
10:02:13	161	49	30	703	337	114	30	30	189	30	30	1100	257	102	31	30	488	738
10:03:13	166	49	30	709	343	118	30	30	194	29	30	1101	262	106	31	30	472	730
10:04:13	170	49	30	715	350	121	30	30	199	30	30	1106	268	109	31	30	469	743

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
10:05:13	175	49	30	721	356	125	30	30	204	30	30	1103	273	112	32	30	482	744
10:06:13	179	49	30	728	362	129	30	30	209	30	30	1105	278	115	32	30	485	753
10:08:13	188	50	30	741	374	136	30	30	218	30	30	1112	288	121	32	30	485	758
10:09:13	192	50	30	748	379	139	31	30	223	31	30	1115	293	125	33	30	478	767
10:10:13	196	51	30	753	385	143	31	30	228	31	30	1126	298	128	33	30	473	767
10:11:13	201	51	30	759	391	147	32	30	232	32	30	1129	303	131	33	30	473	785
10:12:13	205	52	30	763	397	150	32	30	237	32	30	1128	308	134	34	30	482	784
10:13:13	209	53	30	768	403	154	33	30	242	33	30	1130	313	137	34	30	478	789
10:14:13	213	53	30	773	408	157	33	30	247	34	30	1133	317	140	34	30	479	785
10:15:13	217	53	31	778	414	161	33	30	251	34	30	1135	322	143	34	30	475	781
10:16:13	221	53	31	783	419	165	34	30	255	34	30	1140	326	146	35	30	491	792
10:17:13	226	53	31	788	424	168	34	30	259	34	30	1138	331	149	35	30	492	777
10:18:13	229	53	31	794	429	172	34	31	264	34	30	1140	335	153	36	30	494	820
10:19:13	234	53	31	796	434	175	34	31	268	34	30	1127	340	156	36	30	489	845
10:20:13	237	53	31	795	439	179	34	31	272	34	29	1122	344	159	36	30	519	848
10:21:13	241	54	31	794	443	182	34	31	276	35	29	1119	348	162	37	30	523	838
10:22:13	245	54	31	793	448	186	34	31	280	35	29	1116	353	165	37	30	533	838
10:23:13	249	55	32	794	453	189	35	31	285	36	29	1124	357	168	38	30	524	836
10:24:13	253	56	32	794	457	192	36	31	289	37	29	1123	361	171	38	30	523	833
10:25:13	257	56	32	795	461	196	36	31	293	37	29	1130	365	174	39	30	506	834
10:26:13	261	57	32	796	466	199	37	31	297	38	29	1118	369	177	39	30	521	839
10:27:13	264	57	32	799	469	203	37	32	301	38	29	1133	373	180	40	30	515	846
10:28:13	268	57	32	801	473	206	37	32	304	39	29	1139	377	183	40	30	519	845
10:29:13	272	58	33	803	477	209	38	32	308	39	29	1135	380	186	41	30	508	850

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
10:30:13	276	58	33	804	480	213	38	32	312	39	29	1138	384	189	42	30	535	850
10:31:13	279	58	33	806	483	216	38	32	315	40	28	1132	388	192	42	30	537	845
10:33:13	286	59	33	808	490	223	39	33	322	40	28	1121	395	198	44	30	546	842
10:34:13	290	60	34	810	493	226	39	33	326	41	28	1124	398	201	44	30	559	844
10:35:13	293	60	34	812	496	229	40	33	329	42	28	1129	402	204	45	31	551	840
10:36:13	297	61	34	814	499	232	40	33	333	43	28	1131	405	207	45	30	563	842
10:37:13	300	61	34	817	503	236	41	34	336	43	28	1143	408	210	46	31	553	844
10:38:13	303	62	35	819	506	239	41	34	339	44	27	1144	412	213	47	31	560	847
10:39:13	307	62	35	821	509	242	42	34	342	44	27	1143	415	215	47	31	547	849
10:40:13	310	63	35	824	512	245	42	34	346	45	27	1136	418	218	48	31	569	853
10:41:13	313	64	35	827	515	248	44	35	349	46	27	1146	421	221	49	31	564	854
10:42:13	316	65	36	829	518	251	44	35	352	46	27	1147	424	224	49	31	598	854
10:43:13	320	65	36	831	521	254	44	35	355	47	26	1143	427	226	50	31	594	858
10:44:13	323	66	36	834	524	257	45	35	358	48	26	1152	430	229	51	31	608	860
10:45:13	326	66	37	835	527	260	45	36	361	49	26	1150	434	232	52	31	596	856
10:46:13	329	67	37	838	530	262	46	36	364	49	26	1152	437	235	52	31	596	857
10:47:13	332	67	37	840	532	265	46	36	367	50	26	1151	440	237	53	31	588	865
10:48:13	335	68	38	842	535	268	47	36	370	50	25	1151	443	240	54	31	618	870
10:49:13	338	69	38	844	538	271	48	36	373	51	25	1159	445	243	55	31	609	870
10:50:13	341	69	38	846	541	274	48	37	376	52	25	1160	448	245	55	31	628	921
10:51:13	344	70	39	848	543	277	49	37	378	52	25	1159	451	248	56	31	614	909
10:52:13	347	71	39	850	547	279	50	38	382	54	24	1154	454	250	57	31	631	900
10:53:13	350	74	39	854	550	282	52	38	385	56	24	1151	457	253	58	31	607	906
10:54:13	353	74	40	857	553	285	52	38	388	56	24	1169	460	256	58	31	607	902

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
10:55:13	356	73	40	858	555	288	52	38	390	56	24	1167	463	258	59	31	596	905
10:56:13	359	74	40	860	558	290	52	39	393	57	23	1171	465	261	60	31	605	872
10:58:13	364	75	41	866	563	296	53	39	398	58	23	1179	471	266	62	31	585	880
10:59:13	367	75	42	868	565	298	53	40	400	59	22	1181	474	268	63	31	568	882
11:00:13	370	77	42	871	568	301	55	40	403	60	22	1172	477	271	63	31	578	882
11:01:13	373	77	42	873	571	303	55	41	406	61	22	1182	479	273	64	32	577	881
11:02:13	376	77	43	875	573	306	55	41	408	61	21	1181	482	275	65	32	595	876
11:03:13	378	78	43	876	576	308	55	41	411	62	21	1177	485	278	66	32	588	872
11:04:13	381	79	44	877	578	311	56	42	414	63	21	1175	487	280	67	32	591	874
11:05:13	384	82	44	880	582	313	59	42	417	65	20	1165	490	283	68	32	584	874
11:06:13	386	83	44	883	585	316	60	43	420	67	20	1180	493	285	69	32	589	880
11:07:13	389	84	45	885	587	318	60	43	423	68	20	1170	495	288	70	32	580	879
11:08:13	392	84	45	887	590	321	61	43	425	68	19	1182	498	290	71	32	585	879
11:09:13	394	86	45	890	593	323	63	44	428	70	19	1176	501	292	71	32	585	886
11:10:13	397	88	46	894	596	326	65	44	431	72	19	1180	503	294	72	32	593	891
11:11:13	400	89	46	898	599	328	66	44	434	73	18	1181	506	297	73	32	583	900
11:12:13	402	88	47	899	600	331	65	45	436	73	18	1187	508	299	74	32	577	895
11:13:13	405	89	47	900	603	333	65	45	438	73	18	1187	511	301	75	32	576	893
11:14:13	407	90	48	902	605	335	66	46	440	74	17	1179	513	304	76	32	590	893
11:15:13	410	90	48	904	608	338	66	46	442	74	17	1195	516	306	77	33	592	890
11:16:13	412	91	49	905	610	340	67	46	445	75	16	1186	518	308	78	33	606	889
11:17:13	415	91	49	906	612	342	67	47	446	75	16	1198	521	311	79	33	621	891
11:18:13	418	91	50	908	614	345	67	47	448	75	16	1200	523	313	79	33	639	894
11:19:13	420	91	50	909	616	347	67	48	451	76	15	1200	526	315	80	33	601	894

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
11:20:13	422	91	51	907	619	349	68	49	453	76	15	914	528	317	81	33	602	742
11:21:13	425	93	51	891	621	352	69	49	457	78		856	530	320	82	33	578	662
11:23:13	430	96	52	850	626	356	71	50	461	32	47	720	535	324	84	33	530	571
11:24:13	432	96	53	831	627	358	71	50	463	31	48	690	537	326	85	33	511	545
11:25:13	435	97	53	813	628	361	73	51	465	31	48	665	540	328	86	33	495	525
11:26:13	437	98	54	796	628	363	73	51	467	32	49	643	541	330	87	33	481	509
11:27:13	439	99	54	781	627	365	74	52	469	84	49	623	543	332	88	33	464	496
11:28:13	441	100	55	767	626	367	74	52	471	85	50	608	544	334	89	33	446	482
11:29:13	443	101	55	753	625	369	75	53	473	86	50	592	545	337	90	34	435	466
11:30:13	445	101	56	740	622	371	76	53	474	86	51	577	545	339	91	34	423	452
11:31:13	447	102	56	728	620	373	77	54	476	87	51	564	545	341	92	34	414	441
11:32:13	448	103	57	717	617	376	77	55	477	88	52	554	545	343	93	34	402	427
11:33:13	449	104	58	706	614	377	78	55	478	89	52	541	545	345	94	34	386	419
11:34:13	450	106	58	696	612	379	80	56	480	91	53	528	545	347	95	34	373	419
11:35:13	451	110	58	688	611	381	84	56	483	95	53	516	544	349	96	34	366	417
11:36:13	452	110	59	679	606	383	83	57	483	95	54	508	544	350	97	34	360	400
11:37:13	453	109	59	669	602	384	83	57	482	94	54	499	543	352	98	34	349	391
11:38:13	453	110	60	660	598	386	83	58	482	95	55	490	542	354	99	34	340	388
11:39:13	454	114	60	654	597	388	87	58	484	99	55	481	541	356	100	35	334	384
11:40:13	454	113	61	645	592	389	87	59	483	98	56	475	541	357	101	35	327	372
11:41:13	454	115	61	638	589	390	89	59	484	100	56	470	541	359	102	35	315	361
11:42:13	454	117	61	632	586	392	91	60	485	103	56	461	541	360	103	35	302	363
11:43:13	454	117	62	624	582	393	91	60	484	102	57	454	541	362	104	35	290	354
11:44:13	454	116	63	617	577	394	89	61	482	101	57	448	539	363	105	35	281	346

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
11:45:13	453	115	64	609	573	395	89	61	481	101	58	441	537	364	106	35	273	338
11:46:13	453	116	64	602	569	396	88	62	480	101	59	434	535	366	107	35	266	330
11:48:13	452	119	65	590	562	397	91	63	479	104	60	421	531	368	109	36	252	324
11:49:13	452	119	66	584	558	398	92	64	478	105	60	414	529	369	110	36	245	323
11:50:13	451	120	66	578	555	399	92	64	478	106	61	409	527	370	111	36	237	325
11:51:13	450	120	67	572	551	399	92	65	476	106	61	405	525	371	112	36	229	314
11:52:13	449	124	67	569	550	400	97	65	477	110	62	401	523	372	113	36	219	310
11:53:13	449	124	68	563	546	400	97	66	476	111	62	396	520	373	114	36	210	304
11:54:13	448	124	69	558	542	401	96	66	474	111	63	390	519	374	115	36	204	302
11:55:13	447	124	69	552	538	401	97	67	472	110	64	386	517	374	116	36	199	294
11:56:13	446	125	70	547	535	401	97	67	471	111	64	380	514	375	117	37	194	290
11:57:13	445	125	70	542	531	402	97	68	469	111	65	375	513	376	118	37	193	291
11:58:13	444	126	71	538	528	402	98	69	468	112	65	370	510	377	119	37	192	290
11:59:13	443	127	71	533	525	402	99	69	467	113	66	366	508	377	120	37	187	290
12:00:13	442	131	72	531	524	402	103	70	468	118	66	362	507	378	121	37	182	287
12:01:13	441	133	72	528	521	402	105	70	467	120	67	357	505	378	122	37	180	288
12:02:13	440	132	73	522	517	402	104	71	465	119	67	356	503	378	123	37	177	274
12:03:13	439	132	73	518	514	402	104	72	463	119	68	352	501	379	124	38	176	275
12:04:13	438	132	74	514	510	402	104	72	461	119	69	347	499	379	125	38	175	274
12:05:13	437	133	75	509	507	402	105	73	460	120	69	343	497	379	126	38	169	271
12:06:13	436	135	75	506	505	402	106	73	459	121	70	341	495	380	127	38	162	263
12:07:13	435	134	76	501	501	402	106	74	457	121	70	339	493	380	127	38	158	260
12:08:13	434	135	76	498	498	401	107	74	456	122	71	335	491	380	128	38	154	256
12:09:13	432	137	77	495	496	401	109	75	455	124	72	331	489	380	129	39	154	255

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
12:10:13	431	138	77	492	494	401	111	75	453	125	72	329	487	380	130	39	150	253
12:11:13	430	139	78	488	491	401	111	76	452	125	73	325	485	380	131	39	149	253
12:13:13	428	139	79	481	485	400	111	77	448	126	74	318	481	380	133	39	141	247
12:14:13	427	141	80	478	483	400	113	78	448	128	74	316	480	380	134	39	138	246
12:15:13	425	143	80	476	481	399	114	78	447	130	75	301	479	380	135	40	136	246
12:16:13	424	146	80	474	480	399	118	79	447	133	75	288	477	380	136	40	136	271
12:17:13	423	147	81	471	478	398	119	79	446	135	75	502	476	380	137	40	136	339
12:18:13	422	147	81	477	475	398	119	80	445	136	76	751	474	380	137	40	138	458
12:19:13	421	147	82	491	472	397	120	80	443	136	76	796	472	380	138	40	152	485
12:20:13	419	145	83	504	468	397	118	81	440	134	77	821	470	380	139	41	174	486
12:21:13	418	145	83	516	466	396	117	81	437	133	78	835	468	380	140	41	206	519
12:22:13	417	146	84	528	465	396	117	82	436	134	78	847	466	379	141	41	258	554
12:23:13	416	150	84	541	466	395	121	82	437	138	79	863	464	379	142	41	276	563
12:24:13	415	151	84	552	466	395	122	83	436	140	79	877	463	378	143	42	277	593
12:25:13	414	150	85	562	466	394	120	83	433	138	80	909	463	379	144	42	293	611
12:26:13	413	149	86	571	466	393	120	84	431	137	81	922	462	378	145	42	297	616
12:27:13	412	150	86	581	467	393	120	84	430	138	81	921	462	378	145	42	309	616
12:28:13	411	153	86	594	471	392	125	85	432	142	81	941	462	377	146	42	326	628
12:29:13	410	152	87	603	471	392	122	85	429	139	82	963	463	377	147	43	330	643
12:30:13	410	151	87	612	472	391	122	86	428	139	83	966	464	377	148	43	340	662
12:31:13	410	155	87	624	477	391	127	86	430	144	83	970	464	377	149	43	360	677
12:32:13	409	153	88	633	478	391	125	87	428	142	84	986	465	377	150	43	356	681
12:33:13	409	153	89	642	480	390	125	87	428	142	85	998	467	376	150	43	353	682
12:34:13	409	154	89	650	482	390	125	88	428	142	85	1006	468	376	151	44	345	703

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
12:35:13	409	153	90	657	484	390	122	89	427	142	86	1019	470	376	152	44	345	714
12:36:13	409	153	90	666	487	389	123	89	427	141	86	1024	471	376	153	44	339	715
12:38:13	410	155	91	683	494	389	126	90	430	144	87	1024	475	376	154	45	326	742
12:39:13	411	158	91	692	499	389	128	90	432	147	88	1034	477	376	155	45	329	753
12:40:13	411	158	92	700	501	389	128	91	433	148	88	1040	479	376	155	45	330	762
12:41:13	412	160	92	709	506	389	131	92	436	151	88	1042	481	376	156	45	347	766
12:42:13	413	163	92	718	511	389	133	92	438	153	89	1044	483	376	157	45	352	768
12:43:13	414	162	93	726	514	390	133	92	438	153	89	1058	485	377	158	45	366	769
12:44:13	415	161	94	733	516	390	131	93	438	151	90	1058	488	377	158	46	369	770
12:45:13	416	163	94	741	521	390	133	93	440	153	90	1058	490	377	159	46	371	772
12:46:13	417	167	93	751	528	391	138	93	444	157	90	1082	492	378	160	46	373	775
12:47:13	419	167	94	761	531	391	138	94	446	158	90	1075	495	378	160	46	378	778
12:48:13	420	166	94	768	533	392	137	94	446	158	91	1078	497	378	161	46	389	778
12:49:13	421	164	95	773	535	392	134	94	445	154	92	1080	500	379	162	47	407	781
12:50:13	423	167	95	780	541	393	137	95	449	157	92	1003	502	380	162	47	391	789
12:51:13	424	167	95	778	544	394	137	95	451	158	92	757	505	380	163	47	370	796
12:52:13	426	166	96	762	547	394	137	96	451	156	93	680	508	381	164	47	349	800
12:53:13	428	168	96	746	552	395	138	96	451	156	93	628	511	382	164	47	334	806
12:54:13	429	168	97	729	555	396	139	97	455	158	94	598	513	383	165	47	319	811
12:55:13	431	166	97	713	556	397	137	97	455	157	94	574	516	383	166	47	301	819
12:56:13	433	169	97	699	560	397	139	97	458	158	95	552	518	384	166	47	287	642
12:57:13	434	170	97	687	562	398	142	98	461	160	95	535	520	385	167	48	275	425
12:58:13	436	168	98	674	561	399	139	98	461	159	96	520	521	386	167	48	265	408
12:59:13	438	170	98	663	561	400	140	99	464	161	96	509	523	387	168	48	252	394

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
13:00:13	439	173	98	654	563	401	143	99	468	164	96	497	524	387	169	48	239	385
13:01:13	441	173	98	645	562	402	145	99	469	165	96	487	524	388	169	48	231	375
13:03:13	443	171	100	626	558	404	143	100	470	163	97	463	525	390	170	49	218	360
13:04:13	444	169	101	616	554	405	141	100	469	162	98	452	525	391	171	49	213	354
13:05:13	445	168	101	607	550	406	139	101	468	161	99	442	525	392	171	49	206	351
13:06:13	446	167	102	598	547	407	139	102	468	160	100	433	525	393	172	49	198	344
13:07:13	446	167	102	591	544	408	138	102	469	160	100	426	524	393	172	50	188	338
13:08:13	447	167	103	584	542	409	138	103	469	161	101	420	524	394	173	50	181	329
13:09:13	447	171	103	579	542	409	142	103	471	163	101	414	523	395	174	50	177	319
13:10:13	447	169	104	572	538	410	141	104	470	163	102	406	522	396	174	50	175	313
13:11:13	447	170	104	565	535	411	140	104	470	162	102	400	521	397	174	51	174	312
13:12:13	447	170	105	559	532	411	140	105	468	161	103	394	520	397	175	51	172	309
13:13:13	447	169	105	554	530	412	141	106	468	161	103	388	519	398	176	51	173	305
13:14:13	447	170	106	548	526	412	142	106	468	162	104	384	518	399	176	51	172	301
13:15:13	447	173	106	544	526	413	144	106	470	165	104	380	516	399	177	51	169	295
13:16:13	446	173	107	539	523	413	143	107	468	165	105	375	515	400	177	52	166	287
13:17:13	446	172	107	533	519	414	141	107	467	164	105	370	514	400	178	52	164	283
13:18:13	445	172	107	527	515	414	141	108	466	164	106	365	512	401	178	52	162	281
13:19:13	445	174	108	524	514	414	145	108	466	166	106	360	511	401	179	52	163	279
13:20:13	445	174	108	519	511	414	144	109	464	165	107	355	509	402	179	53	163	277
13:21:13	444	173	109	518	508	414	145	109	462	164	107	711	509	402	180	53	172	464
13:22:13	443	173	109	528	505	414	144	109	462	164	108	836	507	402	180	53	202	575
13:23:13	442	173	110	543	503	414	144	110	461	165	108	869	505	402	181	53	219	625
13:24:13	442	180	109	561	505	415	150	110	465	172	108	881	503	402	181	53	229	606

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
13:25:13	441	181	109	575	503	415	152	110	465	174	108	887	501	403	182	53	227	641
13:26:13	440	178	110	584	498	415	147	110	460	170	109	908	500	403	182	54	243	666
13:28:13	439	179	110	607	499	414	149	111	458	170	109	944	499	403	184	54	276	700
13:29:13	438	179	111	617	498	414	148	111	457	171	109	952	498	403	184	54	297	714
13:30:13	437	179	111	627	500	414	149	112	457	172	110	967	498	403	185	55	311	716
13:31:13	437	180	111	637	501	414	149	112	456	172	110	968	499	403	185	55	316	728
13:32:13	436	184	111	651	507	413	155	112	459	176	110	974	499	403	186	55	318	734
13:33:13	436	186	111	663	510	413	156	113	458	176	111	980	500	403	187	55	312	750
13:34:13	436	187	111	674	512	413	157	113	459	178	110	1001	501	403	187	55	318	735
13:35:13	436	188	111	685	515	413	159	113	461	181	110	1006	502	403	188	55	328	752
13:36:13	436	183	112	691	514	413	153	113	457	176	111	1027	503	403	188	56	338	774
13:37:13	436	185	112	699	517	413	155	113	458	178	111	1023	505	403	189	56	346	780
13:38:13	436	187	112	708	522	413	157	113	460	180	111	1029	506	403	189	56	359	774
13:39:13	437	189	112	718	526	413	159	114	462	182	111	1033	508	404	190	56	366	777
13:40:13	437	185	113	724	526	413	156	114	460	179	112	841	510	404	190	56	357	800
13:41:13	438	182	114	717	528	413	153	115	459	177	113	660	512	405	191	57	339	568
13:42:13	439	182	114	703	530	413	153	115	458	175	113	603	514	405	191	57	323	508
13:43:13	439	185	114	690	536	413	157	116	461	179	113	568	516	406	192	57	307	461
13:44:13	440	189	114	677	541	414	160	116	465	182	113	543	518	406	192	57	294	433
13:45:13	441	187	115	662	541	414	157	116	464	180	114	522	519	406	193	57	283	409
13:46:13	442	184	115	648	540	415	153	117	463	178	115	505	521	407	194	58	272	397
13:47:13	443	186	116	638	542	415	155	117	466	179	115	488	522	407	194	58	258	381
13:48:13	444	188	115	629	544	415	159	117	468	181	115	477	523	407	195	58	245	370
13:49:13	445	190	116	621	545	416	161	117	469	182	115	464	524	408	195	58	232	362

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
13:50:13	446	188	116	611	543	417	159	118	469	181	116	451	525	408	196	58	226	354
13:51:13	447	192	116	604	544	417	161	118	473	185	116	442	525	409	196	58	221	350
13:53:13	449	196	115	592	544	418	168	118	478	191	116	434	525	410	197	58	203	329
13:54:13	449	193	117	583	539	419	164	118	476	188	116	419	525	411	197	59	194	325
13:55:13	449	195	116	578	539	419	166	118	478	190	116	414	524	411	198	59	190	317
13:56:13	450	194	117	574	535	420	163	118	477	190	117	770	524	411	198	59	203	530
13:57:13	450	194	117	585	534	420	163	119	476	189	117	862	523	411	199	59	232	631
13:58:13	450	195	117	598	531	421	163	119	475	187	117	891	522	412	199	60	247	666
13:59:13	450	196	117	612	530	421	165	119	474	187	118	907	521	412	200	60	253	686
14:00:13	450	194	118	623	528	421	163	120	473	186	118	926	520	413	200	60	256	700

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

ตาราง ก.6 ปริมาณการใช้น้ำมันเตาชนิดเอในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้
น้ำมันเตาชนิดเอในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	อุณหภูมิของน้ำมันเตาเฉลี่ยที่อุ่นได้ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณการใช้น้ำมัน (ลิตร)
1	82.6	216.23
2	89.6	52.93
3	93.3	30.43
4	86.0	33.04

ข้อมูลปริมาณออกซิเจนในไอเสีย

ตาราง ก.7 ปริมาณออกซิเจนในไอเสียของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมัน
เตาชนิดเอในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	% O ₂
1	4.9
2	4.2
3	4.6
4	5.7

ข้อมูลอุณหภูมิผิวของถึงถ่ายน้ำเหล็กและชุดฝาหัวเผา

ตาราง ก.8 อุณหภูมิผิวของถึงถ่ายน้ำเหล็กและชุดฝาของหัวเผา

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิว ของถึงถ่ายน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิผิว ของกันถึงถ่ายน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิผิว ของฝาชุดหัวเผา (องศาเซลเซียส)
1	71.3	33.4	65.6
2	112.4	55.0	116.6
3	123.5	61.6	123.0
4	127.1	63.0	123.0

3. ข้อมูลดิบการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

ตาราง ก.9 ข้อมูลดิบจากการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
12:10:26	40	38	35	52	46	37	37	34	35	33	33	33	105	154	116	78	354	101
12:11:26	40	38	35	54	47	37	37	34	35	33	33	33	146	170	114	120	350	98
12:12:26	41	37	35	55	46	37	37	34	35	33	33	33	170	190	128	112	354	99
12:13:26	41	38	35	60	47	37	37	34	35	33	33	33	202	281	137	166	359	115
12:14:26	41	37	35	78	47	37	37	34	35	33	33	33	214	446	189	143	372	123
12:15:26	41	39	35	104	49	38	38	33	35	33	33	33	245	535	159	192	393	131
12:16:26	41	38	35	129	51	38	38	34	35	33	33	33	278	587	192	164	406	136
12:17:26	41	37	35	153	53	38	38	34	36	34	34	34	302	618	177	193	422	127
12:18:26	42	38	35	179	58	38	38	34	37	34	34	33	321	658	179	189	435	159
12:19:26	43	39	35	205	64	39	38	34	38	34	34	33	336	684	207	171	446	119
12:20:26	44	39	35	228	70	39	38	34	40	34	34	34	357	684	176	204	457	140
12:21:26	45	38	35	250	75	39	38	34	42	34	34	34	363	685	183	196	462	161
12:22:26	47	37	35	270	82	39	38	34	45	34	34	34	353	712	202	183	469	141
12:23:26	49	38	35	291	90	40	38	34	49	34	34	34	352	729	205	184	481	124
12:24:26	51	38	35	311	99	41	38	34	52	34	34	34	360	731	190	198	494	134
12:25:26	54	38	35	329	107	42	38	34	56	35	34	34	364	733	178	206	503	151
12:26:26	57	38	35	346	115	43	38	34	60	35	34	34	367	754	189	196	507	158
12:27:26	60	38	36	363	123	44	38	34	64	36	34	34	367	766	202	185	514	140

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
12:28:26	63	38	36	379	131	46	38	34	68	37	34	34	383	779	205	185	520	122
12:29:26	66	38	36	394	139	48	38	34	73	38	34	34	390	784	193	197	526	127
12:30:26	70	37	36	409	147	49	37	34	78	39	34	34	412	784	179	206	532	143
12:31:26	73	37	36	423	155	51	37	34	83	40	34	34	417	792	189	196	536	154
12:32:26	77	38	36	436	163	53	37	34	88	41	34	34	435	807	204	184	540	135
12:33:26	81	38	36	449	171	55	37	35	93	42	34	34	433	813	204	185	543	114
12:34:26	85	39	36	461	179	58	38	34	98	44	34	34	447	820	185	202	552	133
12:35:26	89	40	36	474	188	60	39	34	103	45	34	34	444	827	181	203	557	160
12:36:26	93	40	36	486	195	63	39	34	108	47	34	34	460	831	198	187	559	140
12:37:26	97	41	36	498	204	65	40	34	113	48	34	34	457	850	206	182	559	120
12:38:26	101	41	36	511	212	68	41	34	118	50	34	34	472	854	193	196	564	105
12:39:26	106	41	36	523	219	70	40	34	124	52	34	34	465	849	180	205	569	118
12:40:26	110	40	36	534	226	73	40	34	129	54	34	34	478	859	189	197	572	132
12:41:26	114	39	36	545	232	76	39	34	134	56	34	34	465	874	202	187	575	125
12:42:26	119	39	36	556	239	78	39	35	139	58	34	34	478	883	206	184	580	119
12:43:26	123	39	36	567	247	81	39	34	145	60	34	34	473	891	197	194	585	112
12:44:26	127	40	36	577	254	84	39	34	150	62	34	34	488	890	186	202	590	125
12:45:26	132	41	36	588	262	87	40	34	155	64	34	34	479	892	181	205	598	143
12:46:26	136	40	36	597	268	90	40	35	161	67	34	34	496	899	193	195	601	145
12:47:26	141	40	36	606	275	93	40	35	166	69	34	34	490	909	202	188	605	140
12:48:26	145	40	36	615	282	96	40	35	171	71	34	34	509	919	207	185	610	131
12:49:26	149	41	36	624	289	99	40	35	176	74	34	34	502	910	202	191	615	123
12:50:26	154	41	36	631	296	103	41	35	181	76	34	34	516	910	189	201	621	133
12:51:26	158	41	36	638	303	106	40	35	187	78	34	34	508	925	185	204	622	143

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
12:52:26	163	41	36	646	309	109	41	35	192	81	34	34	488	930	184	204	626	154
12:53:26	167	41	37	655	315	112	41	35	197	83	34	34	472	942	190	199	631	160
12:54:26	171	42	37	664	322	116	41	35	202	86	34	34	469	948	198	192	636	154
12:55:26	176	42	37	672	328	119	42	35	207	88	34	34	482	956	202	188	641	149
12:56:26	180	43	37	681	335	122	42	35	212	91	34	34	485	964	206	186	646	144
12:57:26	184	43	37	689	341	125	42	35	217	94	34	34	475	966	206	187	648	139
12:58:26	189	42	37	697	347	129	42	35	222	96	34	34	485	970	205	188	650	135
12:59:26	193	43	37	704	353	132	42	35	226	99	34	34	478	967	204	192	652	129
13:00:26	197	43	37	710	359	135	43	36	231	102	34	34	473	979	202	193	655	129
13:01:26	202	43	37	717	365	139	42	35	236	104	34	34	473	985	200	195	660	133
13:02:26	206	45	37	725	371	142	44	35	241	107	34	34	482	988	197	197	662	134
13:03:26	210	45	37	731	377	145	44	36	246	109	34	34	478	979	196	199	664	135
13:04:26	215	44	38	735	383	149	44	36	251	112	34	34	479	979	194	200	668	137
13:05:26	219	44	38	740	388	152	43	36	255	115	34	34	475	988	194	201	669	138
13:06:26	223	45	38	746	394	155	44	36	260	118	34	34	491	994	191	203	671	140
13:07:26	227	45	38	752	400	159	44	36	265	120	34	34	492	1005	191	203	676	143
13:08:26	232	46	38	759	405	162	45	36	269	123	35	34	494	1010	189	206	678	145
13:09:26	236	47	38	766	411	165	45	36	274	126	35	34	489	1011	188	209	681	152
13:10:26	240	47	38	773	416	169	45	36	279	129	36	34	519	1015	188	211	682	153
13:11:26	244	46	38	779	421	172	45	36	283	132	36	35	523	1020	188	215	687	155
13:12:26	248	47	38	785	426	175	45	36	288	134	36	35	533	1026	187	219	690	158
13:13:26	252	48	39	792	431	179	46	36	292	137	37	35	524	1029	187	222	689	160
13:14:26	257	48	39	798	436	182	46	37	297	140	37	35	523	1034	186	224	694	164
13:15:26	261	49	39	802	442	186	47	37	301	143	37	35	506	1028	187	226	698	173

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
13:16:26	265	49	39	801	447	189	47	37	306	145	38	35	521	916	178	211	684	145
13:17:26	269	49	39	795	452	192	47	37	310	148	38	35	515	1006	191	204	686	165
13:18:26	273	50	40	800	457	195	48	38	315	151	39	35	519	1026	192	216	694	173
13:19:26	277	50	40	807	462	199	49	38	319	154	39	35	508	1037	194	222	703	178
13:20:26	281	52	40	810	467	202	49	38	323	157	39	35	535	906	174	218	692	155
13:21:26	285	54	40	803	471	206	50	38	327	159	40	35	537	1004	197	199	687	156
13:22:26	289	53	40	808	475	209	50	38	332	162	40	35	555	1029	198	214	698	166
13:23:26	293	54	41	814	480	212	51	38	336	165	41	35	546	1025	199	220	699	173
13:24:26	296	54	41	816	483	215	51	38	340	168	41	35	559	894	171	226	686	163
13:25:26	300	55	41	807	487	219	52	39	344	171	42	35	551	987	201	196	683	154
13:26:26	304	55	41	811	491	222	52	39	347	174	42	35	563	1026	203	213	695	163
13:27:26	308	57	41	817	495	225	54	39	351	176	43	35	553	914	173	225	693	168
13:28:26	311	59	42	810	499	229	55	39	355	179	43	35	560	990	205	192	687	149
13:29:26	315	59	42	815	502	232	55	39	359	182	44	35	547	1029	205	211	698	158
13:30:26	318	58	42	821	505	235	55	40	362	185	44	35	569	923	169	233	697	168
13:31:26	322	59	42	813	508	238	55	40	366	188	45	35	564	985	207	189	688	134
13:32:26	325	58	43	815	510	241	54	40	369	190	45	35	598	1032	208	209	701	140
13:33:26	328	59	43	823	514	244	55	40	373	193	46	35	594	939	173	234	703	159
13:34:26	331	60	43	815	516	247	55	41	376	196	46	35	608	984	208	190	691	128
13:35:26	335	62	43	819	519	250	57	41	380	199	47	35	596	1033	208	209	701	143
13:36:26	338	61	44	826	522	254	57	41	383	201	48	35	596	950	175	234	706	171
13:37:26	341	62	44	817	525	257	57	41	386	204	49	35	588	931	189	203	690	139
13:38:26	344	63	44	816	528	259	58	42	389	206	49	35	618	1017	193	218	695	153
13:39:26	347	63	45	824	530	263	58	42	392	209	49	35	609	978	182	234	706	176

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
13:40:26	350	63	45	820	532	265	58	42	395	212	50	35	628	953	196	202	692	138
13:41:26	353	64	45	821	535	268	59	42	398	214	51	35	614	1028	197	218	701	151
13:42:26	356	65	46	829	537	271	60	43	401	217	52	35	631	972	179	236	711	179
13:43:26	358	66	46	824	540	274	61	43	403	219	52	35	607	969	199	199	697	137
13:44:26	361	68	46	826	542	277	62	43	406	222	53	35	607	1038	202	216	706	147
13:45:26	364	71	47	835	545	279	63	43	409	225	53	35	596	961	179	234	711	177
13:46:26	367	69	47	828	547	282	63	44	412	227	54	35	605	987	206	194	698	139
13:47:26	370	70	48	831	549	285	63	44	415	230	55	35	586	1039	207	212	710	156
13:48:26	372	70	48	838	552	288	64	45	417	232	55	36	585	944	177	233	713	177
13:49:26	375	70	49	832	554	290	65	45	420	235	56	36	568	998	207	194	703	158
13:50:26	377	71	49	837	556	293	65	46	422	237	57	36	578	1049	208	208	712	166
13:51:26	380	71	49	844	558	296	66	46	425	240	58	36	577	949	174	233	713	182
13:52:26	383	73	50	839	561	298	67	46	427	242	58	35	595	1005	208	191	703	153
13:53:26	385	74	50	843	563	301	68	46	430	244	59	35	588	1053	208	212	715	167
13:54:26	388	75	50	850	565	303	68	47	432	247	60	36	591	935	176	230	715	174
13:55:26	390	75	51	843	567	306	68	47	435	249	60	36	584	1015	203	199	710	164
13:56:26	392	75	51	849	569	308	69	47	438	252	61	36	589	1059	206	215	720	172
13:57:26	395	79	51	856	573	311	71	48	440	254	62	36	580	930	174	230	713	180
13:58:26	397	80	52	844	575	313	72	48	442	256	63	36	585	836	165	211	695	174
13:59:26	400	79	52	825	576	315	71	49	445	259	64	36	585	857	179	191	682	148
14:00:26	402	80	53	821	578	318	72	49	447	261	64	36	593	996	188	214	694	176
14:01:26	404	82	53	830	580	320	72	49	449	263	65	36	583	997	187	233	708	177
14:02:26	407	81	54	830	581	322	72	50	452	265	66	36	577	945	192	207	697	141
14:03:26	409	85	54	833	582	325	73	50	454	267	67	36	576	1024	191	223	705	153

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
14:04:26	411	88	54	844	584	327	75	50	456	270	67	36	590	988	184	238	712	174
14:05:26	413	87	55	841	585	330	76	51	458	272	68	36	592	964	197	206	699	134
14:06:26	415	85	55	843	586	332	76	51	460	274	69	37	606	1029	197	221	709	149
14:07:26	418	86	55	853	588	334	77	52	462	276	70	36	621	968	181	237	716	175
14:08:26	419	89	56	849	590	336	78	52	464	278	71	36	639	995	207	197	706	144
14:09:26	422	92	56	853	592	338	80	52	466	281	72	36	601	1046	208	214	717	161
14:10:26	424	91	57	860	594	341	79	53	468	283	72	37	602	942	178	233	718	170
14:11:26	426	91	57	851	596	343	81	53	470	285	73	37	578	847	177	208	702	160
14:12:53	428	91	58	827	598	346	82	54	472	288	74	37	553	762	166	192	680	157
14:13:28	430	91	58	816	599	347	82	55	474	289	75	37	530	742	163	188	673	155
14:14:28	431	92	58	800	601	349	83	55	476	291	76	37	511	713	159	183	663	153
14:15:28	434	93	59	784	602	351	83	55	477	293	77	37	495	691	156	180	656	151
14:16:28	435	93	60	769	602	353	84	56	479	295	78	37	481	673	154	178	649	151
14:17:28	437	96	60	755	602	355	84	56	481	297	78	37	464	655	152	176	642	151
14:18:28	439	101	60	745	603	357	89	57	482	299	79	37	446	641	150	174	636	149
14:19:28	441	101	61	733	602	359	89	57	483	301	80	37	435	627	149	173	631	151
14:20:28	442	98	62	720	599	361	88	58	484	303	81	38	423	615	148	171	626	150
14:21:28	444	99	62	710	597	363	88	58	485	304	82	37	414	604	147	170	623	150
14:22:28	445	101	63	699	595	365	89	58	485	306	83	37	402	593	146	169	619	148
14:23:28	446	103	63	689	592	367	89	59	486	308	83	37	386	582	145	168	615	145
14:24:28	447	102	64	680	590	369	90	59	486	310	85	38	373	572	144	167	612	135
14:25:28	448	101	65	671	586	370	90	60	486	312	86	38	366	564	143	166	609	137
14:26:28	448	102	65	663	584	372	91	60	486	314	86	38	360	556	142	165	605	142
14:27:28	449	102	66	655	580	373	91	61	486	315	87	38	349	549	141	164	602	146

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
14:28:28	449	102	66	647	577	375	90	59	484	316	87	37	340	542	141	163	599	147
14:29:28	450	102	67	639	574	377	90	59	484	317	88	36	334	535	140	161	597	144
14:30:28	450	105	67	632	572	378	94	61	484	320	90	38	327	527	138	160	594	143
14:31:28	450	106	67	626	568	379	94	62	483	322	91	38	315	519	137	159	591	143
14:32:28	450	108	68	619	565	380	94	62	483	323	92	38	302	512	137	158	588	143
14:33:28	450	108	69	613	561	381	94	63	482	324	93	38	290	506	136	157	585	141
14:34:28	449	109	69	607	559	382	96	64	481	326	94	38	281	501	135	156	583	144
14:35:28	449	110	70	601	556	383	97	64	480	327	95	38	273	495	135	156	580	145
14:36:28	449	111	70	595	553	384	97	65	479	328	95	39	266	488	134	155	578	145
14:37:28	448	111	71	590	550	385	98	65	478	330	96	39	258	483	133	154	575	146
14:38:28	448	111	71	584	547	386	99	66	477	331	97	39	252	479	133	153	573	146
14:39:28	447	112	72	579	544	386	101	67	476	332	98	39	245	475	132	153	571	145
14:40:28	447	111	73	574	540	387	100	68	475	333	99	40	237	470	131	152	569	145
14:41:28	446	112	73	568	537	387	101	69	474	334	100	40	229	466	131	151	566	147
14:42:28	445	114	73	564	534	388	101	69	473	335	101	40	219	462	130	150	564	146
14:43:28	444	116	74	560	532	389	102	69	471	336	102	40	210	457	130	150	562	146
14:44:28	444	118	74	555	529	389	103	69	470	336	102	40	204	453	129	149	560	145
14:45:28	443	120	75	551	526	390	103	70	469	337	104	40	199	448	128	148	558	147
14:46:28	442	120	75	547	523	390	104	70	467	338	105	40	194	444	128	147	556	146
14:47:28	441	119	76	543	521	390	106	71	466	339	105	40	193	440	127	146	554	146
14:48:28	440	120	76	539	518	390	108	71	465	340	107	40	192	437	126	146	552	147
14:49:28	439	120	77	534	515	391	108	72	463	340	108	41	187	435	126	145	550	148
14:50:28	438	120	78	530	512	391	108	73	462	341	108	41	182	432	125	144	548	149
14:51:28	438	120	79	526	509	391	108	74	461	342	109	41	180	429	125	143	547	148

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
14:52:28	437	119	79	522	506	391	108	74	459	342	110	41	177	425	124	143	545	147
14:53:28	436	123	79	519	504	391	109	74	458	343	111	41	176	421	124	142	543	146
14:54:28	434	124	80	515	501	391	109	75	456	343	112	41	175	418	123	141	541	144
14:55:28	433	126	80	511	498	391	110	76	455	343	113	41	169	414	122	141	539	143
14:56:28	432	127	81	508	495	391	110	77	454	344	114	41	162	410	122	140	538	142
14:57:28	431	127	82	504	492	391	110	77	452	344	115	42	158	407	121	139	536	141
14:58:28	430	129	82	501	490	391	110	78	451	344	116	42	154	405	121	138	534	139
14:59:28	429	131	82	499	488	391	112	78	449	345	116	42	154	401	120	138	533	139
15:00:28	428	134	83	496	486	390	114	79	448	345	117	42	150	398	120	137	531	140
15:01:28	427	136	83	495	486	390	118	79	447	345	118	42	149	395	119	136	529	142
15:02:28	426	137	83	494	486	390	121	79	445	345	119	42	146	393	118	135	527	144
15:03:28	425	137	84	492	484	390	123	80	444	345	120	42	141	391	118	135	525	145
15:04:28	424	138	84	489	482	390	123	80	442	345	120	42	138	389	117	134	523	144
15:05:28	423	140	84	486	480	389	125	80	441	346	121	42	136	386	117	133	521	144
15:06:28	422	137	86	481	475	389	122	81	440	346	123	42	135	384	116	132	520	143
15:07:28	421	136	86	477	471	389	120	82	438	346	123	42	133	382	115	132	518	141
15:08:28	419	135	87	474	469	388	120	82	437	346	124	43	136	380	115	131	517	142
15:09:28	418	134	88	470	466	388	121	83	436	346	125	43	136	378	114	131	516	143
15:10:28	417	135	88	467	463	387	120	84	434	346	126	43	138	408	132	128	516	129
15:11:28	416	140	88	475	462	387	122	83	432	346	126	43	152	666	202	121	529	123
15:12:24	415	142	89	497	462	387	124	84	432	346	127	43	174	757	156	209	544	165
15:13:24	414	140	89	523	460	386	124	85	430	346	128	44	206	830	196	197	558	168
15:14:24	413	140	90	548	457	386	122	86	429	346	129	44	258	857	192	214	573	180
15:15:24	412	140	91	573	456	385	122	86	428	346	130	44	276	873	189	222	586	180

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
15:16:24	411	141	91	596	458	385	125	87	427	346	131	44	277	889	187	224	598	169
15:17:24	410	144	91	618	460	384	127	88	427	346	131	44	293	906	187	224	609	165
15:18:24	409	144	92	638	464	384	129	88	426	346	132	45	297	920	188	222	618	162
15:19:24	408	145	92	657	467	384	129	89	427	346	133	45	309	934	187	222	626	158
15:20:24	408	145	93	674	470	383	130	90	427	345	134	45	326	941	186	222	634	157
15:21:24	408	146	93	691	474	383	130	90	428	345	135	45	330	958	188	222	642	158
15:22:24	408	147	94	706	477	382	129	91	429	345	135	45	340	966	188	222	648	158
15:23:24	408	146	94	720	483	382	130	91	430	345	136	45	360	975	189	224	655	162
15:24:24	409	148	95	735	489	382	132	91	431	345	137	46	356	988	191	224	662	165
15:25:24	410	148	95	749	495	382	134	92	433	345	138	46	353	999	193	224	670	167
15:26:24	411	150	96	761	501	382	135	92	435	345	138	46	345	1008	195	221	675	165
15:27:24	412	150	96	773	506	382	135	93	437	345	139	46	345	1025	199	218	685	162
15:28:24	413	149	97	784	511	382	135	93	440	345	140	46	339	1032	203	213	704	161
15:29:24	414	148	97	792	516	382	135	94	442	345	140	46	336	911	170	225	707	168
15:30:24	416	148	98	781	522	382	136	94	445	345	141	47	326	803	162	206	684	165
15:31:24	418	151	98	764	527	383	136	95	447	346	142	46	329	810	177	185	665	141
15:32:24	420	152	99	758	532	383	136	95	450	345	142	47	330	935	188	204	681	171
15:33:24	422	151	99	763	536	384	136	95	453	346	143	47	347	966	189	223	710	182
15:34:24	424	152	100	770	541	385	137	96	455	346	144	47	352	989	189	232	730	188
15:35:24	426	153	100	774	545	385	138	96	458	347	144	47	366	879	182	215	719	157
15:36:24	428	154	100	772	547	386	137	97	461	347	145	47	369	962	188	213	717	172
15:37:24	430	154	101	779	550	387	137	98	463	348	146	48	371	984	188	226	725	183
15:38:24	432	154	101	788	554	388	139	98	465	348	146	48	373	999	189	234	733	189
15:39:24	434	157	102	790	555	389	137	98	468	349	147	48	378	849	166	228	718	178

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
15:40:24	436	157	102	779	558	390	137	99	470	350	147	48	389	771	159	208	697	173
15:41:24	438	157	103	763	560	392	136	99	472	350	148	48	407	726	156	195	679	168
15:42:24	440	158	103	752	564	393	137	100	475	351	149	48	397	858	209	166	677	144
15:43:24	442	160	103	757	566	394	137	100	477	352	149	48	378	947	208	204	700	163
15:44:24	444	160	104	766	568	395	138	101	479	353	150	48	381	896	183	227	710	177
15:45:24	446	158	105	763	568	396	136	102	481	353	150	48	385	780	171	208	693	171
15:46:24	448	159	104	752	570	397	139	102	483	354	151	49	387	724	164	194	675	161
15:47:24	450	161	105	745	573	398	141	102	485	355	151	49	390	883	202	183	681	155
15:48:24	451	163	105	755	576	400	145	103	487	356	152	49	391	956	199	218	710	173
15:49:24	453	163	105	765	578	401	146	103	488	357	153	49	370	845	176	226	719	169
15:50:24	455	163	106	758	578	402	145	104	490	358	153	49	349	748	166	207	699	161
15:51:24	456	163	106	744	578	403	143	104	491	359	154	49	334	688	160	193	681	158
15:52:24	458	163	107	730	577	404	142	104	493	360	154	49	319	653	156	185	668	155
15:53:24	459	162	107	718	579	406	144	105	494	361	155	50	301	629	153	180	657	151
15:54:24	460	162	108	706	580	407	144	105	495	362	155	50	287	610	151	176	648	150
15:55:24	462	164	108	694	580	408	144	106	496	363	156	50	275	594	149	173	641	148
15:56:24	463	164	109	683	578	409	143	106	498	364	156	50	265	580	147	171	635	145
15:57:24	464	165	109	674	577	410	144	107	498	365	157	50	252	569	146	170	629	147
15:58:24	465	167	109	666	578	411	146	107	499	365	157	50	239	558	145	168	624	149
15:59:24	466	168	110	658	577	412	147	107	500	367	158	50	231	548	144	167	619	149
16:00:24	467	169	110	650	576	413	148	107	500	368	158	50	226	540	143	166	615	148
16:01:24	468	167	112	642	574	414	149	107	500	369	159	50	218	534	142	165	612	147
16:02:24	468	167	112	636	573	415	151	107	500	370	160	50	213	528	141	163	608	150
16:03:24	469	167	112	628	570	416	151	108	501	371	160	51	206	521	140	162	605	148

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
16:04:24	469	166	113	621	568	417	150	108	500	371	161	51	198	515	139	161	602	147
16:06:24	470	168	114	610	564	419	154	108	499	373	162	51	188	504	138	159	596	148
16:07:24	470	168	114	603	561	420	154	109	499	374	162	51	181	498	137	158	593	146
16:08:24	470	168	114	597	558	420	154	109	499	375	163	51	177	492	136	157	590	144
16:09:24	470	169	114	592	556	421	154	110	498	376	164	52	175	486	135	156	587	144
16:10:24	470	170	114	587	554	421	155	110	497	377	164	52	174	481	135	156	585	145
16:11:24	469	170	115	582	552	422	156	110	496	377	165	52	172	476	134	155	582	145
16:12:24	469	170	115	577	549	422	156	111	496	378	165	52	173	471	133	154	580	144
16:13:24	469	169	115	572	546	423	155	112	495	378	166	53	172	467	132	153	577	141
16:14:24	468	169	115	567	543	423	155	112	494	379	166	53	169	462	132	152	575	137
16:15:24	468	169	116	562	540	424	155	113	493	380	167	53	166	457	131	151	573	135
16:16:24	467	169	116	558	537	424	155	113	492	380	167	53	164	454	130	150	571	134
16:17:24	466	170	117	554	534	424	155	113	491	381	168	53	162	450	130	149	569	133
16:18:24	466	170	117	549	532	424	155	114	490	381	168	54	163	445	129	149	566	132
16:19:24	465	171	117	545	529	424	156	114	489	381	169	53	163	441	128	148	564	134
16:20:24	464	171	117	542	528	425	158	114	487	382	169	54	172	509	163	140	565	112
16:21:24	463	174	117	549	524	425	157	115	487	382	170	54	202	718	188	172	582	150
16:22:24	463	175	118	569	521	425	156	115	485	383	170	54	219	815	209	188	598	127
16:23:24	462	176	118	594	520	425	157	116	484	383	171	54	229	860	205	202	612	121
16:24:24	461	176	118	617	517	425	157	116	483	383	172	54	227	881	205	205	626	117
16:25:24	460	176	119	637	517	425	158	116	482	383	172	55	243	899	205	205	644	121
16:26:24	459	177	119	655	516	425	157	117	481	384	173	55	254	915	204	207	658	124
16:27:24	458	177	119	672	516	424	156	117	480	384	173	55	276	925	203	206	666	125
16:28:24	458	176	120	687	516	424	154	118	480	384	174	55	297	938	203	206	673	126

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
16:29:24	457	176	120	702	519	424	153	118	480	384	174	55	311	949	202	208	679	126
16:30:24	457	177	121	717	522	424	155	119	481	384	175	55	316	962	202	210	682	128
16:31:24	456	175	121	732	527	424	158	119	481	384	176	56	318	970	200	213	688	135
16:32:24	457	176	121	743	530	424	157	120	482	385	176	56	312	984	198	215	695	138
16:33:24	457	179	122	754	532	423	156	120	483	385	177	56	318	992	195	218	698	139
16:34:24	457	179	122	766	537	424	156	120	484	385	177	56	328	1001	192	223	702	145
16:35:24	458	179	123	777	541	424	157	121	486	385	178	56	338	976	176	233	706	170
16:36:24	458	178	123	778	547	424	160	121	487	385	178	57	346	829	162	216	689	164
16:37:24	459	180	123	766	552	424	161	122	489	385	179	57	359	758	157	199	672	162
16:38:24	461	179	124	750	556	424	162	122	491	385	179	57	366	776	172	181	660	139
16:39:24	462	180	124	745	558	425	159	122	493	386	180	57	357	924	188	202	673	168
16:40:24	463	183	124	755	561	425	159	122	495	386	180	57	339	985	191	224	689	177
16:41:24	465	183	124	768	565	425	163	123	497	386	181	57	323	890	210	196	686	134
16:42:24	466	182	125	765	569	426	164	123	499	387	181	58	287	774	193	183	670	133
16:43:24	468	183	125	753	572	426	165	123	500	387	182	58	226	714	178	177	655	133
16:44:24	469	183	125	739	575	427	168	124	502	388	182	58	221	678	168	173	644	134
16:45:24	470	183	126	726	577	428	167	124	504	388	183	58	213	652	161	171	635	135
16:46:24	472	185	126	713	579	428	167	124	505	389	184	58	203	631	157	168	628	134
16:47:25	474	186	126	699	578	429	165	125	507	389	184	58	194	614	154	167	621	134
16:48:25	475	186	127	689	579	430	166	125	508	389	184	58	190	600	151	165	616	132
16:49:25	476	188	127	679	578	431	167	126	509	390	185	58	203	587	149	164	611	131
16:50:25	478	188	127	668	577	432	165	126	510	391	186	58	232	576	148	163	607	130
16:51:25	479	186	128	660	577	432	166	126	511	391	186	59	247	566	146	162	603	128
16:52:25	479	185	128	652	576	433	166	127	512	392	187	59	253	558	145	160	599	128

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่าง ๆ (องศาเซลเซียส)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	4B	4C	4D	4E	5A	Furnace	Exhaust 1	Exhaust 2	Regen Upper	Regen Lower
16:53:25	480	185	128	645	575	434	168	127	512	393	187	59	256	549	144	159	596	127
16:54:25	481	186	129	636	572	435	167	127	512	393	187	59	267	541	143	158	593	127
16:55:25	482	186	129	627	569	435	164	128	512	394	188	60	271	533	142	158	589	127
16:56:25	482	186	129	620	566	436	162	128	512	395	188	60	288	526	141	156	586	125
16:57:25	483	187	129	614	563	437	162	128	512	395	189	59	294	567	163	151	585	107
16:58:25	483	189	130	618	562	438	164	129	517	396	189	60	296	767	190	175	605	138
16:59:25	483	191	130	641	562	438	167	129	516	397	190	60	304	860	209	191	628	126
17:00:25	483	192	130	662	561	439	169	129	517	398	190	60	350	895	207	202	650	135
17:01:25	483	192	130	683	559	439	169	130	516	399	191	60	374	915	206	205	664	137
17:02:25	483	191	131	702	560	440	171	130	515	399	191	61	387	933	208	204	676	134
17:03:25	483	190	131	720	560	440	173	130	513	400	192	61	394	950	207	205	689	135
17:04:25	483	190	131	735	561	441	173	130	512	400	192	61	402	961	207	206	698	139
17:05:25	483	190	132	749	562	441	174	131	512	401	193	61	386	975	207	207	708	140
17:06:25	483	189	132	762	564	441	175	131	512	401	193	62	371	984	207	209	715	140
17:07:25	483	189	132	774	567	441	175	131	513	401	194	62	372	995	206	209	721	139
17:08:25	483	190	133	785	570	442	175	131	514	402	194	62	351	1003	206	210	729	139
17:09:25	483	193	133	795	573	442	176	132	515	402	195	62	329	948	175	225	730	155
17:10:25	484	193	133	796	577	442	177	132	516	402	195	62	309	939	207	181	714	116

ศูนย์วทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

ตาราง ก.10 ปริมาณการใช้น้ำมันเตาชนิดเอในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบปริเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	อุณหภูมิของน้ำมันเตาเฉลี่ยที่อุ่นได้ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณการใช้น้ำมัน (ลิตร)
1	112.8	154.5
2	105.5	45.0
3	109.3	27.5
4	103.3	19.0

ข้อมูลปริมาณออกซิเจนในไอเสีย

ตาราง ก.11 ปริมาณออกซิเจนในไอเสียของการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบปริเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	% O ₂
1	8.9
2	9.3
3	8.9
4	8.3

ข้อมูลอุณหภูมิผิวของถังถ่ายน้ำเหล็กและชุดฝาหัวเผา

ตาราง ก.12 อุณหภูมิผิวของถังถ่ายน้ำเหล็กและชุดฝาของหัวเผา

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิว ของถังถ่ายน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิผิว ของถังถ่ายน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิผิว ของฝาชุดหัวเผา (องศาเซลเซียส)
1	108.6	40.7	64.0
2	121.7	50.7	103.0
3	127.7	54.5	127.0
4	136.2	58.7	143.0

ข้อมูลอุณหภูมิผิวของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟและชุดท่อ

ตาราง ก.13 อุณหภูมิผิวของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟและชุดท่อ

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิว ของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิผิว ของชุดท่อ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิผิว ของฝาชุดหัวเผา (องศาเซลเซียส)
1	104.5	66.0	64.0
2	112.5	60.0	103.0
3	112.0	66.0	127.0
4	112.0	64.0	143.0



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข (Appendix B)

ตัวอย่างการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.1 ตัวอย่างการคำนวณการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซล

การคำนวณสมมูลมวล

1. มวลของเชื้อเพลิง (m_{fuel})

มวลของเชื้อเพลิงจะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมดซึ่งจะคำนวณได้ดังสมการ

$$m_{fuel} = \rho_{fuel} V_{fuel}$$

ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลมีค่าเท่ากับ 0.87 kg/litre และจากปริมาณการใช้ น้ำมันในตาราง ก.2 เราสามารถคำนวณมวลของเชื้อเพลิงในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กได้ ดังนี้

ตาราง ข. 1 มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ปริมาณการใช้ น้ำมัน (ลิตร)	มวลของเชื้อเพลิง (kg)
1	260.7	226.0
2	76.84	64.3
3	49.28	38.4
4	52.46	45.1

2. มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($m_{air,comb}$)

มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของ ปริมาณออกซิเจนภายในไอเสีย จากนั้นนำปริมาณออกซิเจนที่เก็บได้คำนวณหาอัตราส่วน อากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (AF_{actual}) ซึ่งค่า $AF_{stoic} = 14.29 \text{ kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$

จากสมการ 3.39 สามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศ (λ) ได้จากเปอร์เซ็นต์ ออกซิเจนที่ได้จากการวัดองค์ประกอบไอเสียซึ่งแสดงในตาราง ก.3 ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนอากาศ ต่อก๊าซเชื้อเพลิงจริงมาคำนวณมวลของอากาศในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{10.3025 - 3.1025 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}{10.3025 - 49.0399 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}$$

รอบการอุ่น	% O ₂	λ	AF_{actual}
1	7.3	1.499	21.44
2	7.3	1.499	21.44
3	7.8	1.553	22.22
4	7.2	1.488	21.29

จากค่าอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง เราสามารถคำนวณมวลของอากาศได้จากสมการ

$$m_{air,comb} = AF_{actual} \times m_{fuel}$$

ตาราง ข. 2 มวลของอากาศที่ใช้ในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	มวลของเชื้อเพลิง (kg)	มวลของอากาศ (kg)
1	226.0	4863.0
2	64.3	1379.0
3	38.4	852.0
4	45.1	959.5

3. มวลของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายน้ำเหล็ก ($m_{flue,ladle}$)

จากสมการสมดุลมวล สมการที่ 3.10 เราสามารถหาค่ามวลของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$m_{flue,ladle} = m_{fuel} + m_{air,comb}$$

ดังนั้นมวลของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายน้ำเหล็กจะถูกแสดงไว้ในตาราง ข.3

ตาราง ข. 3 มวลของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	มวลของเชื้อเพลิง (kg)	มวลของอากาศ (kg)	มวลของไอเสีย (kg)
1	226.0	4863.0	5089.0
2	64.3	1379.0	1443.3
3	38.4	852.0	890.3
4	45.1	959.5	1004.6

ข.2 การคำนวณสมดุลพลังงานการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติใช้น้ำมันดีเซล

จากสมการที่ 3.15 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

$$Q + \sum m_i e_i - \sum m_e e_e = \Delta E_{CV}$$

เราสามารถคำนวณค่าความร้อนต่างๆในสมดุลพลังงานได้ดังนี้

พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ถังถ่ายน้ำเหล็ก

1. ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

$$Q_{fuel} = V_{fuel} \times LHV$$

โดย LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของน้ำมันดีเซลมีค่าเท่ากับ 36.42 MJ/litre และเมื่อนำปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้ในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบจากตาราง ก.2 มาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ตามตาราง ข.4 ดังนี้

ตาราง ข. 4 ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในแต่ละรอบการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก

รอบการอุ่น	ปริมาณการใช้น้ำมัน (ลิตร)	ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (MJ)
1	260.7	9494.69
2	73.94	2692.89
3	44.08	1605.39
4	51.8	1886.56

การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม

1. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังถึงถ้ำน้ำเหล็ก ($Q_{surface,ladle}$)

$$Q_{surface,ladle} = h_m A_{surface} (T_{surface} - T_{amb}) + \varepsilon_{surface} \sigma A_{surface} (T_{surface}^4 - T_{amb}^4)$$

เมื่อพื้นที่ผิวของถ้ำน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 9.28 ตารางเมตรและ $T_{surface}$ คือ อุณหภูมิที่ผิวถ้ำน้ำเหล็กด้านนอกที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละรอบการอุ่นถ้ำน้ำเหล็ก ดังแสดงไว้ในตาราง ก.4

เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยด้วยสมการ 3.3 และค่าความร้อนสูญเสียผ่านผนังถึงถ้ำน้ำเหล็กตามสมการ 3.17 แล้ว ซึ่งจะแสดงไว้ในตาราง ข.5

ตาราง ข. 5 ความร้อนสูญเสียผ่านผนังของถ้ำน้ำเหล็กจากการอุ่นถ้ำน้ำเหล็กด้วย หัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันดีเซลในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิวของถ้ำน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$)	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังถึงถ้ำน้ำเหล็ก (MJ)
1	77.7	4.56	32.43
2	128.5	5.40	26.11
3	146.4	5.48	14.02
4	140.3	5.58	11.94

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิวของถ้ำน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$)	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังส่วนเกินของถ้ำน้ำเหล็ก (MJ)
1	38.7	2.49	0.98
2	69.7	4.33	2.11
3	72.7	4.42	1.53
4	73.4	4.44	1.56

2. ความร้อนสูญเสียผ่านผาถึงถ่ายน้ำเหล็ก ($Q_{surface,cover}$)

$$Q_{surface,cover} = h_m A_{cover} (T_{cover} - T_{amb}) + \varepsilon_{cover} \sigma A_{cover} (T_{cover}^4 - T_{amb}^4)$$

เมื่อพื้นที่ผิวของผาถึงถ่ายน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 3.69 ตารางเมตรและ T_{cover} คืออุณหภูมิที่ผิวของผาถึงถ่ายน้ำเหล็กด้านนอกที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก ดังแสดงไว้ในตาราง ก.4

เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยด้วยสมการ 3.3 และความร้อนสูญเสียผ่านผาของชุดหัวเผาถึงถ่ายน้ำเหล็ก ตามสมการ 3.17 แล้ว ซึ่งจะแสดงไว้ในตาราง ข.6

ตาราง ข. 6 ความร้อนสูญเสียผ่านผาถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิวของผาชุดหัวเผา (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2.K$)	ความร้อนสูญเสียผ่านผาของชุดหัวเผาถึงถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	67.8	4.16	33.19
2	117.0	5.36	28.93
3	124.1	5.46	21.26
4	123.4	5.45	15.94

พลังงานความร้อนที่ออกจากถึงถ่ายน้ำเหล็ก

1. ความร้อนสูญเสียของไอเสีย (Q_{flue})

$$Q_{flue} = m_{CO_2,flue,ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p,CO_2} dT \right) + m_{H_2O,flue,ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p,H_2O} dT \right) + m_{O_2,flue,ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + m_{N_2,flue,ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right)$$

จากสมดุลพลังงานเราสามารถหาค่าสัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ ข.7-ข.10

ตาราง ข. 7 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหลือที่รอบที่ 1

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	m _{flue}
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kg _{total}	kg
CO2	7.200	0.094	44.010	4.137	0.143	727.885
H2O	6.205	0.081	18.015	1.459	0.050	256.776
O2	5.139	0.067	31.199	2.093	0.072	368.289
N2	58.060	0.758	28.013	21.231	0.734	3736.050
Total	76.604	1.000		28.920	1.000	5089.000

ตาราง ข. 8 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหลือที่รอบที่ 2

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	m _{flue}
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kg _{total}	kg
CO2	7.200	0.094	44.010	4.137	0.143	206.394
H2O	6.205	0.081	18.015	1.459	0.050	72.810
O2	5.139	0.067	31.199	2.093	0.072	104.429
N2	58.060	0.758	28.013	21.231	0.734	1059.367
Total	76.604	1.000		28.920	1.000	1443.000

ตาราง ข. 9 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหลือที่รอบที่ 3

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	m _{flue}
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kg _{total}	kg
CO2	7.200	0.091	44.010	3.997	0.138	123.089
H2O	6.205	0.078	18.015	1.410	0.049	43.422
O2	5.699	0.072	31.199	2.243	0.078	69.072
N2	60.167	0.759	28.013	21.262	0.735	654.717
Total	79.271	1.000		28.912	1.000	890.300

ตาราง ข. 10 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กรอบที่ 4

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	m _{flue}
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kgtotal	kg
CO2	7.200	0.095	44.010	4.164	0.144	144.702
H2O	6.205	0.082	18.015	1.469	0.051	51.046
O2	5.032	0.066	31.199	2.063	0.071	71.688
N2	57.657	0.758	28.013	21.226	0.734	737.564
Total	76.093	1.000		28.922	1.000	1005.000

เมื่อได้ค่ามวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดแล้ว นำอุณหภูมิไอเสีย (6A) ที่ตรวจวัดมาแทนค่าลงในสมการเพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สแต่ละชนิดจากตารางที่ 3.1 และค่าความร้อนที่สูญเสียจากไอเสียจากสมการที่ 3.23 ค่าความร้อนสูญเสียจากไอเสียของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบถูกแสดงไว้ในตาราง ข.11

ตาราง ข. 11 ความร้อนสูญเสียจากไอเสียของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติใช้น้ำมันดีเซล

รอบการอุ่น	ความร้อนสูญเสียจากไอเสีย (MJ)
1	4606.25
2	1251.35
3	787.83
4	922.19

2. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดของถังถ่ายน้ำเหล็ก ($Q_{opening}$)

$$Q_{opening} = C_t \varepsilon_{opening} \sigma A_{opening} t (T_{ladle}^4 - T_{amb}^4)$$

จากสมการ 3.24 เราสามารถคำนวณค่าความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดได้ ซึ่งค่า $\varepsilon_{opening}$ มีค่าเท่ากับ 0.85 ซึ่งหาได้จากรูปที่ 3.1 โดยที่ ช่องเปิดเป็นแบบเปิดโดยรอบ (Round opening) โดยพื้นที่ของช่องเปิดระหว่างฝาชุดหัวเผากับถังถ่ายน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 0.068 ตารางเมตร ดังนั้นเมื่อแทนค่าอุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดตรงช่องเปิด (5A) แล้วความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กจะถูกแสดงไว้ในตาราง ข.12

ตาราง ข. 12 ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้
น้ำมันดีเซล

รอบการอุ่น	ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด (MJ)
1	25.08
2	6.14
3	5.23
4	4.62

พลังงานที่เปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุม

1. ความร้อนสะสมในถังถ่ายน้ำเหล็ก ($Q_{storage,ladle}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในถังถ่ายน้ำเหล็กเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก สามารถหาได้จากสมการ 3.27

$$Q_{storage,ladle} = 2\pi\rho_{brick}c_{p,brick}h\int_{r_i}^{r_o}T(r)rdr + \pi\rho_{brick}c_{p,brick}r_{bottom}^2\int_{x_i}^{x_o}T(x)dx$$

อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่เวลาต่างๆถูกแสดงไว้ในตาราง ก.1 โดยการคำนวณความร้อนสะสมในถังถ่ายน้ำเหล็กนั้นจะทำการคำนวณเป็นค่าความร้อนที่สะสมเพิ่มทุกๆ นาทีขณะที่ทำการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก ค่าความหนาแน่นของอิฐทนไฟมีค่าเท่ากับ 2750 kg/m³ ความสูงของถังถ่ายน้ำเหล็กเท่ากับ 2.5 เมตร รัศมีของถังถึงมีค่าเท่ากับ ความร้อนสะสมในถังถ่ายน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่นถูกแสดงไว้ในตาราง ข.13

ตาราง ข. 13 ความร้อนสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ความร้อนสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	3865.10
2	842.47
3	353.25
4	426.80

2. ความร้อนที่สะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก ($Q_{storage,steel}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็กสามารถหาได้จาก

$$Q_{storage,steel} = \int_{r_i}^{r_o} c_{p,steel} T(r) dm_{steel} = 2\pi\rho_{steel} c_{p,steel} h \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr$$

การคำนวณใช้วิธีเดียวกันกับการคำนวณความร้อนสะสมในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก ซึ่งจะใช้คุณสมบัติของผนังในตำแหน่ง 2D และ 2E ในการคำนวณ โดยค่าความหนาแน่นของเหล็กมีค่าเท่ากับ 7800 kg/m^3 และความสูงของชั้นเหล็กมีค่าเท่ากับ 2.5 เมตร ช่วงของการอินทิเกรตอยู่ในช่วง 20 มิลลิเมตรซึ่งเท่ากับความหนาของชั้นเหล็ก เมื่อทำการคำนวณแล้ว ค่าความร้อนสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็กที่ได้จะถูกแสดงไว้ในตาราง ข.14

ตาราง ข. 14 ความร้อนสะสมภายในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ความร้อนสะสมภายในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	727.90
2	302.00
3	206.00
4	257.00

ข.3 ตัวอย่างการคำนวณการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

การคำนวณสมมูลมวล

1. มวลของเชื้อเพลิง (m_{fuel})

มวลของเชื้อเพลิงจะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมดซึ่งจะคำนวณได้ดังสมการ

$$m_{fuel} = \rho_{fuel} V_{fuel}$$

ความหนาแน่นของน้ำมันเตาชนิดเอมีค่าเท่ากับ 0.95 kg/litre และจากปริมาณการใช้น้ำมันในตาราง ก.6 เราสามารถคำนวณมวลของเชื้อเพลิงในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กได้ดังนี้

ตาราง ข. 15 มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ปริมาณการใช้น้ำมัน (ลิตร)	มวลของเชื้อเพลิง (kg)
1	216.23	205.4
2	52.93	50.3
3	30.43	28.9
4	33.04	31.4

2. มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($m_{air,comb}$)

มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณออกซิเจนภายในไอเสีย จากนั้นนำปริมาณออกซิเจนที่เก็บได้คำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (AF_{actual}) ซึ่งค่า $AF_{stoic} = 14.91 \text{ kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$

จากสมการ 3.39 สามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศ (λ) ได้จากเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่ได้จากการวัดองค์ประกอบไอเสียซึ่งแสดงในตาราง ก.7 ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงมาคำนวณมวลของอากาศในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{10.027 - 2.877 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}{10.027 - 47.728 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}$$

รอบการอุ่น	% O ₂	λ	AF_{actual}
1	4.9	1.286	19.17
2	4.2	1.235	18.41
3	4.6	1.263	18.84
4	5.7	1.350	20.13

จากค่าอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง เราสามารถคำนวณมวลของอากาศได้จากสมการ

$$m_{air,comb} = AF_{actual} \times m_{fuel}$$

ตาราง ข. 16 มวลของอากาศที่ใช้ในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	มวลของเชื้อเพลิง (kg)	มวลของอากาศ (kg)
1	205.4	3938.6
2	50.3	925.8
3	28.9	544.6
4	31.4	631.7

3. มวลของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายน้ำเหล็ก ($m_{flue,ladle}$)

จากสมการสมดุลมวล สมการที่ 3.10 เราสามารถหาค่ามวลของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$m_{flue,ladle} = m_{fuel} + m_{air,comb}$$

ดังนั้นมวลของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายน้ำเหล็กจะถูกแสดงไว้ในตาราง ข.17

ตาราง ข. 17 มวลของไอเสียที่ออกจากถังถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	มวลของเชื้อเพลิง (kg)	มวลของอากาศ (kg)	มวลของไอเสีย (kg)
1	205.4	3938.6	4144.0
2	50.3	925.8	976.1
3	28.9	544.6	573.5
4	31.4	631.7	663.1

ข.4 การคำนวณสมดุลพลังงานการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

จากสมการที่ 3.15 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

$$Q + \sum m_i e_i - \sum m_e e_e = \Delta E_{CV}$$

เราสามารถคำนวณค่าความร้อนต่างๆในสมดุลพลังงานได้ดังนี้

พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ถังถ่ายน้ำเหล็ก

1. ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

$$Q_{fuel} = V_{fuel} \times LHV$$

โดย LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของน้ำมันเตาชนิดเอมีค่าเท่ากับ 39.77 MJ/litre และเมื่อนำปริมาณน้ำมันเตาชนิดเอที่ใช้ในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบจากตาราง ก.6 มาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ตามตาราง ข.18 ดังนี้

ตาราง ข. 18 ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก

รอบการอุ่น	ปริมาณการใช้น้ำมัน (ลิตร)	ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (MJ)
1	216.23	8619.05
2	52.93	2110.48
3	30.43	1213.54
4	33.04	1317.19

2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า ($Q_{fuel, sen}$)

ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า

$$Q_{fuel, sen} = \rho_{fuel} \times V_{fuel} \times C_{fuel} (T_{fuel, in} - T_{amb}) / 1000$$

จากตาราง ก.6 ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและอุณหภูมิของน้ำมันเตาที่อุ่นได้นั้น เมื่อนำมาคำนวณในสมการที่ 3.22 โดยความหนาแน่นของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 0.95 kg/liter ความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 1.884 kJ/kg-K ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้าถูกแสดงในตาราง ข.19

ตาราง ข. 19 ค่าความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้าในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่าน้ำเหล็ก

รอบการอุ่น	อุณหภูมิของน้ำมันเตาเฉลี่ยที่อุ่นได้ (องศาเซลเซียส)	ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า (MJ)
1	82.6	19.58
2	89.6	5.45
3	93.3	3.33
4	86.0	3.19

การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม

1. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังถึงถ่าน้ำเหล็ก ($Q_{surface, ladle}$)

$$Q_{surface, ladle} = h_m A_{surface} (T_{surface} - T_{amb}) + \varepsilon_{surface} \sigma A_{surface} (T_{surface}^4 - T_{amb}^4)$$

เมื่อพื้นที่ผิวของถ่าน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 9.28 ตารางเมตรและ $T_{surface}$ คือ อุณหภูมิที่ผิวถ่าน้ำเหล็กด้านนอกที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่าน้ำเหล็ก ดังแสดงไว้ในตาราง ก.8

เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยด้วยสมการ 3.3 และค่าความร้อนสูญเสียผ่านผนังถึงถ่าน้ำเหล็กตามสมการ 3.17 แล้ว ซึ่งจะแสดงไว้ในตาราง ข.20

ตาราง ข. 20 ความร้อนสูญเสียผ่านผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กจากการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิวของถังถ่ายน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2.K$)	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังถังถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	71.3	4.42	27.58
2	112.4	5.29	19.85
3	123.5	5.44	13.34
4	127.1	5.49	10.64

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิวของถังถ่ายน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2.K$)	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังส่วนก้นของถังถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	33.4	1.62	0.62
2	55.0	3.80	4.85
3	61.6	4.08	3.22
4	63.0	4.14	3.41

2. ความร้อนสูญเสียผ่านฝาถังถ่ายน้ำเหล็ก ($Q_{surface,cover}$)

$$Q_{surface,cover} = h_m A_{cover} (T_{cover} - T_{amb}) + \varepsilon_{cover} \sigma A_{cover} (T_{cover}^4 - T_{amb}^4)$$

เมื่อพื้นที่ผิวของฝาถังถ่ายน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 3.69 ตารางเมตรและ T_{cover} คืออุณหภูมิที่ผิวของฝาถังถ่ายน้ำเหล็กด้านนอกที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละรอบการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็ก ดังแสดงไว้ในตาราง ก.8

เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยด้วยสมการ 3.3 และความร้อนสูญเสียผ่านฝาของชุดหัวเผาถังถ่ายน้ำเหล็ก ตามสมการ 3.17 แล้ว ซึ่งจะแสดงไว้ในตาราง ข.21

ตาราง ข. 21 ความร้อนสูญเสียผ่านฝาถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิวของฝาชุดหัวเผา (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2.K$)	ความร้อนสูญเสียผ่านฝาของชุดหัวเผาถึงถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	65.6	4.21	35.27
2	116.6	5.36	33.52
3	123.0	5.45	20.92
4	123.0	5.45	20.92

พลังงานความร้อนที่ออกจากถึงถ่ายน้ำเหล็ก

1. ความร้อนสูญเสียของไอเสีย (Q_{flue})

$$Q_{flue} = m_{CO_2, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, CO_2} dT \right) + m_{H_2O, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, H_2O} dT \right) + m_{O_2, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, O_2} dT \right) + m_{N_2, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, N_2} dT \right)$$

จากสมดุลพลังงานเราสามารถหาค่าสัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ ข.22-ข.25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข. 22 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ 1

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	mflue
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kgtotal	kg
CO ₂	7.026	0.109	44.010	4.808	0.166	686.531
H ₂ O	5.878	0.091	18.015	1.647	0.057	235.106
O ₂	2.866	0.045	31.199	1.390	0.048	198.506
SO ₂	0.062	0.001	64.066	0.062	0.002	8.819
N ₂	48.477	0.754	28.013	21.117	0.728	3015.037
Total	64.308	1.000		29.024	1.000	4144.000

ตาราง ข. 23 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ 2

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	mflue
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kgtotal	kg
CO ₂	7.026	0.114	44.010	4.997	0.172	167.993
H ₂ O	5.878	0.095	18.015	1.711	0.059	57.530
O ₂	2.354	0.038	31.199	1.187	0.041	39.906
SO ₂	0.062	0.001	64.066	0.064	0.002	2.158
N ₂	46.554	0.752	28.013	21.077	0.726	708.512
Total	61.874	1.000		29.037	1.000	976.100

ตาราง ข. 24 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ 3

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	mflue
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kgtotal	kg
CO ₂	7.026	0.111	44.010	4.890	0.168	96.598
H ₂ O	5.878	0.093	18.015	1.674	0.058	33.081
O ₂	2.641	0.042	31.199	1.303	0.045	25.742
SO ₂	0.062	0.001	64.066	0.063	0.002	1.241
N ₂	47.632	0.753	28.013	21.100	0.727	416.839
Total	63.239	1.000		29.029	1.000	573.500

ตาราง ข. 25 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กรอบที่ 4

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	mflue
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kgtotal	kg
CO ₂	7.026	0.104	44.010	4.590	0.158	104.922
H ₂ O	5.878	0.087	18.015	1.572	0.054	35.931
O ₂	3.508	0.052	31.199	1.625	0.056	37.142
SO ₂	0.062	0.001	64.066	0.059	0.002	1.348
N ₂	50.893	0.755	28.013	21.163	0.730	483.757
Total	67.368	1.000		29.008	1.000	663.100

เมื่อได้ค่ามวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดแล้ว นำอุณหภูมิไอเสีย (6A) ที่ตรวจวัดมาแทนค่าลงในสมการเพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สแต่ละชนิดจากตารางที่ 3.1 และค่าความร้อนที่สูญเสียจากไอเสียจากสมการที่ 3.23 ค่าความร้อนสูญเสียจากไอเสียของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบถูกแสดงไว้ในตาราง ข.26

ตาราง ข. 26 ความร้อนสูญเสียจากไอเสียของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมดาที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

รอบการอุ่น	ความร้อนสูญเสียจากไอเสีย (MJ)
1	3899.44
2	771.72
3	458.28
4	596.50

2. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดของถังถ้ำน้ำเหล็ก ($Q_{opening}$)

$$Q_{opening} = C_t \varepsilon_{opening} \sigma A_{opening} t (T_{ladle}^4 - T_{amb}^4)$$

จากสมการ 3.24 เราสามารถคำนวณค่าความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดได้ ซึ่งค่า $\varepsilon_{opening}$ มีค่าเท่ากับ 0.85 ซึ่งหาได้จากรูปที่ 3.1 โดยที่ ช่องเปิดเป็นแบบเปิดโดยรอบ (Round opening) โดยพื้นที่ของช่องเปิดระหว่างฝาชุดหัวเผากับถังถ้ำน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 0.068 ตารางเมตร ดังนั้นเมื่อแทนค่าอุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดตรงช่องเปิด (5A) แล้วความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดในแต่ละรอบการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็กจะถูกแสดงไว้ในตาราง ข.27

ตาราง ข. 27 ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดของการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็กด้วยหัวเผาธรรมชาติใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

รอบการอุ่น	ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด (MJ)
1	4.48
2	1.35
3	1.11
4	1.36

พลังงานที่เปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุม

1. ความร้อนสะสมในถังถ้ำน้ำเหล็ก ($Q_{storage,ladle}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในตัวถังถ้ำน้ำเหล็กเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็ก สามารถหาได้จากสมการ 3.27

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

อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่เวลาต่างๆถูกแสดงไว้ในตาราง ก.5 โดยการคำนวณความร้อนสะสมในถังถ้ำน้ำเหล็กนั้นจะทำการคำนวณเป็นค่าความร้อนที่สะสมเพิ่มทุกๆ นาทีขณะที่ทำการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็ก ค่าความหนาแน่นของอิฐทนไฟมีค่าเท่ากับ 2750 kg/m³ ความสูงของถังถ้ำน้ำเหล็กเท่ากับ 2.5 เมตร รัศมีของถังถ้ำน้ำเหล็กเท่ากับ ความร้อนสะสมในถังถ้ำน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่นถูกแสดงไว้ในตาราง ข.28

ตาราง ข. 28 ความร้อนสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ความร้อนสะสมภายในถังถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	3677.81
2	558.95
3	308.65
4	311.82

2. ความร้อนที่สะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก ($Q_{storage,steel}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็กสามารถหาได้จาก

$$Q_{storage,steel} = \int_{r_i}^{r_o} c_{p,steel} T(r) dm_{steel} = 2\pi\rho_{steel} c_{p,steel} h \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr$$

การคำนวณใช้วิธีเดียวกันกับการคำนวณความร้อนสะสมในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก ซึ่งจะใช้ข้อมูลหุภูมิของผนังในตำแหน่ง 2D และ 2E ในการคำนวณ โดยค่าความหนาแน่นของเหล็กมีค่าเท่ากับ 7800 kg/m^3 และความสูงของชั้นเหล็กมีค่าเท่ากับ 2.5 เมตร ช่วงของการอินทิเกรตอยู่ในช่วง 20 มิลลิเมตรซึ่งเท่ากับความหนาของชั้นเหล็ก เมื่อทำการคำนวณแล้ว ค่าความร้อนสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็กที่ได้จะถูกแสดงไว้ในตาราง ข.29

ตาราง ข. 29 ความร้อนสะสมภายในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ความร้อนสะสมภายในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	572.50
2	351.00
3	145.00
4	123.00

ข.5 ตัวอย่างการคำนวณการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

การคำนวณสมดุลมวล

1. มวลของเชื้อเพลิง (m_{fuel})

มวลของเชื้อเพลิงจะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมดซึ่งจะคำนวณได้ดังสมการ

$$m_{fuel} = \rho_{fuel} V_{fuel}$$

ความหนาแน่นของน้ำมันเตาชนิดเอมีค่าเท่ากับ 0.95 kg/litre และจากปริมาณการใช้น้ำมันในตาราง ก.10 เราสามารถคำนวณมวลของเชื้อเพลิงในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กได้ดังนี้

ตาราง ข. 30 มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ปริมาณการใช้น้ำมัน (ลิตร)	มวลของเชื้อเพลิง (kg)
1	154.5	205.4
2	45.0	42.75
3	27.5	26.12
4	19.0	18.05

2. มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($m_{air,comb}$)

มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ จะสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณออกซิเจนภายในไอเสีย จากนั้นนำปริมาณออกซิเจนที่เก็บได้คำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (AF_{actual}) ซึ่งค่า $AF_{stoic} = 14.91 \text{ kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$

จากสมการ 3.39 สามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศ (λ) ได้จากเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่ได้จากการวัดองค์ประกอบไอเสียซึ่งแสดงในตาราง ก.11 ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงมาคำนวณมวลของอากาศในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{10.027 - 2.877 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}{10.027 - 47.728 \left(\frac{\% O_2}{100} \right)}$$

รอบการอุ่น	% O ₂	λ	AF_{actual}
1	8.9	1.691	25.21
2	9.3	1.746	26.04
3	8.9	1.691	25.21
4	8.3	1.614	24.06

จากค่าอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง เราสามารถคำนวณมวลของอากาศได้จากสมการ

$$m_{air,comb} = AF_{actual} \times m_{fuel}$$

ตาราง ข. 31 มวลของอากาศที่ใช้ในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	มวลของเชื้อเพลิง (kg)	มวลของอากาศ (kg)
1	205.4	5177.6
2	42.7	1113.3
3	26.1	658.6
4	18.0	434.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. มวลของไอเสียที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็ก ($m_{flue,ladle}$)

จากสมการสมดุลมวล สมการที่ 3.10 เราสามารถหาค่ามวลของไอเสียที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$m_{flue,ladle} = m_{fuel} + m_{air,comb}$$

ดังนั้นมวลของไอเสียที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็กจะถูกแสดงไว้ในตาราง ข.32

ตาราง ข. 32 มวลของไอเสียที่ออกจากถังถ้ำน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	มวลของเชื้อเพลิง (kg)	มวลของอากาศ (kg)	มวลของไอเสีย (kg)
1	205.4	5177.6	5383.0
2	42.7	1113.3	1156.0
3	26.1	658.6	684.7
4	18.0	434.3	452.3

ข.6 การคำนวณสมดุลพลังงานการอุ่นถังถ้ำน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้ น้ำมันเตาชนิดเอ

จากสมการที่ 3.15 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

$$Q + \sum m_i e_i - \sum m_e e_e = \Delta E_{CV}$$

เราสามารถคำนวณค่าความร้อนต่างๆในสมดุลพลังงานได้ดังนี้

พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ถังถ้ำน้ำเหล็ก

1. ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

$$Q_{fuel} = V_{fuel} \times LHV$$

โดย LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของน้ำมันเตาชนิดเอมีค่าเท่ากับ 39.77 MJ/litre และเมื่อนำปริมาณน้ำมันเตาชนิดเอที่ใช้ในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบจากตาราง ก.1 มาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ตามตาราง ข.33 ดังนี้

ตาราง ข. 33 ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก

รอบการอุ่น	ปริมาณการใช้ น้ำมัน (ลิตร)	ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (MJ)
1	154.5	6144.47
2	45.0	1789.65
3	27.5	1093.68
4	19.0	755.63

2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า ($Q_{fuel, sen}$)

ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า

$$Q_{fuel, sen} = \rho_{fuel} \times V_{fuel} \times C_{fuel} (T_{fuel, in} - T_{amb}) / 1000$$

จากตาราง ก.11 ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและอุณหภูมิของน้ำมันเตาที่อุ่นได้นั้น เมื่อนำมาคำนวณในสมการที่ 3.22 โดยความหนาแน่นของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 0.95 kg/liter ความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 1.884 kJ/kg-K ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้าถูกแสดงในตาราง ข.34

ตาราง ข. 34 ค่าความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้าในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก

รอบการอุ่น	อุณหภูมิของน้ำมันเตาเฉลี่ยที่อุ่นได้ (องศาเซลเซียส)	ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า (MJ)
1	112.8	22.34
2	105.5	5.92
3	109.3	3.80
4	103.3	2.42

การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม

1. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังถึงถ้ำน้ำเหล็ก ($Q_{surface,ladle}$)

$$Q_{surface,ladle} = h_m A_{surface} (T_{surface} - T_{amb}) + \varepsilon_{surface} \sigma A_{surface} (T_{surface}^4 - T_{amb}^4)$$

เมื่อพื้นที่ผิวของถ้ำน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 9.28 ตารางเมตรและ $T_{surface}$ คือ อุณหภูมิที่ผิวถ้ำน้ำเหล็กด้านนอกที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละรอบการอุ่นถ้ำน้ำเหล็ก ดังแสดงไว้ในตาราง ก.12

เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยด้วยสมการ 3.3 และค่าความร้อนสูญเสียผ่านผนังถึงถ้ำน้ำเหล็กตามสมการ 3.17 แล้ว ซึ่งจะแสดงไว้ในตาราง ข.35

ตาราง ข. 35 ความร้อนสูญเสียผ่านผนังของถ้ำน้ำเหล็กจากการอุ่นถ้ำน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิวของถ้ำน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$)	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังถึงถ้ำน้ำเหล็ก (MJ)
1	108.6	4.42	27.56
2	121.7	5.42	26.38
3	127.7	5.50	14.16
4	136.2	5.60	12.04

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิวของถ้ำน้ำเหล็ก (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$)	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังส่วนเกินถึงถ้ำน้ำเหล็ก (MJ)
1	40.8	2.85	4.73
2	50.8	3.58	3.81
3	54.5	3.78	2.32
4	58.8	3.97	2.16

2. ความร้อนสูญเสียผ่านฝ้าถึงถ่ายน้ำเหล็ก ($Q_{surface,cover}$)

$$Q_{surface,cover} = h_m A_{cover} (T_{cover} - T_{amb}) + \varepsilon_{cover} \sigma A_{cover} (T_{cover}^4 - T_{amb}^4)$$

เมื่อพื้นที่ผิวของฝ้าถึงถ่ายน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 3.69 ตารางเมตรและ T_{cover} คืออุณหภูมิที่ผิวของฝ้าถึงถ่ายน้ำเหล็กด้านนอกที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก ดังแสดงไว้ในตาราง ก.12

เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยด้วยสมการ 3.3 และความร้อนสูญเสียผ่านฝ้าของชุดหัวฝ้าถึงถ่ายน้ำเหล็ก ตามสมการ 3.17 แล้ว ซึ่งจะแสดงไว้ในตาราง ข.36

ตาราง ข. 36 ความร้อนสูญเสียผ่านฝ้าถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	อุณหภูมิผิวของฝ้าชุดหัวฝ้า (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2.K$)	ความร้อนสูญเสียผ่านฝ้าของชุดหัวฝ้าถึงถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	64.0	4.16	33.19
2	103.0	5.14	30.56
3	127.0	5.50	22.18
4	143.0	5.69	20.81

3. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหัวฝ้าแบบรีเจนเนอเรทีฟ ($Q_{surface,regen}$)

$$Q_{surface,regen} = 2 \times (h_m A_{surface,regen} (T_{surface} - T_{amb}) + \varepsilon_{surface} \sigma A_{surface,regen} (T_{surface}^4 - T_{amb}^4))$$

เมื่อพื้นที่ผิวของหัวฝ้าแบบรีเจนเนอเรทีฟมีค่าเท่ากับ 5.11 ตารางเมตรและ $T_{surface}$ คืออุณหภูมิที่ผิวของหัวฝ้าแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก ดังแสดงไว้ในตาราง ก.13

เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยด้วยสมการ 3.3 และความร้อนสูญเสียผ่านผนังหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟตามสมการ 3.19 แล้ว ซึ่งจะแสดงไว้ในตาราง ข.37

ตาราง ข. 37 ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

รอบการ อุ่น	อุณหภูมิผนังหัว เผาแบบรีเจน เนอเรทีฟ (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ธรรมชาติเฉลี่ย (W/m ² .K)	ความร้อนสูญเสียผ่านผนัง หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (MJ)
1	104.5	5.51	48.48
2	112.5	5.26	12.40
3	112.0	5.26	6.15
4	112.0	5.26	6.15

4. การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวท่อส่งแก๊สร้อน ($Q_{surface, piping}$)

เนื่องจากท่อส่งแก๊สร้อนในชุดหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟมีการหุ้มฉนวน ซึ่งการคำนวณการสูญเสียความร้อนจากท่อที่มีฉนวนหุ้มสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.20 ความร้อนสูญเสียผ่านผิวของท่อส่งแก๊สร้อนถูกแสดงไว้ในตาราง ข.38

$$Q_{surface, pipe} = h_m A_{pipe} (T_{pipe} - T_{amb}) + \epsilon_{pipe} \sigma A_{pipe} (T_{pipe}^4 - T_{amb}^4)$$

ตาราง ข. 38 ความร้อนสูญเสียผ่านผิวท่อส่งแก๊สร้อน

รอบการ อุ่น	อุณหภูมิผนังผิว ท่อส่งแก๊สร้อน (องศาเซลเซียส)	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ธรรมชาติเฉลี่ย (W/m ² .K)	ความร้อนสูญเสียผ่านผิวท่อ ส่งแก๊สร้อน (MJ)
1	66.0	5.32	12.87
2	60.0	5.07	3.41
3	66.0	5.32	2.12
4	64.0	5.24	1.49

พลังงานความร้อนที่ออกจากถังถ่าน้ำเหล็ก

1. ความร้อนสูญเสียของไอเสีย (Q_{flue})

$$Q_{flue} = m_{CO_2, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, CO_2} dT \right) + m_{H_2O, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, H_2O} dT \right) \\ + m_{O_2, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, O_2} dT \right) + m_{N_2, flue, ladle} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} \bar{c}_{p, N_2} dT \right)$$

จากสมมูลพลังงานเราสามารถหาค่าสัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ ข.39-ข.42

ตาราง ข. 39 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถังถ่าน้ำเหล็กรอบที่ 1

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	mflue
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kgtotal	kg
CO ₂	7.026	0.084	44.010	3.697	0.128	687.595
H ₂ O	5.878	0.070	18.015	1.266	0.044	235.471
O ₂	6.926	0.083	31.199	2.584	0.089	480.479
SO ₂	0.062	0.001	64.066	0.047	0.002	8.833
N ₂	63.742	0.762	28.013	21.350	0.738	3970.622
Total	83.634	1.000		28.945	1.000	5383.000

ตาราง ข. 40 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถังถ่าน้ำเหล็กรอบที่ 2

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	mflue
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kgtotal	kg
CO ₂	7.026	0.081	44.010	3.583	0.124	143.152
H ₂ O	5.878	0.068	18.015	1.227	0.042	49.023
O ₂	7.484	0.087	31.199	2.706	0.094	108.099
SO ₂	0.062	0.001	64.066	0.046	0.002	1.839
N ₂	65.842	0.763	28.013	21.374	0.739	853.887
Total	86.292	1.000		28.937	1.000	1156.000

ตาราง ข. 41 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ 3

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	mflue
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kgtotal	kg
CO ₂	7.026	0.084	44.010	3.697	0.128	87.460
H ₂ O	5.878	0.070	18.015	1.266	0.044	29.951
O ₂	6.926	0.083	31.199	2.584	0.089	61.115
SO ₂	0.062	0.001	64.066	0.047	0.002	1.123
N ₂	63.742	0.762	28.013	21.350	0.738	505.050
Total	83.634	1.000		28.945	1.000	684.700

ตาราง ข. 42 สัดส่วนของมวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ 4

	Ni	Fraction Yi	Mi	Yi*Mi	YiMi/Total	mflue
	kmol	kmol/kmol	kg/kmol	kg	kg/kgtotal	kg
CO ₂	7.026	0.088	44.010	3.867	0.134	60.405
H ₂ O	5.878	0.074	18.015	1.324	0.046	20.686
O ₂	6.154	0.077	31.199	2.401	0.083	37.504
SO ₂	0.062	0.001	64.066	0.050	0.002	0.776
N ₂	60.839	0.761	28.013	21.315	0.736	332.929
Total	79.959	1.000		28.957	1.000	452.300

เมื่อได้ค่ามวลของไอเสียของแก๊สแต่ละชนิดแล้ว นำอุณหภูมิไอเสีย (6A) ที่ตรวจวัดมาแทนค่าลงในสมการเพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สแต่ละชนิดจากตารางที่ 3.1 และค่าความร้อนที่สูญเสียจากไอเสียจากสมการที่ 3.23 ค่าความร้อนสูญเสียจากไอเสียของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบถูกแสดงไว้ในตาราง ข.43

ตาราง ข. 43 ความร้อนสูญเสียจากไอเสียของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบ
รีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

รอบการอุ่น	ความร้อนสูญเสียจากไอเสีย (MJ)
1	960.90
2	227.44
3	129.50
4	81.74

2. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดของถังถ่ายน้ำเหล็ก ($Q_{opening}$)

$$Q_{opening} = C_t \varepsilon_{opening} \sigma A_{opening} t (T_{ladle}^4 - T_{amb}^4)$$

จากสมการ 3.24 เราสามารถคำนวณค่าความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดได้ ซึ่งค่า $\varepsilon_{opening}$ มีค่าเท่ากับ 0.85 ซึ่งหาได้จากรูปที่ 3.1 โดยที่ ช่องเปิดเป็นแบบเปิดโดยรอบ (Round opening) โดยพื้นที่ของช่องเปิดระหว่างฝาชุดหัวเผากับถังถ่ายน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 0.068 ตารางเมตร ดังนั้นเมื่อแทนค่าอุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดตรงช่องเปิด (5A) แล้วความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดในแต่ละรอบการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กจะถูกแสดงไว้ในตาราง ข.44

ตาราง ข. 44 ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดของการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผา
แบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้น้ำมันเตาชนิดเอ

รอบการอุ่น	ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด (MJ)
1	4.48
2	1.57
3	1.17
4	1.61

พลังงานที่เปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุม

1. ความร้อนสะสมในถังถายน้ำเหล็ก ($Q_{storage,ladle}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในตัวถังถายน้ำเหล็กเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นถังถายน้ำเหล็ก สามารถหาได้จากสมการ 3.27

$$Q_{storage,ladle} = 2\pi\rho_{brick}c_{p,brick}h\int_{r_i}^{r_o}T(r)rdr + \pi\rho_{brick}c_{p,brick}r_{bottom}^2\int_{x_i}^{x_o}T(x)dx$$

อุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟที่เวลาต่างๆถูกแสดงไว้ในตาราง ก.9 โดยการคำนวณความร้อนสะสมในถังถายน้ำเหล็กนั้นจะทำการคำนวณเป็นค่าความร้อนที่สะสมเพิ่มทุกๆ นาทีขณะที่ทำการอุ่นถังถายน้ำเหล็ก ค่าความหนาแน่นของอิฐทนไฟมีค่าเท่ากับ 2750 kg/m³ ความสูงของถังถายน้ำเหล็กเท่ากับ 2.5 เมตร รัศมีของถังถายน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ ความร้อนสะสมในถังถายน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่นถูกแสดงไว้ในตาราง ข.45

ตาราง ข. 45 ความร้อนสะสมภายในถังถายน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ความร้อนสะสมภายในถังถายน้ำเหล็ก (MJ)
1	3441.96
2	762.31
3	387.95
4	279.70

2. ความร้อนที่สะสมในชั้นเหล็กของถังถายน้ำเหล็ก ($Q_{storage,steel}$)

ค่าความร้อนที่สะสมในชั้นเหล็กของถังถายน้ำเหล็กสามารถหาได้จาก

$$Q_{storage,steel} = \int_{r_i}^{r_o}c_{p,steel}T(r)dm_{steel} = 2\pi\rho_{steel}c_{p,steel}h\int_{r_i}^{r_o}T(r)rdr$$

การคำนวณใช้วิธีเดียวกันกับการคำนวณความร้อนสะสมในผนังของถังถ่ายน้ำเหล็ก ซึ่งจะใช้ข้อมูลหุภูมิของผนังในตำแหน่ง 2D และ 2E ในการคำนวณ โดยค่าความหนาแน่นของเหล็กมีค่าเท่ากับ 7800 kg/m^3 และความสูงของชั้นเหล็กมีค่าเท่ากับ 2.5 เมตร ช่วงของการอินทิเกรตอยู่ในช่วง 20 มิลลิเมตรซึ่งเท่ากับความหนาของชั้นเหล็ก เมื่อทำการคำนวณแล้ว ค่าความร้อนสะสมในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็กที่ได้จะถูกแสดงไว้ในตาราง ข.46

ตาราง ข. 46 ความร้อนสะสมภายในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ความร้อนสะสมภายในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็ก (MJ)
1	439.60
2	340.00
3	144.00
4	92.00

3. ความร้อนที่สะสมในฝาของชุดหัวเผา $Q_{storage,cover}$

การหาค่าความร้อนสะสมในฝาของชุดหัวเผานั้น ทางผู้วิจัยได้ประเมินให้มีค่าเท่ากับค่าความร้อนที่สะสมในส่วนกันของถังถ่ายน้ำเหล็กเนื่องจากขนาดและความหนาของชุดฝานั้นมีความใกล้เคียงกับกันบ้าง

4. ความร้อนที่สะสมในลูกบอลเซรามิก $Q_{storage,ceramics}$

$$Q_{storage,regen} = m_{ceramics} c_{p,ceramics} (T_{ceramics} - T_{amb})$$

จากการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศที่ทำได้ทั้งด้านบนและด้านล่างของหัวเผาแบรีเจนเนอเรทีฟ ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิอากาศที่ทำได้ดังแสดงไว้ในตาราง ก.9 ดังนั้นเราจึงประเมินอุณหภูมิของลูกบอลเซรามิกเฉลี่ยจากการแจกแจงของอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิที่ลูกบอลเซรามิกสะสมนั้นอยู่ที่ประมาณ 500 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาคำนวณความร้อนที่สะสมในลูกบอลเซรามิกแล้ว ค่าที่ได้ถูกแสดงไว้ในตาราง ข.47

ตาราง ข. 47 ความร้อนสะสมภายในชั้นเหล็กของถังถ่ายน้ำเหล็กแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ความร้อนสะสมภายในลูกบอลเซรามิก (MJ)
1	468.00
2	187.20
3	187.20
4	46.80

5. ความร้อนสะสมในโครงสร้างหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

$$Q_{storage,regen} = m_{regen} c_{p,steel} (T_{regen} - T_{amb})$$

เมื่อคำนวณความร้อนสะสมในโครงสร้างของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟตามสมการ 3.30 แล้ว ค่าความร้อนสะสมในโครงสร้างของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟถูกแสดงไว้ในตาราง ข.48

ตาราง ข. 48 ความร้อนสะสมภายในชุดหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟแต่ละรอบการอุ่น

รอบการอุ่น	ความร้อนสะสมภายในโครงสร้างหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (MJ)
1	193.70
2	38.74
3	38.74
4	38.74

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค (Appendix C)

การนำเสนอผลงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



WREC

2009 - Asia

www.wrec2009asia.com

World Renewable Energy Congress 2009 - Asia

Mr. Jakkrawut Jaroonsaratul
Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University,
Bangkok 10330, Thailand

25 May 2009

CERTIFICATE OF PARTICIPATION

It is hereby certified that Mr. Jakkrawut Jaroonsaratul from Chulalongkorn University, Thailand, has participated to the World Renewable Energy Congress (WREC) 2009 - Asia, held during 19-22 May 2009 in Bangkok, Thailand.

Mr. Jakkrawut Jaroonsaratul presented a paper during the congress entitled: "A Thermal Modeling of Ladle for Energy Conservation in Steelmaking Process".

Yours sincerely,

Assoc. Prof. Dr. Bundit Fungtammasan
Chairman of the Organizing Committee
WREC 2009 - Asia

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Incorporating

Co-organised by:

A Thermal Modeling of Ladle for Energy Conservation in Steelmaking Process

Jakkrawut Jaroonsaratul^{1,2,*} Siripong Cheanklin^{1,2,**} Pongtorn Charunyakorn² and Ittipon Diewwanit³

¹Iron and Steel Institute of Thailand, Bangkok 10100, Thailand

Tel: 02 713 6290 Fax: 02 713 6293

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok 10330, Thailand

Tel: 02 218 6630 Fax: 02 252 2889 * Corresponding Author: *Jakkrawut@isit.or.th, **Siripong@isit.or.th

³Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok 10330, Thailand

Tel: 02 218 6939 Fax: 02 218 6942

Abstract: Energy consumption in steelmaking process can be reduced substantially if the thermal conditions of the ladle can be predicted accurately throughout its working cycle. In this study, transient heat transfer in a steelmaking ladle is numerically investigated by using commercial software. The model validation and parameter adjustment were made by comparing modeling results with experimental data taken from field experiments in a steel factory. In experiments, thermocouples were installed to measure temperatures of refractory bricks and combustion gases at various locations. Thermal images of the ladle during casting were also taken to help the analysis of the thermal state of the ladle. This will facilitate more extensive studies on thermal conditions of the ladle during steelmaking process and ultimately leads to reduction of energy consumption both in electric arc furnaces and in ladle preheating. This paper presents heat transfer modeling together with experimental data during the casting.

Keywords: Ladle preheating, Energy conservation, Heat transfer in ladle, Steelmaking, Numerical simulation

1. INTRODUCTION

Steel industry is one of very high energy-intensity industries. Therefore, study and improvement of energy efficiency in this industry are much needed. In steelmaking process, electric arc furnace (EAF) is the major energy consumer due to its high-temperature condition. The molten steel temperature must be sufficiently high to ensure proper temperature at continuous casting station. In conservative practice, the tapping temperature of molten steel is frequently maintained excessively higher than necessary to compensate for heat loss from molten steel to ambient and to the ladle. Such practice, because of the lack of knowledge on heat transfer characteristics of molten steel and the ladle, leads to large waste of energy.

The objective of this research is to model heat transfer characteristics and thermal conditions of molten steel and the ladle and interaction between molten steel and the ladle during the complete cycle of steelmaking. The modeling validation and parameters adjustment are made by comparing modeling results with experimental data taken from field experiments in a steel factory. The results will be employed to establish an optimized control of tapping temperature together with degree of ladle preheating. The thermal modeling of ladle in preheating, holding, teeming and cooling stations are considered. This paper presents preliminary results of heat transfer modeling along with experimental data.

2. METHODOLOGY

2.1 Experimental Method

The experiments were conducted in a factory with 25-ton ladle. A number of thermocouples were installed at several positions in the ladle wall. (Fig.1.) In experiments, the ladle preheating, conditions were controlled in the same way as normally practiced in the factory. The experiments covered three initial conditions, namely:

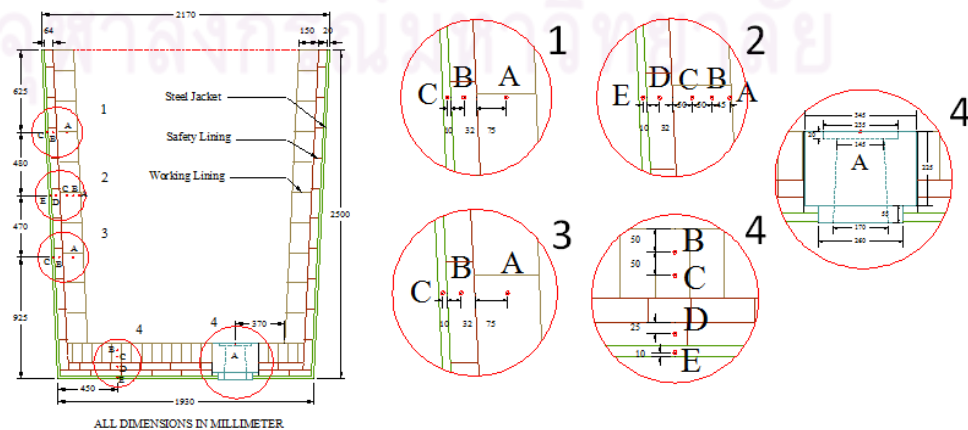


Fig. 1 Positions of thermocouple junctions in the ladle wall

1. Preheating of cold ladle by setting final exhaust gas temperature at 1000°C or about 2 hours of preheating. The data were recorded every 1 minute.
2. Preheating of warm ladle by setting exhaust gas temperature at 850°C and recording data every 1 minute.
3. Preheating of relatively hot ladle by setting exhaust gas temperature at 850°C and recording data every 1 minute.

2.2 Mathematical Simulation

The transient heat transfer in a ladle during preheating and holding periods are numerically simulated and validated against the experimental results. The numerical simulations are performed by 2 step implementations of 3-dimensional numerical models, (Fig. 2). In the first step, for simulation of the preheating period, the ladle model without molten steel was used. In the second step, for simulation of holding period, the ladle model with molten steel was used and taking the temperature distribution in ladle wall at the end of preheating as the initial parameter. Due to the capability in symmetry calculation of commercial software, the segmented ladle model, 20° by radial axis, is used in simulation. The mesh size of 5 mm is used in a direction corresponding to direction of thermocouple installation and mesh size of 10 mm is used in other directions.

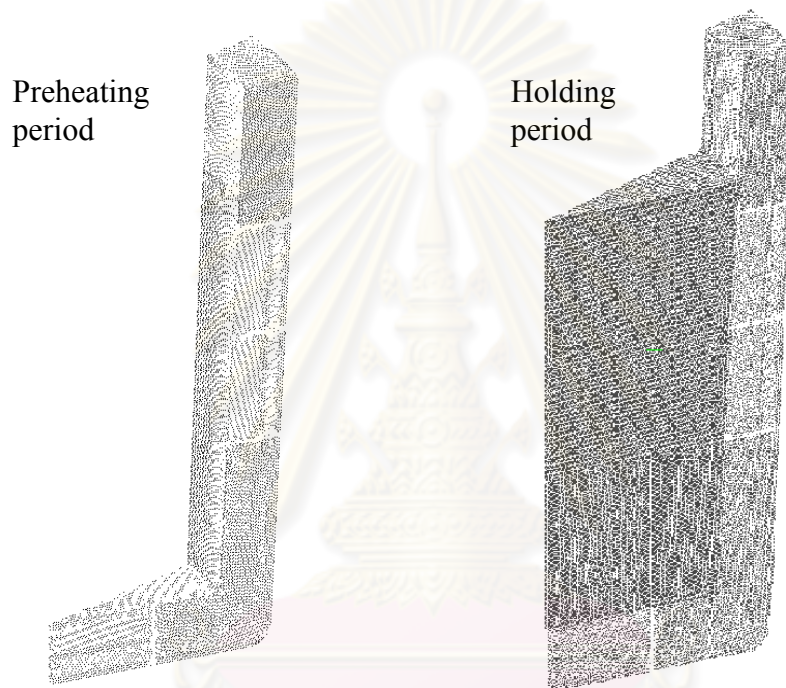


Fig. 2 The numerical models in ladle preheating and holding periods.

The thermophysical properties used in simulation are listed in Table 1 and 2. Table 1 is the properties of ladle wall and table 2 shows the properties of molten steel during holding period simulations.

Table 1 Thermophysical properties of ladle used in calculations

Layer	Material	k (W/m-K)		ρ (kg/m ³)	C _p (J/kg-K)
		400°C	600°C		
Working lining	Refractory SK38 [1]	2.20	2.09	2,750	1,100
Safety lining		2.03	2.00		
		2.00			
Steel shell		52			

2.2.1 Initial and Boundary conditions

Preheating period

In ladle preheating period, the necessary procedure to prevent thermal shock in ladle and to reduce heat loss of molten steel to the ladle, the ladle receives energy from combustion gases through the inside surface of the ladle wall and loses some of the heat at the outside surface (steel shell).

According to the results of Mohanty and Satayayut [3], heat transfer from combustion gases to the ladle wall is dominated by radiation. Therefore, this heat transfer can be calculated from equation:

$$q_{\text{rad}}(G) = \epsilon_g \sigma (T_g^4 - T_{s1}^4) \quad (3)$$

Where σ is the Stefan-Boltzmann constant ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$); ϵ_g is the emissivity of combustion gases and is a function of gas temperature and percentage of excess air as suggested by Wimpress [4] (Fig. 3); T_g^4 is the combustion gas temperature. The modified experimental results are shown as line Sim T4A in Fig. 5.

Table 2 Thermophysical properties of molten steel

Temperature (°C)	k (W/m-K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg-K)
1550	40.0	7,030	753
1575	40.5	7,005	788
1600	41.0	6,980	824
1625	41.3	6,955	824
1650	41.5	6,930	824
1675	41.7	6,905	824
1700	42.0	6,880	824

At the outside wall surface of the steel shell, the heat loss to ambient is the combination of free convection and radiation. For free convection between steel shell surface and ambient air at 32°C, the Rayleigh number is estimated to be 2.77×10^{10} , indicating that the boundary layer along steel shell is in the turbulent region. Therefore, the heat transfer coefficient is calculated as follows:

$$\overline{Nu}_c = \left\{ 0.025 + \frac{0.387 Ra_c^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \right\}^2 \quad (4)$$

$$\overline{h} = 4.7 \text{ W}/(\text{m}^2) \quad (5)$$

The emissivity, ϵ , is set to be 0.78 for radiation heat transfer from steel shell to ambient at 32°C. The initial temperatures of ladle wall are uniformly at 32°C.

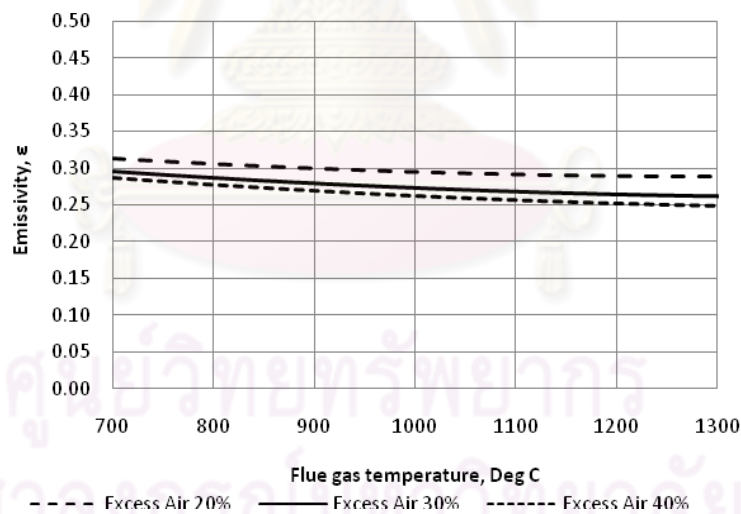


Fig. 3 The emissivity of combustion gases

Holding period

In the numerical simulation, the ladle temperature distributions at the end of preheating period are set to be the initial ladle temperature for holding period. In this paper, the heat loss from ladle while waiting before tapping is neglected because the waiting is relatively brief (less than 5 min).

The molten steel temperature is initially assumed to be uniform at tapping temperature. Two different initial molten steel temperatures, 1680°C and 1700°C, have been chosen in examining the effect of tapping temperature on heat loss rate.

At molten steel free surface, the field experiments data in a steel factory show that the temperature of slag cover surface fluctuates in a relatively narrow range of 700-900°C. For this reason, the radiation and free convection heat loss from slag cover is represented in term of heat loss rate:

$$q = 39.9 \text{ kW/} \quad (6)$$

For the outside ladle surface, the heat loss to ambient by free convection and radiation is approximately the same as in *preheating period*.

Simulation cases

In order to investigate the influence of certain parameters (initial ladle preheating time, tapping temperature and holding time) on the molten steel temperature, 4 simulation cases are investigated. They are the combination of 2 different preheating times (90 and 120 min) and 2 different tapping temperatures (1680 and 1700°C). The list of simulation cases is shown in Table 3.

Table 3 List of simulation cases

Model	Preheating time (min)	Tapping temperature (°C)
P90T1680	90	1680
P90T1700	90	1700
P120T1680	120	1680
P120T1700	120	1700

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Experimental Results

The results of the experiments are shown in Fig. 4 which cover all initial conditions of ladle preheating such as cold, warm and hot. The issues under investigation are:

1. Exhaust gas temperature in the stack from ladle was recorded and used for assessing exhaust gas loss and the potential for in energy conservation.
2. Ladle wall temperatures at positions 2 and 4 are employed for the calculations of energy content in the ladle wall which indicate thermal conditions of the ladle.
3. Ladle wall temperatures at points 2B and 2C are closely examined to be adopted as suitable controlling temperature during ladle preheating.

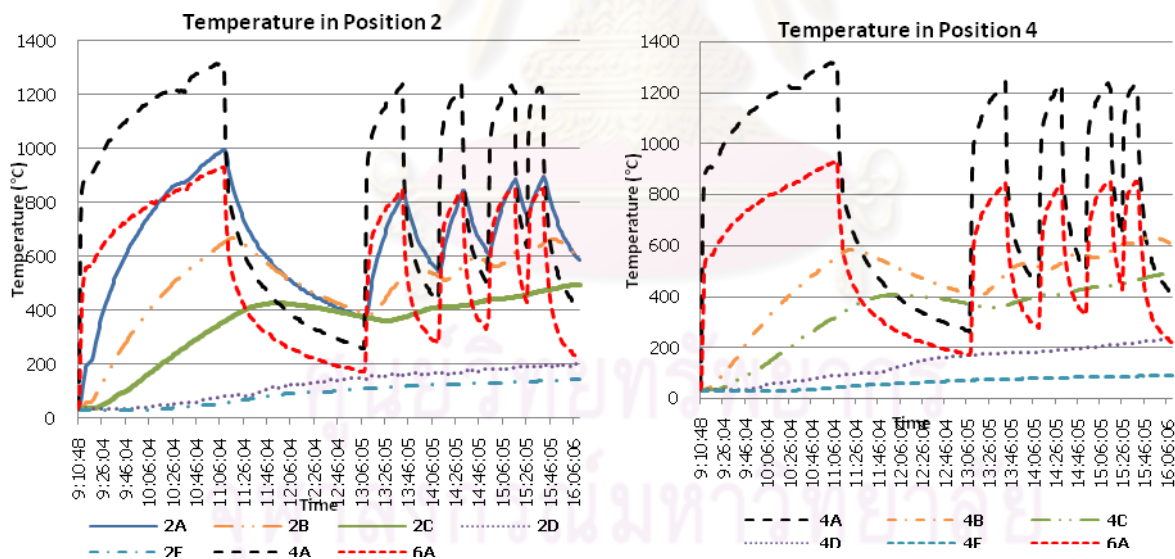


Fig. 4 Temperatures at several points in the ladle wall at position 2 and position 4 compared with exhaust gas temperature (6A) and hot gas temperature inside ladle (4A) for several cycles of ladle preheating.

Fig.5 shows comparison of temperatures at corresponding points of positions 2 and 4. Fig.6. is similar to Fig. 5 except for the inclusion of the energy content of the ladle wall. It can be seen that the temperature at position 2, for example, of point 2B is more closely related to energy content of the ladle wall than exhaust gas temperature. Therefore it is very likely that the ladle wall temperature at position 2 is adopted as controlling parameter in ladle preheating especially when regenerative burner is installed in place of conventional burner.

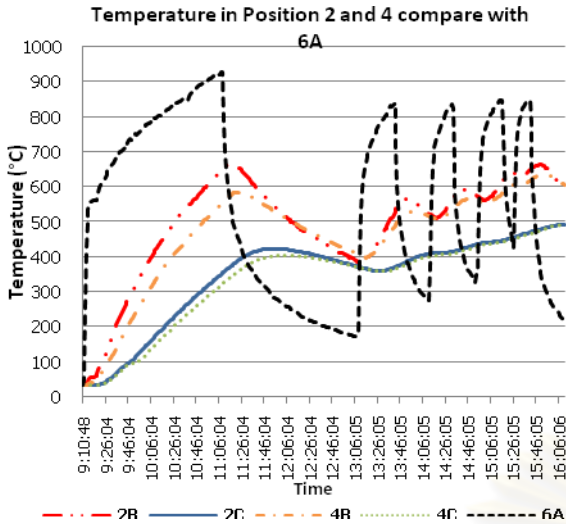


Fig. 5 Comparison of ladle wall temperatures at positions 2, 4 and exhaust gas temperature (6A) for several cycles of ladle preheating.

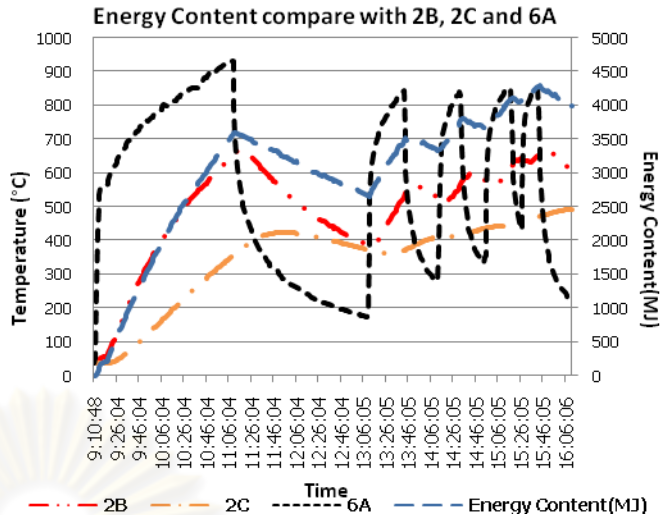


Fig. 6 Comparison of ladle wall temperatures at points 2B, 2C, exhaust gas temperature (6A), and energy content in ladle wall for several cycles of ladle preheating.

3.2 Simulation Results

Fig. 7 shows the comparison of temperature evolutions between the transient simulation model case P120T1700 and experimental results at 5, 50 100, 182, and 224 mm from the inside wall surface. In the first 120 min, i.e., the preheating period, the ladle wall temperatures obtained from the simulation closely match the experimental results. This indicates that the modeling heat transfer in the ladle wall based on assigned emissivity and combustion gas temperature is appropriate.

The temperature differences between the experimental results and the simulation model could be due to two factors. One is a result of the assumptions that inside surface convection heat transfer is negligible. The other is the uncertainty involved in the experimental results.

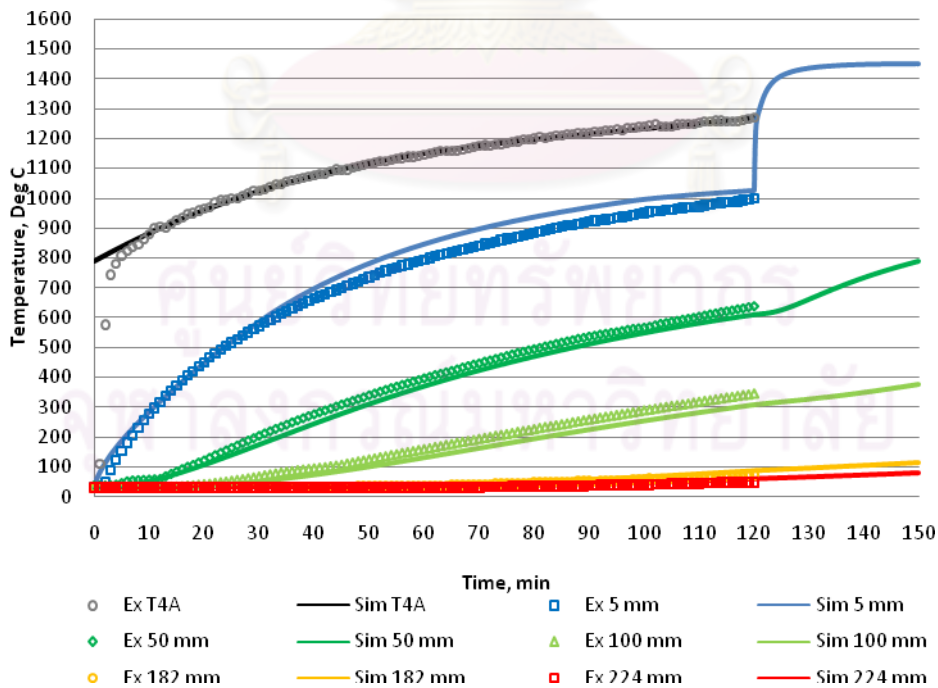


Fig. 7 Temperature evolution of ladle wall during the preheating and holding periods

In holding period (after 120 min), the temperature evolution of ladle wall at the position near the inside surface suddenly increases. Clearly, it levels off after 10 min of holding time. Temperature changes in location further away from the inside surface is insignificant.

The effect of the extent of ladle preheating on mean temperature of molten steel during the holding period is shown in Fig. 8. The molten steel temperature drops sharply at the beginning and more gradually afterward. Variation of preheating time seems to have little effect on average molten steel. This is due to the fact that after a certain period of preheating, the temperature difference between the wall surface and combustion gases becomes relative small. As a consequence, the heat transfer from the combustion gases is much lower than at the beginning. In all simulation cases, the mean steel temperatures decrease approximately 20°C after 20 min of holding time. This result can be used as guideline for optimization of steelmaking operation regarding ladle preheating period and tapping temperature in order to increase productivity and save energy in steelmaking process.

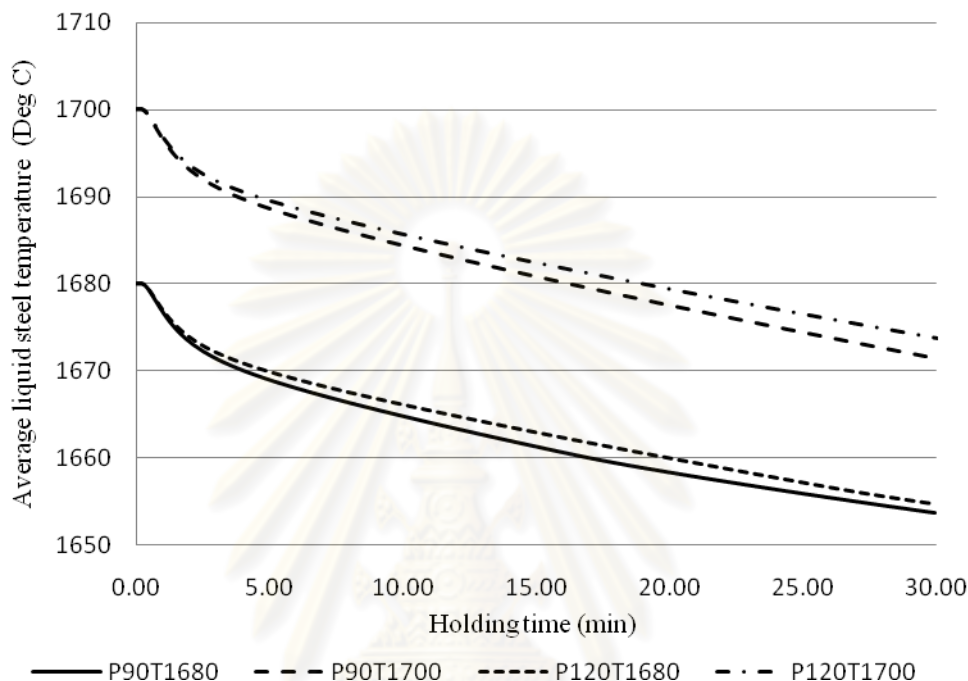


Fig. 8 Variation of molten steel temperature as a function of time for different values of tapping temperatures and preheating periods.

4. CONCLUSION

The experiments and simulation of heat transfer of steelmaking ladle have been investigated. The experimental results show that ladle energy content is better represented by ladle wall temperatures than by exhaust gas temperature. The simulation results and experimental results are in good agreement. Therefore the simulation method employed in this research can be used to accurately predict the thermal conditions of molten steel and ladle which will enable more precise control in steelmaking process in order to improve quality and energy efficiency. The preliminary result also indicates that after a certain period of time, ladle preheating time has little effect on molten steel temperature at the end of holding period (or the start of continuous casting operation)

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their gratitude to Siam Steel Syndicate Co., Ltd. (Thailand) for personnel and technical assistance during field measurement. The financial support and advice from the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University and the Iron and Steel Institute of Thailand are gratefully acknowledged.

6. REFERENCES

- [1] Refractory SK38, Material data sheet, The Siam Refractory Industry Co., Ltd.
- [2] Xia, J.L. and Ahokanen, T. (2001) Transient flow and heat transfer in a steelmaking ladle during the holding period, *Metall Mater Trans B*, v 32B, Aug, p733 -741
- [3] Mohanty, B. and Satayayut, J. (1992) Dynamic Model for Ladle Preheater Performance Evolution, *International Journal of Energy Research*, Vol. 16, 51-60
- [4] Wimpres (1978) Generalized method predicts fired-heater performance, *Chemical Engineering (New York)*, v 85, n 12, May 22, p95 -102 (Cited in [3])
- [5] Incropera, F.P. and Dewitt, D.P. (2000) *Introduction to heat transfer*, 4th edition, John Wiley & Son, Inc.



มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เกียรติบัตรนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

จักรารุช จริญญาพร และ พงษ์ธร จริญญาภรณ์

ได้เข้าร่วมเสนอบทความเรื่อง

การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝายและอุปกรณ์อุ้มน้ำหลัก

โดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5

ระหว่างวันที่ 29 เมษายน - 1 พฤษภาคม 2552

ให้ไว้ ณ วันที่ 1 พฤษภาคม พุทธศักราช 2552

Jiraruch Jirajit

(ศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ จินายน)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยขอนแก่น

การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถึงถ้ำน้ำเหล็ก โดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

Improvement of Ladle Preheating Apparatus with Regenerative Burners

จักราวุธ จรูญสารตุล^{1,2,*} พงษ์ธร จรรย์ญากรณ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 02 218 6610

²สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร 10110
โทร 02 713 6290 โทรสาร 02 713 6293

Jakkrawut Jaroonsaratul^{1,2,*} Pongtorn Charunyakorn¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

Tel: 02 218 6610 * Corresponding Author: Tsuneo_jung@hotmail.com

²Iron and Steel Institute of Thailand, Bangkok 10110, Thailand

Tel: 02 713 6290 Fax: 02 713 6293

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมแขนงหนึ่งที่มีศักยภาพในการอนุรักษ์พลังงานค่อนข้างสูง บทความนี้เป็นงานศึกษาวิจัยเพื่อลดการใช้พลังงานในการอุ่นถึงถ้ำน้ำเหล็กก่อนนำไปรับน้ำเหล็กจากเตาหลอม เพื่อลด thermal shock ของถ้ำน้ำเหล็ก และ ลดการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กให้แก่ถ้ำน้ำเหล็ก การอุ่นถึงถ้ำน้ำเหล็กจะควบคุมด้วยอุณหภูมิของไอเสียที่ปล่อยทิ้ง โดยตั้งค่าอุณหภูมิสูงสุดของไอเสียไว้ที่ 900-1,000°C จึงมีการสูญเสียความร้อนออกไปกับไอเสียสูงมาก วิธีลดการสูญเสีย คือ การใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟแทนหัวเผาแบบเดิม เพื่อให้มีการนำความร้อนปล่อยทิ้งมาอุ่นอากาศเผาใหม่ ในการทดลองการอุ่นถึงถ้ำน้ำเหล็กในโรงงานเหล็กแห่งหนึ่งที่สภาวะต่างๆ พบว่า ไอเสียที่ปล่อยทิ้งมีอุณหภูมิ 600-1,000°C ซึ่งคิดเป็นความร้อนสูญเสียในไอเสีย 32-36% การนำเอาหัวเผา รีเจนเนอเรทีฟมาใช้จะสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้ 27-29% ของเชื้อเพลิง นอกจากนี้ จากข้อมูลการทดลองพบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะใช้อุณหภูมิในผนังถ้ำน้ำเหล็กควบคุมการอุ่นแทนอุณหภูมิไอเสีย

คำสำคัญ: ถ้ำน้ำเหล็ก, หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ, การอุ่นถึงถ้ำน้ำเหล็ก

Abstract

Steel industry is one of the industries that have high potential for energy conservation. This paper presents research to reduce the energy consumption in ladle preheating before filling with molten steel to prevent thermal shock and heat loss from molten steel to ladle. Ladle preheating is controlled by exhaust gas temperature normally set at a maximum temperature of 900-1,000°C. It is evident that the exhaust gas heat loss is very high. One method to reduce this loss is employing regenerative burners in place of conventional burners in order to

recover waste heat for combustion air preheating. In experiments with ladle preheating in a factory under several conditions, it was found that exhaust gas temperature was in the range 600-1,000°C. This leads to corresponding heat loss of 32-36%. By employing a regenerative burner, fuel consumption reduction of 27-29% may be realized. Furthermore, data from the experiments indicates the possibility of using the wall temperature to control the preheating in place of the exhaust gas temperature.

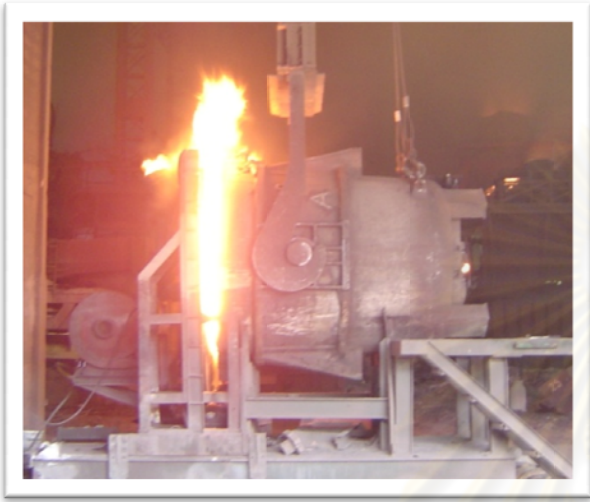
Keywords: Ladle, Regenerative burner, Ladle preheating

1. บทนำ

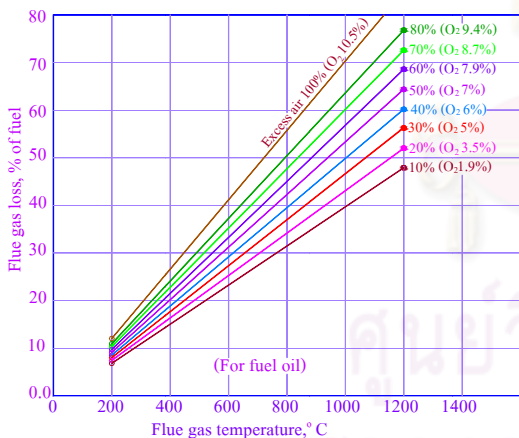
อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตสูงมาก การศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอุปกรณ์และกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนจึงเป็นจุดที่มีศักยภาพการประหยัดพลังงานสูง ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จะต้องมีการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมไปสู่ถ้ำน้ำเหล็กเพื่อเคลื่อนย้ายไปยังแท่นหล่อเพื่อทำการหล่อแบบต่อเนื่อง ในกรณีนี้ ต้องทำการอุ่นถึงถ้ำน้ำเหล็กให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนรับน้ำเหล็ก เพื่อกำจัดความชื้นในผนังถ้ำน้ำเหล็ก เพื่อป้องกันการเกิด Thermal shock และ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กให้แก่ถ้ำน้ำเหล็กมากเกินไปในระหว่างการหล่ออย่างต่อเนื่อง

การอุ่นถึงถ้ำน้ำเหล็กที่ปฏิบัติทั่วไป จะควบคุมโดยเวลาที่ใช้ในการอุ่น หรือพิจารณาจากอุณหภูมิไอเสีย ที่ปล่อยทิ้ง ซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ประมาณ 900-1,000°C ในการอุ่นถึงถ้ำน้ำเหล็กในปัจจุบันใช้หัวเผาฟืนเปลวไฟเข้าไปในตัวถ้ำน้ำเหล็ก แม้ความร้อนจากการเผาไหม้จะไหลย้อนกลับออกมาทางปากถ้ำ และระบายทิ้งออกไปทางปล่องบนฝาถ้ำ ไอเสียที่ปล่อยทิ้งมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง โดยเฉพาะในช่วงท้ายๆ

ของการอุณหภูมิอาจจะขึ้นไปถึง 1000°C [5] และในบางครั้งมีเปลวไฟแลบออกมาจากปากถังด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1 จึงมีการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้สูงมาก จากกราฟในรูปที่ 2 พบว่าที่อุณหภูมิไอเสีย 1000°C จะมีการสูญเสียความร้อนในไอเสียถึง 45% (คิดที่อากาศส่วนเกิน 30%) Worrell และ คณะ [2] ประเมินว่า การใช้พลังงานในส่วนนี้น่าจะลดลงได้อีกถึง 50% ซึ่งสอดคล้องกับการประเมินข้างต้น



รูปที่ 1 ถังถ่ายน้ำเหล็กที่มีไฟแลบออกมาทางช่องว่างระหว่างปากถังกับฝาปิดขณะที่ทำการอุ่น



รูปที่ 2 กราฟสำหรับหาการสูญเสียพลังงานที่ออกไปกับไอเสียที่อุณหภูมิไอเสียและอากาศส่วนเกินต่างๆ [4]

การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังเช่นในกรณีทั่วไป ไม่สามารถทำได้เนื่องจากความจำกัดด้านพื้นที่ การนำความร้อนในไอเสียกลับคืนมาใช้โดยการประยุกต์ใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟจึงเป็นแนวทางในการลดการสูญเสียที่มีความเป็นไปได้สูง [6] ซึ่งนอกจากจะให้ผลประหยัดจากการลดการใช้พลังงานในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กแล้ว ยังอาจจะให้ผล

ประหยัดพลังงานทางอ้อม จากการช่วยให้สามารถลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก (tapping temperature) ได้อีกด้วย

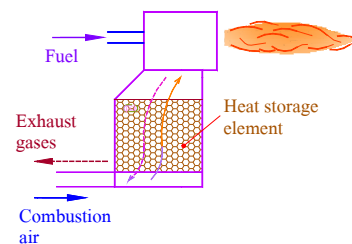
บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาวิจัยในส่วนที่หนึ่ง ซึ่งเป็นการทดลองและบันทึกข้อมูลการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กในโรงงาน และ วิเคราะห์สภาวะทางความร้อนและการใช้พลังงานของการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กในปัจจุบัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงการใช้พลังงาน และเปรียบเทียบกับการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในงานขั้นต่อไป

2. ถังถ่ายน้ำเหล็ก (Ladle)

ถังถ่ายน้ำเหล็กที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีขนาดความจุ 25 ตัน น้ำเหล็ก มีลักษณะรูปทรงและมีสัดส่วนต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5 การก่ออิฐทนไฟของผนังของถังถ่ายน้ำเหล็กแบ่งเป็น 2 ชั้น ผนังชั้นในเรียกว่า Working lining ก่อด้วยอิฐทนไฟ SK38 ซึ่งมีส่วนผสมของ Alumina 80% ชั้นนี้หนา 150 มิลลิเมตร ชั้นถัดออกมาเรียกว่า Safety lining เป็นอิฐทนไฟชนิดเดียวกัน ซึ่งสำหรับผนังด้านข้างของถังหนา 64 มิลลิเมตร ส่วนผนังก้นถังหนา 100 มิลลิเมตร เปลือกหุ้มชั้นนอกของผนังข้างเป็นเหล็กหนา 20 มิลลิเมตร และที่ก้นถังหนา 50 มิลลิเมตร น้ำหนักถังเปล่าประมาณ 15 ตัน รับน้ำเหล็กได้ครั้งละประมาณ 20-25 ตัน ในการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กแบ่งตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 แบบ คือ การอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กใหม่หรือถังเย็น และการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้วหรือถังร้อน

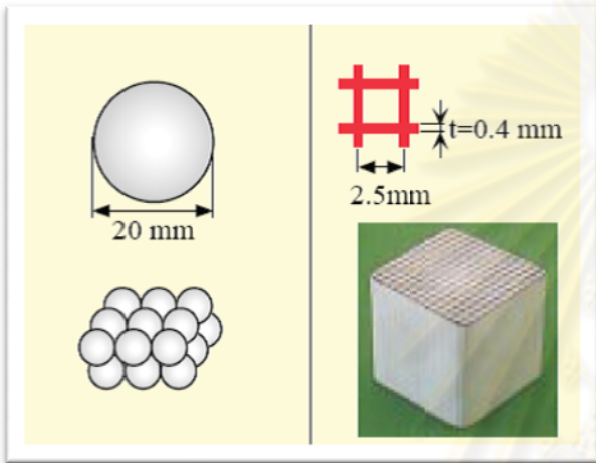
3. หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative burner)

หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟเป็นหัวเผาที่มีการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของหัวเผานั้น หัวเผาแบบนี้มีส่วนประกอบเพิ่มเติมจากหัวเผาธรรมดาทั่วไปคือ มีห้องวัสดุสะสมความร้อน(heat storage element) ดังแสดงในรูปที่ 3 การติดตั้งใช้งานหัวเผาแบบนี้ต้องติดตั้งเป็นคู่ ซึ่งจะทำงานสลับกัน กล่าวคือ ในขณะที่ตัวหนึ่งกำลังทำงานเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน อีกตัวหนึ่งจะปล่อยให้ไอเสียไหลผ่านวัสดุสะสมความร้อนเพื่อเก็บความร้อนในไอเสียไว้ ในรอบต่อไป หัวเผาตัวนี้จะทำงานโดยใช้ความร้อนในวัสดุสะสมความร้อนมาอุ่นอากาศเผาไหม้ ส่วนอีกตัวหนึ่งจะหยุดทำงานและทำหน้าที่ระบายไอเสียเพื่อเก็บสะสมความร้อนไว้ในวัสดุสะสมความร้อนแทน ทำงานสลับกันไปเช่นนี้ การทำงานแต่ละรอบจะใช้เวลาประมาณ 60 วินาที เวลาที่แน่นอนขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของวัสดุสะสมความร้อน



รูปที่ 3 หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

วัสดุสะสมความร้อนที่ใช้กันโดยทั่วไปมี 3 ชนิดคือ ชนิดลูกบอลเซรามิก(ceramic ball) ชนิดรังผึ้งเซรามิก(ceramic honeycomb) และชนิดรังผึ้งสแตนเลส(stainless honeycomb) รูปที่ 4 เป็นตัวอย่างวัสดุสะสมความร้อนที่ใช้ทั่วไป สำหรับลูกบอลเซรามิกมีข้อดีที่ค่อนข้างทนทาน เปลี่ยนทำความสะอาดง่าย ทนอุณหภูมิได้สูง และราคาถูกรังผึ้งเซรามิกได้เปรียบในแง่ของพื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรสูงกว่าลูกบอลเซรามิก แต่จะเปลี่ยนทำความสะอาดยากกว่า ราคาแพงกว่า ส่วนรังผึ้งสแตนเลสมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรสูงที่สุด แต่ทนอุณหภูมิได้ต่ำกว่าเซรามิก และราคาแพงที่สุดด้วย ในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้ เลือกหัวเผาที่ใช้ลูกบอลเซรามิก



รูปที่ 4 วัสดุสะสมความร้อนแบบลูกบอลเซรามิกและแบบรังผึ้งเซรามิก [3]

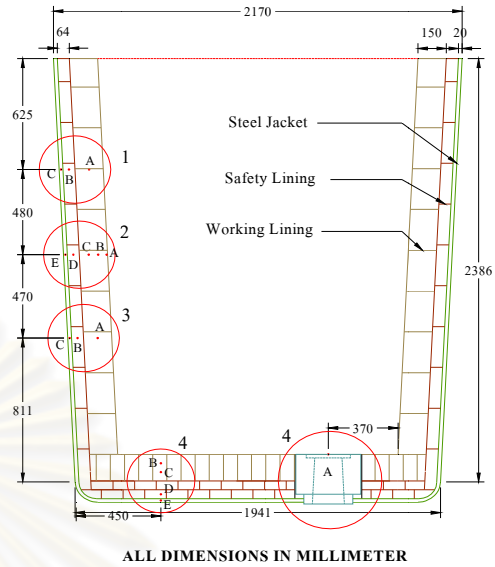
4. วิธีการศึกษาวิจัย

เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะทางความร้อนของถังถ่ายน้ำเหล็กและแก๊สไอเสีย จึงทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิทั้งในผนังถังถ่ายน้ำเหล็ก [1] และ อุณหภูมิไอเสีย ณ ตำแหน่งต่างๆ (ในวงกลมสีแดงในรูปที่ 5)

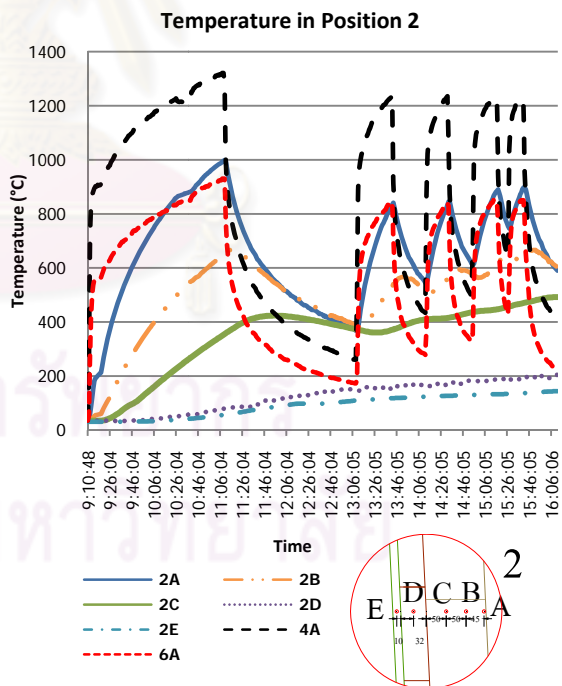
ในการทดลองการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กนั้น ได้ควบคุมการอุ่นให้ใกล้เคียงกับสภาพการทำงานโดยทั่วไปของโรงงาน กล่าวคือ ได้ทำการทดลองทั้งในถังถ่ายน้ำเหล็กแบบเย็นและแบบร้อนรวม 5 ครั้งโดยการทดลองจะเป็นไปตามแนวทางการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กจริงของโรงงานตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กแบบเย็นโดยตั้งอุณหภูมิไอเสียไว้ที่ 1,000°C หรืออุ่นถึงประมาณ 2 ชั่วโมงโดยติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูลไว้ทุกๆ 60 วินาที ทำการจดมิเตอร์น้ำมัน หลังจากนั้นทำการหยุดหัวเผาแล้วทำการพักถังทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง
2. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กแบบอุ่นโดยตั้งอุณหภูมิไอเสียไว้ที่ 850°C ซึ่งจะมีการบันทึกข้อมูลทุกๆ 60 วินาทีและจดมิเตอร์น้ำมัน หลังจากนั้นทำการหยุดหัวเผาแล้วพักถังทิ้งไว้ 30 นาที
3. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กแบบร้อนโดยทดลองซ้ำแบบเดียวกันกับข้อ 2 ให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วพักถังทิ้ง

ไว้ 20 นาที ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งจนได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วพักถัง 10 นาทีจึงทำการทดลองซ้ำครั้งสุดท้าย



รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในผนังข้างและผนังส่วนกันของถังถ่ายน้ำเหล็ก

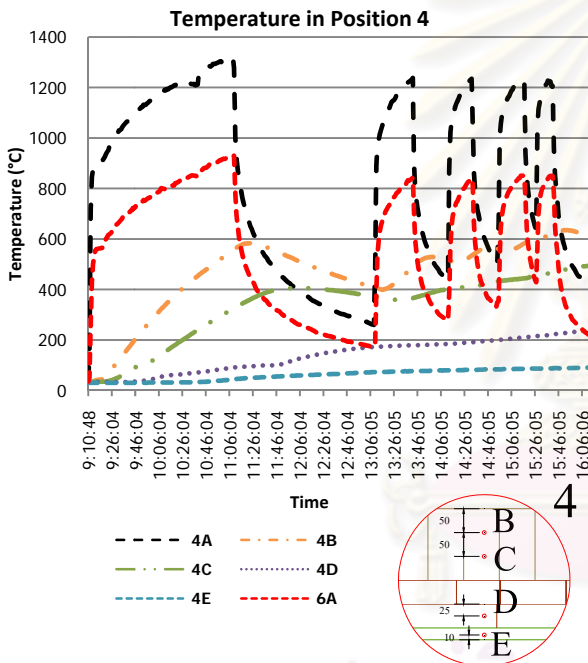


รูปที่ 6 อุณหภูมิ ณ จุดต่างๆภายในผนังถังถ่ายน้ำเหล็กที่ตำแหน่งที่ 2 เทียบกับอุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยทิ้งออกทางปล่อง(6A) และอุณหภูมิของแก๊สร้อนภายในถังถ่ายน้ำเหล็ก(4A)

5. ผลการทดลอง

ผลการทดลองทั้งหมดถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 6 และ 7 ซึ่งครอบคลุมทั้งการอุ่นถึงจากสภาวะเย็น(การอุ่นในในตอนเริ่มต้น)และสภาวะร้อน(การอุ่นในรอบต่อไป) ผลการทดลองดังกล่าว สามารถจัดแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ

1. อุณหภูมิของไอเสียที่ปล่อยทิ้งทางปล่อง(6A) ซึ่งจะใช้ในการประเมินการสูญเสียความร้อนในไอเสียและศักยภาพการประหยัดพลังงานจากการนำหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทิฟมาใช้
2. อุณหภูมิจุดต่างๆภายในผนังที่ตำแหน่ง 2 และ 4 ใช้สำหรับคำนวณความร้อนสะสมในผนังถึงถ่ายน้ำเหล็ก เพื่อเป็นตัวบ่งชี้สภาวะทางความร้อนของถึงถ่ายน้ำเหล็ก
3. อุณหภูมิของผนังที่จุด 2B และ 2C ซึ่งจะใช้พิจารณาความเหมาะสมในการนำมาเป็นจุดควบคุมการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก

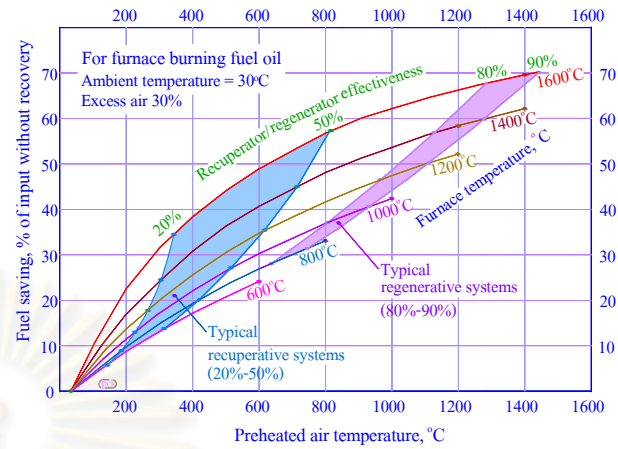


รูปที่ 7 อุณหภูมิ ณ จุดต่างๆภายในผนังถึงถ่ายน้ำเหล็กที่ตำแหน่งที่ 4 เทียบกับอุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยออกทางปล่อง(6A) และอุณหภูมิของแก๊สร้อนภายในถึงถ่ายน้ำเหล็ก(4A)

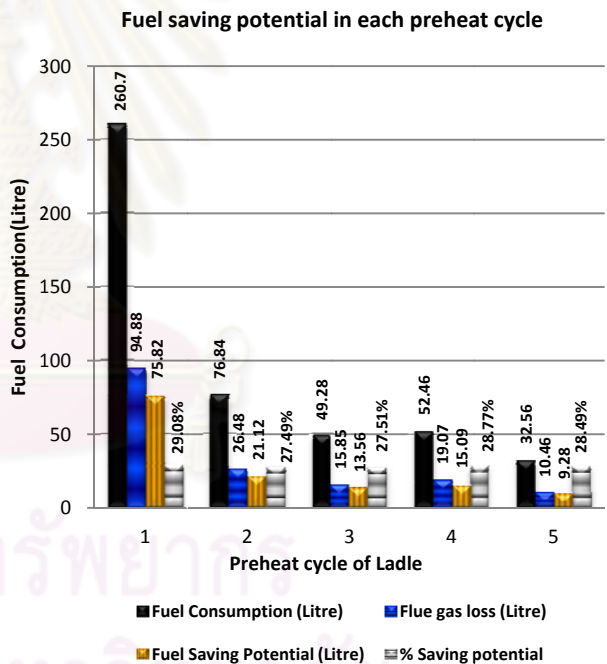
จากค่าอุณหภูมิไอเสียปล่อยทิ้งทางปล่อง(6A) 1) เราได้ทำการคำนวณการสูญเสียพลังงานในไอเสียในแต่ละรอบของการอุ่น โดยใช้กราฟรูปที่ 2 2) ทำการคำนวณศักยภาพของการประหยัดพลังงานในการนำหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทิฟมาใช้แทนหัวเผาธรรมดา โดยใช้กราฟในรูปที่ 8 ซึ่งในส่วนนี้กำหนดให้ประสิทธิภาพของระบบหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทิฟมีค่าเท่ากับ 80% ซึ่งทั่วไปมีค่าระหว่าง 80-90%

ผลการคำนวณในส่วนนี้ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่า ศักยภาพการประหยัดพลังงานสำหรับการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในสภาวะต่างๆมีค่าระหว่าง 27.49-29.08% คณะผู้วิจัยเชื่อว่า ศักยภาพจริง

น่าจะสูงกว่านี้ เนื่องจากในปัจจุบันมีไอเสียรั่วไหลออกไปทางช่องว่างระหว่างปากถึงถ่ายน้ำเหล็กกับฝาปิด ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้ที่ปล่องทางออกต่ำกว่าที่เป็นจริง



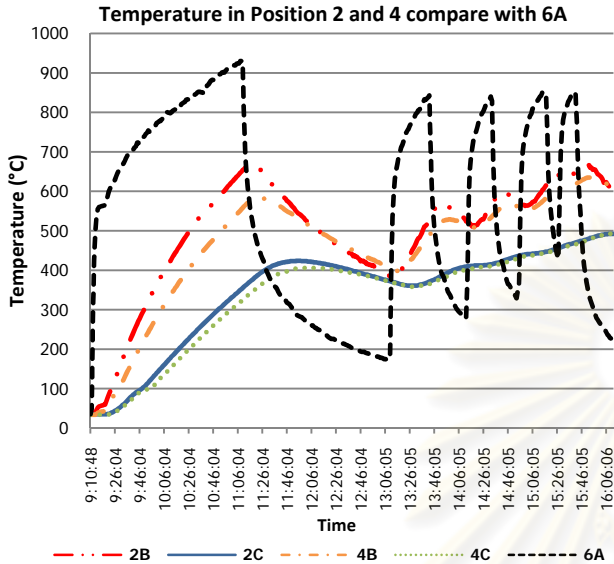
รูปที่ 8 ศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานจากการติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทิฟใช้แทนหัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน [4]



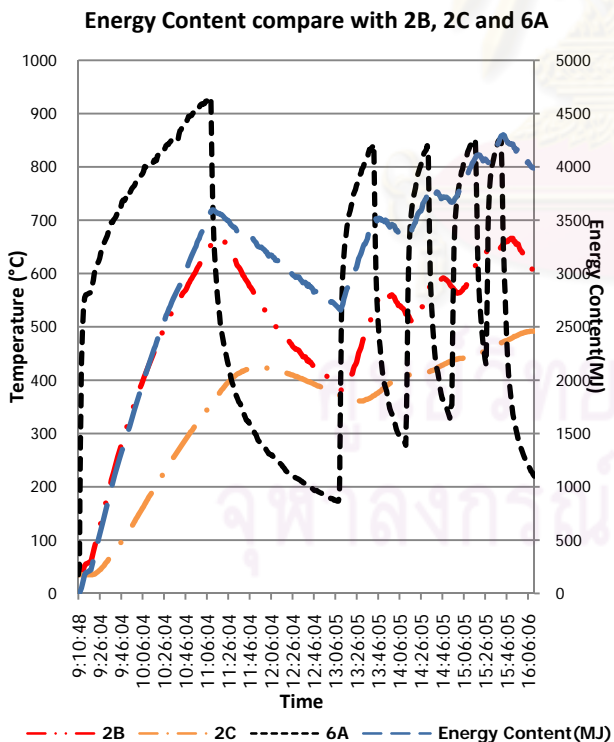
รูปที่ 9 กราฟแสดงข้อมูลการใช้น้ำมัน การสูญเสียพลังงานในไอเสีย ศักยภาพการประหยัดพลังงานในการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบ ทั้งการอุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กแบบเย็น(หมายเลข 1) และแบบร้อน (หมายเลข 2-5)

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิในผนังที่ตำแหน่ง 2 และ 4 ณ จุดที่สมนัยกัน ซึ่งจะเห็นว่า มีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นเราจะพิจารณาใช้อุณหภูมิในผนังที่ตำแหน่ง 2 เป็นตัวแทนอุณหภูมิผนังเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมการอุ่น

เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนขึ้น จึงได้พล็อตกราฟระหว่างอุณหภูมิไอเสีย (6A) อุณหภูมิจุด 2B และ 2C และ พลังงานความร้อนสะสมในผนังถึง ถ้วยน้ำเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 11 จากรูปจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของจุด 2B และ 2C มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับพลังงาน



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในผนังของถังก่อถ้วยน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 2 และ 4 กับอุณหภูมิของไอเสียในการอุ่นถังก่อถ้วยน้ำเหล็กในแต่ละรอบ



รูปที่ 11 อุณหภูมิของไอเสียที่ปล่อยออกทางปล่อง อุณหภูมิที่จุด 2B และ 2C ในผนังของถังก่อถ้วยน้ำเหล็ก และพลังงานความร้อนสะสม สำหรับการอุ่นถังก่อถ้วยน้ำเหล็กในแต่ละรอบ

ความร้อนที่สะสมภายในถึงในแต่ละรอบการทำงานของถังก่อถ้วยน้ำเหล็ก ตีกว่าอุณหภูมิของไอเสีย(6A) ดังนั้น อุณหภูมิผนังถังก่อถ้วยน้ำเหล็กที่ ตำแหน่ง 2 จึงเป็นตัวบ่งชี้สภาวะทางความร้อนที่มีความเหมาะสม สำหรับใช้เป็นตัวแปรควบคุมการอุ่นถังก่อถ้วยน้ำเหล็กได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม จะมีการพิจารณาในประเด็นนี้อีกครั้งหนึ่ง เมื่อมีการทดลองกับการ อุ่นถังก่อถ้วยน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบเจเนอเรทิฟแล้ว

6. ข้อสรุปของงานศึกษาวิจัย

จากการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นถังก่อถ้วยน้ำเหล็กในรูปแบบการใช้งานจริงในปัจจุบันในช่วงของอุณหภูมิไอเสียประมาณ 900-1,000°C พบว่ามีการสูญเสียจากไอเสียประมาณ 32-36% และในส่วนของ การศึกษาการนำเอาหัวเผาเจเนอเรทิฟมาใช้ในการอุ่นถังก่อถ้วยน้ำ เหล็กนั้นจะสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้ 27-29%

จากการวิเคราะห์จากข้อมูลที่ทำการทดลอง เปรียบเทียบอุณหภูมิ ที่ตำแหน่ง 2B, 2C, 4B และ 4C กับอุณหภูมิไอเสียแล้วนั้น พบว่า แนวโน้มของอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 2 และ 4 มีความใกล้เคียงและมี แนวโน้มในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาสภาวะทางความร้อนของผนัง ถังก่อถ้วยน้ำเหล็กประกอบอุณหภูมิในผนังที่จุด 2B, 2C และอุณหภูมิของ ไอเสียที่ปล่อยทิ้ง พบว่า อุณหภูมิจุด 2B และ 2C เป็นตัวชี้วัดที่ เหมาะสมในการควบคุมการอุ่นถังก่อถ้วยน้ำเหล็กได้ดีกว่าอุณหภูมิไอเสีย ที่ปล่อยทิ้งทางปล่องที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยและ บริษัท สยามสตีลซินดิเกท จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ อุปกรณ์ และบุคลากรให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Zimmer, A., Lima, A.N.C., Trommer, R.M. , Braganca, S.R. and Bergmann C.P., "Heat Transfer in Steelmaking Process" Journal of Iron and Steel Research, International, 2008, 15(3),11-14, 60
- Worrell, E., Martin, N., and Price, L., "Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector" Environment Energy Technologies Division, 1999
- Hasegawa, T., Kishimoto S. and Suzukawa Y., "Environmentally-compatible Regenerative Combustion Heating System" Nippon Furnace Kogyo, Ltd., Yokohama, Japan and NKK Corporation, 1-1-2, Tokyo 100-8202 Japan
- พงษ์ธร จริญญากรณ์, "การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและ อุปกรณ์อุ่น Ladle โดยการใช้ Regenerative burners" สถาบัน เหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2008 (รายงานฉบับร่าง)

5. สมศักดิ์ คงโชติ, "การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในถังรับน้ำเหล็กในอุตสาหกรรมหลอมโลหะ", 1993, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
6. "ข้อมูลเทคโนโลยีเชิงลึกหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ", โครงการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจ, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักรวาล จรูญสารทูล เกิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 ระหว่างการศึกษาได้รับทุนผู้ช่วยสอนของวิศวกรรมนานาชาติ เข้าร่วมโครงการของสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้เข้าทำงานกับทางสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย