

การศึกษาการลดการสูญเสียพลังงานจากการสะสมความร้อนในผนังเตาเผาเหล็ก  
โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์



นาย บรรยเวชก์ สงฤทธิ

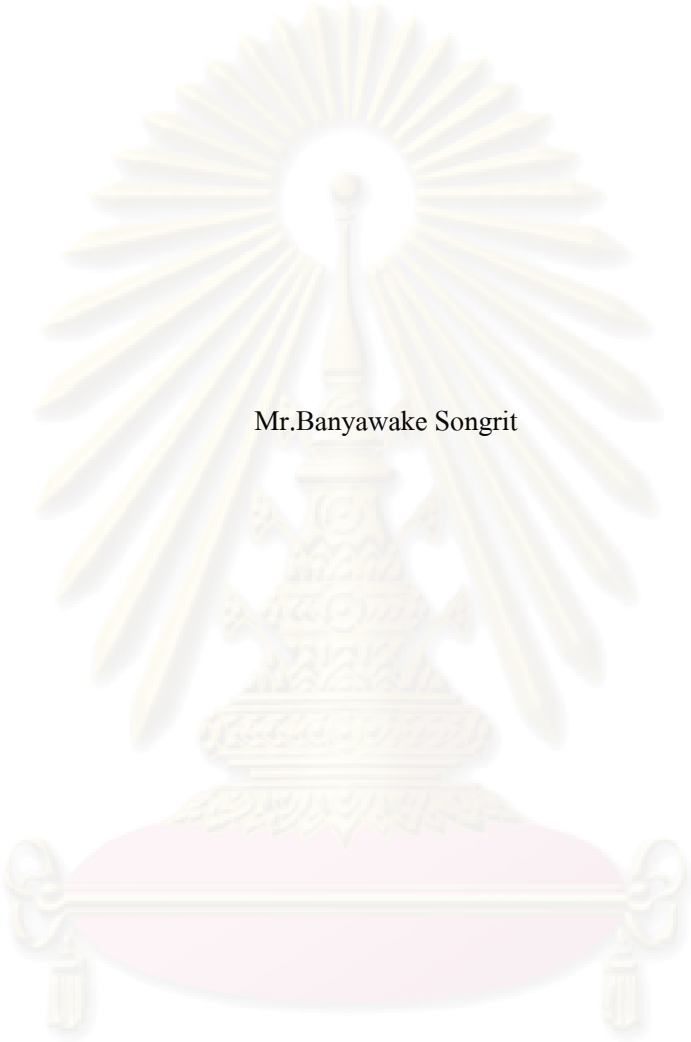
ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY ON ENERGY SAVING OF FURNACE WALL STORAGE LOSS  
BY USING CERAMIC FIBER



Mr.Banyawake Songrit

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการลดการสูญเสียพลังงานจากการสะสมความร้อน  
ในผนังเตาเผาเหล็ก โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์

โดย

นายบรรยเวกษ์ก์ สงฤทธิ์

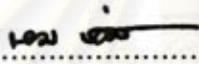
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

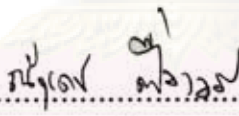
อาจารย์ ดร. ฉัฐเดช เพ็องวรวงศ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จริญญากรณ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.ฉัฐเดช เพ็องวรวงศ์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตดิน แดงเที่ยง)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. วีรินทร์ หวังจิรานันท์)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรยายพิเศษ : การศึกษาการลดการสูญเสียพลังงานจากการสะสมความร้อนในผนังเตาเผาเหล็กโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ (STUDY ON ENERGY SAVING OF FURNACE WALL STORAGE LOSS BY USING CERAMIC FIBER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.ฉัฐเดช เพ็ญจรวงศ์, 271 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลดความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กที่ทำงานไม่ต่อเนื่องโดยใช้ข้อมูลของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่างจำนวน 4 โรงงาน ที่มีลักษณะการทำงานและขนาดกำลังการผลิตแตกต่างกัน ซึ่งเริ่มจากการศึกษาสมดุลพลังงานและความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างฉนวน (total heat loss) เนื่องจากการทำงานที่ไม่ต่อเนื่อง และหาแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างฉนวน รวมถึงประเมินผลการประหยัดและระยะเวลาคืนทุน

จากการวิเคราะห์ พบว่า ปริมาณความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กที่มีการทำงานไม่ต่อเนื่อง ประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ คือ ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวน (wall heat loss) และความร้อนสูญเสียที่สะสมในโครงสร้างฉนวน (wall storage loss) โดยความร้อนสูญเสียที่สะสมในโครงสร้างฉนวนนั้น เกิดจากช่วงการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องของเตาเผาเหล็ก ส่งผลให้เตาเผาสูญเสียพลังงานความร้อนมากกว่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในกรณีการทำงานแบบต่อเนื่อง งานวิจัยชิ้นนี้จึงหาแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเพื่อลดความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ โดยการใช้เซรามิกไฟเบอร์ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำแทนการใช้วัสดุฉนวนที่มีความหนาแน่นสูงในผนังชั้นในสุด เพื่อลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนเป็นหลัก ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนได้อีกด้วย จากผลการศึกษาพบว่า สามารถลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างได้ประมาณ 10-85% และสามารถลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างได้ประมาณ 15-60% โดยคิดเป็น 1-6% ของค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงทั้งหมดของเตาเผาเหล็ก และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 1-4 ปี ขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานและโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....บรรณกมล ฉัฐเดช.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....อ.ดร.ฉัฐเดช เพ็ญจรวงศ์.....  
ปีการศึกษา.....2551.....

## 4970782521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: REHEATING FURNACE / CERAMIC FIBER

BANYAWAKE SONGRIT : STUDY ON ENERGY SAVING OF FURNACE WALL STORAGE LOSS BY USING CERAMIC FIBER.

THESIS ADVISOR: NATTADATE FUANGWORAWONG, Ph.D. ,271 pp.

This thesis focuses on the study of energy conservation for discontinuously operated reheating furnaces by improving refractory lining of reheating furnace. Many parameters of four reheating furnaces are obtained to analyze energy balance and total heat loss of the furnaces. It is found that the total heat loss of refractory lining in discontinuously operated reheating furnaces might be divided into two parts, wall heat loss and wall storage loss. The wall storage loss occurs from the discontinued operation of the reheating furnaces. This study proposed the reduction of the heat storage loss in refractory lining by using the low thermal mass ceramic fiber. The ceramic fiber is placed at the hot face of the lining in the furnaces to reduce both wall heat loss and wall storage loss. The wall storage loss is reduced about 10-85% and the wall heat loss is reduced about 15-60%. From this study, It can concluded that the energy using in discontinuously operated reheating furnaces can be reduced about 1-6% of the total energy by improving refractory lining of reheating furnace. The pay back period of the improvement is about 1-4 years depending on the furnace operating and furnace lining.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department:..... Mechanical Engineering ..... Student's Signature: *นิรันดร์ นันท*.....

Field of study:..... Mechanical Engineering ..... Advisor's Signature: *นัตตาดะ ฟุ้งวรวงศ์*.....

Academic year:..... 2008.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลและหน่วยงานดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ คุณหิน นววงศ์ คุณจิตติชัย จันทรินทร์ และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่มีโครงการสนับสนุนการวิจัยในโรงงานเหล็กและเหล็กกล้า และให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย รวมทั้งบริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) บริษัท อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) บริษัท แอล.พี.เอ็น. เพลาทมิล จำกัด(มหาชน) และบริษัท ที.ที.เอส. สตีล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ทำการวิจัยจนโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ณัฐเดช เพ็ญวรวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ผศ.มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล ผศ.ดร.จิตติน แดงเที่ยง และดร.วีรินทร์ หวังจิรานันต์ และอาจารย์ ดร. ธนากร จงวิลาสลักษณ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้ต่างๆ และช่วยแนะนำเอกสารและเครื่องมือทดลองที่เป็นประโยชน์อย่างสูงในการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณอภิสิทธิ์ บุญเกิด คุณแมนพงศ์ ตั้งตระกูล และ คุณตรงจิต ชาวะหา ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในระหว่างทำการวิจัยนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยทั้งในด้านค่าใช้จ่าย และกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	พ
<b>บทที่</b>	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	4
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
3.1 เตาเผาเหล็ก.....	7
3.2 ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์.....	9
3.3 การถ่ายเทความร้อน.....	13
3.4 สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก และ .....	15
3.5 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันเตา.....	27
3.6 การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้.....	29
3.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนเตาเผา.....	31
3.8 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	31
4 การดำเนินการวิจัย.....	34
4.1 รายละเอียด และวิธีการตรวจวัดข้อมูลเตาเผา.....	34
4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียสะสมที่โครงสร้างฉนวนเตาเผา.....	35

บทที่	หน้า
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัด.....	36
5 การวิเคราะห์ก่อนการปรับปรุงฉนวนของเตาเผาเหล็ก.....	40
5.1 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง.....	40
5.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตาม โครงสร้างฉนวนปัจจุบัน ของโรงงานตัวอย่าง.....	52
5.3 การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่ โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของ โรงงานตัวอย่าง.....	52
5.4 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตาม โครงสร้างฉนวน ของเตาเผาเหล็ก.....	67
6 การวิเคราะห์หลังการปรับปรุงฉนวนของเตาเผาเหล็ก.....	69
6.1 การวิเคราะห์ความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์กับราคาเชื้อเพลิง และค่าการลงทุนในปัจจุบัน.....	70
6.2 การวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก ของโรงงานตัวอย่าง.....	73
6.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์หลังการปรับปรุง โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก.....	122
7 วิเคราะห์ สรุปและข้อเสนอแนะ.....	127
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	127
7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต.....	132
รายการอ้างอิง .....	133
ภาคผนวก .....	135
ภาคผนวก ก ข้อมูลเบื้องต้นและลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก ของโรงงานตัวอย่าง .....	136
ภาคผนวก ข ข้อมูลการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงาน.	140
ภาคผนวก ค ข้อมูลอุณหภูมิผิวของเตาเผาเหล็ก โดยใช้ thermocouple.....	170
ภาคผนวก ง โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง.....	192
ภาคผนวก จ ตัวอย่างการคำนวณ.....	197
ภาคผนวก ฉ การกระจายตัวของอุณหภูมิตาม โครงสร้างฉนวน ของโรงงานตัวอย่าง.....	208



บทที่	หน้า
ภาคผนวก ช ราคาณนวนเซรามิกไฟเบอร์.....	241
ภาคผนวก ซ บทความดีที่ตีพิมพ์ในการประชุมเชิงวิชาการ.....	244
บทความดีที่ตีพิมพ์ในการประชุมเชิงวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4.....	245
บทความดีที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6.....	252
บทความดีที่ตีพิมพ์ในการประชุมเสนอผลงาน วิจัยระดับบัณฑิตวิทยาลัยครั้งที่ 9.....	259
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	271



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างคุณสมบัติของเซรามิกไฟเบอร์แบบ felt.....	11
3.2 ตารางแสดงองค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย.....	28
3.3 ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำมันเตา.....	29
4.1 วิธีการเก็บข้อมูลของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง.....	34
5.1 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ.....	55
5.2 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ.....	56
5.3 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรม เหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ.....	58
5.4 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็ก กล้าไทยจำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ.....	59
5.5 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ.....	61
5.6 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ .....	62
5.7 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ.....	65
5.8 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ.แอล พี เอ็น เพทมิลจำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ.....	66
5.9 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายของอุณหภูมิตาม โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน) ช่วงอุ่นเตา ที่ได้จากการตรวจวัดและคำนวณ.....	68
6.1 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุง ด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	75
6.2 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง ด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	76

ตารางที่	หน้า
6.3 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	77
6.4 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	78
6.5 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุง	
ด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	79
6.6 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง	
ด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	80
6.7 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	81
6.8 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	82
6.9 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุง	
ด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	83
6.10 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง	
ด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	84
6.11 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	85
6.12 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	86

ตารางที่	หน้า
6.13 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุง ด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	87
6.14 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง ด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	88
6.15 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	89
6.16 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	90
6.17 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุง ด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	91
6.18 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง ด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	92
6.19 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	93
6.20 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	94
6.21 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุง ด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	95
6.22 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง ด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	96

ตารางที่	หน้า
6.23 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก	
บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	97
6.24 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก	
บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	98
6.25 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก	
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	99
6.26 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก	
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง	
ด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	100
6.27 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด	
กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	101
6.28 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก	
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	102
6.29 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก	
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	103
6.30 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก	
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง	
ด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	101
6.31 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด	
กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	105
6.32 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก	
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบัน	
กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	106
6.33 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก	
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	107
6.35 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด	
กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	109

ตารางที่	หน้า
6.36 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบัน กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	110
6.37 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุง ด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	111
6.38 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง ด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	112
6.39 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	113
6.40 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	114
6.41 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุง ด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	115
6.42 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง ด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	116
6.43 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	117
6.44 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	118
6.45 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุง ด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	119

ตารางที่	หน้า
6.46 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง ด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ .....	120
6.47 เปรียบเทียบสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	121
6.48 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน กับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ.....	122
6.49 สรุปผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการปรับปรุงโครงสร้างฉนวน ของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	124
6.50 สรุปผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	124
6.51 สรุปผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด.....	125
6.52 สรุปผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) .....	126
ข.1 ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	142
ข.2 ข้อมูลอุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน).....	143
ข.3 ข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	143
ข.4 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	143
ข.5 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากrecuperator และค่าอื่นๆ จาก flue gas analyzer ช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	144
ข.6 ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	144
ข.7 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน).....	145
ข.8 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	145
ข.9 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	145

ตารางที่	หน้า
ข.10 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากrecuperatorและค่าอื่นๆจาก flue gas analyzer ช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	146
ข.11 ข้อมูลอัตราการผลิตเหล็กช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	146
ข.12 ข้อมูลอุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	147
ข.13 ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	147
ข.14 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	147
ข.15 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	148
ข.16 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	148
ข.17 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator และ ค่าอื่นๆจาก flue gas analyzer ช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	149
ข.18 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	149
ข.19 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	150
ข.20 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ....	150
ข.21 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	151
ข.22 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator โดยข้อมูลจากโรงงานช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	151
ข.23 ข้อมูลอัตราผลิตเหล็กช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)...	152
ข.24 อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผาช่วงรีดเหล็ก). บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	152
ข.25 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน).....	152
ข.26 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	153
ข.27 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)....	153
ข.28 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	154



ตารางที่	หน้า
ข.29 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator โดยข้อมูลจากโรงงานช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	154
ข.30 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด.....	155
ข.31 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด.....	155
ข.32 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด.....	156
ข.33 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด...	156
ข.34 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator และค่าอื่นๆจาก flue gas analyzer ช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด.....	157
ข.35 อัตราการผลิตเหล็กช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด.....	157
ข.36 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด.....	158
ข.37 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด.....	158
ข.38 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด.....	159
ข.39 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด.....	159
ข.40 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator และค่าอื่นๆจา flue gas analyze ช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด.....	160
ข.41 ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงอุ่นบ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน).....	161
ข.42 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) .....	161
ข.43 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน).....	161
ข.44 ความดันของเตาช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน).....	162
ข.45 อุณหภูมิไอเสียและคุณสมบัติของไอเสียที่ออกจากเตาเผาช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) .....	163
ข.46 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาและผสมอากาศเย็นก่อนเข้า recuperator ช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน).....	163
ข.47 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator ช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) .....	164
ข.48 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) .....	165
ข.49 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน).....	165

ตารางที่	หน้า
ข.50 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน) .....	166
ข.51 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน).....	166
ข.52 ความดันของเตาอ่านได้ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน).....	167
ข.53 อุณหภูมิไอเสียและคุณสมบัติของไอเสียที่ออกจากเตาเผาช่วงรีด บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน) .....	167
ข.54 อุณหภูมิไอเสียออกจากเตาและผสมกับอากาศเย็นก่อนเข้า recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน).....	168
ข.55 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน) .....	168
ค.1 อุณหภูมิผิวผนังด้านแทนรีดเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	171
ค.2 อุณหภูมิผิวผนังด้านแทนรีดเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงอุ่นเตา.....	173
ค.3 อุณหภูมิผิวผนังด้านแทนรีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	174
ค.4 อุณหภูมิผิวผนังด้านแทนรีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	175
ค.5 อุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	176
ค.6 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	177
ค.7 อุณหภูมิผิวผนังด้านแทนรีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	178
ค.8 อุณหภูมิผิวผนังด้านรดยังเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	179
ค.9 อุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	180
ค.10 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	181

ตารางที่	หน้า
ค.11 อุณหภูมิผิวผนังด้านทิศเหนือ ด้านแท่นรีด เตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	182
ค.12 อุณหภูมิผิวผนังด้านทิศเหนือด้านรอยยิงเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	183
ค.13 อุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	184
ค.14 อุณหภูมิผิวผนังด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	185
ค.15 อุณหภูมิผิวผนังด้านรอยยิงเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	186
ค.16 อุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	187
ค.17 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	188
ค.18 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	189
ค.19 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) วัด โดยใช้ thermocouple ช่วงอุ่นเตา.....	190
ค.20 อุณหภูมิผิวผนังด้านทิศเหนือ (ด้านที่วาง slab) เตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) วัด โดยใช้ thermocouple ช่วงอุ่นเตา.....	191
จ.1 แสดงสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ.....	200
จ.2 แสดงสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสีย.....	203
ช.1 แสดงราคาเซรามิกไฟเบอร์แบบ felt.....	242
ช.2 แสดงราคาเซรามิกไฟเบอร์แบบ Module.....	242
ช.3 ช.3 แสดงราคาหมุดและตัวจับยึดหมุดในการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์.....	243

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเตาเผา.....	7
3.2 เตาเผาเหล็กแบบผลักคืบ (pusher type).....	8
3.3 เตาเผาเหล็กคานเคลื่อนที่ (walking beam).....	9
3.4 ตัวอย่างวิธีการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์แบบ Module.....	12
3.5 ตัวอย่างวิธีการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์แบบ veneering.....	13
3.6 ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด ( $C_{rad}$ ).....	22
3.7 กราฟการหาความหนาที่เหมาะสมของฉนวน.....	33
4.1 แผนผังการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนเตาเผา.....	36
4.2 Logger Communicator.....	37
4.3 Thermocouple probe.....	37
4.4 Thermocouple หัวแบบ contact และ immersion.....	37
4.5 Flue gas analyzer.....	38
4.6 Anemometer.....	38
4.7 Thermal imaging camera.....	39
5.1 แผนผังเชิงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) ช่วงรีดเหล็ก.....	41
5.2 แผนผังเชิงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) ช่วงอุ่นเตา.....	42
5.3 แผนผังเชิงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) ช่วงเร่งเตา.....	43
5.4 แผนผังเชิงกึ่งเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ช่วงรีดเหล็ก....	44
5.5 แผนผังเชิงกึ่งเตาเผาเหล็ก บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ช่วงเร่งเตา.....	45
5.6 แผนผังเชิงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ช่วงรีดเหล็ก.....	46
5.7 แผนผังเชิงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ช่วงเร่งเตา.....	47
5.8 แผนผังเชิงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ช่วงรีดเหล็ก.....	49
5.9 แผนผังเชิงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ช่วง อุ่นเตา.....	50
5.10 แผนผังเชิงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ช่วงเร่งเตา.....	51
5.11 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายของอุณหภูมิตาม โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ช่วงอุ่นเตา ที่ได้จากการตรวจวัดและคำนวณ.....	67
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเซรามิกไฟเบอร์กับค่าเชื้อเพลิง และค่าฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน).....	71

รูปที่	หน้า
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเซรามิกไฟเบอร์กับค่าเชื้อเพลิงและ ค่าฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทยจำกัด (มหาชน).....	71
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเซรามิกไฟเบอร์กับค่าเชื้อเพลิงและ ค่าฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด.....	72
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเซรามิกไฟเบอร์กับค่าเชื้อเพลิงและ ค่าฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ของ บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน).....	72
ข.1 ไดอะแกรมแสดงตำแหน่งการแบ่งโซนการตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) .....	162
ข.2 ไดอะแกรมค่าการตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวน ของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) ผนังด้านวาง slab ช่วงอุณหภูมิที่ระยะ 75, 100, 150, 200 และ 250 mm.....	169
ข.3 กราฟลักษณะกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) ผนังด้านวาง slab ช่วงอุณหภูมิ ที่ระยะ 75, 100, 150, 200 และ 250 mm.....	169
ค.1 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหน้ารีดเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงรีดเหล็ก.....	171
ค.2 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหน้ารีดเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงอุณหภูมิ.....	173
ค.3 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหน้ารีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	174
ค.4 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านรอยเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงรีดเหล็ก.....	175
ค.5 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	176
ค.6 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	177
ค.7 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหน้ารีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงเร่งเตา.....	178
ค.8 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านรอยเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงเร่งเตา.....	179

รูปที่	หน้า
ค.9 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก	
บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	180
ค.10 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก	
บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	181
ค.11 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านแท่นรีด เตาเผาเหล็ก	
บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	182
ค.12 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านรดยังเหล็กเตาเผาเหล็ก	
บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	183
ค.13 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านหลังเตาเผาเหล็ก	
บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	184
ค.14 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก	
บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	185
ค.15 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านรดยังเหล็กเตาเผาเหล็ก	
บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	186
ค.16 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านหลังเตาเผาเหล็ก	
บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา.....	187
ค.17 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านทิศใต้ (ด้านแท่นรีด)เตาเผาเหล็ก	
บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	188
ค.18 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านทิศเหนือ(ด้านที่วาง slab) เตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก.....	189
ค.19 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านทิศใต้ (ด้านแท่นรีด)เตาเผาเหล็ก	
บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงอุ่นเตา.....	190
ค.20 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านทิศเหนือ(ด้านที่วาง slab) เตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงอุ่นเตา.....	191
ง.1 หลังคาเตาของ Preheating Zoneบ.กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน).....	193
ง.2 หลังคาเตาของ Heating Zoneบ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน).....	193
ง.3 ผนังเตาด้านแท่นรีดและด้านรดยังเหล็กของ Preheating Zone บ.กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	193

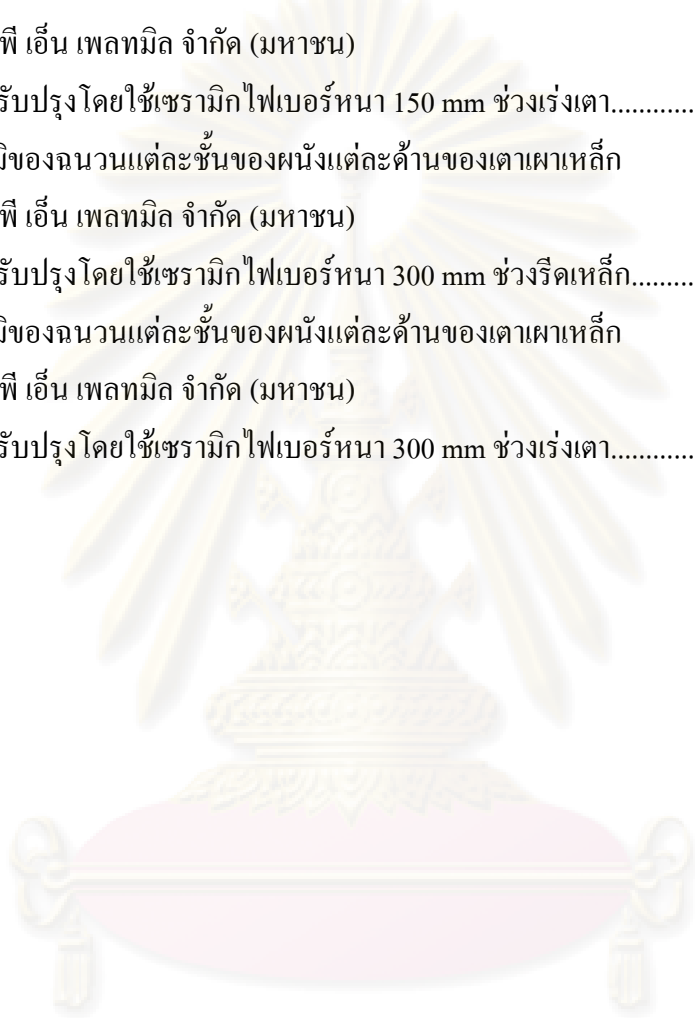
รูปที่	หน้า
ง.4 ผนังเตาด้านแทนรีดและด้านรดยิ่งเหล็กของ Heating Zone	
บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) .....	193
ง.5 ผนังเตาด้านหลัง บ.กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน).....	194
ง.6 ผนังเตาด้านหน้า บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน).....	194
ง.7 หลังคาเตา Heating Zone บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน).....	194
ง.8 หลังคาเตา Soaking Zone บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน).....	194
ง.9 ผนังด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็กของ Heating Zone	
บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	194
ง.10 ผนังด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็กของ Soaking Zone	
บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	194
ง.11 ผนังด้านหลัง บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) .....	195
ง.12 ผนังด้านหน้า บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน).....	195
ง.13 หลังคาเตา Heating Zone บ. ที ที เอส สตีล จำกัด .....	195
ง.14 หลังคาเตา Soaking Zone บ. ที ที เอส สตีล จำกัด.....	195
ง.15 ผนังด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็กของ Heating Zone บ. ที ที เอส สตีล จำกัด.....	195
ง.16 ผนังด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็กของ Soaking Zone บ. ที ที เอส สตีล จำกัด.....	195
ง.17 ผนังด้านหลัง บ. ที ที เอส สตีล จำกัด.....	196
ง.18 ผนังด้านหน้าบ. ที ที เอส สตีล จำกัด.....	196
ง.19 หลังคาเตา Heating และ Soaking Zone บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) .....	196
ง.20 ผนังเตาด้านทิศเหนือและด้านทิศใต้ Heating Zone และ Soaking Zone	
บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) .....	196
ง.21 ผนังเตาด้านเหล็กเข้าและด้านเหล็กออกบ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) .....	196
จ.1 ตัวอย่างโครงสร้างของฉนวนหลังคาของ heating zone.....	206
ฉ.1 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก	
บ.กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงรีดเหล็ก.....	209
ฉ.2 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก	
บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงเร่งเตา.....	210
ฉ.3 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก	
บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงรีดเหล็ก.....	211







รูปที่	หน้า
น.29 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เฟลทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 150 mm ช่วงรีดเหล็ก.....	237
น.30 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เฟลทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 150 mm ช่วงเร่งเตา.....	238
น.31 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เฟลทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงรีดเหล็ก.....	239
น.32 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เฟลทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงเร่งเตา.....	240



### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$a_{ih}$	อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อหนึ่งโมลของเชื้อเพลิง	$\text{kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_{\text{fuel}}$
$A$	พื้นที่ถ่ายเทความร้อน	$\text{m}^2$
$A_o$	พื้นที่ของช่องเปิด	$\text{m}^2$
$AF_{actual}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ	$\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
$AF_{stoic}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี	$\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
$\bar{c}_{p,CO_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	$\text{kJ}/\text{kmol}$ .
$\bar{c}_{p,H_2O}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	$\text{kJ}/\text{kmol}$ .
$\bar{c}_{p,N_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน	$\text{kJ}/\text{kmol}$ .
$\bar{c}_{p,O_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน	$\text{kJ}/\text{kmol}$ .
$\bar{c}_{p,SO_2}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	$\text{kJ}/\text{kmol}$ .
$C_{p,a}$	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	$\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
$C_{p,f}$	ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง	$\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
$C_{p,i}$	ค่าความร้อนจำเพาะของฉนวนแต่ละชนิด	$\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
$C_{p,s}$	ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก	$\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
$C_{p,w}$	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ	$\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
$C_{rad}$	ตัวคูณการแผ่รังสีความร้อน	-
$C_{rad,black}$	การแผ่รังสีจากวัตถุดำ	$\text{kcal}/\text{cm}^2/\text{hr}$
$G$	ปริมาณก๊าซเสียจริง	$\text{Nm}^3/\text{kg}$
$h_m$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$
$k$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	$\text{W}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$
$l_i$	ความหนาแน่นของฉนวนแต่ละชนิด	$\text{m}$
$LHV$	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	$\text{kcal}/\text{L}$
$m_{air}$	อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เตาเผา	$\text{kg}/\text{s}$
$\dot{m}_{N_2,air}$	อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	$\text{kg}/\text{s}$
$\dot{m}_{O_2,air}$	อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	$\text{kg}/\text{s}$
$\dot{m}_{CO_2,flue}$	อัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในไอเสีย	$\text{kg}/\text{s}$
$\dot{m}_{H_2O,flue}$	ไหลของไอน้ำภายในไอเสีย	
$\dot{m}_{N_2,flue}$	อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนภายในไอเสีย	$\text{kg}/\text{s}$

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\dot{m}_{O_2, flue}$	อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนภายในไอเสีย	kg/s
$\dot{m}_{SO_2, flue}$	อัตราไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายในไอเสีย	kg/s
$\dot{m}_{fuel}$	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	kg/s
$\dot{m}_{steel}$	อัตราการผลิตเหล็ก	kg/hr
$\dot{m}_{water}$	อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่เตาเผา	L/hr
$Nu_L$	ค่า Nusselt number	-
Pr	ค่า Prandtl number	-
P	ความดัน	mmH <sub>2</sub> O
$Q_{cond}$	อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำ	Mcal/hr
$Q_{conv}$	อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพา	Mcal/hr
$Q_{rad}$	อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี	Mcal/hr
$Q_{in1}$	ความร้อนจากเชื้อเพลิง	Mcal/hr
$Q_{in2}$	ความร้อนสัมผัสของอากาศ	Mcal/hr
$Q_{in3}$	ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	Mcal/hr
$Q_{in4}$	ความร้อนจากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก	Mcal/hr
$Q_{out1}$	ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr
$Q_{out2}$	ความร้อนสูญเสียสเกล	Mcal/hr
$Q_{out3}$	ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย	Mcal/hr
$Q_{out4}$	ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี	Mcal/hr
$Q_{out5}$	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา	Mcal/hr
$Q_{out6}$	ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น	Mcal/hr
$Q_{out7}$	ความร้อนสูญเสียสะสมที่เหล็ก	Mcal/hr
$Q_{out8}$	ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน	Mcal
$Q_{out9}$	ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal
$Ra_L$	ค่า Rayleigh number	-
T	อุณหภูมิ	<sup>0</sup> C
$T_{air}$	อุณหภูมิของอากาศ	<sup>0</sup> C
$T_{fuel}$	อุณหภูมิของเชื้อเพลิง	<sup>0</sup> C
$T_g$	อุณหภูมิของก๊าซเสีย	<sup>0</sup> C
$T_i$	อุณหภูมิระหว่างผิวของฉนวนแต่ละชนิด	<sup>0</sup> C

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$T_o$	อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา	$^{\circ}\text{C}$
$T_s$	อุณหภูมิของพื้นผิว	$^{\circ}\text{C}$
$T'_{steel}$	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเหล็ก	$^{\circ}\text{C/hr}$
$T_{sur}$	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	$^{\circ}\text{C}$
$T_{w,i}$	อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้า	$^{\circ}\text{C}$
$T_{w,o}$	อุณหภูมิของน้ำที่ไหลออก	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\infty}$	อุณหภูมิของของไหล	$^{\circ}\text{C}$
$\rho_{air}$	ความหนาแน่นของอากาศ	$\text{kg/m}^3$
$\rho_f$	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	$\text{kg/L}$
$\rho_i$	ความหนาแน่นของฉนวนแต่ละชนิด	$\text{kg/m}^3$
$\varepsilon$	Emissivity ของผนังเตาเผา	-
$\sigma$	ค่าคงที่เตฟาน-โบลต์มานน์ ( $5.64 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )	-
$\alpha$	การแพร่กระจายทางความร้อน	$\text{m}^2/\text{s}$
$\beta$	ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงปริมาตร	$\text{K}^{-1}$
$\lambda$	ตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน	-
$\nu$	ค่า Kinematic viscosity	$\text{m}^2/\text{s}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ อุตสาหกรรมหนึ่งของประเทศไทย เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตจำนวนมาก อุปกรณ์ที่มีความสำคัญและเป็นอุปกรณ์หลักในกระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า คือ เตาเผาเหล็ก โดยจะให้พลังงานความร้อนแก่เหล็กทำให้เหล็กร้อนเพื่อง่ายต่อการรีดหรือขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น โดยจากผลการศึกษาของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้รายงานการใช้พลังงานความร้อน ต่อตันผลิตภัณฑ์ของเตาเผาเหล็ก [1] ในกระบวนการผลิตเหล็กชนิดต่างๆ ระหว่างปี 2542-2547 โดยข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการใช้พลังงานเฉลี่ยของประเทศไทยระหว่างปี 2542-2547 ของอุตสาหกรรมผลิตเหล็กชนิดต่างๆ และข้อมูลการใช้พลังงานที่ดีที่สุดของต่างประเทศแสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานเฉลี่ยของเตาเผาเหล็กในประเทศไทยมีค่าอยู่ระหว่าง 1,400 – 1,700 MJ/ตันเหล็ก ในขณะที่พลังงานเฉลี่ยของเตาเผาเหล็กในประเทศญี่ปุ่นมีค่าอยู่ที่ 1,174 MJ/ตันเหล็ก [2] โดยจากการศึกษา พบว่าสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กที่ใช้ในประเทศไทยมีค่าสูงกว่าการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กมาตรฐานอื่นๆ คือ การทำงานของเตาเผาเหล็กที่ไม่ต่อเนื่องในประเทศไทย โดยเตาเผาเหล็กจะต้องรักษาอุณหภูมิไว้เพื่อรอจ่ายเหล็กเข้าแท่นรีด ในช่วงที่มีค่าไฟฟ้าสูง สำหรับประเทศไทยคือ ช่วง 18.30-21.30 น. ของทุกวัน สำหรับการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOD (Time of Day Rate) และ ช่วง 09.00-22.00 น. ของวันจันทร์ - ศุกร์ สำหรับการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOU (Time of Use Rate) หรือช่วงหยุดเตาเมื่อมีปัญหาในการรีดเหล็กทั้งที่ได้วางแผนหยุดเพื่อซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ และไม่ได้วางแผนหยุด

การทำงานที่ไม่ต่อเนื่องของเตาเผาเหล็กนี้ ส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานในโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กในรูปความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน(heat storage) โดยจากการศึกษาพบว่า การลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนนี้ ทำได้โดยการใช้วัสดุฉนวนที่มีค่าความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนต่ำ สามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูง ซึ่งฉนวนเซรามิกไฟเบอร์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีในด้านนี้ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการทำการศึกษาวิจัยออกแบบ การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กโดยการนำฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มาใช้

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยจะทำการศึกษา วิจัยออกแบบ ลักษณะของเตาเผาเหล็กที่มีการทำงานแบบไม่เนื่อง 4 บริษัท ซึ่งมีเงื่อนไขการทำงานที่ต่างกัน คือ ทำงานตามการคิดระบบไฟฟ้าแบบ TOD, TOU ที่มีขนาดกำลังผลิตแตกต่างกัน และเตาเผาเหล็กที่หยุดเตาเมื่อมีปัญหาในการรีดเหล็กหรือซ่อมแซมชิ้นส่วนต่างๆ ประกอบกับทางสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยมีโครงการสนับสนุนการวิจัยใน โรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก จึงเป็นที่มาของการทำการศึกษาวินิจฉัยออกแบบการปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กนี้ ซึ่งในการวิจัยนี้ถ้าทำอย่างมีระบบก็จะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเหล็ก และลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมเหล็กลงได้อีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาลักษณะการสูญเสียความร้อนจาก โครงสร้างของเตาเผาเหล็ก และวิธีการลดความร้อนสูญเสียจาก โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก
2. ออกแบบ โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยใช้ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่มีความเหมาะสม เพื่อใช้ในการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงในเตาเผาเหล็กตามสภาพการใช้งานของเตาเผาเหล็ก

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก และการสูญเสียความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก รวมทั้งวิธีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตเหล็กของโรงงานที่มีการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOD (Time of Day Rate), โรงงานที่มีการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOU (Time of Use Rate) ที่มีขนาดกำลังการผลิตแตกต่างกัน และโรงงานที่ทำงานต่อเนื่องแต่จะหยุดเพื่อเตาเผาเหล็กเพื่อซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 4 โรงงาน โดยเน้นที่การปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนเตาเผา
2. การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ โดยทิศทางการถ่ายเทความร้อนตั้งฉากกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อน
3. กำหนดและออกแบบ โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของโรงงานให้เหมาะสมกับราคาน้ำมันเชื้อเพลิง (น้ำมันเตา C ราคา 20 บาทต่อลิตร), ราคาวัสดุ และความหนาของฉนวนทนไฟ

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การทำวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนก่อนทำการออกแบบโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก
  - 1.1 ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาและการออกแบบโครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็ก
  - 1.2 ศึกษาลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก
  - 1.3 ทำการวัดค่าข้อมูลที่ต้องการใช้ในการออกแบบโครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็ก
2. ขั้นตอนการออกแบบและคำนวณ
  - 2.1 ทำการศึกษาสมมูลพลังงานของเตาเผาเหล็ก
  - 2.2 ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นฉนวน โครงสร้างเตาเผาเหล็ก
  - 2.3 ทำการออกแบบโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก
  - 2.4 ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนภายในโครงสร้างของฉนวนที่ออกแบบ
  - 2.5 ศึกษาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของ โครงสร้างที่ออกแบบ
3. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
4. รวบรวมข้อมูล และจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็กและการสูญเสียความร้อนของเตาเผาเหล็ก รวมทั้งวิธีการที่ใช้ในการลดการสูญเสียและปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็กให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
2. ทราบถึงวิธีการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงในเตาเผาเหล็ก โดยการลดความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก
3. สามารถนำผลการออกแบบและความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจในการปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กได้
4. สามารถนำผลไปใช้ได้กับโรงงานเหล็กหรือโรงงานอื่นๆที่จะปรับปรุงโครงสร้างฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ได้



## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

Bhattacharya, A.K. และคณะ [3] ทำการทดลองศึกษาการนำฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มาใช้กับเตาเผาในอุตสาหกรรมเหล็ก โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ที่มีส่วนผสมของ อะลูมินาซิลิเกต อะลูมินาซิโคเนีย ซึ่งทำให้ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงได้ถึง 1,400-1,600 °C โดยติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ด้วยการปะหรือเคลือบที่ผนังเตาเผา (venezing) และพิจารณาถึงการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง ได้ข้อสรุปว่า สามารถประหยัดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงได้ 5-25 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งการใช้เซรามิกไฟเบอร์ยังทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบาและลดระยะเวลาในการเพิ่มและลดอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการผลิตลง

David hamling [4] ได้ศึกษาและวิเคราะห์การนำฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มาใช้เป็นฉนวนชั้นในสุดของเตาเผาที่มีการทำงานแบบเดินและหยุดสลับกันตามช่วงเวลา โดยเตาเผาที่ศึกษามีทั้งที่ใช้น้ำมันเตาเป็นพลังงานเชื้อเพลิง และเตาเผาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเชื้อเพลิง พบว่าช่วงของระยะเวลาในการเพิ่มและลดอุณหภูมิภายในเตาเผาลดลง ความร้อนสูญเสียของเตาเผาลดลง การใช้พลังงานในกระบวนการผลิตลดลง ปัจจัยในการพิจารณาเลือกเซรามิกไฟเบอร์ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของเซรามิกไฟเบอร์ อุณหภูมิใช้งานภายในเตาเผา ระยะเวลาการเพิ่มลดของอุณหภูมิ และขนาดของเตาเผาเหล็ก

Molloy, T.J. [5] ได้ศึกษาและทดลองปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กแบบคานเคลื่อนที่ (walking beam) ซึ่งมีอุณหภูมิใช้งานภายในเตาเผาเหล็กที่ 1,350 °C ชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นน้ำมันเตา C โดยใน 1 สัปดาห์มีการเดินเตาเผาเหล็กเป็นระยะเวลา 6 วัน และหยุดเดินเตาเผาเหล็ก 1 วัน วิธีการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็กทำโดยวิธีการติดตั้งโครงสร้างแบบปะหรือเคลือบผนังเตาเผา (venezing) โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ที่มีความหนา 50 มิลลิเมตร ซึ่งจากการศึกษาและทดลองพบว่าความร้อนสูญเสียรวมจากโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กลดลง ช่วงเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิในเตาเผาเหล็กในกระบวนการผลิตลดลง 3 ชั่วโมง การใช้พลังงานเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตลดลง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่หลังการใช้งานผ่านไป 12 เดือนเซรามิกไฟเบอร์ก็จะเกิดการหดตัวและมีสเกลยึดติดบนเซรามิกไฟเบอร์ สำหรับการลงทุนในการปรับปรุงโครงสร้างโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์เมื่อเปรียบเทียบกับ การประหยัดพลังงานที่เพิ่มขึ้นนั้นจะพบว่าจะมีระยะเวลาคืนทุน 9 เดือน

Ou, J.J., Ho, T.Y. [6] ได้ทดลองใช้เซรามิกไฟเบอร์เป็นฉนวนของผนังด้านข้างและหลังคาของเตาเผาเหล็ก โดยใช้การปะหรือเคลือบที่ผนังเตาเผาเหล็ก (veneeing) โดยจากการทดลองพบว่าความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมใน โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กลดลง โดยความร้อนสูญเสียสะสมลดลง 40 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ การใช้พลังงานเชื้อเพลิงลดลง 6.33 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งอายุการใช้งานของฉนวนกันความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

Routschka and Aleksander [7] ได้ทำการศึกษาและทดลองนำเซรามิกไฟเบอร์มาใช้เป็นฉนวนชั้นในสุดของเตาเผาเหล็กแบบผลักดัน (pusher type) ที่มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง คือ มีการหยุดเดินเตาเผาในระหว่างสัปดาห์ โดยได้ปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ที่มีความหนา 50 มิลลิเมตรมาปะหรือเคลือบผนังเตาเผาเหล็ก (veneeing) สรุปได้ว่า ความร้อนสูญเสียรวมจากโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กลดลง การใช้พลังงานเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตลดลง ช่วงเวลาในการเพิ่มและลดอุณหภูมิในเตาเผาเหล็กลดลง สำหรับการลงทุนในการปรับปรุงโครงสร้างโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์เมื่อเปรียบเทียบกับการประหยัดพลังงานที่เพิ่มขึ้นนั้นจะพบว่าจะมีระยะเวลาคืนทุน 12 เดือน

Jerry Tonth and Nigara Fall N.Y.[8] ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก (slab reheating furnace) ที่มีอุณหภูมิทำงาน  $1,345^{\circ}\text{C}$  โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ด้วยวิธีการฉีดพ่น (gunned) ติดกับผนังปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก โดยก่อนการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์จะมีการสกัดฉนวนทนความร้อนปัจจุบันของโครงสร้างฉนวนเดิมออก ผนังเตาเผาด้านข้างมีการเชื่อม anchor รูปตัว V ติดกับเฟรมผนังเหล็กของเตาเผา จากนั้นจึงฉีดเซรามิกไฟเบอร์ติดกับผนังและ anchor จนได้ความหนา 230 มิลลิเมตร โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์เกรด II ความหนาแน่น 128 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนผนังด้านหลังคาใช้ anchor รูปตัว V ร่วมกับตาข่ายจับยึด (spider netting) หลังจากฉีดเซรามิกไฟเบอร์ติดกับผนังและ anchor จนได้ความหนาที่ต้องการแล้ว จะใช้เกรียงในการเกลี่ยเซรามิกไฟเบอร์ให้เรียบ และสร้างผิวเซรามิกไฟเบอร์ให้มีลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยม เพื่อป้องกันการแตกจากการขยายตัวและหดตัวของเซรามิกไฟเบอร์เนื่องจากความร้อน การติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ด้วยวิธีการนี้ใช้เวลาน้อยกว่า 2 วัน จากการใช้งานพบว่า มีระยะเวลาคืนทุนน้อยกว่า 6 เดือน

Brain Bradley.[9] ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาแบบ roller-hearth furnace ที่มีอุณหภูมิทำงาน  $1,175^{\circ}\text{C}$  โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ด้วยวิธีการฉีดพ่น (gunned) ติดกับผนังปัจจุบันของเตาเผาเหล็กซึ่งเป็นเซรามิกไฟเบอร์แบบ Module ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วประมาณ 6 ปี โดยฉีดเซรามิกไฟเบอร์ติดกับฉนวน Module จนได้ความหนา ของเซรามิกไฟ

เบอร์ประมาณ 76 มิลลิเมตร โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์เกรด II ความหนาแน่น 128 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยเตาเผาจะทำงานต่อเนื่องและจะหยุดเดินเตาเผาประมาณ 48 ชั่วโมงในทุก 6 – 8 สัปดาห์เพื่อซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งในช่วงเวลาที่มีการหยุดเดินเตาเผานี้จะมีการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาและสูญเสียค่าใช้จ่ายจากการหยุดเดินเตาเพื่อมาติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ หลังจากการใช้งาน พบว่า มีระยะเวลาการคืนทุนน้อยกว่า 6 เดือน

Niagara Falls.[10] ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาแบบ roller-hearth furnace ที่มีอุณหภูมิทำงาน  $1,232^{\circ}\text{C}$  โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ด้วยวิธีการฉีดพ่น (gunned) ติดกับผนังปัจจุบันของเตาเผาเหล็กซึ่งเป็นเซรามิกไฟเบอร์แบบ Module ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วประมาณ 6 ปี โดยฉีดเซรามิกไฟเบอร์ติดกับฉนวน Module จนได้ความหนา ของเซรามิกไฟเบอร์ประมาณ 76 มิลลิเมตร โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์เกรด II ความหนาแน่น 128 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยเตาเผาจะทำงานต่อเนื่องและจะหยุดเดินเตาเผาประมาณ 24 ชั่วโมงในทุก 11 เดือนเพื่อซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งในช่วงเวลาที่มีการหยุดเดินเตาเผานี้จะมีการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาและสูญเสียค่าใช้จ่ายจากการหยุดเดินเตาเพื่อมาติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ จากการใช้งาน พบว่า สามารถยืดอายุการใช้งานของเซรามิกไฟเบอร์แบบ module ที่ใช้ในปัจุบันออกไปได้ ติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็ว เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงฉนวนได้เป็นอย่างมาก

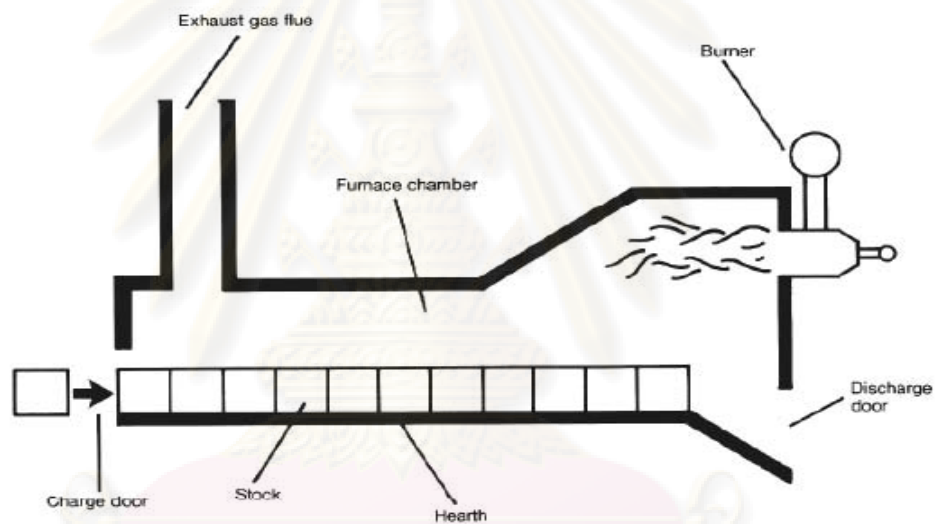
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 เตาเผาเหล็ก

เตาเผาเหล็กเป็นอุปกรณ์หลักอุปกรณ์หนึ่งในกระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า ขึ้นปลาย โดยให้ความร้อนแก่เหล็กจนถึงระดับอุณหภูมิระหว่าง  $1,100 - 1,250^{\circ}\text{C}$  แล้วรีดด้วยลูกรีด เพื่อลดขนาดให้เป็นเหล็กเส้น เหล็กทวด เหล็กรูปพรรณและเหล็กแผ่น เพื่อไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ อื่นๆ ต่อไป โดยเตาเผาทุกเตาจะมีส่วนประกอบพื้นฐานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเตาเผา [11]

ประกอบด้วย

1. ผนังอิฐและฉนวนความร้อนถูกสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุที่เป็นฉนวน เพื่อเก็บความร้อนไว้ที่อุณหภูมิขณะปฏิบัติงาน
2. ผนังเตาและอุปกรณ์คล้าย เป็นส่วนที่รองรับเตาหรือขนส่งเหล็กกล้า ซึ่งจะประกอบไปด้วยวัสดุทนความร้อนและรองรับด้วยโครงสร้างเหล็กกล้า ซึ่งมีบางส่วนถูกหล่อขึ้นด้วยน้ำ
3. หัวเผาและอุปกรณ์ประกอบเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ ซึ่งใช้เชื้อเพลิงก๊าซ หรือน้ำมันเพื่อทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นและรักษาอุณหภูมินั้นไว้ภายในห้องเตาเผา

4. ปล่องไฟ เป็นทางระบายควันไอเสียออกจากห้องเตาเผา

5. ประตูซึ่งเป็นช่องทางที่มีการป้อนงานเข้าเตาเผาและผ่านออกจากเตาเผา รวมถึงช่องเปิด-ปิดนี้สามารถเข้าไปซ่อมแซมเตาเผา

6. โครงสร้างเหล็ก เป็นส่วนโครงสร้างที่หุ้มโครงสร้างอิฐทนไฟ

โดยทั่วไปเตาเผาเหล็กสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดตามรูปแบบการเคลื่อนย้ายเหล็ก เช่น เตาเผาแบบพื้นเคลื่อนที่ (walking hearth), เตาเผาแบบพื้นเตาหมุน (rotary hearth), เตาเผาแบบคานเคลื่อนที่ (walking beam), เตาเผาแบบผลักดัน (pusher type) และ เตาเผาแบบตู้ขนถ่ายหมุนเวียน (continuous recalculating bogie type) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาเตาเผาเหล็กชนิด pusher type แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นเตาเผาที่มีลักษณะการเคลื่อนย้ายเหล็กด้วยการผลักเหล็กเข้าและออกจากเตาเผา โดยเหล็กแต่ละแท่งภายในเตาเผาจะแนบติดกัน เมื่อเหล็กชิ้นใหม่ถูกผลักเข้าสู่เตาเผาก็จะทำการผลักเหล็กที่อยู่ท้ายเตาออกจากเตาเผาไปสู่กระบวนการรีดต่อไป และเตาเผาเหล็กชนิด walking beam แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นเตาเผาที่มีลักษณะการเคลื่อนย้ายเหล็กด้วยการเคลื่อนที่ของคานรองรับเหล็กภายในเตาเผา โดยจะมีน้ำหล่อเย็นสำหรับคานเลื่อน

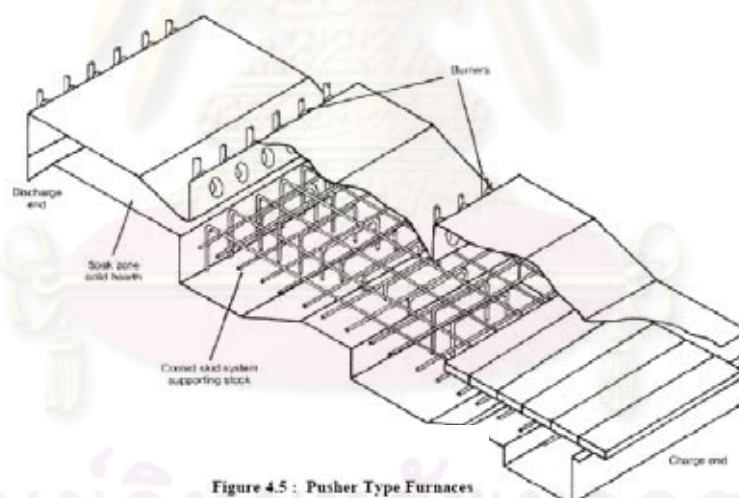
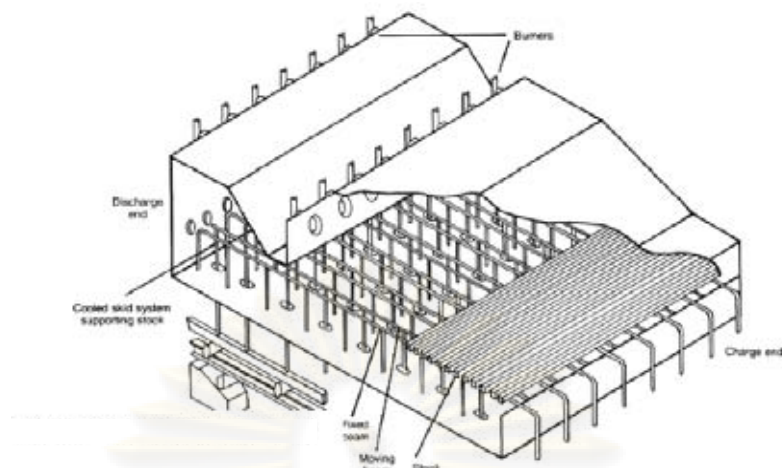


Figure 4.5 : Pusher Type Furnaces

รูปที่ 3.2 เตาเผาเหล็กแบบผลักดัน (pusher type) [11]



รูปที่ 3.3 เตาเผาเหล็กคานเคลื่อนที่ (walking beam) [11]

### 3.2 ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

ฉนวนเซรามิกเป็นวัสดุฉนวนที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ผลิตขึ้น โดยการผสมและ หลอมอะลูมินาและซิลิกาเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิ 1,800-2,000 °C โดยปกติแล้วเส้นใยจะถูกผลิต ออกมาใน 2 ช่วงอุณหภูมิคุณภาพของเซรามิกไฟเบอร์ขึ้นอยู่กับปริมาณของ  $Al_2O_3$  ผลิตภัณฑ์เซรา มิกไฟเบอร์ชนิดใหม่ๆ จะมีการใช้อะลูมิโน-ซิลิเกต เพื่อจะช่วยลดระดับการหดตัวและทำให้เส้นใย เหมาะกับการใช้งานในอุณหภูมิ

โดยทั่วไปแล้ว เส้นใยเซรามิกจะถูกผลิตออกมาในรูปแบบของฝอยเส้นใย จากนั้นจึงถูกเย็บเข้าด้วยกันเป็นผืนผ้าที่มีความหนาแน่นต่างๆ กันตั้ง 64 ถึง 190 กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร โดยมีรูปแบบต่างๆ มากกว่า 40 รูปแบบ

#### 3.2.1 คุณสมบัติเด่นของฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

##### 1. มีค่าการนำความร้อนต่ำ

เนื่องจากมีค่าการนำความร้อนต่ำ (0.1 กิโลแคลอรี/เมตร ต่อชั่วโมงต่อ องศา เซลเซียส ที่ 600 °C สำหรับเซรามิกไฟเบอร์แบบ blanket มีความหนาแน่น 128 กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร) เมื่อใช้เป็นฉนวนกันความร้อนจึงสามารถเลือกใช้ให้มีความหนาที่น้อยกว่าฉนวน ชนิดอื่นได้ โดยประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนเหมือนกับวัสดุทนความร้อนมาตรฐาน และ เนื่องจากสามารถเลือกความหนาให้น้อยกว่าดังกล่าวนี้ส่งผลให้สามารถเพิ่มปริมาตรภายในเตาเผา เหล็กขึ้นได้ จึงมีประสิทธิภาพมากกว่าฉนวนทนความร้อนชนิดอื่นๆ 40 เปอร์เซ็นต์

## 2. มีน้ำหนักเบา

ความหนาแน่นเฉลี่ยของเส้นใยเซรามิก คือ 96 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จึงมีค่าเพียงหนึ่งในสิบของน้ำหนักของฉนวนอิฐทนไฟ และหนักเพียงหนึ่งในสามของน้ำหนักของใยหิน

## 3. การสะสมของความร้อนน้อยกว่า

การติดตั้งเส้นใยเซรามิกจะทำให้เก็บสะสมความร้อนได้น้อยกว่า การใช้ฉนวนทนไฟชนิดอื่นๆ ดังนั้น เตาเผาจึงถูกทำให้ร้อนขึ้นหรือเย็นลงได้อย่างรวดเร็ว

## 4. มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

เส้นใยเซรามิกสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ เนื่องจากมีโครงสร้างที่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้จึงทำให้มีการให้ความร้อนและทำให้เย็นลงได้เร็วขึ้น ซึ่งก็เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและความสามารถในการผลิตได้

## 5. มีความต้านทานต่อสารเคมี

เส้นใยเซรามิกสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีส่วนใหญ่ได้และไม่ได้รับผลกระทบจากไฮโดรคาร์บอน น้ำและไอน้ำซึ่งอยู่ในก๊าซไอเสีย

### 3.2.2 ประเภทของเซรามิกไฟเบอร์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย

#### 1. felt

เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความยืดหยุ่น สามารถทำการตัดให้โค้งงอ หรือทำเป็นแผ่นบอร์ด ได้มาจากการขึ้นรูปโดยกระบวนการเป็ยก แล้วรีดหรือดูดน้ำออกด้วยระบบสุญญากาศ (wet vacuum forming) โดยใช้สารยึดประสานที่เป็นสารอินทรีย์เรียกผลิตภัณฑ์นี้ว่า “felt” ซึ่งเป็นฉนวนที่มีความแข็งแรงแต่จะเกิดการลุกไหม้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากๆ ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ felt โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ felt สามารถทนต่ออุณหภูมิได้ที่ระดับ 1,000 °C, 1,260 °C, 1,400 °C, 1,500 °C และ 1,600 °C

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างคุณสมบัติของเซรามิกไฟเบอร์แบบ felt [12]

ความหนาแน่นรวม [g/cm <sup>3</sup> ]	0.16	0.16	0.16
Ig. loss [%]	6	6	7
การหดตัวจากความร้อน [%]			
ที่ 1,000 °C x 24 h	1.1	0.5	
ที่ 1,100 °C x 24 h	1.2	0.9	0.0
ที่ 1,200 °C x 24 h	2.0	1.4	0.4
ที่ 1,300 °C x 24 h		2.0	0.7
ที่ 1,400 °C x 24 h			1.5
ที่ 1,500 °C x 24 h			1.1
ค่าการนำความร้อน [kcal/m.h. °C]			
ที่ 600 °C	0.11	0.11	0.12
ที่ 1,000 °C	0.21	0.21	0.22
ชนิดวัสดุ	เซรามิกไฟเบอร์	อะลูมินาไฟเบอร์เซรามิกไฟเบอร์	อะลูมินาไฟเบอร์เซรามิกไฟเบอร์

Ig. loss = Ignition loss

## 2. Module หรือ block

Module หรือ block เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดมาตรฐานเท่ากับ 300 mm โดยทั่วไปใช้สำหรับการติดตั้งในโครงสร้างด้วยวิธีแบบ stack ในโครงสร้างแบบนี้ block จะถูกนำมาเรียงต่อกันตามทิศทางของความหนา ดังนั้นจึงมีความแข็งแรงสูงกว่าการติดตั้งด้วยวิธีแบบ paper (แบบแปะ) ซึ่งติดฉนวนขนานไปกับผนังของเตาเผา วิธีการติดตั้งแบบ block แตกต่างจากวิธีการติดตั้งแบบ paper ในเรื่องการติดตั้งฉนวนในแต่ละชั้นซึ่งวิธีการติดตั้งแบบ block ไม่ต้องเจาะหมุดยึดทะลุฉนวน และหมุดยึดที่ใช้สามารถออกแบบได้ง่ายกว่าเพราะมีข้อจำกัดที่น้อยกว่า

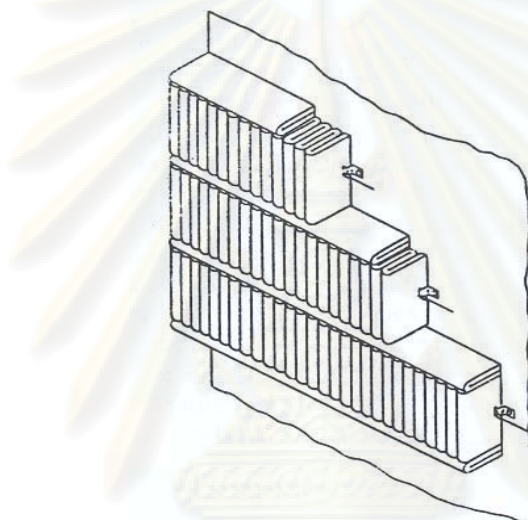
วิธีการติดตั้งแบบ block จะใช้สารยึดหรือหมุดโลหะในการยึดฉนวนติดกับผนังเตาเผา วิธีการยึดติดนี้เป็นการประยุกต์ใช้การเคลือบ (vener) block บนผิวด้านในของผนังเตาเดิมหรือติด block เป็นฉนวนชั้นผิวร้อน (ชั้นในสุด) ที่ซึ่งหากใช้ไฟเบอร์แบบ felt หรือ blanket ต้องใช้สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์เป็นตัวยึด



### 3.2.3 วิธีการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย

#### 1. วิธีการติดตั้งแบบ Module หรือ block

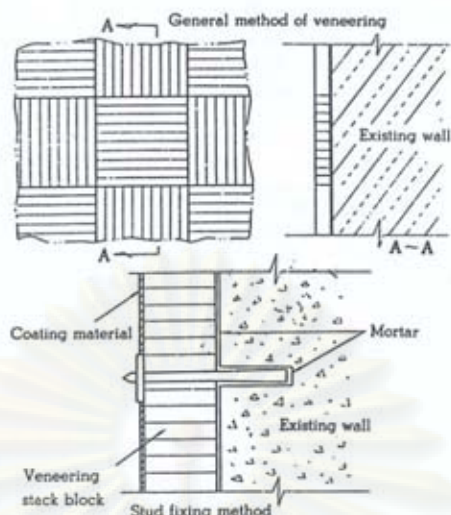
เป็นการติดตั้งโดยนำเซรามิกไฟเบอร์แบบ block ติดตั้งแบบวางตั้งฉากกับผนังเตาเผา ดังรูปที่ 3.4 โดยใช้แท่งเหล็กเสียบยึดติดกัน ขนาดมาตรฐานของ block (1 โมดูล) คือ 300 x 300 มิลลิเมตร ความหนาที่ใช้อยู่ในช่วง 100 – 300 มิลลิเมตร วิธีการติดตั้งแบบ block นี้จะใช้ blanket (หรือ felt) ขนาดความหนา 25 มิลลิเมตร โดยนำมาตัดเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมและนำไปทับหรือพับซ้อนกันเป็นฉนวน



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างวิธีการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์แบบ Modul [12]

#### 2. วิธีการติดตั้งแบบ veneering

veneeering หมายถึงการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ลงบนฉนวนทนไฟเดิมในเตาเผา วิธีนี้ทำให้ความร้อนสูญเสียผ่านฉนวนของเตาเผาตกลง การ veneering มีอยู่สองวิธีคือ หนึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์ blanket และสองใช้เซรามิกไฟเบอร์ block เป็นวัสดุฉนวนของผิวด้านในเตาเผา สำหรับการติดตั้งนั้นใช้หมุดเป็นตัวตรึงฉนวนแต่ละชั้นติดกับอิฐทนไฟ, ฉนวน castable หรือฉนวนพลาสติกทนไฟที่ผนังด้านในของเตาเผา หรือใช้มอร์ต้าเป็นตัวยึดฉนวนแต่ละชั้น หรือใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างวิธีการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์แบบ veneering [12]

ข้อดีของใช้เซรามิกไฟเบอร์ คือสามารถลดความร้อนสะสม (heat storage) และความร้อนผ่านผนังได้ดี ในการประยุกต์ใช้กับเตาเผาชนิด batch (ลักษณะการทำงานที่มีการเพิ่ม-ลด อุณหภูมิเป็นช่วงๆ) ซึ่งเห็นผลได้ชัดจากการแกว่งของอุณหภูมิ การใช้เซรามิกไฟเบอร์มีช่วงการใช้งานที่กว้างสามารถประหยัดพลังงานได้มากโดยไม่ต้องทำการแก้ไขผนังเตาเผาเดิม และยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับเตาเผาที่มีการสร้างขึ้นมาใหม่ได้อีกด้วย

### 3.3 การถ่ายเทความร้อน

ความร้อนที่ถ่ายเทจากก๊าซร้อนภายในเตาเผาเหล็กไปสู่ผนังชั้นนอกสุด (cold face) ของเตาเผาเหล็ก จะสามารถถ่ายเทได้ โดย 3 วิธี ประกอบด้วย การนำความร้อน, การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ความร้อนจะถ่ายเทจากก๊าซร้อนในเตาเผาเหล็กไปสู่ผนังของชั้นในสุด (hot face) ของเตาเผาเหล็ก โดยวิธีการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน หลังจากนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากชั้นในสุดไปชั้นต่างๆ โดยวิธีการนำความร้อน และท้ายที่สุดความร้อนจะถ่ายเทจากผนังนอกสุดของเตาเผาเหล็กไปสู่อากาศภายนอกโดยการพาความร้อน ซึ่งสมการการถ่ายเทความร้อนของทั้ง 3 วิธี แสดงดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานจากการปฏิสัมพันธ์กันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปสู่อนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าที่อยู่ติดกัน การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ในกรณีของแข็ง การนำความร้อนเกิดจากการสั่นของโมเลกุลในโครงร่างผลึกของตัวกลาง พลังงานดังกล่าวจะถูกส่งถ่ายเทโดยอิเล็กตรอนอิสระ ส่วน

กรณีของเหลวและก๊าซ การนำความร้อนจะเกิดจากการชนของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปมา อัตราการนำความร้อนผ่านตัวกลางทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิด้วย ตามกฎของ Fourier สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

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

เมื่อ

$Q_{cond}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อน (kcal/hr)

$k$  = ค่าการนำความร้อนของวัสดุตัวกลาง (kcal/m.hr. $^{\circ}$ C)

$A$  = พื้นที่ความร้อนไหลผ่าน ( $m^2$ )

$\frac{dT}{dx}$  = ความชันของอุณหภูมิเทียบกับระยะทางที่เกิดการนำความร้อน ( $^{\circ}$ C /m)

ในเตาเผาเหล็ก การนำความร้อนเกิดขึ้นในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กจากผนังด้านในสุดซึ่งมีอุณหภูมิสูงผ่านฉนวนชนิดต่างๆของผนัง โดยค่าการนำความร้อนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฉนวนแต่ละชนิด

### 3.3.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

การพาความร้อนเป็นรูปการถ่ายเทพลังงานระหว่างพื้นผิวของแข็งกับของไหลที่อยู่ติดกัน และเกี่ยวข้องกับการนำความร้อนรวมถึงการเคลื่อนที่ของของไหลด้วย ของไหลที่เคลื่อนที่เร็วกว่าพาความร้อนได้ดีกว่า ส่วนของไหลที่อยู่นิ่งจะมีเพียงการนำความร้อนเท่านั้นตามกฎของ Newton สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (3.2)$$

เมื่อ

$Q_{conv}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน (kcal/hr)

$h$  = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (kcal/ $m^2$ .hr. $^{\circ}$ C)

$A$  = พื้นที่ความร้อนไหลผ่าน ( $m^2$ )

$T_s$  = อุณหภูมิสมบูรณ์ของพื้นผิว (เท่ากับอุณหภูมิของของไหลที่อยู่ติดกัน) ( $^{\circ}$ C)

$T_{\infty}$  = อุณหภูมิของของไหล ณ ตำแหน่งห่างจากพื้นผิวไกลออกไป ( $^{\circ}$ C)

ในเตาเผาเหล็ก การพาความร้อนเกิดขึ้นจากการที่ก๊าซร้อนถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาไปยังผนังชั้นในสุด โดยเกิดรวมกับการแผ่รังสีความร้อนและจากผนังชั้นนอกสุดไปสู่อากาศภายนอก โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของอากาศ และลักษณะตำแหน่งของพื้นผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน

### 3.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การแผ่รังสีคือการปล่อยพลังงานที่อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมหรือโมเลกุลออกมา โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง และเป็นพลังงานที่ถ่ายเทได้เร็วที่สุด (เท่าความเร็วแสง)

จากกฎของ Stefan-Boltzman สมการแสดงอัตราการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวใดๆ กับสิ่งแวดล้อมคือ

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3.3)$$

เมื่อ

$Q_{rad}$  = อัตราการแผ่รังสีความร้อน (kcal/hr)

$\varepsilon$  = Emissivity ของพื้นผิว ( $0 < \varepsilon < 1$ )

$\sigma$  = Stefan-Boltzman มีค่า  $4.88 \times 10^{-8}$  (kcal/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)

$A$  = พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี (m<sup>2</sup>)

$T_s$  = อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

$T_{sur}$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (K)

ในเตาเผาเหล็ก การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนภายในเตาเผาเหล็กไปสู่ผนังชั้นในสุดของเตาเผาเหล็ก โดยเกิดรวมกับการพาความร้อน

### 3.4 สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กและ recuperator จะพิจารณาภายใต้ข้อสมมุติฐาน ดังต่อไปนี้.

1) พิจารณาระบบการทำงานของเตาเผาเหล็กแบบต่อเนื่องและมีสภาวะการทำงานแบบปกติหรือมีสภาวะสมดุลทางความร้อน (Thermal equilibrium) ซึ่งความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาจะกลายเป็นความร้อนที่ออกจากเตาเผาทั้งหมด โดยไม่มีการสะสมอยู่ในเตาเผา

2) พิจารณาระบบการทำงานของเตาเผาเหล็กอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งถือว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กมีค่าเฉลี่ยที่คงที่และมีอุณหภูมิเดียวกันทั้งเตาเผา รวมทั้งอัตราของมวลไหลข้ามผิวควบคุม อัตราของการถ่ายเทความร้อน และพลังงานข้ามผิวควบคุมนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาณควบคุม จำเป็นต้องพิจารณา กฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์พลังงานควบคู่กัน ดังต่อไปนี้

### 3.4.1 สมดุลมวลของเตาเผาเหล็ก

การพิจารณาปริมาณควบคุมสำหรับระบบที่มีการถ่ายเทมวลกับสิ่งแวดล้อม จะสามารถนิยามกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) ดังสมการ

$$\begin{aligned} [\text{มวลไหลเข้าปริมาณควบคุมทั้งหมด}] - [\text{มวลไหลออกจากปริมาณควบคุมทั้งหมด}] \\ = [\text{การเปลี่ยนแปลงของมวลสุทธิภายในปริมาณควบคุม}] \end{aligned}$$

หรือ

$$\sum m_i - \sum m_e = \Delta m_{CV} \quad (3.4)$$

พิจารณาในรูปสมการเชิงอัตรา

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e = \frac{dm_{CV}}{dt} \quad (3.5)$$

โดยการศึกษาพิจารณากระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) หรือไม่เปลี่ยนแปลงมวลสุทธิภายในปริมาณควบคุม ( $dm_{CV}/dt = 0$ ) ดังนั้นจากกฎการอนุรักษ์มวล จะได้ว่า

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e = \frac{dm_{CV}}{dt} = 0 \quad (3.6)$$

เมื่อพิจารณาปริมาณควบคุมคือเตาเผาเหล็ก จะสามารถคำนวณหาสมดุลมวลของเตาเผา ดังสมการต่อไปนี้

$$[\text{มวลไหลเข้าสู่เตาเผาเหล็ก}] = [\text{มวลไหลออกจากเตาเผาเหล็ก}]$$

$$\sum \dot{m}_{i, \text{furnace}} = \sum \dot{m}_{e, \text{furnace}} \quad (3.7)$$

### 3.4.2 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

การพิจารณาปริมาณควบคุมสำหรับระบบที่มีการถ่ายเทมวลกับสิ่งแวดล้อม ทำให้มีพลังงานส่วนหนึ่งไหลเข้าและออกไปพร้อมกับการถ่ายเทของมวล ซึ่งพลังงานเหล่านี้สามารถ

วิเคราะห์ได้จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาณควบคุม โดยอาศัยหลักการของกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ดังสมการ

$$Q_{CV} - W_{CV} + \sum E_{in} - \sum E_{out} = \Delta E_{CV} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $Q_{CV}$  = พลังงานความร้อนทั้งหมดที่ข้ามผิวควบคุมของปริมาณควบคุม  
 $W_{CV}$  = งานทั้งหมดที่ข้ามผิวควบคุมของปริมาณควบคุม  
 $\sum E_{in}$  = พลังงานทั้งหมดของมวลที่ไหลเข้าปริมาณควบคุม  
 $\sum E_{out}$  = พลังงานทั้งหมดของมวลที่ไหลออกจากปริมาณควบคุม  
 $\Delta E_{CV}$  = การเปลี่ยนแปลงของพลังงานสุทธิในปริมาณควบคุม

พิจารณาในรูปสมการเชิงอัตรา

$$\dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + gZ_i \right) - \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) = \frac{dE_{CV}}{dt} \quad (3.9)$$

เมื่อพิจารณาปริมาณควบคุม คือ เตาเผาเหล็กและระบบของเตาเผาอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) จะสามารถหาสมดุลพลังงาน (Energy Balance) ของเตาเผา ดังสมการต่อไปนี้

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

$$\sum \dot{Q}_i = \sum \dot{Q}_e \quad (3.10)$$

พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย

#### 1. ความร้อนจากการเชื้อเพลิง ( $Q_{in1}$ )

ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นพลังงานความร้อนหลักของเตาเผาที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีไปเป็นพลังงานทางความร้อน ซึ่งโดยมากจะสามารถคำนวณจากอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงกับค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง (High heating value, HHV) โดยค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงจะพิจารณาน้ำที่ได้จากการเผาไหม้อยู่ในสถานะของเหลว แต่ในทางปฏิบัติอุณหภูมิของไอเสียจะสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ทำให้น้ำที่มีอยู่ในไอเสียมีสถานะเป็นก๊าซ ดังนั้นจึงนำค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (Low heating value, LHV) มาใช้ในการคำนวณ ดังสมการ

$$Q_{in1} = m_{fuel} \times LHV \quad (3.11)$$

เมื่อ  $m_{fuel}$  = อัตราการใช้เชื้อเพลิง (liter /hr)  
 $LHV$  = Low Heating Value (kcal/L)

### 2. ความร้อนสัมผัสของอากาศขาเข้า ( $Q_{in2}$ )

เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าสู่ burner ซึ่งความร้อนส่วนนี้ได้มาจากการนำความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียกลับมาใช้ใหม่ด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือ recuperator โดยสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{in2} = \dot{m}_{air} (h_{air,preheat} - h_0) \quad (3.12)$$

หรือ

$$Q_{in2} = \sum \frac{\dot{m}_{air}}{M_{air}} \left( \int_T^{T_{air}} \bar{c}_{p,air} dT \right) \quad (3.13)$$

พิจารณาองค์ประกอบของอากาศให้มีเพียงก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจน จะได้ว่า

$$Q_{in2} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}} \left( \int_T^{T_{air}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}} \left( \int_T^{T_{air}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \quad (3.14)$$

เมื่อ  $\dot{m}_{O_2,air}$  = อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (kg/s)  
 $\dot{m}_{N_2,air}$  = อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (kg/s)  
 $M_{O_2}$  = มวลโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน มีค่าเท่ากับ 31.999 (kg/kmol)  
 $M_{N_2}$  = มวลโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 28.013 (kg/kmol)  
 $\bar{c}_{p,O_2}$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซออกซิเจน โดยอยู่ในรูปสมการ  
 $25.48 + 1.52 \times 10^{-2} T - 0.7155 \times 10^{-5} T^2 + 1.312 \times 10^{-9} T^3$ .  
 $\bar{c}_{p,N_2}$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไนโตรเจน โดยอยู่ในรูปสมการ  
 $28.90 - 0.1571 \times 10^{-2} T + 0.8081 \times 10^{-5} T^2 - 2.873 \times 10^{-9} T^3$ .  
 $T_{air}$  = อุณหภูมิของอากาศที่ได้จากการอุ่น (K)

### 3. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง ( $Q_{in3}$ )

เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยฮีตเตอร์ ก่อนจะป้อนเข้าสู่ burner โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความหนืดของน้ำมันเชื้อเพลิง และสามารถทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นสถานะของไหลได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้น้ำมันเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับอากาศได้ดีขึ้นสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{in3} = m_{fuel} \times \rho_f \times c_{p,f} \times (T_{fuel} - T_{sur}) \quad (3.15)$$

เมื่อ  $m_{fuel}$  = อัตราการใช้เชื้อเพลิง (liter /hr)  
 $\rho_f$  = ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/ liter)  
 $c_{p,f}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง (kcal/kg-°C)  
 $T_{fuel}$  = อุณหภูมิน้ำมันที่ผ่านฮีตเตอร์ (°C)  
 $T_{sur}$  = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

#### 4. ความร้อนจากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก ( $Q_{in4}$ )

เป็นพลังงานความร้อนที่เกิดจากกระบวนการคายความร้อนของสเกล ซึ่งการก่อตัวของสเกลเกิดจากการรวมตัวของเหล็กกับออกซิเจนภายในอากาศกลายเป็นเหล็กออกไซด์ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{in4} = \left(\frac{\% scale}{100}\right) \times m_{steel} \times HV_{scale} \quad (3.16)$$

เมื่อ %scale = ร้อยละของสเกลที่เกิดขึ้นเทียบกับปริมาณเหล็กที่ผลิต  
 $m_{steel}$  = ปริมาณเหล็ก (kg/hr)  
 $HV_{scale}$  = ความร้อนที่คายออกจากการเปลี่ยนเหล็กและออกซิเจนไปเป็นเหล็กออกไซด์ของสเกล (kcal/kg)

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย

#### 1. ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ ( $Q_{out1}$ )

เป็นพลังงานความร้อนที่เหล็กสามารถกักเก็บได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของเหล็กสูงขึ้นก่อนเข้าสู่กระบวนการรีดเหล็กต่อไป เพื่อให้ง่ายต่อการรีดเหล็กสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{out1} = m_{steel} \times c_{p,s} \times (T_o - T_{sur}) \quad (3.17)$$

เมื่อ  $m_{steel}$  = อัตราการผลิตเหล็ก (kg/hr)  
 $c_{p,s}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก (kcal /kg-°C)



$T_o$  = อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{sur}$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ )

## 2. ความร้อนสูญเสียไปกับสเกล ( $Q_{out 2}$ )

เป็นพลังงานความร้อนที่สเกลสามารถเก็บกักได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในลักษณะเดียวกันกับเหล็ก สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{out 2} = \% \times m_{steel} \times c_{p,s} \times (T_o - T_{sur}) \quad (3.18)$$

เมื่อ  $\%$  = เปอร์เซ็นต์การเกิด scale

$m_{steel}$  = อัตราการผลิตเหล็ก (kg/hr)

$T_o$  = อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา ( $^{\circ}\text{C}$ )

$c_{p,s}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของ scale (kcal/kg- $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{sur}$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ )

## 3. ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียก่อน recuperator ( $Q_{out 3}$ )

เป็นพลังงานความร้อนที่ออกไปกับไอเสีย ซึ่งพลังงานความร้อนส่วนนี้จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ที่ recuperator เนื่องจากพลังงานความร้อนส่วนนี้ยังมีค่าสูงอยู่ สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{out 3} = m_{flue} \times (h_{flue} - h_o) \quad (3.19)$$

หรือ

$$Q_{out 3} = \sum \frac{m_{flue}}{M_{flue}} \left( \int_{T_o}^{T_g} \bar{c}_{p,g} dT \right) \quad (3.20)$$

จากการพิจารณาผลิตภัณฑ์ของสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา ประกอบด้วย  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  และ  $\text{N}_2$  ซึ่งจะสามารถเขียนสมการในแต่ละองค์ประกอบของก๊าซ ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Q_{out 3} = & \frac{\dot{m}_{\text{CO}_2, flue}}{M_{\text{CO}_2}} \left( \int_T^{T_g} \bar{c}_{p, \text{CO}_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}, flue}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \left( \int_T^{T_g} \bar{c}_{p, \text{H}_2\text{O}} dT \right) \\ & + \frac{\dot{m}_{\text{SO}_2, flue}}{M_{\text{SO}_2}} \left( \int_T^{T_g} \bar{c}_{p, \text{SO}_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{\text{O}_2, flue}}{M_{\text{O}_2}} \left( \int_T^{T_g} \bar{c}_{p, \text{O}_2} dT \right) \\ & + \frac{\dot{m}_{\text{N}_2, flue}}{M_{\text{N}_2}} \left( \int_T^{T_g} \bar{c}_{p, \text{N}_2} dT \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

เมื่อ  $\dot{m}_{CO_2, fluee}$  = อัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย (kg/s)

$\dot{m}_{H_2O, fluee}$  = อัตราไหลของไอน้ำในไอเสีย (kg/s)

$\dot{m}_{SO_2, fluee}$  = อัตราไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในไอเสีย (kg/s)

$\dot{m}_{O_2, fluee}$  = อัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในไอเสีย (kg/s)

$\dot{m}_{N_2, fluee}$  = อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในไอเสีย (kg/s)

$M_{CO_2}$  = มวลโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 44.01 (kg/kmol)

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

$M_{SO_2}$  = มวลโมเลกุลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 64.063 (kg/kmol)

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

$\bar{c}_{p, CO_2}$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รูปสมการ  $22.26 + 5.981 \times 10^{-2} T - 3.501 \times 10^{-5} T^2 + 7.469 \times 10^{-9} T^3$ .

$\bar{c}_{p, H_2O}$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ รูปสมการคือ  $32.24 + 0.1923 \times 10^{-2} T + 1.055 \times 10^{-5} T^2 - 3.595 \times 10^{-9} T^3$ .

$\bar{c}_{p, SO_2}$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ รูปสมการ  $25.78 + 5.795 \times 10^{-2} T - 3.812 \times 10^{-5} T^2 + 8.612 \times 10^{-9} T^3$ .

$T_g$  = อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (K)

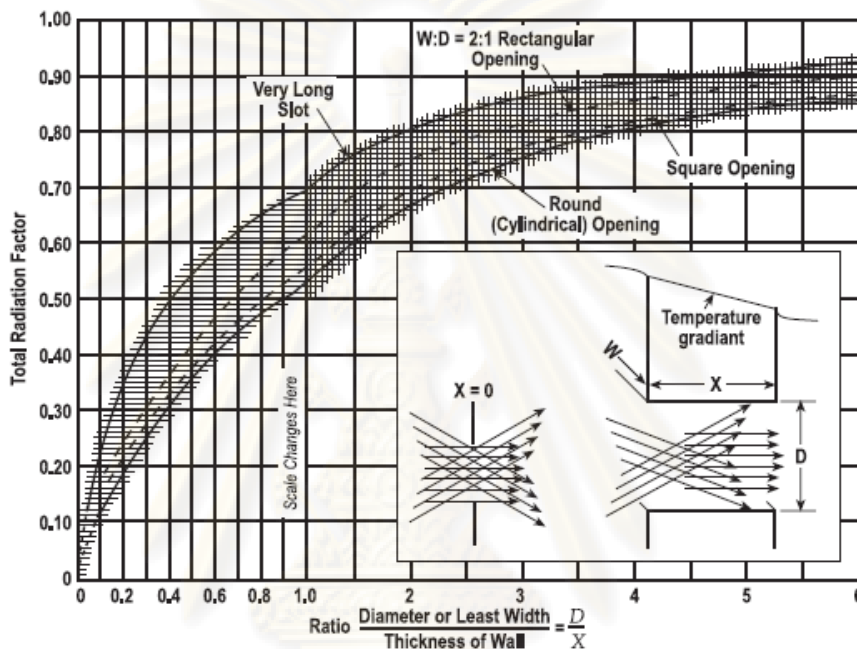
#### 4. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี ( $Q_{out4}$ )

เป็นเป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องเปิด โดยปริมาณของพลังงานความร้อนสูญเสียขึ้นอยู่กับขนาดของช่องเปิดและอุณหภูมิภายในเตาเผา สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{out4} = C_t \times C_b \times C_{rad} \times \sigma \times A_o \times (T_{furnace}^4 - T_{sur}^4) \quad (3.22)$$

เมื่อ  $C_t$  = ตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของสัดส่วนเวลาในการเปิดปิดของช่องเปิดที่มีผลต่อการแผ่รังสีความร้อน

- $C_b$  = ตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของอุปกรณ์หรือที่บัง ซึ่งคิดตามสัดส่วนของพื้นที่ของที่บังต่อพื้นที่ช่องเปิดทั้งหมด
- $C_{rad}$  = ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด สามารถหาได้จากรูปที่ 3.8
- $\sigma$  = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 \cdot K^4)$
- $A_o$  = พื้นที่ของช่องเปิด ( $m^2$ )
- $T_{furnace}$  = อุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก (K)



รูปที่ 3.6 ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด ( $C_{rad}$ ) [13]

5. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา ( $Q_{out5}$ )

เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการนำความร้อนจากภายในเตาเผาผ่านผนังของเตาไปสู่ผิวเตาด้านนอก จากนั้นความร้อนที่ผิวเตาด้านนอกจะถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม โดยการพาความร้อนตามธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อน สามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{out5} = h_m A(T_s - T_{sur}) + 4.88 \times 10^{-8} \varepsilon A \{ (T_s + 273)^4 - (T_{sur} + 273)^4 \} \quad (3.23)$$

- เมื่อ  $h_m$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย
- $A$  คือพื้นที่ของผิวด้านนอกของเตา ( $m^2$ )
- $T_s$  คืออุณหภูมิที่ผิวเตาด้านนอก ( $^{\circ}K$ )
- $\varepsilon$  คือค่า Emissivity ของผนังเตาเผา มีค่าประมาณ 0.9

พิจารณาการพาความร้อนตามธรรมชาติของการไหลแบบราบเรียบบนแผ่นระนาบแนวดิ่ง

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} \quad (3.24)$$

โดยค่า Nusselt number จะขึ้นกับลักษณะการไหลของของไหล

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} ; 10^{-1} < Ra_L < 10^9, \text{Laminar Flow} \quad (3.25)$$

$$\overline{Nu}_L^{1/2} = 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} ; 10^9 < Ra_L < 10^{12}, \text{Turbulent Flow} \quad (3.26)$$

โดยค่า Rayleigh number สามารถหาได้จาก

$$Ra_L = \frac{g\beta L^3 (T_s - T_{sur})}{\nu\alpha} \quad (3.27)$$

โดยที่

$$\beta = 1/T_f ; T_f = \frac{(T_s + T_{sur})}{2}$$

เมื่อ  $\overline{Nu}_L$  = ค่า Nusselt number เฉลี่ย

$L$  = ความสูงของเตาเผา (m)

$Ra_L$  = ค่า Rayleigh number

$g$  = อัตราการเร่งของแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ  $0.98 \text{ (m/s}^2\text{)}$

$\beta$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงปริมาตร ( $\text{K}^{-1}$ )

$T_f$  = อุณหภูมิฟิล์มโดยประมาณ (K)

$k$  = ค่าสภาพการนำความร้อน ( $\text{W/m.K}$ ) โดยเขียนอยู่ในรูปสมการ  
 $(-0.0027T_f^2 + 9.3957T_f + 51.4286) \times 10^{-5}$

Pr = ค่า Prandtl number โดยเขียนอยู่ในรูปสมการ  
 $(0.0005T_f^2 - 0.5035T_f + 815.8571) \times 10^{-3}$

$\nu$  = ค่า Kinematic viscosity โดยเขียนอยู่ในรูปสมการ

$$(0.0097T_f^2 + 3.6976T_f - 387.5714) \times 10^{-8}$$

$$\alpha = \text{การแพร่กระจายทางความร้อน โดยเขียนอยู่ในรูปสมการ} \\ (0.0146T_f^2 + 5.3893T_f - 678.5714) \times 10^{-8}$$

### 6. ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น ( $Q_{out6}$ )

เป็นพลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำระบายความร้อน อุปกรณ์ต่างๆ ภายในเตาเผาเหล็ก อย่างไรก็ตามความร้อนในส่วนนี้ จะมีเฉพาะเตาเผาเหล็กที่มีการใช้น้ำระบายความร้อนสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{out6} = m_{water} \times c_{p,w} \times (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (3.28)$$

เมื่อ  $m_{water}$  = อัตราการไหลของน้ำ (L/hr)  
 $c_{p,w}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kcal/kg-°C)  
 $T_{w,o}$  = อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากเตาเผา (°C)  
 $T_{w,i}$  = อุณหภูมิของน้ำที่เข้าสู่เตาเผา (°C)

### 7. ความร้อนสูญเสียสะสมที่เหล็ก ( $Q_{out7}$ )

เป็นพลังงานความร้อนที่สะสมในเหล็ก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหล็กในเตาเผาเหล็ก อย่างไรก็ตามความร้อนในส่วนนี้จะมีค่าเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหล็กขณะเหล็กค้างอยู่ในเตาเผาเหล็กสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$Q_{out7} = m_{steel} \times c_{p,s} \times T'_{steel} \quad (3.29)$$

เมื่อ  $m_{steel}$  = มวลของเหล็กที่ค้างอยู่ในเตา (kg)  
 $c_{p,s}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก (kcal/kg-°C)  
 $T'_{steel}$  = อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเหล็ก (°C/hr)

### 8. ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก ( $Q_{out8}$ )

เป็นพลังงานความร้อนที่สะสมใน โครงสร้างเตาเผาเหล็ก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโครงสร้างเตาเผาเหล็ก อย่างไรก็ตามความร้อนในส่วนนี้จะมีค่าเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก

สมการที่ใช้ในการคำนวณความร้อนสะสมใน โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก แสดงดังต่อไปนี้

$$Q_{out8} = A \left[ \left[ l_1 \times \rho_1 \times c_{p1} \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right) + l_2 \times \rho_2 \times c_{p2} \left( \frac{T_2 + T_3}{2} \right) + \dots + l_n \times \rho_n \times c_{pn} \left( \frac{T_n + T_{n+1}}{2} \right) \right] - \left[ l_1 \times \rho_1 \times c_{p1} \left( \frac{T_{1s} + T_{2s}}{2} \right) + l_2 \times \rho_2 \times c_{p2} \left( \frac{T_{2s} + T_{3s}}{2} \right) + \dots + l_n \times \rho_n \times c_{pn} \left( \frac{T_{ns} + T_{ns+1}}{2} \right) \right] \right] \quad (3.30)$$

เมื่อ  $A$  = พื้นที่ผืนเงาเตาเผาเหล็ก ( $m^2$ )

$l_1, l_2, \dots, l_n$  = ความหนาของฉนวนแต่ละชนิด (m)

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  = ความหนาแน่นของฉนวนแต่ละชนิด ( $kg/m^3$ )

$c_{p1}, c_{p2}, \dots, c_{pn}$  = ความร้อนจำเพาะของฉนวนแต่ละชนิด ( $kcal/kg \cdot ^\circ C$ )

$T_1, T_2, \dots, T_{n+1}$  = อุณหภูมิระหว่างผิวของฉนวนแต่ละชนิด (สภาวะสุดท้าย) ( $^\circ C$ )

$T_{1s}, T_{2s}, \dots, T_{ns+1}$  = อุณหภูมิระหว่างผิวของฉนวนแต่ละชนิด (สภาวะตั้งต้น) ( $^\circ C$ )

### 9. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ( $Q_{out9}$ )

ได้มาจากความแตกต่างของพลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็กกับพลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก

$$Q_{out9} = Q_{in1} + Q_{in2} + Q_{in3} + Q_{in4} - Q_{out1} - Q_{out2} - Q_{out3} - Q_{out4} - Q_{out5} - Q_{out6} - Q_{out7} - Q_{out8} \quad (3.31)$$

### 3.4.3 สมดุลมวลของ recuperator

เนื่องด้วย recuperator เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียที่ออกจากเตาเผากับอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมคือ recuperator จะสามารถแสดงรายละเอียดของสมดุลมวลที่เข้าและออกจาก recuperator ดังต่อไปนี้

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

อัตราไหลของไอเสียเข้าสู่ recuperator เป็นอัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาเผาเพื่อใช้ในการอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (3.11) โดยหากพิจารณาว่าไม่มีการรั่วไหลของไอเสียออกสู่ภายนอกบริเวณท่อส่งไอเสียระหว่างเตาเผากับ recuperator จะสามารถหา  $\dot{m}_{flue,recup}$  ได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{flue,recup} = \dot{m}_{flue,furnace} \quad (3.32)$$

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

อัตราไหลของอากาศเข้าสู่ recuperator เป็นอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงก่อนทำการอุ่นด้วยไอเสีย ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (3.6) โดยหากไม่มีการรั่วไหลของอากาศบริเวณ recuperator และท่อส่งอากาศระหว่าง recuperator กับเตาเผา จะสามารถหา  $\dot{m}_{air,inlet}$  ได้ดังสมการ

$$\dot{m}_{air,inlet} = \dot{m}_{air,preheat} \quad (3.33)$$

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

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

$$\dot{m}_{flue,stack} = \dot{m}_{flue,recup} \quad (3.34)$$

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

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

$$\dot{m}_{air,outlet} = \dot{m}_{air,inlet} \quad (3.35)$$

### 3.4.4 สมดุลความร้อนของ recuperator

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาณควบคุม เมื่อพิจารณาปริมาณควบคุมคือ recuperator และมีระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) ด้วยกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) สามารถคำนวณหาสมดุลความร้อนของ recuperator ได้ โดยรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจาก recuperator มีดังนี้

#### 1. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียเข้า ( $\dot{Q}_{flue,recup}$ )

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

$$\dot{Q}_{flue,recup} = \dot{Q}_{flue,furnace} \quad (3.36)$$

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

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

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

$$\dot{Q}_{air,inlet} = \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}} \left( \int_{T_0}^{T_{air,inlet}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}} \left( \int_{T_0}^{T_{air,inlet}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \quad (3.37)$$

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

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

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

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

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

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



$$+ \frac{\dot{m}_{N_2, flue, stack}}{M_{N_2}} \left( \int_{T_0}^{T_{flue, stack}} \bar{c}_{p, N_2} dT \right) \quad (3.38)$$

เมื่อ	$\dot{m}_{CO_2, flue, stack}$	คืออัตราไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสีย (kg/s)
	$\dot{m}_{H_2O, flue, stack}$	คืออัตราไหลของไอน้ำในไอเสีย (kg/s)
	$\dot{m}_{SO_2, flue, stack}$	คืออัตราไหลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในไอเสีย (kg/s)
	$\dot{m}_{O_2, flue, stack}$	คืออัตราไหลของก๊าซออกซิเจนในไอเสีย (kg/s)
	$\dot{m}_{N_2, flue, stack}$	คืออัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนในไอเสีย (kg/s)
	$T_{flue, stack}$	คืออุณหภูมิของก๊าซไอเสียออกจาก recuperator (K)

#### 4. ความร้อนสัมผัสของอากาศออก ( $\dot{Q}_{air, outlet}$ )

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

$$\dot{Q}_{air, outlet} = \dot{Q}_{air, preheat} \quad (3.39)$$

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

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

### 3.5 องค์ประกอบและคุณสมบัติของน้ำมันเตา

น้ำมันเตาเป็นผลิตภัณฑ์จากน้ำมันดิบ โดยส่วนมากจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและมีกำมะถันผสมอยู่บ้างเล็กน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ซึ่งองค์ประกอบของน้ำมันเตาที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของธาตุต่างๆ ดังตารางที่ 3.2 ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงองค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย [13]

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก
C	86.4
H	11.6
S	2.0

องค์ประกอบของน้ำมันเตาในรูปของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก จะสามารถจำแนกเป็นสัดส่วนจำนวนโมลของแต่ละธาตุได้ ซึ่งน้ำมันเตาจำนวน 1 kmol ประกอบด้วย  $C = 0.3836$  kmol,  $H = 0.6131$  kmol และ  $S = 0.0033$  kmol

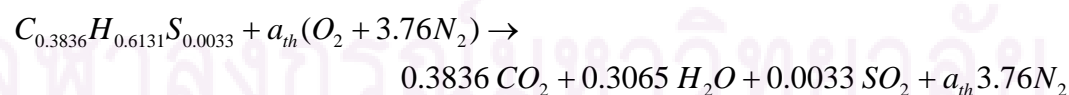
การพิจารณาค่าความร้อนเชื้อเพลิงของน้ำมันเตา โดยทั่วไปมักจะนำค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงมาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง นั้นหมายถึงการหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงจะถูกกำหนดสถานะอ้างอิงของสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงไว้ โดยสถานะอ้างอิงมาตรฐานจะอยู่ที่  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $1\text{ atm}$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

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำมันเตา [13]

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

### 3.6 การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

องค์ประกอบของน้ำมันเตาดังที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาเขียนสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎี ดังสมการ

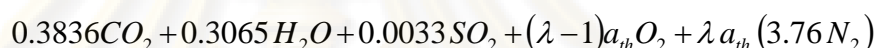
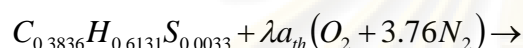


เมื่อ  $a_{th}$  คือ จำนวนโมลของออกซิเจนที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kmol ทางทฤษฎี ซึ่งจากการคำนวณหาสมดุลของสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงทางทฤษฎีข้างต้น จะได้ว่า

$a_{th}$  มีค่าเท่ากับ  $0.54015 \text{ kmol}_{O_2}/\text{kmol}_{fuel}$  จากนั้นนำไปคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (stoichiometric air-fuel ratio,  $AF_{stoic}$ ) ดังสมการ

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

สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาทางทฤษฎีเขียนขึ้นภายใต้เงื่อนไขการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วปริมาณอากาศที่ใช้จะสูงกว่าปริมาณอากาศที่ใช้ในทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกินสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ ดังนี้



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

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{SO_2} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{(\lambda - 1)a_{th}}{0.3836 + 0.0033 + (\lambda - 1)a_{th} + 3.76\lambda a_{th}} \quad (3.40)$$

เมื่อเขียนค่า  $\lambda$  อยู่ในรูปของ  $\%O_2$  จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{(0.3869 - a_{th})\left(\frac{\%O_2}{100}\right) + a_{th}}{a_{th} - 4.76a_{th}\left(\frac{\%O_2}{100}\right)} \quad (3.41)$$

จากการหาสมดุลของสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงทางทฤษฎี ทราบว่า  $a_{th}$  มีค่าเท่ากับ  $0.54015$  ดังนั้น

$$\lambda = \frac{0.54015 - 0.153 \left( \frac{\% O_2}{100} \right)}{0.54015 - 2.571 \left( \frac{\% O_2}{100} \right)} \quad (3.42)$$

เมื่อทราบค่า  $\lambda$  จะสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (actual air-fuel ratio,  $AF_{actual}$ ) ได้จากสมการ

$$AF_{actual} = \lambda AF_{stoic} \quad (3.43)$$

### 3.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างของฉนวนเตาเผา

การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างของฉนวนเตาเผาหลักตามชั้นของฉนวน สามารถคำนวณได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 วิธีของการถ่ายเทความร้อน โดยมีข้อสมมุติ ดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ โดยทิศทางการถ่ายเทความร้อนตั้งฉากกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อน
2. อุณหภูมิผิวของชั้นในสุดจะมีการประมาณเท่ากับอุณหภูมิของก๊าซร้อนในเตาเผาหลัก

โดยเมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างของฉนวนเตาเผาหลักจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ผนังเตาเผาหลักชั้นในสุดจะมีค่าสูงที่สุดและค่อยๆลดลงตามความหนา และคุณสมบัติของฉนวนในแต่ละชั้น

### 3.8 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

การออกแบบทางวิศวกรรม วิศวกรผู้ออกแบบส่วนมากมีความมุ่งหวังให้โครงการนั้นเป็นโครงการที่มีประสิทธิภาพและให้ผลดีทางด้านอุตสาหกรรม โดยยึดหลักวิชาการประยุกต์ให้สามารถเกิดผลงานที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในการออกแบบต่างๆ เช่น การออกแบบเครื่องจักร การออกแบบกระบวนการผลิต หรือการออกแบบฉนวนกันความร้อนภายในเตาเผาหลัก แม้ว่าจะพบว่าเป็นการออกแบบที่ดีในเชิงวิศวกรรม แต่บางครั้งพบว่า งานออกแบบต่างๆเหล่านั้นไม่เป็นผลดีในทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งหมายถึงไม่เหมาะสมในการลงทุนนั่นเอง ในปัจจุบันนี้เนื่องจากความจำกัดของทรัพยากร เช่น วัสดุแรงงาน ทรัพยากรสิ้น รวมทั้งเวลา เป็นต้น ทำให้การออกแบบทางด้านวิศวกรรมมีข้อจำกัดมากขึ้น การออกแบบเพื่อให้เกิดผลดีทางด้านวิศวกรรมด้านเดียวนั้นทำ

ได้ยาก การพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ในด้านวิศวกรรมต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆและการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า โดยการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์นี้จะช่วยให้การตัดสินใจในการลงทุนทำโครงการต่างๆ ทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

### 3.8.1. ระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย ( Simple Payback Period )

การคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย เป็นวิธีการที่ง่ายที่ทำให้คำนวณผลตอบแทนของโครงการได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมักใช้ทั่วไปกับมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่มีเงินลงทุนไม่มากนัก ข้อเสียของการคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายก็คือ ไม่ได้พิจารณามูลค่าทางการเงินที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ซึ่งเป็นผลจากอัตราดอกเบี้ยหรืออัตราเงินเฟ้อต่าง ๆ ดังนั้น ในมาตรการที่มีจำนวนเงินลงทุนสูง จึงไม่เหมาะสมกับมาตรการที่มีอายุการคำนวณนานๆ ซึ่งระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายสามารถหาได้ดังนี้

$$n = \frac{TIC}{A_s} \quad (3.44)$$

เมื่อ

$TIC$  คือ ค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้ง (Total Installed Cost of the system)

$A_s$  คือ ค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ (Annual Money Saved)

$n$  คือ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

### 3.8.2. การหาอัตราผลตอบแทนการลงทุน ( Internal Rate of Return, IRR )

ในการวิเคราะห์โครงการใดๆ การหาอัตราผลตอบแทนสำหรับโครงการนั้นจะมีประโยชน์ต่อการตัดสินใจอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพราะว่าโครงการต่างๆเหล่านั้นมักจะมีแผนดำเนินงานโดยต้องอาศัยเงินทุนจากการกู้ยืม ซึ่งจะคืนเงินส่วนที่กู้ยืมมาได้โดยอาศัยผลประโยชน์จากโครงการในระยะเวลาที่จะดำเนินการในอนาคต ดังนั้นจะต้องรวมค่าดอกเบี้ยเป็นค่าใช้จ่าย และถ้าโครงการสามารถทำรายได้ให้มีอัตราผลตอบแทนสูงกว่าอัตราดอกเบี้ยการคืนเงินกู้ก็เท่ากับว่าโครงการนั้นมีกำไร ซึ่งผลตอบแทนการลงทุนสามารถหาได้ดังนี้

$$TIC = A_s \left[ \frac{1}{(1 + IRR)} + \frac{1}{(1 + IRR)^m} \right] \quad (3.44)$$

เมื่อ

$IRR$  คือ อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return)

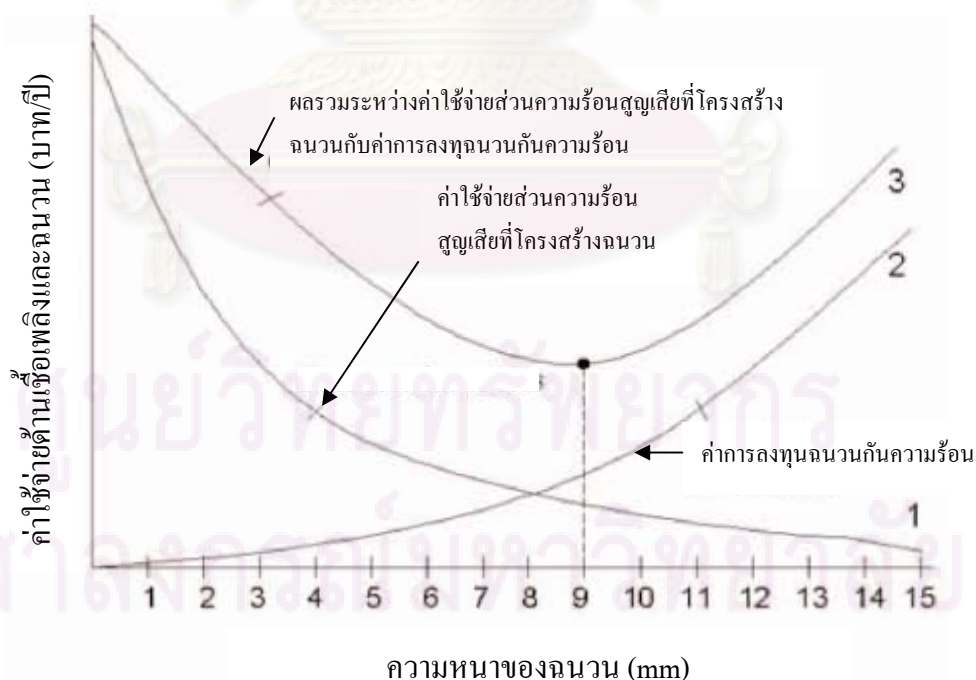
$TIC$  คือ ค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้ง (Total Installed Cost of the system)

$A_s$  คือ ค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ (Annual Money Saved)

$m$  คือ อายุการใช้งานอุปกรณ์ (Operating Time)

### 3.8.3. การหาความหนาที่เหมาะสมของฉนวน

ในการวิเคราะห์หาความหนาที่เหมาะสมของฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก นั้นเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเพราะความหนาของชั้นฉนวนที่มีความเหมาะสม จะส่งผลต่อการใช้พลังงานเชื้อเพลิงของเตาเผา เพราะสามารถลดปริมาณการสูญเสียเชื้อเพลิงจากโครงสร้างฉนวนลงได้ ซึ่งความหนาที่เหมาะสมของฉนวนนั้นสามารถหาได้จากจุดต่ำสุดของผลรวมระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของฉนวนที่ใช้งานไปต่อปีรวมกับ รวมกับ ค่าใช้จ่ายจากการสูญเสียพลังงานที่โครงสร้างฉนวนต่อปี แสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายจากการสูญเสียเชื้อเพลิงที่โครงสร้างฉนวนจะลดลงตามความหนาของฉนวนที่เพิ่มขึ้น (เส้นหมายเลข 1) แต่ราคาของวัสดุฉนวนจะเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น (เส้นหมายเลข 2) โดยเมื่อพิจารณาผลรวม (เส้นหมายเลข 1 รวมกับ เส้นหมายเลข 2) คือเส้นหมายเลข 3 ก็จะได้จุดต่ำสุดของกราฟซึ่งเป็นขนาดความหนาที่เหมาะสมของฉนวนที่จะใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างของฉนวน โดยในการพิจารณาค่าใช้จ่ายจากการสูญเสียพลังงานที่โครงสร้างฉนวนนั้น จำเป็นต้องทราบชั่วโมงการทำงานของเตาเผาเหล็กต่อปี ราคาเชื้อเพลิง อุณหภูมิใช้งานและราคาของวัสดุฉนวนที่ความหนาต่างๆ ทำให้กราฟความหนาที่เหมาะสมมีความสัมพันธ์กับตัวแปรเหล่านี้



รูปที่ 3.7 กราฟการหาความหนาที่เหมาะสมของฉนวน [13]

## บทที่ 4

### การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยจะมีการตรวจวัดข้อมูลต่างๆ ของเตาเผาเหล็กของโรงงาน ตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก รวมทั้งนำมาประกอบการพิจารณาการสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างฉนวนในช่วงการทำงานต่างๆ โดยการตรวจวัดข้อมูลสามารถหาได้จาก 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นข้อมูลที่ได้จากการสอบถามข้อมูลและเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ของโรงงานโดยตรง ส่วนที่สองเป็นข้อมูลจากการนำอุปกรณ์เข้าทำการตรวจวัด ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของข้อมูลที่ต้องการตรวจวัดและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัด ดังนี้

#### 4.1 รายละเอียดและวิธีตรวจวัดข้อมูลของเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 4.1 วิธีการเก็บข้อมูลของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง

รายการที่จะตรวจวัด	วิธีการได้มาของข้อมูลและตัวอย่างข้อมูล
อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผา	มิมิเตอร์น้ำมันเตา C ของทางโรงงาน
อัตราการไหลของอากาศเข้าเตาเผา	มิมิเตอร์ของโรงงานและวัดโดยใช้
อัตราการผลิต (หรือการป้อน) เหล็กของเตาเผา	มีข้อมูลนับจำนวนแท่งของเหล็กที่ออกจากเตาเผา
สัดส่วนของสเกลที่ออกมาจากเหล็ก	ใช้ข้อมูลสเกลของทางโรงงานที่เก็บรายปี
อุณหภูมิของอากาศภายนอก	วัด โดยใช้ thermocouple
อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้า recuperator	มีข้อมูลของโรงงานและวัดโดยใช้ thermocouple
อุณหภูมิของอากาศออกจาก recuperator	มีข้อมูลของโรงงานและวัดโดยใช้ thermocouple
อุณหภูมิของเชื้อเพลิงก่อนเข้าเตาเผา	มีข้อมูลของโรงงานและวัดโดยใช้ thermocouple
อุณหภูมิในเตาเผา	มีข้อมูลของโรงงาน และวัดโดยใช้ thermocouple
อุณหภูมิของเหล็กที่ออกมาจากเตาเผา	ประมาณเท่ากับอุณหภูมิภายในเตาเผา
อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากเตาเผา	มีข้อมูลของโรงงาน
อุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจาก recuperator ไปสู่ stack	มีข้อมูลของโรงงานและวัดโดยใช้ thermocouple
อุณหภูมิที่ผิวเตา	วัดโดยใช้ thermocouple และ thermal imaging camera
อัตราการไหลของไอเสีย	คำนวณจากข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดคุณสมบัติไอเสีย

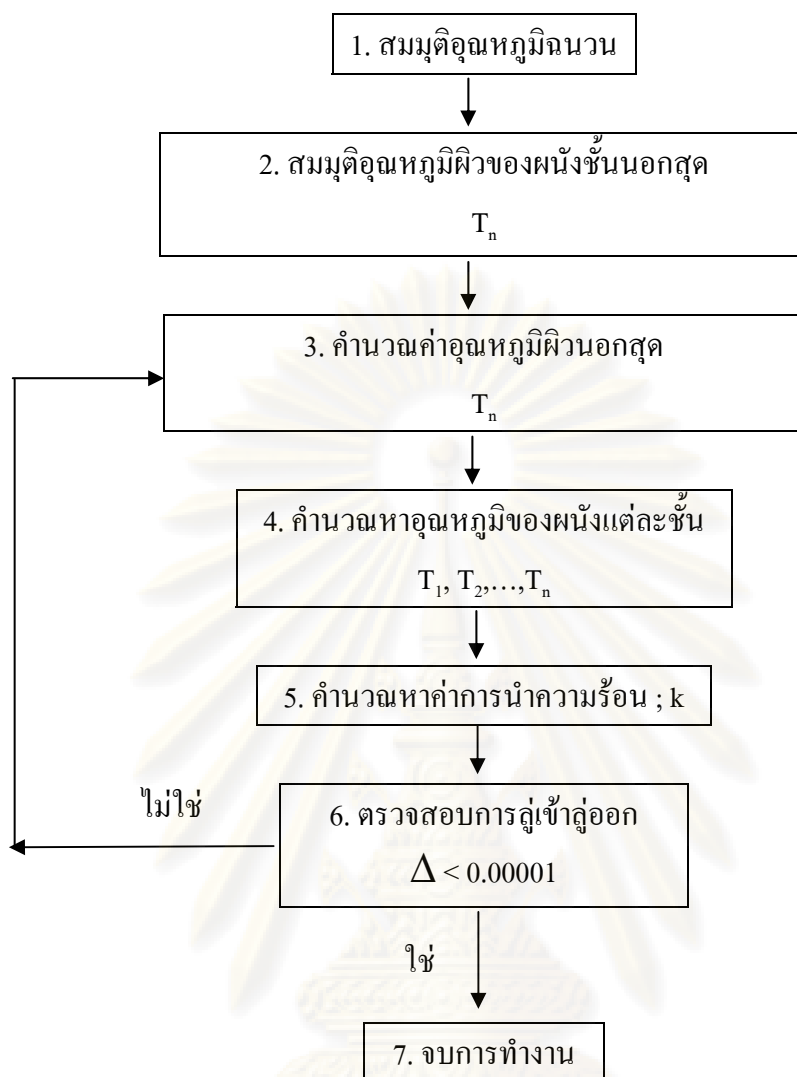
รายการที่จะตรวจวัด	วิธีการได้มาของข้อมูลและตัวอย่างข้อมูล
ปริมาณองค์ประกอบของก๊าซต่างๆ ในไอเสีย	วัดโดยใช้ thermocouple และ เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย
ความดันในตัวเตาเผา	มีข้อมูลของโรงงาน
อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนออกจากเตา	วัดโดยใช้ thermocouple
อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนเข้าสู่เตา	วัดโดยใช้ thermocouple
อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน	มีมิเตอร์ของโรงงาน
ขนาดของเตาเผาและส่วนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง	ได้ข้อมูลจาก drawing ของเตาเผา

#### 4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนเตาเผา

ขั้นตอนการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิ ประกอบด้วย

1. สมมุติอุณหภูมิของฉนวน เพื่อคำนวณหา ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน เช่น สภาพการนำความร้อน และค่าความจุความร้อนของฉนวนแต่ละชั้น เนื่องจากค่าคุณสมบัติเหล่านี้ของฉนวนแต่ละชั้นเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ
  2. สมมุติอุณหภูมิผิวของผนังชั้นนอกสุดของเตาเผาเหล็ก
  3. คำนวณหาอุณหภูมิผิวของผนังชั้นนอกสุดของเตาเผาเหล็ก บนเงื่อนไขของการถ่ายเทระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทโดยการนำความร้อนจากผนังในสุดของเตาเผาเหล็กไปสู่ผนังนอกสุดของเตาเผาเหล็กกับความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากผนังนอกสุด ไปสู่อากาศภายนอก
  4. คำนวณหาอุณหภูมิของผนังฉนวนแต่ละชั้น โดยใช้อุณหภูมิของผนังชั้นนอกสุดเป็นเกณฑ์
  5. ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแต่ละชั้นเพื่อหาอุณหภูมิแต่ละฉนวนกันความร้อน เพื่อนำไปหาคุณสมบัติ เช่น สภาพการนำความร้อน และค่าความจุความร้อนของฉนวนแต่ละชั้น
  6. กลับไปทำขั้นตอนที่ 3 อีกครั้ง
  7. การคำนวณจะหยุดเมื่อความแตกต่างของค่าการถ่ายความร้อนผ่านผนังโดยการนำความร้อนผ่านฉนวนกับความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากผนังนอกสุด ไปสู่อากาศภายนอกมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด ในที่นี้ใช้ค่า 0.00001
- แผนผังการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.1





รูปที่ 4.1 แผนผังการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนเตาเผา

#### 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

##### 4.3.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Data logger and Thermocouple)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 1) Logger Communicator ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดโดยใช้ Thermocouple และ 2) Thermocouple ซึ่งใช้เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆ อาทิเช่น อุณหภูมิผนังเตา, อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น และอุณหภูมิอากาศ เป็นต้น โดย Thermocouple ที่ใช้ในงานวิจัยมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับบริเวณที่ทำการตรวจวัด คือ Thermocouple แบบ probe ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิของผนังเตาเผาตามชั้นต่างๆ Thermocouple ที่มีหัวแบบ contact และหัวแบบ immersion ใช้วัดอุณหภูมิที่ผิวผนังนอกสุดของเตาเผา, อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นและสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 4.2 Logger Communicator



รูปที่ 4.3 Thermocouple probe



รูปที่ 4.4 Thermocouple หัวแบบ contact และ immersion

#### 4.3.2 เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย (Flue gas analyzer)

เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสียใช้เพื่อทำการวัดปริมาณ  $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  และ  $SO_2$  ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละ โดยโมลแบบแห้ง (dry basis) เนื่องจากภายในมีเครื่องวัดความชื้นก่อนทำการวิเคราะห์ ในส่วนของการวัดอุณหภูมิไอเสียจะใช้ Thermocouple type K ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง  $-40$  ถึง  $1200$  °C และมีความละเอียดในการแสดงผลของอุณหภูมิอยู่ที่  $0.1$  °C



รูปที่ 4.5 Flue gas analyzer

#### 4.3.3 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ (Anemometer)

อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ คือ Anemometer ใช้เพื่อวัดความเร็วของอากาศที่เข้าสู่อุปกรณ์อุ่นอากาศ (Recuperator)



รูปที่ 4.6 Anemometer

#### 4.3.4 กล้องถ่ายภาพเชิงความร้อน (Thermal Imaging Camera)

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



รูปที่ 4.7 Thermal imaging camera

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ก่อนการปรับปรุงฉนวนของเตาเผาเหล็ก

ในการวิเคราะห์ก่อนการปรับปรุงฉนวนของเตาเผาเหล็ก เริ่มจากการศึกษาสมดุลพลังงานในช่วงการทำงานต่างๆ ของเตาเผาเหล็ก เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการใช้พลังงาน ในช่วงการทำงานต่างๆ ของเตาเผาเหล็กในปัจจุบัน โดยเฉพาะที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก จากนั้นจึงทำการคำนวณการสูญเสียพลังงานที่โครงสร้างฉนวนในช่วงการทำงานต่างๆ ตามกระบวนการที่แสดงไว้ในบทที่ 3 โดยการคำนวณใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก เพื่อนำผลที่ได้ไปศึกษาถึงปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนต่อไป ซึ่งผลการคำนวณและการวิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่างในปัจจุบันแสดงได้ดังนี้

#### 5.1 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง

##### 5.1.1 สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กของบริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

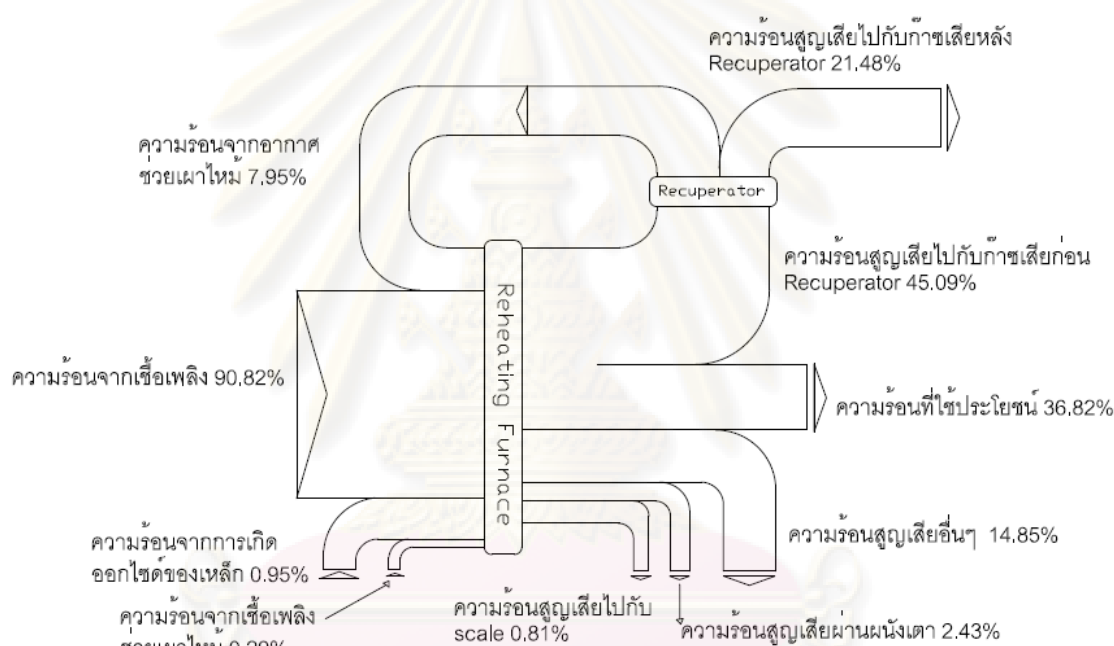
สภาวะการทำงานของเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงการทำงาน ประกอบด้วย ช่วงรีดเหล็ก, ช่วงอุ่นเตาและช่วงเร่งเตา โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### ช่วงรีดเหล็ก

เป็นช่วงที่มีการรีดเหล็ก โดยเหล็กจะได้รับความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเหล็กให้มีอุณหภูมิที่พอเหมาะในการรีด ในที่นี้จะมีการควบคุมอุณหภูมิของ pre-heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ  $1,150\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ ควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ  $1,250\text{ }^{\circ}\text{C}$  เวลาการทำงานในช่วงรีดเหล็กของเตาเผาเหล็กของ บ.กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 21:30 – 18:30 น.

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงรีดเหล็ก ได้แสดงเป็นแผนผังเชิงก็ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ  $65,380.54\text{ MJ/hr}$  ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 4 ส่วน ประกอบด้วยพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 90.82%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ

คิดเป็น 7.95%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง คิดเป็น 0.95% , พลังงานความร้อนจากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก คิดเป็น 0.29% สำหรับพลังงานความร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มอุณหภูมิเหล็ก คิดเป็น 36.82%, พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 45.09% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วน โดย recuperator ซึ่งจะมีพลังงานสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ recuperator คิดเป็น 21.48% , พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับช่องเปิดและอื่นๆ คิดเป็น 14.85%, พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 2.43% และพลังงานความร้อนสูญเสียไปกับสเกล คิดเป็น 0.81%



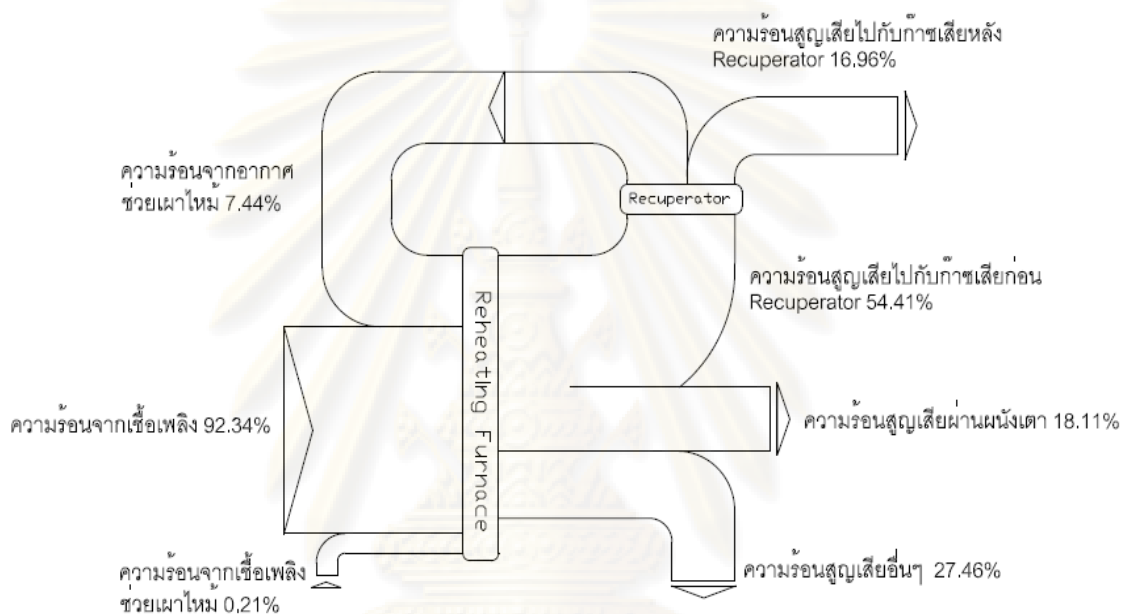
รูปที่ 5.1 แผนผังแรงก๊ของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) ช่วงรีดเหล็ก

### ช่วงอุ่นเตา

เป็นช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาเหล็กที่อุณหภูมิต่ำลง เพื่อรอทำการรีดเหล็กในที่นี้มีการควบคุมอุณหภูมิของ pre-heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 850 °C และควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,050 °C เวลาการทำงานในช่วงอุ่นเตาของเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 18:30 – 21:00 น.

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงอุ่นเตา ได้แสดงเป็นแผนผังแรงก๊ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ 9,237.84 MJ/hr ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความ

ร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 92.34%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ คิดเป็น 7.44%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง คิดเป็น 0.21% สำหรับพลังงานความร้อนขอออกสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ ความร้อนสูญเสียกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 54.41% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ recuperator คิดเป็น 16.96% พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 18.11% พลังงานความร้อนที่ และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 27.46%



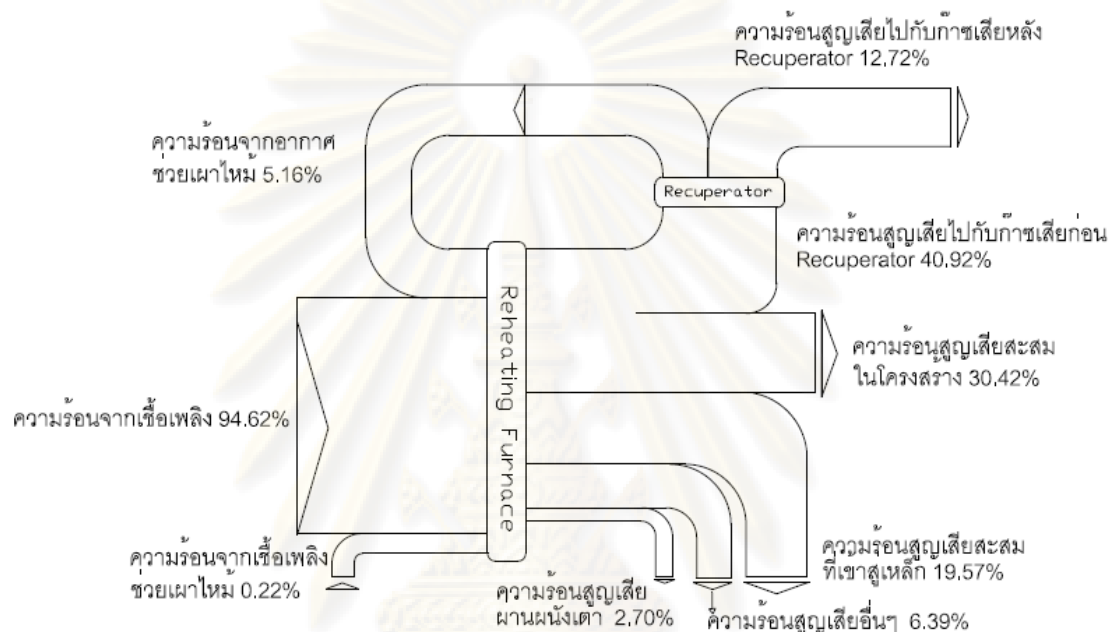
รูปที่ 5.2 แผนผังเชิงกลของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) ช่วงอุ่นเตา

### ช่วงเร่งเตา

เป็นช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิที่ควบคุมในช่วงอุ่นเตา มาเป็นอุณหภูมิที่ควบคุมในช่วงรีดเหล็ก เวลาที่ใช้การอุ่นเตาของ บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 21:00 – 21:30 น.

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงเร่งเตา ได้แสดงเป็นแผนผังเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ 40,971.34 MJ ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 94.62%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ คิดเป็น 5.16%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง คิดเป็น 0.22% สำหรับพลังงานความร้อนขอออกสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ

พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียที่ออกจากเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 40.92% อย่างไรก็ตาม พลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีพลังงานความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ recuperator คิดเป็น 12.72% พลังงานความร้อนที่สะสมในโครงสร้างเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 30.42% พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 2.70% พลังงานความร้อนที่สะสมในเหล็กที่ค้างในเตาเผา คิดเป็น 19.57% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 6.39 %



รูปที่ 5.3 แผนผังเชิงกลของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน) ช่วงเร่งเตา

### 5.1.2 สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กของ บริษัท อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

สถานะการทำงานของเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงการทำงาน ประกอบด้วย ช่วงรีดเหล็กและช่วงเร่งเตา โดยมีรายละเอียดดังนี้

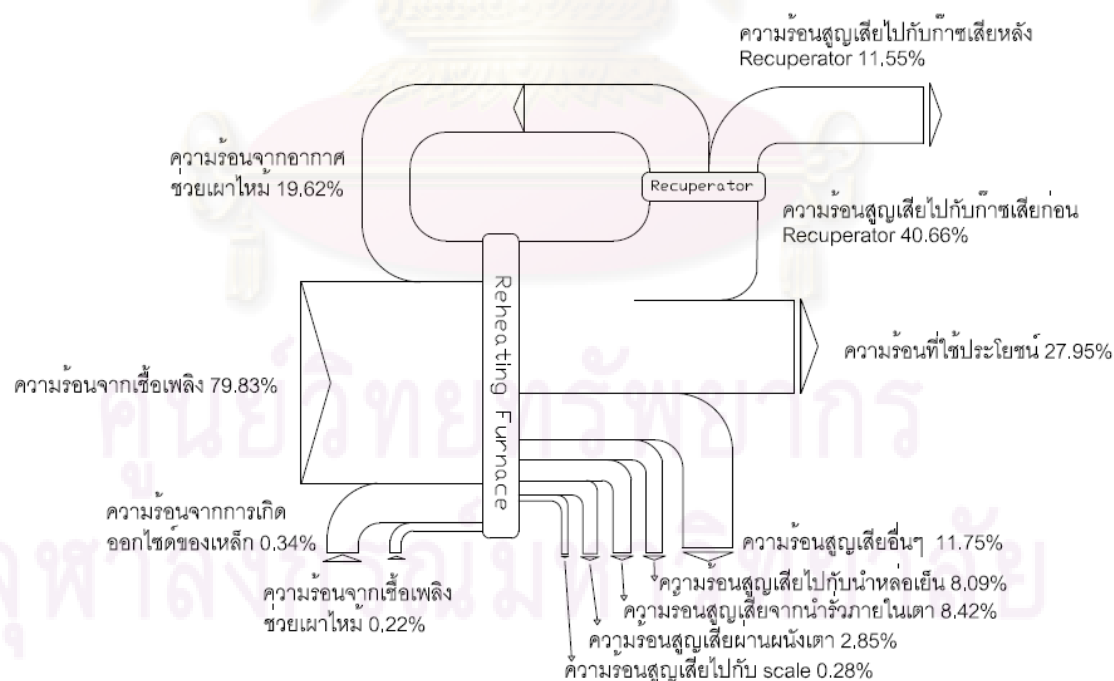
#### ช่วงรีดเหล็ก

เป็นช่วงที่มีการรีดเหล็ก โดยเหล็กจะได้รับความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเหล็กให้มีอุณหภูมิที่พอเหมาะในการรีด ในที่นี้จะมีการควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 970 °C และ ควบคุมอุณหภูมิของ soaking zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,080 °C เวลาการทำงานในช่วงรีดเหล็ก



ของเตาเผาเหล็กของ บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – ศุกร์ เวลา 22:00 – 09:00 น. และ วันเสาร์- อาทิตย์และวันหยุดนักขัตฤกษ์

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงรีดเหล็ก ได้แสดงเป็นแผนผังเชิงกึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ 78,516.37 MJ/hr ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 4 ส่วน ประกอบด้วยพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 79.83%, พลังงานความร้อนจากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก คิดเป็น 0.34%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ คิดเป็น 19.62%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง คิดเป็น 0.22% สำหรับพลังงานความร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 7 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มอุณหภูมิเหล็ก คิดเป็น 27.95%, พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียน้ำที่ออกจากเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 40.66% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ recuperator คิดเป็น 11.55% พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากมีน้ำรั่วในเตาเผา 8.42%, พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากน้ำหล่อเย็น คิดเป็น 8.09%, พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 2.85% พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับสเกล คิดเป็น 0.28% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 11.75 %

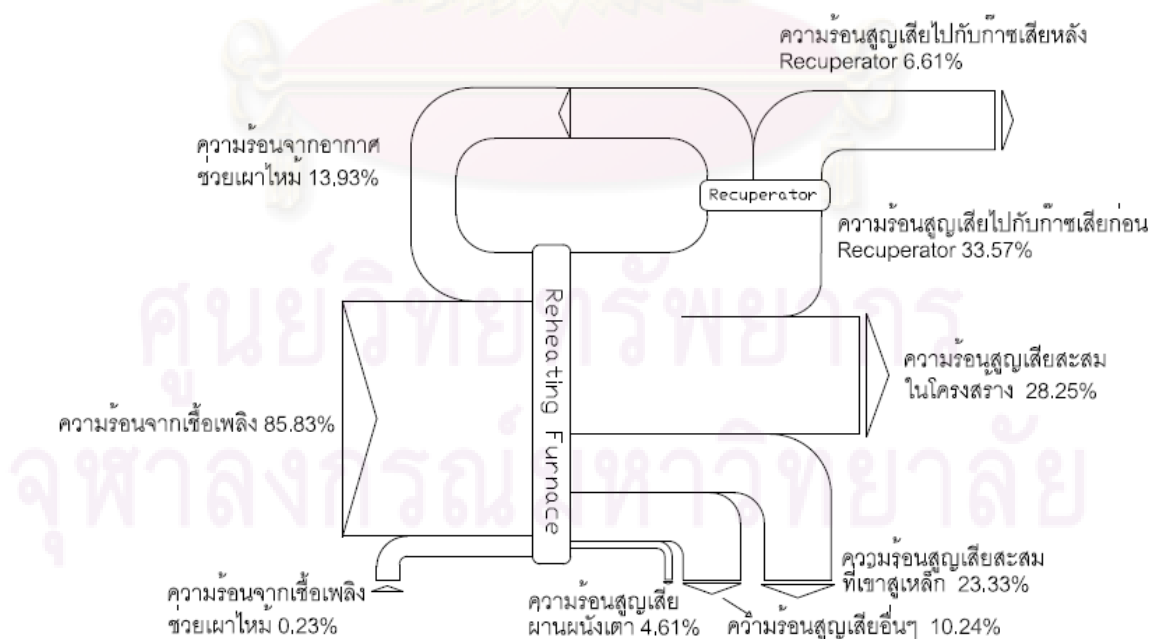


รูปที่ 5.4 แผนผังเชิงกึ่งเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ช่วงรีดเหล็ก

## ช่วงเร่งเตา

เป็นช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กที่เย็นตัวลงซึ่งปกติจะอยู่ที่ประมาณ 700 °C ที่ heating zone และ อุณหภูมิที่ 870 °C ของ soaking zone มาเป็นอุณหภูมิที่ควบคุมในช่วงรีดเหล็ก เวลาที่ใช้การอุ่นเตาของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – ศุกร์ เวลา 14:00 – 22:00 น.

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงเร่งเตา ได้แสดงเป็นแผนผังเชิงกึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ ความร้อนรวม 207,059.69 MJ ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 85.90%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ คิดเป็น 13.93%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง คิดเป็น 0.23% สำหรับ พลังงานความร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียที่ออกจากเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 33.57% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ recuperator คิดเป็น 5.51% พลังงานความร้อนที่สะสมในโครงสร้างเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 28.25% พลังงานความร้อนที่สะสมในเหล็กที่ค้างในเตาเผา คิดเป็น 23.33% พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 4.61% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 10.24%



รูปที่ 5.5 แผนผังเชิงกึ่งเตาเผาเหล็ก บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ช่วงเร่งเตา

### 5.1.3 สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กของบริษัท ที ที เอส สตีล จำกัด

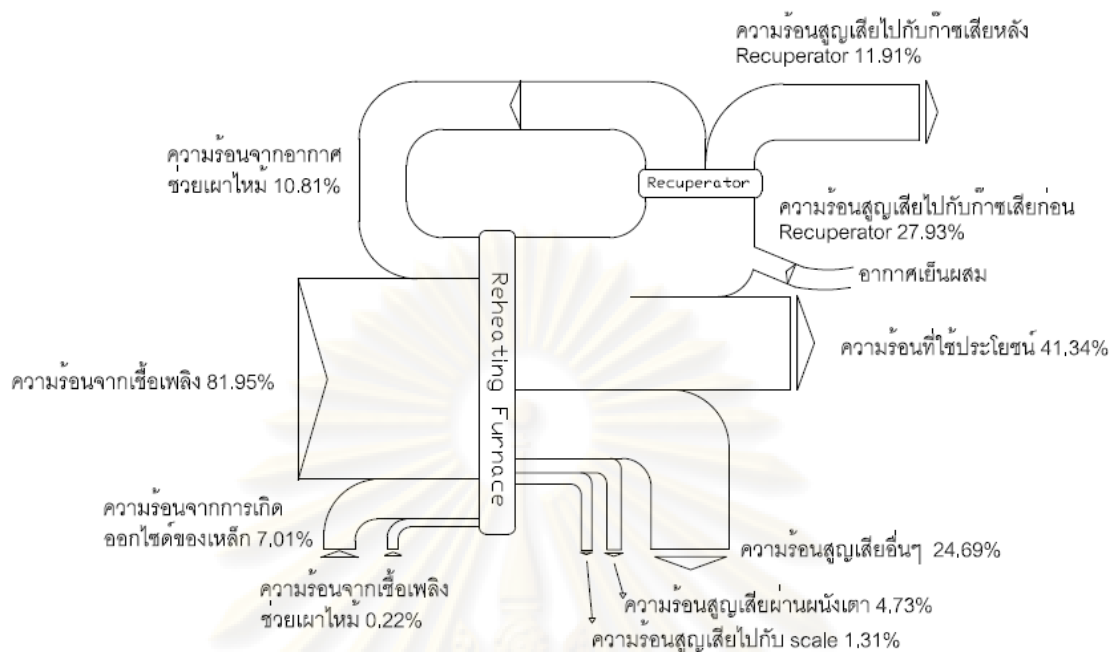
สภาวะการทำงานของเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงการทำงาน ประกอบด้วย ช่วงรีดเหล็กและช่วงเร่งเตา โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### ช่วงรีดเหล็ก

เป็นช่วงที่มีการรีดเหล็ก โดยเหล็กจะได้รับความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเหล็กให้มีอุณหภูมิที่พอเหมาะในการรีด ในที่นี้จะมีการควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,120 °C และ ควบคุมอุณหภูมิของ soaking zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,250 °C เวลาการทำงานในช่วงรีดเหล็กของเตาเผาเหล็กของ บ.ที ที เอส สตีล จำกัด คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 06:30– 17:00 น.

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงรีดเหล็ก ได้แสดงเป็นแผนผังแซงก์ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ 39,264.28 MJ/hr ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 81.95%, พลังงานความร้อนจากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก คิดเป็น 7.01%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ คิดเป็น 10.81%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง คิดเป็น 0.22% สำหรับพลังงานความร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มอุณหภูมิเหล็ก คิดเป็น 41.34% พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียกับไอเสียนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 27.93% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจาก recuperator คิดเป็น 11.91% , พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็กคิดเป็น 4.73%, พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับสเกลคิดเป็น 1.31% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่น ๆ คิดเป็น 24.69%

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



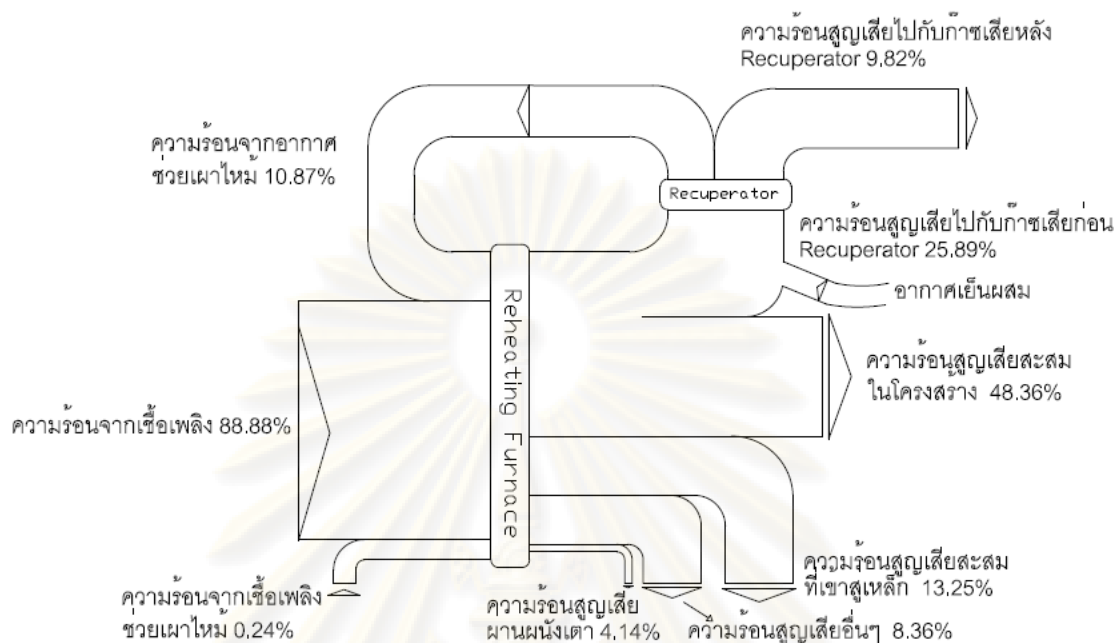
รูปที่ 5.6 แผนผังแรงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ช่วงรีดเหล็ก

### ช่วงเร่งเตา

เป็นช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กที่เย็นตัวลงซึ่งปกติจะอยู่ที่ประมาณ 590 °C ที่ heating zone และ อุณหภูมิที่ 750 °C ของ soaking zone มาเป็นอุณหภูมิที่ควบคุมในช่วงรีดเหล็ก เวลาที่ใช้การเร่งเตาของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 05:00 – 06:30 น.

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงเร่งเตา ได้แสดงเป็นแผนผังแรงกึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ ความร้อนรวม 32,205.75 MJ/ครั้ง ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 88.88%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ คิดเป็น 10.87%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง คิดเป็น 0.24% สำหรับ พลังงานความร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ พลังงานความร้อนที่สะสมใน โครงสร้างเตาเผาเหล็ก เนื่องจากต้องใช้พลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิจนกว่าความร้อนของเตาเผาเหล็กคิดเป็น 48.36%, พลังงานความร้อนที่สูญเสียกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กคิดเป็น 25.89% อย่างไรก็ตาม พลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ recuperator คิดเป็น 9.82% , พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็กคิดเป็น

4.14% , พลังงานความร้อนสูญเสียสะสมเข้าสู่เหล็กคิดเป็น 13.25% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 8.36%



รูปที่ 5.7 แผนผังแรงก๊ของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ช่วงเร่งเตา

#### 5.1.4 สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กของ บริษัท แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน)

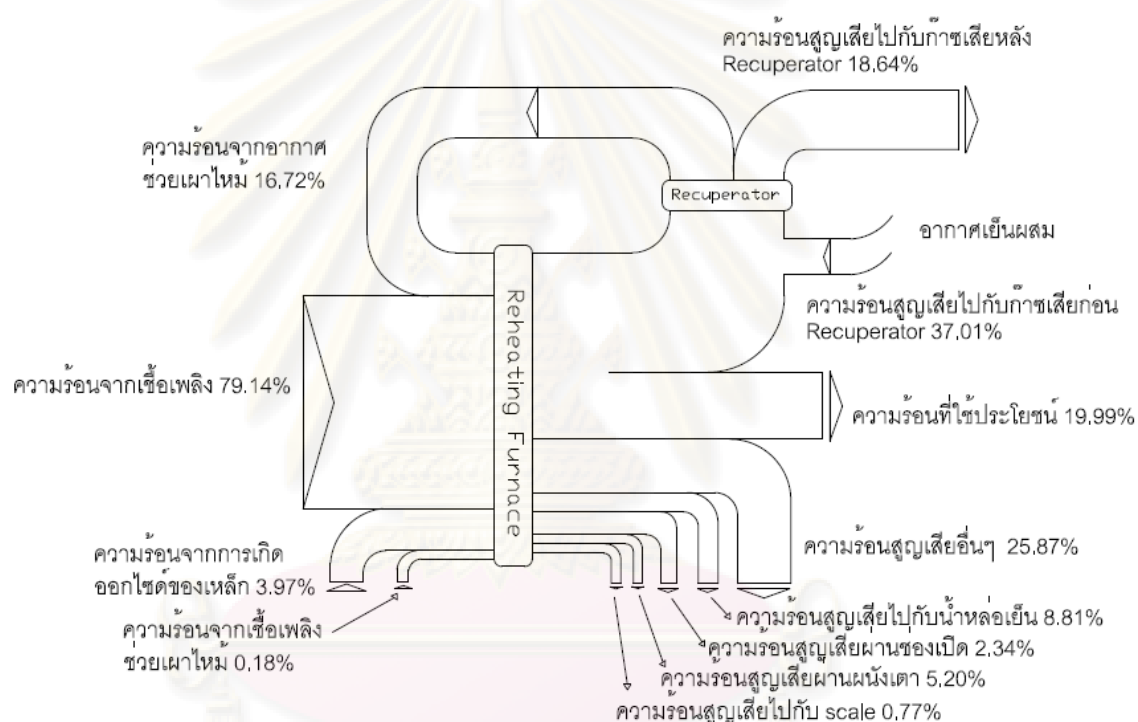
สภาวะการทำงานของเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงการทำงาน ประกอบด้วย ช่วงรีดเหล็ก, ช่วงอุ่นเตา และช่วงเร่งเตา โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### ช่วงรีดเหล็ก

เป็นช่วงที่มีการรีดเหล็ก โดยเหล็กจะได้รับความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเหล็กให้มีอุณหภูมิที่พอเหมาะในการรีด ในที่นี้จะมีการควบคุมอุณหภูมิของ heating zone และ soaking zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,250 °C เวลาการทำงานในช่วงรีดเหล็กของเตาเผาเหล็กของ บ.แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ ตลอด 24 ชั่วโมง แต่จะมีการหยุดรีดเหล็กในช่วงอุ่นเตาเพื่อซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงรีดเหล็ก ได้แสดงเป็นแผนผังแรงก๊ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ 110,964.45 MJ/hr ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 4 ส่วน ประกอบด้วยพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 79.14%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ คิดเป็น 16.72%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง คิดเป็น 0.18% , พลังงาน

ความร้อนจากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก คิดเป็น 3.97% สำหรับพลังงานความร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 7 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มอุณหภูมิเหล็ก คิดเป็น 19.99%, พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 37.01% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออก recuperator คิดเป็น 18.64% , พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับช่องเปิดคิดเป็น 2.34%, พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก คิดเป็น 5.20%, พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับสเกลคิดเป็น 0.77% , พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็นคิดเป็น 8.81 และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 25.87%

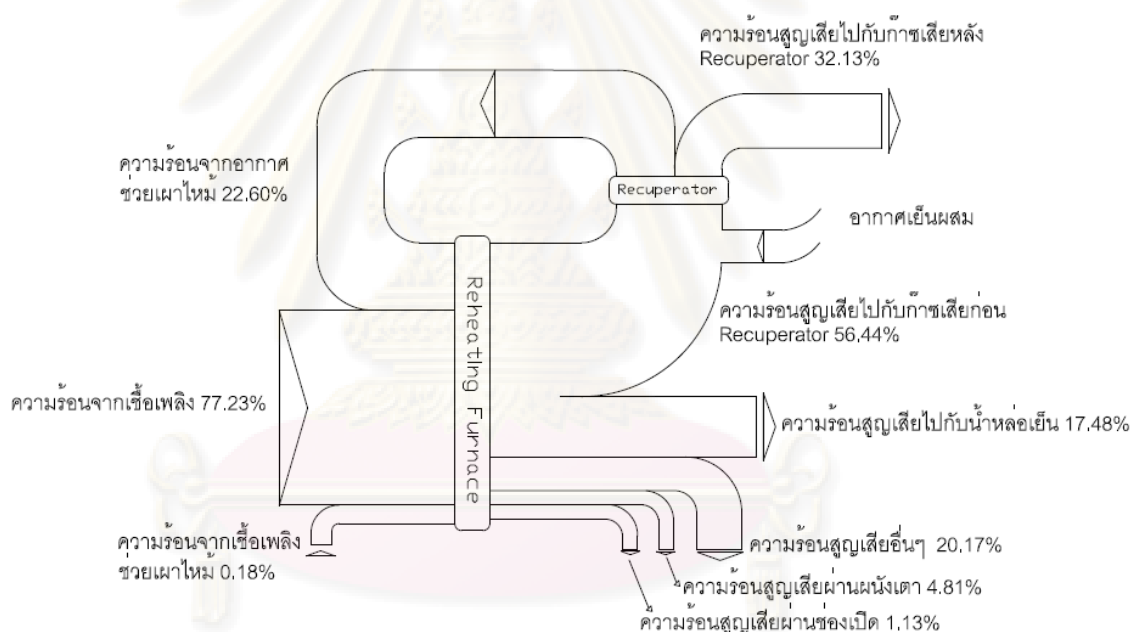


รูปที่ 5.8 แผนผังแรงกึ่งของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น แพลทมิค จำกัด (มหาชน) ช่วงรีดเหล็ก

### ช่วงอุ่นเตา

เป็นช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาเหล็กให้อุณหภูมิต่ำลง เพื่อรอทำการซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ โดยจะหยุดการใช้พลังงานของ heating zone เพื่อควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,000 °C ส่วน soaking zone ควบคุมอุณหภูมิของไว้ที่อุณหภูมิ 1,250 °C จากข้อมูลของโรงงานการทำงานในช่วงอุ่นเตา ของเตาเผาเหล็กของ บ.แอล พี เอ็น แพลทมิค จำกัด (มหาชน) จะเกิดขึ้นประมาณ 1 ครั้งต่อสัปดาห์ ครั้งละ 2 ชั่วโมง

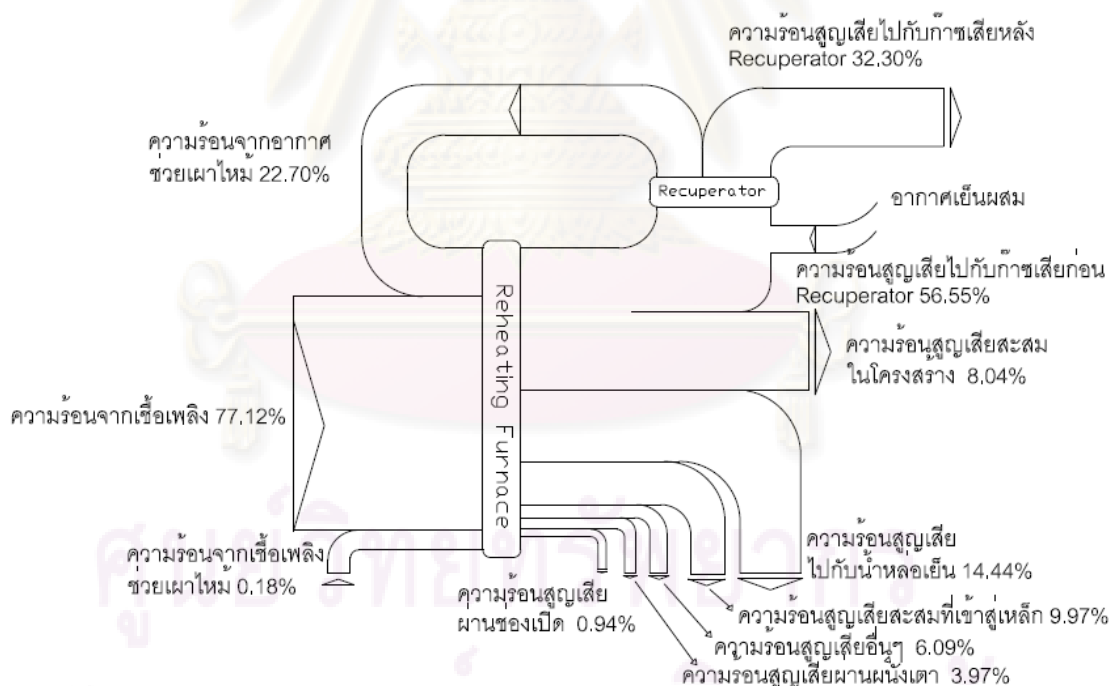
ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงอุ่นเตา ได้แสดงเป็นแผนผัง  
 แชนจ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ 55,927.12  
 MJ/hr ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความ  
 ร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 77.23%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศคิดเป็น  
 22.60%, พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงคิดเป็น 0.18% สำหรับพลังงานความ  
 ร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ  
 พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียนที่ออกจากเตาเผาเหล็กคิดเป็น 56.44% อย่างไรก็ตาม  
 พลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับ  
 ไอเสียออกจาก recuperator คิดเป็น 32.13%, พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็กคิดเป็น  
 4.81%, พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดคิดเป็น 1.13%, พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับน้ำ  
 หล่อเย็นคิดเป็น 17.48% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 20.17%



รูปที่ 5.9 แผนผังแชนจ์ของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น พลัททิล จำกัด (มหาชน) ช่วงอุ่นเตา  
 ช่วงเร่งเตา

เป็นช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิที่ควบคุมไว้ที่  $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่ heating zone  
 ในช่วงอุ่นเตา มาเป็นอุณหภูมิ  $1,250\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากข้อมูลของโรงงานการทำงานในช่วงเร่งเตา ของเตา  
 เหล็กของ บ.แอล พี เอ็น พลัททิล จำกัด (มหาชน) จะเกิดขึ้นประมาณ 1 ครั้งต่อสัปดาห์ ครั้งละ 3  
 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงเร่งเตา ได้แสดงเป็นแผนผังแซงก์ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 โดยปริมาณพลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก คือ 203,110.93 MJ/ครั้ง ซึ่งคิดเป็น 100% โดยสามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง คิดเป็น 77.12 % , พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ คิดเป็น 22.70 % , พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง คิดเป็น 0.18% สำหรับพลังงานความร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 7 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุด คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กคิดเป็น 56.55% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจาก recuperator คิดเป็น 32.30% , พลังงานความร้อนที่สะสมใน โครงสร้างเตาเผาเหล็ก เนื่องจากต้องใช้พลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิจนกั้นความร้อนของเตาเผาเหล็กคิดเป็น 8.04% , พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็กคิดเป็น 3.97% พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็นคิดเป็น 14.44% , ความร้อนที่สูญเสียไปผ่านช่องเปิดคิดเป็น 0.94% , พลังงานความร้อนที่สูญเสียสะสมเข้าสู่เหล็กคิดเป็น 9.97% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 6.09 %



รูปที่ 5.10 แผนผังแซงก์ของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น แพลทมิล จำกัด (มหาชน) ช่วงเร่งเตา

จากผลของการคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่างข้างต้น เมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก (ไม่รวมโครงสร้างพื้นฉนวน) พบว่า เกิดจาก 2 ส่วนหลักๆ คือ ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวนและความร้อนสูญเสีย



สะสมในโครงสร้างฉนวน ซึ่งเมื่อวิเคราะห์สมมูลพลังงานในช่วงการทำงานต่างๆ เห็นว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนนั้น เกิดขึ้นในทุกช่วงการทำงาน โดยช่วงรีดเหล็กมีค่าอยู่ในช่วง 3-6 เปอร์เซ็นต์ ช่วงอุ่นเตามีค่าอยู่ในช่วง 5-18 เปอร์เซ็นต์ และช่วงเร่งเตามีค่าอยู่ในช่วง 3-6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนนั้นเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กหรือช่วงเร่งเตาซึ่งเป็นช่วงที่เป็นผลมาจากการทำงานที่ไม่ต่อเนื่อง มีค่าอยู่ในช่วง 8-45 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับช่วงของอุณหภูมิที่ในการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก และคุณสมบัติของวัสดุฉนวนเตาเผาเหล็ก ทั้งนี้เพราะในช่วงที่มีการเร่งเตา จะต้องมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับฉนวน เมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียส่วนนี้ในช่วงการทำงานเร่งเตา จะเห็นว่าปริมาณที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานทั้งหมดในช่วงการเร่งเตา ในการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนนั้น จะต้องทำการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนที่โครงสร้างฉนวน เพื่อให้ทราบถึงปริมาณการสูญเสียความร้อน ซึ่งผลการคำนวณที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

## 5.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนปัจจุบันของโรงงานตัวอย่าง

การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กนั้น ได้มาจากการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการวิเคราะห์การกระจายทำให้ทราบถึงลักษณะความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นต่างๆของฉนวน เพื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน โดยลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการนำความร้อนของฉนวน ความหนาของฉนวนแต่ละชั้น โดยผลการคำนวณการกระจายของอุณหภูมิตามโครงสร้างของฉนวนสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงโครงสร้างฉนวนชั้นต่างๆได้ ซึ่งผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างของเตาเผาเหล็กของโครงสร้างฉนวนในปัจจุบันแสดงไว้ในภาคผนวก ฉ

## 5.3. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง

ผลของการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง แบ่งแสดงออกเป็นช่วงตามการทำงานของเตาเผาเหล็กในแต่ละบริษัท ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

### 5.3.1 ผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน)

ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กจะมีปริมาณไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก จำนวนชั่วโมงการทำงาน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก ดังนั้นการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กจะทำการวิเคราะห์ตามช่วงการทำงานของเตาเผาเหล็ก ได้ดังนี้

#### ช่วงรีดเหล็ก

ช่วงรีดเหล็กเป็นช่วงการทำงานที่มีการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กให้มีค่าคงที่ เพื่อให้ความร้อนแก่เหล็ก โดยสำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) มีการควบคุมอุณหภูมิของ pre-heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,150 °C และ ควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,250 °C ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงไม่มีความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามในช่วงการทำงานนี้ จะมีความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยได้คำนวณมาจากสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งเวลาการทำงานในช่วงรีดเหล็กของเตาเผาเหล็กของ บ.กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 21:30 – 18:30 น. เป็นเวลา 147 ชั่วโมง/ สัปดาห์

#### ช่วงอุ่นเตา

ช่วงอุ่นเตาเป็นช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กไว้ในระดับที่ต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งาน (อุณหภูมิช่วงรีดเหล็ก) เพื่อรอเพิ่มอุณหภูมิใช้งานในช่วงรีดเหล็ก โดยสำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) มีการควบคุมอุณหภูมิของ pre-heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 850 °C และควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,050 °C ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงไม่มีความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามในช่วงการทำงานนี้ จะมีความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยได้คำนวณมาจากสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น

สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งเวลาการทำงานในช่วงอุ่นเตาของเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 18:30 – 21:00 น. เป็นเวลา 17.5 ชั่วโมง/สัปดาห์

### ช่วงเร่งเตา

ช่วงเร่งเตาเป็นช่วงการทำงานที่มีการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กจากอุณหภูมิของช่วงอุ่นเตา มาเป็นอุณหภูมิของช่วงรีดเหล็ก สำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) ใช้เวลาในการเร่งเตาเผาเหล็กเป็นเวลา 0.5 ชั่วโมงต่อครั้ง ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงมีทั้งความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กไม่คงที่ และมีความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนที่โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก คำนวณได้จากสมการการถ่ายเทความร้อน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งเวลาการทำงานในช่วงเร่งเตาของเตาเผาเหล็กของ บ.กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 21:00 – 21:30 น. เป็นจำนวน 7 ครั้ง/สัปดาห์ (0.5 ชั่วโมง/ครั้ง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงอุ่นเตา		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์
หลังคา	Preheating	72.08	1,499	15,887	991	1,251	623	314	9,616	4,852
	Heating	96.06	1,891	26,704	1,513	2,543	851	572	7,481	5,030
แผ่นรีด	Preheating	16.62	771	1,884	553	161	331	39	17,292	2,011
	Heating	22.56	888	2,944	740	292	407	64	12,672	2,001
รถยิงเหล็ก	Preheating	16.62	771	1,884	553	161	331	39	17,292	2,011
	Heating	22.56	888	2,944	740	292	407	64	12,672	2,001
หน้าเตา	-	16.34	888	2,132	740	212	407	47	12,672	1,449
หลังเตา	-	12.51	771	1,419	553	121	331	29	17,292	1,514
รวม	-	275.35	-	55,797	-	5,033		1,168	-	20,872

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 147 ชม./สัปดาห์, \*\*เวลาทำงานช่วงอุ่นเตา 17.5 ชม./สัปดาห์ และ \*\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 7 ครั้งต่อสัปดาห์ (0.5 ชม./ครั้ง)

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อข้างต้นพบว่า การทำงานของเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็กจำกัด (มหาชน) นั้น มีความร้อนที่ต้องสูญเสียไปเป็นความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก ในช่วงรีดเหล็ก, ช่วงอุ่นเตาและช่วงเร่งเตา โดยปริมาณของความร้อนสูญเสีย โดยสามารถสรุป ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ

ชื่อโรงงาน	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ผลรวมความร้อนสูญเสีย ที่โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
กรุงเทพผลิตเหล็ก	61,998	20,872	82,870

จากผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) เห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนมีค่า 82,870 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็น 3.78 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด คิดเป็นเงิน 5,853,090 บาทต่อปี เกิดขึ้นจากสองส่วนหลักๆ คือความร้อนสูญเสียผ่านและสะสมในโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนคิดเป็น 2.83 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานของการใช้พลังงานทั้งหมด คิดเป็นเงิน 4,378,930 บาทต่อปี และความร้อนสูญเสียสะสมโครงสร้างฉนวนคิดเป็น 0.95 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานของการใช้พลังงานทั้งหมด คิดเป็นเงิน 1,474,160 บาทต่อปี (คิดที่ราคาน้ำมันเตา C 20 บาทต่อลิตรและคิดเวลาทำงาน 70 เปอร์เซ็นต์ต่อปี)

### 5.3.2 ผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย

ปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กจะมีปริมาณไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก จำนวนชั่วโมงการทำงาน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก ดังนั้นการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กจะทำการวิเคราะห์ตามช่วงการทำงานของเตาเผาเหล็ก

### ช่วงรีดเหล็ก

ช่วงรีดเหล็กเป็นช่วงการทำงานที่มีการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กให้มีค่าคงที่ เพื่อให้ความร้อน โดยสำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) มีการควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 970 °C และ ควบคุมอุณหภูมิของ soaking zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,080 °C ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงไม่มีความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิของโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามในช่วงการทำงานนี้ จะมีความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยได้คำนวณมาจากสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ซึ่งเวลาการทำงานในช่วงรีดเหล็กของเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – ศุกร์ เวลา 22:00 – 09:00 น. และ วันเสาร์- อาทิตย์และวันหยุดนักขัตฤกษ์ เป็นเวลา 103 ชั่วโมง/สัปดาห์

### ช่วงเร่งเตา

ช่วงเร่งเตาเป็นช่วงการทำงานที่มีการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กจากที่อุณหภูมิประมาณ 700 °C ของ heating zone และ ที่อุณหภูมิประมาณ 870 °C ของ soaking zone มาเป็นอุณหภูมิของช่วงรีดเหล็ก สำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ใช้เวลาในการเร่งเตาเผาเหล็กเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อครั้ง ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงมีทั้งความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิของโครงสร้างเตามีค่าไม่คงที่ และมีความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กได้คำนวณมาจากสมการต่างๆ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ซึ่งเวลาการทำงานในช่วงเร่งเตาของเตาเผาเหล็กของ บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) คือ วันจันทร์ – ศุกร์ เวลา 14:00 – 22:00 น. เป็นจำนวน 5 ครั้ง/สัปดาห์ (8 ชั่วโมง/ครั้ง)

ตารางที่ 5.3 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์
หลังคา	Heating	84.76	762	6,656	4,817	2,042	24,707	10,471
	Soaking	185.73	885	16,930	5,896	5,475	21,166	19,655
แท่นรีด	Heating	22.94	462	1,091	2,940	337	34,140	3,916
	Soaking	44.72	530	2,439	3,564	797	29,474	6,590
รถยิง เหล็ก	Heating	22.94	462	1,091	2,940	337	34,140	3,916
	Soaking	44.72	530	2,439	3,564	797	29,474	6,590
หน้าเตา	-	66.11	401	2,728	2,649	876	30,507	10,084
หลังเตา	-	51.28	462	2,438	2,940	754	34,140	8,754
รวม	-	523.19	-	35,812	-	11,414	-	69,975

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 103 ชม./สัปดาห์และ \*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 5 ครั้งต่อสัปดาห์ (8 ชม./ครั้ง)

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อข้างต้นพบว่า มีความร้อนที่ต้องสูญเสียไปเป็นความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก ในช่วงรีดเหล็กและช่วงเร่ง โดยสามารถสรุป ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ

ชื่อโรงงาน	ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ผลรวมความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย	47,227	69,975	117,202

จากผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) เห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนมีค่า 117,202 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็น 6.67 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด คิดเป็นเงิน 8,277,978.28 บาทต่อปี เกิดขึ้นจากสองส่วนหลักๆ ก็คือความร้อนสูญเสียผ่านและสะสมในโครงสร้างฉนวน โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนคิดเป็น 2.69 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานของการใช้พลังงานทั้งหมด คิดเป็นเงิน 3,335,614 บาทต่อปี และความร้อนสูญเสียสะสมโครงสร้างฉนวนคิดเป็น 3.98 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานของการใช้พลังงานทั้งหมด คิดเป็นเงิน 4,942,365 บาทต่อปี (คิดที่ราคาน้ำมันเตา C 20 บาทต่อลิตรและคิดเวลาทำงาน 70 เปอร์เซ็นต์ต่อปี)

### 5.3.3 ผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด

ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กจะมีปริมาณไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก จำนวนชั่วโมงการทำงาน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก ดังนั้นการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กจะทำการวิเคราะห์ตามช่วงการทำงานของเตาเผาเหล็ก



### ช่วงรีดเหล็ก

ช่วงรีดเหล็กเป็นช่วงการทำงานที่มีการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กให้มีค่าคงที่ เพื่อให้ให้ความร้อน โดยสำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด มีการควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,120 °C และ ควบคุมอุณหภูมิของ soaking zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,250 °C ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงไม่มีความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิของโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามในช่วงการทำงานนี้ จะมีความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนผ่าน โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยได้คำนวณมาจากสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 ซึ่งเวลาการทำงานในช่วงรีดเหล็กของเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 06:30 – 17:00 น. เป็นเวลา 73.5 ชม./ สัปดาห์

### ช่วงเร่งเตา

ช่วงเร่งเตาเป็นช่วงการทำงานที่มีการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กจากที่อุณหภูมิประมาณ 590 °C ของ heating zone และ ที่อุณหภูมิประมาณ 750°C ของ soaking zone มาเป็นอุณหภูมิของช่วงรีดเหล็ก สำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ใช้เวลาในการเร่งเตาเผาเหล็กเป็นเวลา 1.5 ชม./ครั้ง ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงมีทั้งความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิของโครงสร้างเตามีค่าไม่คงที่ และมีความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กได้คำนวณมาจากสมการต่างๆ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 ซึ่งเวลาการทำงานในช่วงเร่งเตาของเตาเผาเหล็กของ บ.ที ที เอส สตีล จำกัด คือ วันจันทร์ – อาทิตย์ เวลา 05:00 – 06:30 น. เป็นจำนวน 7 ครั้ง/สัปดาห์ (1.5 ชม./ครั้ง)

ตารางที่ 5.5 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์
หลังคา	Heating	16.96	773	964	849	101	26,024	3,090
	Soaking	72.24	915	4,859	1,070	541	22,585	11,421
แท่นรีด	Heating	5.33	415	163	490	18	27,397	1,022
	Soaking	28.52	766	1,606	853	170	25,159	5,023
รดยิง เหล็ก	Heating	5.33	415	163	490	18	27,397	1,022
	Soaking	28.52	766	1,606	853	170	25,159	5,023
หน้าเตา	-	7.58	748	417	826	44	29,909	1,587
หลังเตา	-	7.11	527	275	672	33	23,302	1,159
รวม	-	171.59	-	10,052	-	1,097	-	29,347

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 73.5 ชม./สัปดาห์และ\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์ (1.5 ชม./ครั้ง)

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อข้างต้นพบว่า การทำงานของเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด นั้น มีความร้อนที่ต้องสูญเสียไปเป็นความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก ในช่วงรีดเหล็กและช่วงเร่งเตา โดยสามารถสรุป ดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบัน ในช่วงการทำงานต่างๆ

ชื่อโรงงาน	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ผลรวมความร้อนสูญเสีย ที่โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ที ที เอส สตีล	11,149	29,347	40,495

จากผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด เห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนมีค่า 40,495 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็น 6.53 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมดคิดเป็นเงิน 2,860,406 บาทต่อปี เกิดขึ้นจากสองส่วนหลักๆ คือความร้อนสูญเสียผ่านและสะสมในโครงสร้างฉนวน โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนคิดเป็น 1.80 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานของการใช้พลังงานทั้งหมด คิดเป็นเงิน 787,434 บาทต่อปี และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนคิดเป็น 4.73 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานของการใช้พลังงานทั้งหมด คิดเป็นเงิน 2,072,972 บาทต่อปี (คิดที่ราคาน้ำมันเตา C 20 บาทต่อลิตรและคิดเวลาทำงาน 70 เปอร์เซ็นต์ต่อปี)

#### 5.3.4 ผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. แอลพี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน)

ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กจะมีปริมาณไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก จำนวนชั่วโมงการทำงาน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก ดังนั้นการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กจะทำการวิเคราะห์ตามช่วงการทำงานของเตาเผาเหล็ก

### ช่วงรีดเหล็ก

ช่วงรีดเหล็กเป็นช่วงการทำงานที่มีการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กให้มีค่าคงที่ เพื่อให้ความร้อนแก่เหล็ก โดยสำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) มีการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 1,250 °C ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงไม่มีความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามในช่วงการทำงานนี้ จะมีความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยได้คำนวณมาจากสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.7 โดยเวลาการทำงานในช่วงรีดเหล็กของเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) นั้นจะทำงานทุกวัน แต่หยุดรีดเหล็กในช่วงอุ่นเตา และช่วงเร่งเตา ซึ่งช่วงรีดเหล็กคิดเป็นเวลา 163 ชั่วโมง/ สัปดาห์

### ช่วงอุ่นเตา

ช่วงอุ่นเตา เป็นช่วงที่มีการลดอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กลงมาในระดับที่ต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งาน (อุณหภูมิช่วงรีดเหล็ก) เพื่อทำการซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งจะทำโดยการหยุดการใช้เชื้อเพลิงเฉพาะบริเวณ preheating zone และ heating zone โดยสำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) มีการควบคุมอุณหภูมิของ preheating zone และ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 950-1,000 °C และ soaking zone ไว้ที่ 1,250 °C ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงไม่มีความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก อย่างไรก็ตามในช่วงการทำงานนี้ จะมีความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยได้คำนวณมาจากสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.7 ซึ่งเวลาการทำงานในช่วงอุ่นเตา ของเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) ซึ่งช่วงรีดเหล็กคิดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง/ สัปดาห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ช่วงเร่งเตา

ช่วงเร่ง เป็นช่วงการทำงานที่มีการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กจากอุณหภูมิของช่วงอุ่นเตามาเป็นอุณหภูมิของช่วงรีดเหล็ก ซึ่งจะทำการเพิ่มอุณหภูมิโดยการใช้หัวเผาที่ preheating zone เพิ่มอุณหภูมิจาก 950 °C เป็น 1,050 °C และ heating zone เพิ่มอุณหภูมิจาก 1,000 °C เป็น 1,250 °C สำหรับเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ใช้เวลาในการเร่งเตาเผาเหล็กเป็นเวลา 3 ชั่วโมง/ครั้ง ดังนั้นในช่วงการทำงานนี้ จึงมีทั้งความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก และมีความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กไม่คงที่ โดยความร้อนสูญเสียสะสมจะเกิดเฉพาะบริเวณ heating zone เพราะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กคำนวณได้จากสมการการถ่ายเทความร้อน ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น สำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.7 ซึ่งเวลาการทำงานในช่วงเร่งเตาของเตาเผาเหล็กของ บ.แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ในหนึ่งสัปดาห์จะเกิดขึ้น 1 ครั้งๆ ละ 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.7 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงอุ่นเตา		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสมใน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย สะสมใน โครงสร้างฉนวน รวม*** Mcal/สัปดาห์
หลังคา เตา	Preheating	27.47	1,208	4,911	1,064	58	3,408	94	9,598	264
	Heating	36.94	1,514	8,277	1,132	84	3,968	147	24,255	896
	Soaking	50.99	1,523	11,493	1,523	155	4,569	233	0	0
แท่นรีด	Preheating	17.27	446	1,141	403	14	1,274	22	13,959	241
	Heating	28.45	535	2,251	424	24	1,437	41	35,509	1,010
	Soaking	34.10	537	2,712	537	37	1,612	55	0	0
วาง slab	Preheating	17.27	446	1,141	403	14	1,274	22	13,959	241
	Heating	28.45	535	2,251	424	24	1,437	41	35,509	1,010
	Soaking	34.10	537	2,712	537	37	1,612	55	0	0
หน้าเตา	-	25.99	1,044	4,017	1,044	54	3,133	81	0	0
หลังเตา	-	18.79	839	2,333	743	28	2,373	45	12,946	243
รวม	-	319.8	-	43,237	-	529	-	835	-	3,905

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 163 ชม./สัปดาห์, \*\*เวลาทำงานช่วงอุ่นเตา 2 ชม./สัปดาห์ และ\*\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 1 ครั้ง/สัปดาห์ (3 ชม./ครั้ง)

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อข้างต้นพบว่า การทำงานของเตาเผาเหล็กของ มีความร้อนที่ต้องสูญเสียไปเป็นความร้อนสูญเสียผ่านและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก ในช่วงรีดเหล็ก, ช่วงอุ่นเตา และช่วงเร่งเตา โดยสามารถสรุป ดังแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบัน ช่วงการทำงานต่างๆ

ชื่อโรงงาน	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ผลรวมความร้อนสูญเสีย ที่โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
แอล พี เอ็น	44,601	3,905	48,506

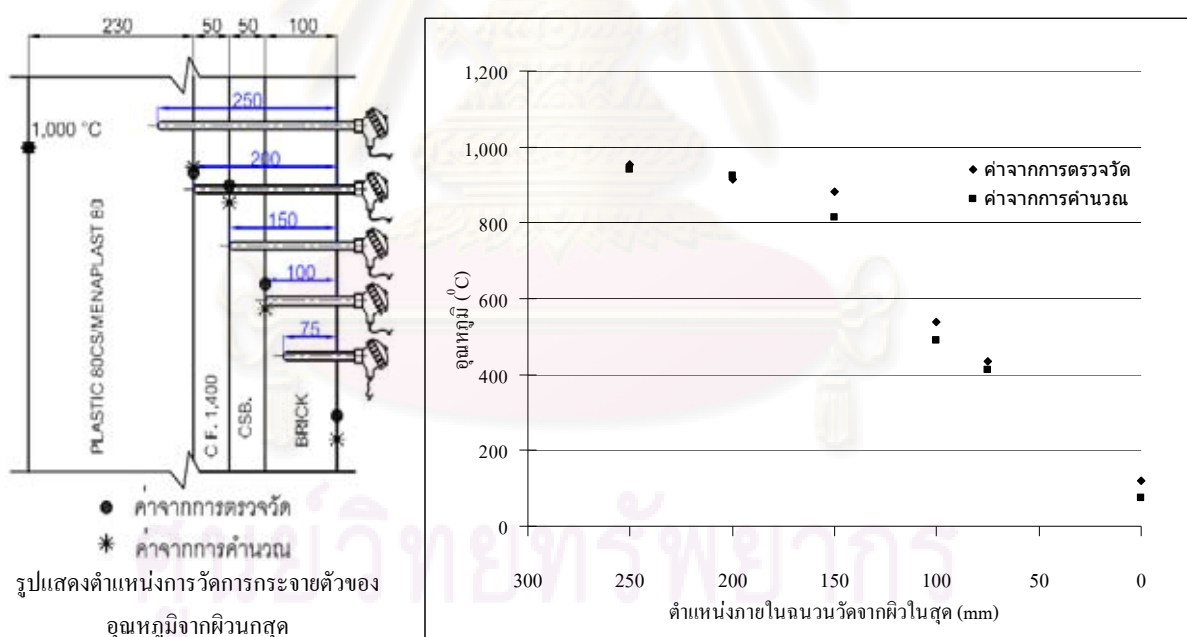
จากผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) เห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนมีค่า 48,506 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็น 1.53 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมดคิดเป็นเงิน 3,425,985 บาทต่อปี เกิดขึ้นจากสองส่วนหลักๆ คือความร้อนสูญเสียผ่านและสะสมในโครงสร้าง โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนคิดเป็น 1.41 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นเงิน 3,150,575 บาทต่อปี และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนคิดเป็น 0.12 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานของการใช้พลังงานทั้งหมด คิดเป็นเงิน 275,410 บาทต่อปี (คิดที่ราคาน้ำมันเตา C 20 บาทต่อลิตรและคิดเวลาทำงาน 70 เปอร์เซ็นต์ต่อปี)

จากการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ โรงงาน ตัวอย่างทั้ง 4 โรงงานข้างต้น เห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กนั้นมีค่าประมาณ 1-6 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยประกอบด้วยความร้อนสูญเสียสองส่วนหลัก คือ ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวน คิดเป็น 1-3 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยความร้อนส่วนนี้เกิดขึ้นในทุกช่วงการทำงาน และ ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กคิดเป็น 1-4 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยความร้อนส่วนนี้เกิดขึ้นเฉพาะช่วงเร่งเตา ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดจากการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องของเตาเผาเหล็ก ซึ่งปริมาณความร้อนสองส่วนนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทำงานในช่วงต่างๆ ความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างฉนวน โดยความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของเตาเผาเหล็กที่ไม่ต่อเนื่องเท่านั้น หากมีการปรับปรุงฉนวนให้เหมาะสมกับการใช้งานก็จะสามารถลดความร้อนสูญเสียสะสมในส่วนนี้ลงได้

จากการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของโรงงาน ตัวอย่างที่ทำงานไม่ต่อเนื่อง ดังที่ได้แสดงไว้ข้างต้น ในบทนี้ นำไปสู่การศึกษาเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กเพื่อลดปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างของฉนวนเตาเผาให้น้อยลงได้

#### 5.4 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการตรวจวัด และการคำนวณ การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนในปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก เพื่อวิเคราะห์ผลของความถูกต้องของการคำนวณที่ใช้ โดยเป็นตัวอย่างผลการตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) ผนังเตาเผาด้านที่วาง slab ในช่วงอุ่นเตา บริเวณ Heating zone โดยมีการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาไว้ที่  $1,000^{\circ}\text{C}$  เพื่อรอการรีดเหล็ก ซึ่งข้อมูลการตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิแสดงไว้ในภาคผนวก ข และข้อมูลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิแสดงไว้ใน ภาคผนวก ง ได้ผลการเปรียบเทียบดังนี้



รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิการกระจายของตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) ช่วงอุ่นเตา ที่ได้จากการตรวจวัดและคำนวณ



ตารางที่ 5.9 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการกระจายของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทรมิล จำกัด (มหาชน) ช่วงอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดและคำนวณ

ตำแหน่งการตรวจวัด	ค่าการตรวจวัด	ค่าการคำนวณ	ค่าความคลาดเคลื่อน
(mm)	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $^{\circ}\text{C}$ )	(%)
0	102.01	75.02	-26.53
75	434.43	412.8	-4.98
100	537.94	491.00	-8.73
150	881.16	814.93	-7.52
200	914.96	925.05	1.10
250	953.14	941.34	-1.24

จากผลการเปรียบเทียบ พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการตรวจวัดและการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กที่ได้อยู่ในช่วง -2 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนอาจเป็นผลมาจากความต้านความร้อนบริเวณผิวสัมผัส (Contact Resistance) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความขรุขระของผิวทำให้เกิดช่องว่างขึ้นที่ผิวตรงบริเวณจุดสัมผัสทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ซึ่งจากตารางจะเห็นว่าส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้น วิธีการคำนวณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงน่าจะมีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### ผลการวิเคราะห์หลังการปรับปรุงฉนวนของเตาเผาเหล็ก

จากการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนปัจจุบันของโรงงานตัวอย่างในบทที่ 5 นั้น พบว่า ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนนั้น ประกอบด้วยความร้อนจากการสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนและความร้อนสูญเสียที่สะสมในโครงสร้างฉนวน โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนเกิดขึ้นในทุกช่วงการทำงาน ส่วนความร้อนสูญเสียสะสมเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่เตาเผาเหล็กมีการเพิ่มอุณหภูมิจากผลของการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องจากสาเหตุต่างๆของเตาเผาเหล็ก แนวทางในการลดความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างเตาเผาเหล็ก คือการปรับปรุงฉนวนกันความร้อนของเตาเผาเหล็กให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของเตาเผาเหล็ก เมื่อพิจารณาเซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) ซึ่งเป็นฉนวนกันความร้อนชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมที่มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง เซรามิกไฟเบอร์นั้นเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง, ความหนาแน่นต่ำ และมีค่าการนำความร้อนต่ำ จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อน เพื่อลดความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างเตาเผาเหล็ก

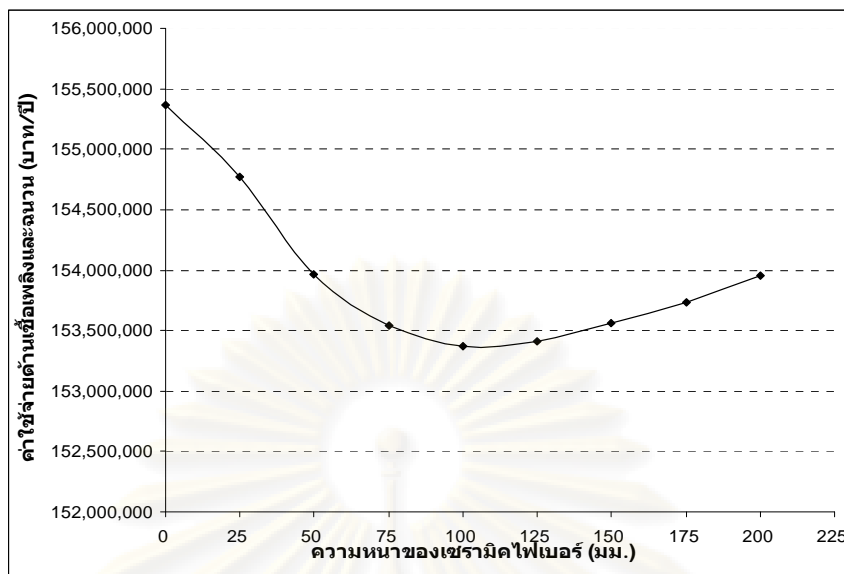
การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานเมื่อมีการใช้ เซรามิกไฟเบอร์ เริ่มจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตามชั้นต่างๆ เมื่อมีการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ที่ผนังด้านในสุด หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เมื่อมีการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ที่ผนังด้านในสุด เพื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กที่ใช้ในปัจจุบันของ โรงงานตัวอย่าง คือ บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน), บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน), บ.ที ที เอส สตีล จำกัด และ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีระบบช่วงเวลาในการทำงานและขนาดกำลังการผลิตที่แตกต่างกัน (รายละเอียดในภาคผนวก ก) โดยการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงฉนวนกันความร้อนของเตาเผาเหล็กในครั้งนี้ จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 กรณี ตามลักษณะการใช้งานเซรามิกไฟเบอร์ คือ กรณีที่ 1 ทำการปรับปรุงฉนวนโดยการนำเซรามิกไฟเบอร์ขนาดความหนา 50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดความหนาที่มีความเหมาะสม[12][14] เนื่องจากขนาดความหนานี้สามารถทำการยึดติดกับโครงสร้างเดิมได้ง่ายและไม่เป็นการเพิ่มความหนาให้กับฉนวนเตาเผาเหล็กมากจนทำให้พื้นที่ภายในเตาเผาเหล็กแคบลง กรณีที่ 2 ทำการปรับปรุงฉนวนเฉพาะชั้นในสุดโดยการลดความหนาของ plastic refractory ลงเพื่อลดน้ำหนักวัสดุ และติดตั้งฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ติดกับ plastic

refractory โดยใช้ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสม ซึ่งวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์กับราคาเชื้อเพลิงและค่าการลงทุนในปัจจุบัน ส่วนโครงสร้างฉนวนชั้นถัดๆ ไปจะยังคงใช้ฉนวนเหมือนฉนวนที่มีในปัจจุบัน กรณีที่ 3 ทำการปรับปรุงฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ทั้งหมดโดยเลือกความหนาที่มีขนาดใกล้เคียงกับความหนาเดิมและสามารถทำให้อุณหภูมิผิวชั้นนอกสุดไม่เกินเกณฑ์ค่ามาตรฐาน [16] ในที่นี้เลือกใช้เซรามิกไฟเบอร์ 300 มิลลิเมตร[5] โดยกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt ในการปรับปรุง โดยข้อมูลอายุการใช้งานเฉลี่ยของเซรามิกไฟเบอร์แบบ felt อยู่ที่ประมาณ 3 ปี ส่วนในกรณีที่ 3 ใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ Module ในการปรับปรุง โดยข้อมูลอายุการใช้งานเฉลี่ยของเซรามิกไฟเบอร์แบบ Module อยู่ที่ประมาณ 5 ปี

## 6.1 การวิเคราะห์ความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์กับราคาเชื้อเพลิงและค่าการลงทุนในปัจจุบัน

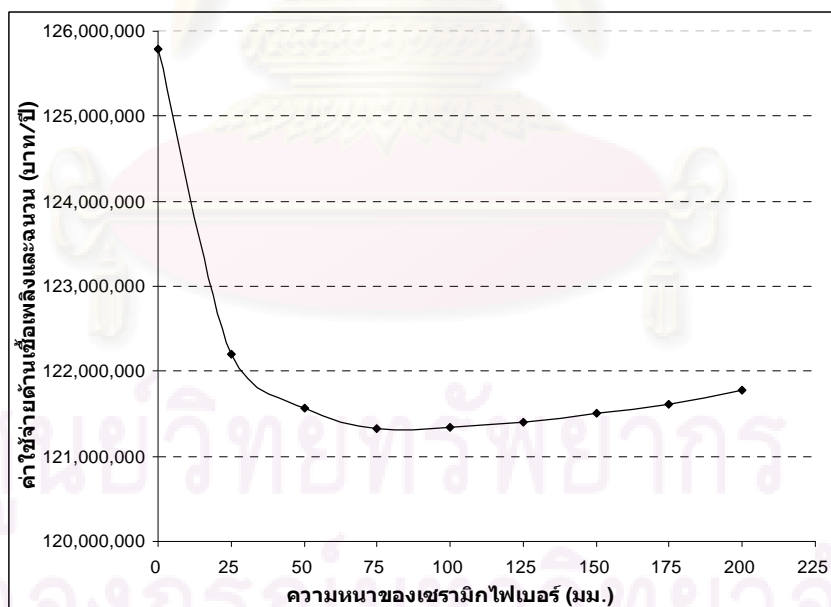
การปรับปรุงฉนวนใน กรณีที่ 2 ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพื่อให้สามารถใช้เซรามิกไฟเบอร์ได้เหมาะสมกับราคาวัสดุฉนวนกันความร้อนและค่าเชื้อเพลิง เนื่องจากความหนาของเซรามิกไฟเบอร์มีผลกับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวน และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก เรื่องการลงทุน การหาความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์ของโรงงานตัวอย่างนั้น ได้พิจารณาจากการวิเคราะห์ ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจากความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวน และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กกับค่าการลงทุนฉนวนกันความร้อน จากรูปที่ 6.1 ถึง 6.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่เกิดจากความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก (ในที่นี้ใช้น้ำมันเตา C ที่ราคา 20 บาทต่อลิตร) กับค่าการลงทุนฉนวนกันความร้อนของเตาเผาเหล็กที่คำนวณราคาของฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ต่อตารางเมตร โดยค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงของพลังงานสูญเสียรวมในโครงสร้างฉนวนจะลดลงตามความหนาของเซรามิกไฟเบอร์จนถึงความหนาที่ค่าหนึ่งผลของการลดลงจะค่อนข้างคงที่ แต่ค่าการลงทุนจะมากขึ้นตามความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเรื่องของราคาฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มีความหลากหลาย แล้วแต่บริษัทผู้ผลิตฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ ในที่นี้ได้สอบถามราคาเซรามิกไฟเบอร์ จากบริษัทผู้จำหน่ายในต่างประเทศ[15] (อ้างอิงภาคผนวก ข)

ผลการวิเคราะห์ความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์กับราคาเชื้อเพลิงและค่าการลงทุนในปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) จะได้ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่ประมาณ 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6.1



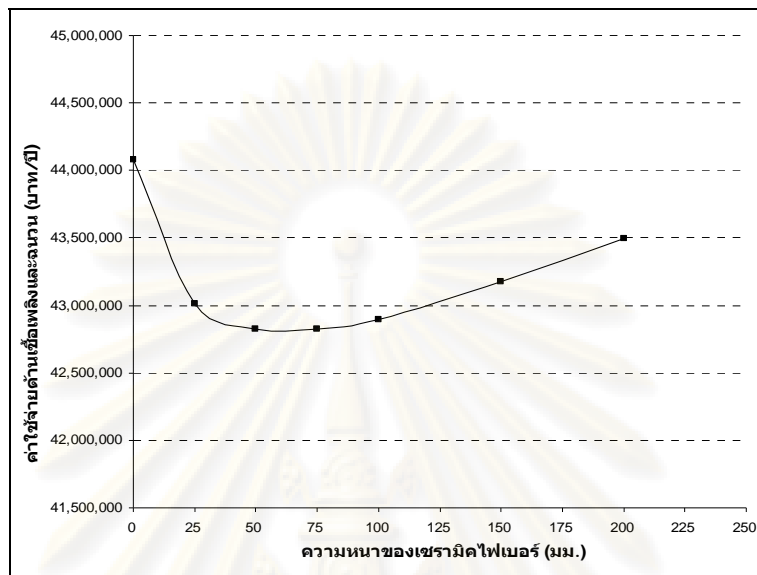
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเซรามิกไฟเบอร์กับค่าเชื้อเพลิงและค่าจำนวนเซรามิกไฟเบอร์ของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

ผลการวิเคราะห์ความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์กับราคาเชื้อเพลิงและค่าการลงทุนในปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) จะได้ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่ประมาณ 75 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6.2



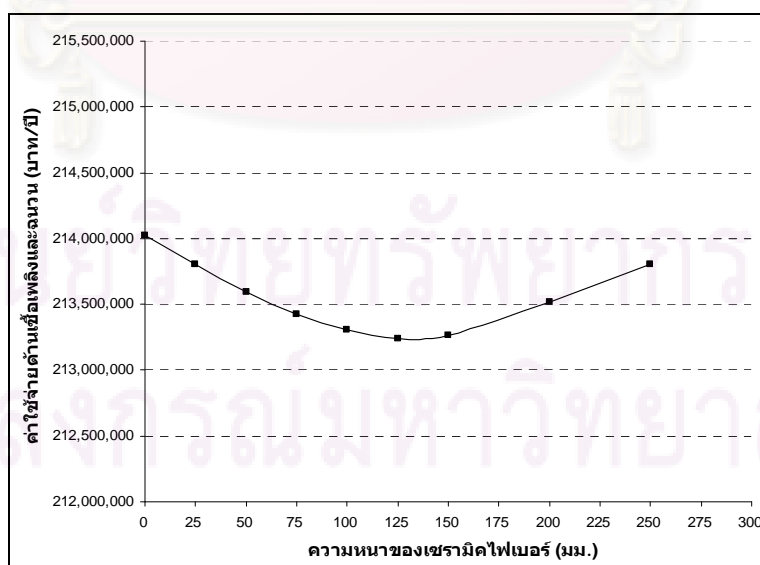
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเซรามิกไฟเบอร์กับค่าเชื้อเพลิงและค่าจำนวนเซรามิกไฟเบอร์ของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

ผลการวิเคราะห์ความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์กับราคาเชื้อเพลิงและค่าการลงทุนในปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด จะให้ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่ประมาณ 75 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเซรามิกไฟเบอร์กับค่าเชื้อเพลิงและค่าจนวนเซรามิกไฟเบอร์ของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด

ผลการวิเคราะห์ความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์กับราคาเชื้อเพลิงและค่าการลงทุนในปัจจุบันของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) จำกัด จะให้ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่ประมาณ 150 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเซรามิกไฟเบอร์กับค่าเชื้อเพลิงและค่าจนวนเซรามิกไฟเบอร์ของ บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

จากการวิเคราะห์ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมตามความสัมพันธ์ที่กล่าวไว้ข้างต้น เห็นได้ว่า ความหนาของขนาดเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมของการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กด้วยกรณีที่ 2 ของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) ได้ขนาดความหนาเท่ากับ 100 มิลลิเมตร ของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ได้ขนาดความหนาเท่ากับ 75 มิลลิเมตร ของ บ. ที ที เอส จำกัด ได้ขนาดความหนาเท่ากับ 75 มิลลิเมตร และของ บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) ได้ขนาดความหนาเท่ากับ 150 มิลลิเมตร ทั้งนี้ความหนาที่เหมาะสมแตกต่างกัน เนื่องจากผลการประหยัดที่แตกต่างกันจากการใช้งานฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ที่มีความหนาต่างๆ อันมีผลมาจากคุณสมบัติของฉนวนที่ใช้ การออกแบบชนิดและความหนาของฉนวนเตาเผาเหล็ก และประเภทของเตาเผาเหล็ก ส่งผลให้หากปรับปรุงฉนวนโดยใช้ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์แล้วผลการประหยัดมีความค่ามากก็จะได้ขนาดความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์มีค่าน้อยกว่ากรณีที่ปรับปรุงแล้วมีผลการประหยัดน้อยกว่า เพราะหากผลการประหยัดมากจะทำให้ความชื้นของกราฟผลของการประหยัดมีความชันมาก (อ้างอิงหัวข้อ 3.8) เมื่อรวมกับผลของการลงทุนค่าฉนวนที่แต่ละความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ต่างๆ ก็จะได้จุดต่ำสุดของกราฟความสัมพันธ์ที่ความหนาน้อยกว่าในกรณีที่ผลการประหยัดน้อย

ดังนั้นจากขนาดความหนาที่ได้ จึงเห็นได้ว่าการปรับปรุงฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์กับเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) และ บ. ที ที เอส จำกัด มีผลการประหยัดมากกว่า เตาเผาเหล็ก ของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) และ แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน) (อ้างอิงบทที่ 7) โดยผลการประหยัดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงการทำงานต่างๆ โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุงฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ แสดงได้ดังต่อไปนี้

## 6.2 การวิเคราะห์หลังการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์หลังการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนและความร้อนที่สูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนในช่วงการทำงานต่างๆ ของโรงงานตัวอย่างหลังการปรับปรุงฉนวนกรณีต่างๆ ซึ่งในการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนนี้ ต้องมีการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวน เมื่อได้ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวจึงนำไปสู่การคำนวณผลของความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลการประหยัดจากการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนในกรณีต่างๆ และระยะเวลาการคืนทุน หลังการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนด้วยกรณีต่างๆ แล้วโดยมีผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

## 6.2.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุงฉนวนของโรงงานตัวอย่าง

การวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กนั้น ได้มาจากการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการวิเคราะห์การกระจายทำให้ทราบถึงลักษณะความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นต่างๆของฉนวน เพื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน โดยลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการนำความร้อนของฉนวน ความหนาของฉนวนแต่ละชั้น โดยผลการคำนวณการกระจายของอุณหภูมิตามโครงสร้างของฉนวนสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงโครงสร้างฉนวนชั้นต่างๆได้ ซึ่งผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนในปัจจุบันของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่างในกรณีต่างๆ แสดงไว้ใน ภาคผนวก ฉ จากผลการกระจายตัวที่ได้สามารถวิเคราะห์ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของโรงงานตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้

## 6.2.2 การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุงฉนวนของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง

ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนประกอบด้วยสองส่วน ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวน คำนวณได้จากการถ่ายเทความร้อนตามบทที่ 3 และใช้ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิจากภาคผนวก ข และ ภาคผนวก ค ส่วนความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนคำนวณได้จากหลักการถ่ายเทความร้อนด้วยเช่นกัน โดยชนิดและความหนาของฉนวนชั้นต่างแสดงไว้ในภาคผนวก ง คุณสมบัติของฉนวนที่ใช้ในการคำนวณอ้างอิงจากข้อมูลฉนวนของ บ . ผู้ผลิต[17] ผลการคำนวณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของโรงงานตัวอย่างแสดงได้ดังนี้

### 6.2.2.1. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) หลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณี 1

#### 1. ผลการคำนวณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.1 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโครงสร้างฉนวนด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงอุ่นเตา		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียสะสมที่ โครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์
หลังคา	Preheating	72.08	1,120	11,868	663	837	446	225	5,849	4,222
	Heating	96.06	1,394	19,677	1,042	1,752	609	409	36,551	4,565
แท่นรีด	Preheating	16.62	679	1,659	456	133	284	33	11,139	1,889
	Heating	22.56	843	2,795	678	268	380	60	15,307	1,912
รถยิง เหล็ก	Preheating	16.62	679	1,659	456	133	284	33	11,139	1,889
	Heating	22.56	843	2,795	678	268	380	60	15,567	1,912
หน้าเตา	-	16.34	786	1,888	635	181	355	41	14,872	1,398
หลังเตา	-	12.51	679	1,249	456	100	284	25	687	1,422
รวม	-	275.35	-	43,591	-	3,671	-	886	-	19,208

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 147 ชม./สัปดาห์,\*\*เวลาทำงานช่วงอุ่นเตา 17.5 ชม./สัปดาห์ และ \*\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์(ครั้งละ0.5 ชม./ครั้ง)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก โดยจากตารางที่ 6.1 สามารถสรุป ผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 1 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุง โครงสร้างฉนวนด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	61,998	20,872	82,870
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	48,148	19,208	67,356
ผลต่าง	-13,850	-1,664	-15,514

จากตารางที่ 6.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 1 คือใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 มิลลิเมตร คิดตั้งคิดกับฉนวนชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 13,850 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 1,664 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 15,514 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.2 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็กลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็กลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กระหว่างการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีด			ช่วงอุ่นเตา			ช่วงเร่งเตา			
		จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF.	ผลต่าง	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF.	ผลต่าง	หน่วย	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF.	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>											
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	14,205	14,080	-125	2,041	1,917	-124	Mcal/ครั้ง	9,274	8,876	-398
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	1,243	1,232	-11	165	155	-10	Mcal/ครั้ง	506	485	-22
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	45	44.45	-0.55	4.72	4.44	-0.28	Mcal/ครั้ง	21	20.55	-0.45
รวม	Mcal/hr	15,641	15,505	-136	2,210	2,076	-134	Mcal/ครั้ง	9,802	9,381	-421
<b>ความร้อนออก</b>											
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	5,759	5,759	0.00	-	-	-	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับ scale	Mcal/hr	127	127	0.00	-	-	-	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้าRecup	Mcal/hr	7,053	7,000	-53	1,203	1,146	-56	Mcal/ครั้ง	4,011	3,869	-143
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	380	297	-83	288	210	-78	Mcal/ครั้ง	167	127	-40
ความร้อนสูญเสียสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	1,918	1,918	0.00
ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้าง	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	2,982	2,744	-238
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	2,324	2,323	0.00	720	720	0.00	Mcal/ครั้ง	724	724	0.00
รวม	Mcal/hr	15,641	15,505	-136	2,210	2,076	-134	Mcal/ครั้ง	9,802	9,381.15	-420.70

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีจำนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงรีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงอุ่นเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงเร่งเตา***	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง รวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
จำนวนปัจจุบัน	2,088,125	35,715	64,919	2,188,758
จำนวนเซรามิกไฟเบอร์	2,069,858	33,549	60,246	2,163,653
ผลต่าง	-18,267	-2,165	-4,673	-25,105

\*ช่วงรีดเหล็ก 147 ชม./สัปดาห์, \*\* ช่วงอุ่นเตา 17.5 ชม./สัปดาห์ และ\*\*\*ช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 0.5 ชม.)

จากตารางที่ 6.4 พบว่า ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง 25,105 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 2,639 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 52,27734 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร) เมื่อคิดการทำงาน 70 เปอร์เซ็นต์ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 1,773,197 บาท/ปี คิดเป็น 1.15 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างจนลดลงได้ 7.97 เปอร์เซ็นต์ และคิดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างจนลดลงได้ 22.34 เปอร์เซ็นต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงจำนวนโดยการติดตั้งจำนวนเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 50 มิลลิเมตรกับผนังด้านในสุดของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) ราคาปรับปรุงโครงสร้างจำนวนรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 3,034,963 บาท (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ข) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.71 ปี

#### 6.2.2.2. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) หลังการปรับปรุงจำนวนด้วย กรณี 2

##### 1. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวนของเตาเผา

ตารางที่ 6.5 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงอุ่นเตา		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม**** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์
หลังคาเตา	Preheating	72.08	960	10,171	524	661	371	187	3,875	2,197
	Heating	96.06	1,141	16,105	812	1,365	488	328	3,111	2,351
แท่นรีด	Preheating	16.62	655	1,600	411	119	266	31	11,154	1,458
	Heating	22.56	789	2,618	610	241	350	55	7,968	1,414
รถยิงเหล็ก	Preheating	16.62	655	1,600	411	119	266	31	11,154	1,458
	Heating	22.56	789	2,618	610	241	350	55	7,968	1,414
หน้าเตา	-	16.34	742	1,782	577	165	330	38	8,101	1,041
หลังเตา	-	12.51	655	1,205	411	90	266	23	11,154	1,097
รวม	-	275.35	-	37,700	-	3,001	-	749	-	12,430

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 147 ชม./สัปดาห์,\*\*เวลาทำงานช่วงอุ่นเตา 17.5 ชม./สัปดาห์ และ \*\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์(ครั้งละ0.5 ชม./ครั้ง)

## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานขอเตาเผาเหล็ก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก โดยจากตารางที่ 6.5 สามารถสรุป ผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 2 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ ในเวลา 1 สัปดาห์

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	61,998	20,872	82,870
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	53,131	12,430	65,561
ผลต่าง	-8,867	-8,442	-17,309

จากตารางที่ 6.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 2 คือ ใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 100 มิลลิเมตร ร่วมกับการปรับปรุงฉนวนชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 8,867 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 8,442 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 17,308 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.6 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็กลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็กลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กระหว่างการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงอุ่นเตา			ช่วงเร่งเตา			
		จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	หน่วย	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>											
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	14,205	14,020.69	-184.24	2,041	1,856.24	-184.59	Mcal/ครั้ง	9,274	7,460.90	-1,813.2
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	1,243	1,227.00	-16.12	165	149.58	-14.87	Mcal/ครั้ง	506	407.28	-98.98
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	45	44.26	-0.58	4.72	4.30	-0.43	Mcal/ครั้ง	21	17.27	-4.20
รวม	Mcal/hr	15,641	15,440.33	-200.94	2,210	2,010.12	-199.89	Mcal/ครั้ง	9,802	7,751.84	-2,050.0
<b>ความร้อนออก</b>											
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	5,759	5,758.76	0.00	-	-	-	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับ scale	Mcal/hr	127	126.69	0.00	-	-	-	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recup	Mcal/hr	7,053	6,961.29	-91.47	1,203	1,118.86	-83.7	Mcal/ครั้ง	4,011	3,226.80	-784.21
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	380	256.46	-123.11	288	171.47	-116.14	Mcal/ครั้ง	167	106.98	-59.81
ความร้อนสูญเสียสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	1,918	1,918.07	0.00
ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้าง	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	2,982	1,775.71	-1,205.9
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	2,324	2,323.26	0.00	720	719.58	0.00	Mcal/ครั้ง	724	724.08	0.00
รวม	Mcal/hr	15,641	15,440.33	-200.94	2,210	2,010.12	-199.89	Mcal/ครั้ง	9,802	7,751.84	-2,050.1

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีจำนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ในช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง รีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง อุ่นเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง เร่งเตา***	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง รวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
ณวนปัจจุบัน	2,088,125	35,715	64,919	2,188,758
ณวนเซรามิกไฟเบอร์	2,061,042	32,484	52,226	2,145,752
ผลต่าง	-27,083	-3,230	-12,692	-43,006

\*ช่วงรีดเหล็ก 147 ชม/สัปดาห์, \*\* ช่วงอุ่นเตา 17.5 ชม/สัปดาห์ และ\*\*\*ช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 0.5 ชม)

จากตารางที่ 6.8 พบว่า ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง 43,006 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 4,520 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 90,402 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร) เมื่อคิดการทำงาน 70 เฟอร์เซ็นต์ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 3,037,504 บาท/ปี คิดเป็น 1.96 เฟอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างจนลดลงได้ 40.45 เฟอร์เซ็นต์ และคิดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างจนลดลงได้ 14.30 เฟอร์เซ็นต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงจำนวนโดยการติดตั้งจำนวนเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 100 มิลลิเมตรร่วมกับการปรับปรุงผนังด้านในสุดของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) ราคาปรับปรุงโครงสร้างรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50 เฟอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 3,197,268 บาท โดยค่าการปรับปรุงคิดจากผลต่างระหว่างราคาโครงสร้างจำนวนปัจจุบันเฉพาะส่วนที่ถูกปรับปรุงกับราคาปรับปรุงโครงสร้างจำนวนใหม่ในส่วนนั้น (ข้อมูลราคาจำนวนอ้างอิงภาคผนวก ข) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.05 ปี

6.2.2.3. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) หลังการปรับปรุงจำนวนด้วย กรณี 3

#### 1. วิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวนของจำนวนเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 6.9 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงอุ่นเตา		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย สะสม ที่โครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์
หลังคาเตา	Preheating	72.08	468	4,955	256	323	181	91	2,836	1,907
	Heating	96.06	542	7,648	385	647	232	156	13,845	1,610
แท่นรีด	Preheating	16.62	467	1,142	256	74	181	21	2,801	442
	Heating	22.56	541	1,796	385	152	232	37	3,273	381
รถยิงเหล็ก	Preheating	16.62	467	1,142	256	74	181	21	2,801	442
	Heating	22.56	541	1,796	385	152	232	37	3,329	381
หน้าเตา	-	16.34	541	1,301	385	110	232	26	3,149	276
หลังเตา	-	12.51	467	859	256	56	181	16	173	333
รวม	-	275.35	-	20,638	-	1,588	-	405	-	5,773

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 147 ชม./สัปดาห์,\*\*เวลาทำงานช่วงอุ่นเตา 17.5 ชม./สัปดาห์ และ \*\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์(ครั้งละ0.5 ชม./ครั้ง)



## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาหลัก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาหลัก โดยจากตารางที่ 6.9 สามารถสรุป ผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 3 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาหลัก บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ ในเวลา 1 สัปดาห์

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	61,998	20,872	82,870
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	22,631	5,773	28,404
ผลต่าง	-39,367	-15,099	-54,466

จากตารางที่ 6.10 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 3 คือใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 มิลลิเมตร พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 39,367 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาหลักลดลง 15,099 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 54,466 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.10 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาหลักและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาหลัก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาหลักระหว่างการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.11

ตารางที่ 6.11 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงอุ่นเตา			ช่วงเร่งเตา			
		จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	หน่วย	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>											
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	14,205	13,847	-358	2,041	1,728	-313	Mcal/ครั้ง	9,274	6,028	-3,246
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	1,243	1,212	-31	165	139	-25	Mcal/ครั้ง	506	329	-177
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	45	43	-2	4.72	4.00	-0.72	Mcal/ครั้ง	21	14	-7
รวม	Mcal/hr	15,641	15,251	-390	2,210	1,871	-339	Mcal/ครั้ง	9,802	6,371	-3,431
<b>ความร้อนออก</b>											
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	5,759	5,759	0.00	-	-	-	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับ scale	Mcal/hr	127	127	0.00	-	-	-	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recup	Mcal/hr	7,053	6,902	-151	1,203	1,061	-142	Mcal/ครั้ง	4,011	2,846	-1,165
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	380	140	-239	288	91	-197	Mcal/ครั้ง	167	58	-109
ความร้อนสูญเสียสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	1,918	1,918	0.00
ความร้อนสูญเสียสะสมใน โครงสร้าง	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	2,982	825	-2,157
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	2,324	2,323	0.00	720	720	0.00	Mcal/ครั้ง	724	724	0.00
รวม	Mcal/hr	15,641	15,251	-390	2,210	1,871	-339	Mcal/ครั้ง	9,802	6,371	-3,430

ตารางที่ 6.12 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีจำนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ในช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงรีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง อุ่นเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง เร่งเตา***	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง รวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
จำนวนปัจจุบัน	2,088,124	35,714.5	64,918.82	2,188,758
จำนวนเซรามิกไฟเบอร์	2,035,508	30,239.5	42,196.27	2,107,944
ผลต่าง	-52,616	-5,475	-22,723	-80,814

\*ช่วงรีดเหล็ก 147 ชม./สัปดาห์, \*\* ช่วงอุ่นเตา 17.5 ชม./สัปดาห์ และ\*\*\*ช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 0.5 ชม.)

จากตารางที่ 6.12 พบว่า ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง 80,814 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 8,494 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 169,877 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร) เมื่อคิดการทำงาน 70 เปอร์เซ็นต์ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 5,707,870 บาท/ปี คิดเป็น 3.69 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างจนลดลงได้ 72.34 เปอร์เซ็นต์ และลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างจนลดลงได้ 63.50 เปอร์เซ็นต์

### 3.การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงจำนวนโดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 300 มิลลิเมตรของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) ราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 12,631,878 บาท โดยค่าการปรับปรุงคิดจากผลต่างระหว่างราคาโครงสร้างจำนวนปัจจุบันกับราคาปรับปรุงโครงสร้างจำนวนใหม่ (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ข) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 2.21 ปี

#### 6.2.2.4 การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก บ.

อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) หลังการปรับปรุงด้วย กรณี 1

#### 1. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 6.13 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโครงสร้างฉนวนด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย สะสมใน โครงสร้างฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย สะสมในโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์
หลังคาเตา	Heating	84.76	593	5,175	3,686	1,562	20,810	8,820
	Soaking	185.73	696	13,320	4,579	4,252	17,941	16,661
แท่นรีด	Heating	22.94	397	939	2,495	286	29,720	3,409
	Soaking	44.72	461	2,125	3,066	686	25,803	5,769
รดยิ่งเหล็ก	Heating	22.94	397	939	2,495	286	29,720	3,409
	Soaking	44.72	461	2,125	3,066	686	25,803	5,769
หน้าเตา	-	66.11	353	2,405	2,328	769	26,885	8,887
หลังเตา	-	51.28	397	2,099	2,495	640	29,720	7,620
รวม	-	523.19	-	29,126	-	9,167	-	60,343

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 103 ชม./สัปดาห์และ\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 5 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ8 ชม./ครั้ง)

## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาหลัก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาหลัก โดยจากตารางที่ 6.13 สามารถสรุป ผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 1 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.14

ตารางที่ 6.14 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาหลัก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ ในเวลา 1 สัปดาห์

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	47,226	69,975	117,202
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	38,293	60,343	98,636
ผลต่าง	-8,934	-9,633	-18,566

จากตารางที่ 6.14 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 1 คือใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 มิลลิเมตร คิดตั้งคิดกับฉนวนชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 18,566 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 9,633 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 8,934 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.14 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาหลักและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาหลัก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาหลักระหว่างการให้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.15

ตารางที่ 6.15 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด(มหาชน)กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงอุ่นเตา			
		คำนวณปัจจุบัน	คำนวณ CF	ผลต่าง	หน่วย	คำนวณปัจจุบัน	คำนวณ CF	ผลต่าง
<u>ความร้อนเข้า</u>								
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	14,995	14,896	-98	Mcal/ครั้ง	42,518	38,256	-4,262
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	3,685	3,660	-24	Mcal/ครั้ง	6,902	6,210	-692
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	41	40	-1	Mcal/ครั้ง	116	105	-12
รวม	Mcal/hr	18,783	18,661	-122	Mcal/ครั้ง	49,536	44,571	-4,965
<u>ความร้อนออก</u>								
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	5,250	5,250	0.00	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	11,555	11,555	0.00
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recup	Mcal/hr	7,637	7,587	-50	Mcal/ครั้ง	16,631	15,201	-1,429
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็นและจากน้ำรั่วในเตา	Mcal/hr	3,102	3,102	0.00	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	348	282	-66	Mcal/ครั้ง	2,283	1,146	-1,137
ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้าง	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	13,995	12,069	-1,927
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	2,395	2,395	0.00	Mcal/ครั้ง	5,072	5,072	0.00
รวม	Mcal/hr	18,783	18,661	-122	Mcal/ครั้ง	49,536	44,570	-4,965

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยี  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.16 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง รีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง เร่งเตา**	ความร้อนส่วนน้ำมัน เชื้อเพลิงรวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	1,544,446	212,589	1,757,035
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	1,534,354	191,280	1,725,634
ผลต่าง	-10,092	-21,309	-31,401

\*ช่วงรีดเหล็ก 103 ชม./สัปดาห์, \*\* ช่วงเร่งเตา 5 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 8 ชม.)

จากตารางที่ 6.16 พบว่า ปริมาณความร้อนส่วนเชื้อเพลิงลดลง 31,401 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 3,300 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 66,007 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร) เมื่อคิดการทำงาน 70 เฟอร์เซ็นต์ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 2,217,840 บาท/ปี คิดเป็น 1.79 เฟอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลงได้ 13.77 เฟอร์เซ็นต์ และลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลงได้ 18.91 เฟอร์เซ็นต์

### 3.การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงฉนวนโดยการติดตั้งฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 50 มิลลิเมตรกับผนังด้านในสุดของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างฉนวนรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50เฟอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 4,325,028.61 บาท (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ข) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.95 ปี

#### 6.2.2.5. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) หลังการปรับปรุงด้วยกรณี 2

##### 1.การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 6.17 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโครงสร้างฉนวนด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย สะสมใน โครงสร้างฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย สะสมในโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์
หลังคาเตา	Heating	84.76	607	5,301	3,686	1,562	11,477	4,864
	Soaking	185.73	732	14,007	4,699	4,364	10,234	9,504
แท่นรีด	Heating	22.94	423	1,000	2,607	299	15,402	1,767
	Soaking	44.72	500	2,302	3,265	730	13,756	3,076
รดยังเหล็ก	Heating	22.94	423	1,000	2,607	299	15,402	1,767
	Soaking	44.72	500	2,302	3,265	730	7,901	1,767
หน้าเตา	-	66.11	381	2,591	2,468	816	14,294	4,725
หลังเตา	-	51.28	423	2,236	2,607	668	15,402	3,949
รวม	-	523.19	-	30,740	-	9,468	-	31,417

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 103 ชม./สัปดาห์และ \*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 5 ครั้ง/สัปดาห์(ครั้งละ 8 ชม./ครั้ง)



## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาหลัก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาหลัก โดยจากตารางที่ 6.17 สามารถสรุปผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 2 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.18

ตารางที่ 6.18 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาหลัก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ ในเวลา 1 สัปดาห์

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	47,226	69,975	117,202
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	40,208	31,417	71,625
ผลต่าง	-7,019	-38,559	-45,577

จากตารางที่ 6.18 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 2 คือ ใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 75 มิลลิเมตร ร่วมกับการปรับปรุงฉนวนชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 7,019 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 38,559 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 45,577 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.18 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาหลักและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาหลัก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาหลักระหว่างการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.19

ตารางที่ 6.19 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด(มหาชน)กรณีจำนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงเร่งเตา			
		จำนวนปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	หน่วย	จำนวนปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>								
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	14,995	14,920	-74	Mcal/ครั้ง	42,518	30,260	-12,257
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	3,685	3,667	-18	Mcal/ครั้ง	6,902	4,912	-1,990
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	41	41	0	Mcal/ครั้ง	116	83	-34
รวม	Mcal/hr	18,783	18,691	-93	Mcal/ครั้ง	49,536	35,255	-14,281
<b>ความร้อนออก</b>								
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	5,250	5,250	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับ scale	Mcal/hr	52	52	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	11,555	11,555	0.00
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recuperator	Mcal/hr	7,637	7,599	-38	Mcal/ครั้ง	16,631	12,510	-4,119.1
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็นและจากน้ำรั่วในเตา	Mcal/hr	3,102	3,102	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	348	298	-49	Mcal/ครั้ง	2,283	1,183	-1,099
ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้าง	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	13,995	6,283	-7,712
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	2,395	2,395	0.00	Mcal/ครั้ง	5,072	5,072	0
รวม	Mcal/hr	18,783	18,691	-93	Mcal/ครั้ง	49,536	35,255	-14,281

ตารางที่ 6.20 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ในช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง รีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง เร่งเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง รวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	1,544,446	212,589	1,757,035
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	1,536,790	151,301	1,688,09
ผลต่าง	-7,656	-61,287	-68,943

ช่วงรีดเหล็ก 103 ชม./สัปดาห์ และ\*\*ช่วงเร่งเตา 5 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 8 ชม.)

จากตารางที่ 6.20 พบว่า ปริมาณความร้อนส่วนเชื้อเพลิงลดลง 68,943 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 7,246 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 144,924 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร) เมื่อคิดการทำงาน 70 เฟอร์เซ็นต์ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 4,869,462 บาท/ปีคิดเป็น 3.92 เฟอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลงได้ 55.10 เฟอร์เซ็นต์ และลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลงได้ 14.86 เฟอร์เซ็นต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงฉนวนโดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 75 มิลลิเมตรร่วมกับการปรับปรุงฉนวนด้านในสุดของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50 เฟอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 5,040,870 บาท โดยค่าการปรับปรุงคิดจากผลต่างระหว่างราคาโครงสร้างปัจจุบันเฉพาะส่วนที่ถูกปรับปรุงกับราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างใหม่ในส่วนนั้น (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ข) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.04 ปี

6.2.2.6 การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) หลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณี 3

#### 1. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 6.21 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย สะสมใน โครงสร้างฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย สะสมในโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์
หลังคาเตา	Heating	84.76	332	2,898	1,236	838	2,494	1,691
	Soaking	185.73	407	7,777	1,606	2,386	2,166	3,218
แผ่นรีด	Heating	22.94	332	784	1,235	227	2,508	460
	Soaking	44.72	406	1,871	1,605	574	2,179	780
รถยิงเหล็ก	Heating	22.94	332	784	1,235	227	2,508	460
	Soaking	44.72	332	1,528	1,418	507	2,179	780
หน้าเตา	-	66.11	383	2,606	1,513	800	2,173	1,149
หลังเตา	-	51.28	332	1,752	1,235	507	2,508	1,029
รวม	-	523.19	-	19,999	-	6,066	-	9,567

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 103 ชม./สัปดาห์และ\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 5 ครั้ง/สัปดาห์ (8 ชม./ครั้ง)

## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาหลัก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาหลัก โดยจากตารางที่ 6.21 สามารถสรุป ผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 3 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.22

ตารางที่ 6.22 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาหลัก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ ในเวลา 1 สัปดาห์

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	47,226	69,975	117,202
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	26,064	9,567	35,632
ผลต่าง	-21,162	-60,408	-81,570

จากตารางที่ 6.22 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 3 คือใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 มิลลิเมตร พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 21,162 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 60,408 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 81,570 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.22 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาหลักและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาหลัก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาหลักระหว่างการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.23

ตารางที่ 6.23 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด(มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงอุ่นเตา			
		ฉนวนปัจจุบัน	ฉนวน CF	ผลต่าง	หน่วย	ฉนวนปัจจุบัน	ฉนวน CF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>								
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	14,995	14,763	-232	Mcal/ครั้ง	42,518	22,591	-19,926
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	3,685	3,628	-57	Mcal/ครั้ง	6,902	3,667	-3,235
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	41	40	-1	Mcal/ครั้ง	116	62	-55
รวม	Mcal/hr	18,783	18,495	-289	Mcal/ครั้ง	49,536	26,320	-23,216
<b>ความร้อนออก</b>								
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	5,250	5,250	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับ scale	Mcal/hr	52	52	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	11,555	11,555	0.00
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recuperator	Mcal/hr	7,637	7,519	-118	Mcal/ครั้ง	16,631	8,836	-7,794
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็นและจากน้ำรั่วในเตา	Mcal/hr	3,102	3,102	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	348	194	-154	Mcal/ครั้ง	2,283	758	-1,525
ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้าง	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	13,995	1,196	-12,799
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	2,395	2,395	0	Mcal/ครั้ง	5,072	5,072	0
รวม	Mcal/hr	18,783	18,495	-289	Mcal/ครั้ง	49,536	26,320	-23,216

ตารางที่ 6.24 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ในช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง รีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง เร่งเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงรวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
คำนวณปัจจุบัน	1,544,446	212,589	1,757,035
คำนวณเซรามิกไฟเบอร์	1,520,578	112,956	1,633,535
ผลต่าง	-23,868	-99,632	-123,500

\*ช่วงรีดเหล็ก 103 ชม./สัปดาห์, และ\*\*ช่วงเร่งเตา 5 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 8 ชม.)

จากตารางที่ 6.24 ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง 80,814 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 123,500 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 12,980 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 259,608 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร) เมื่อคิดการทำงาน 70เปอร์เซ็นต์ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 8,722,841 บาท/ปี คิดเป็น 7.03 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างจนลดลงได้ 86.33 เปอร์เซ็นต์ และลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างจนลดลงได้ 44.81 เปอร์เซ็นต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงจำนวนโดยการติดตั้งจำนวนเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 300 มิลลิเมตรของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) ราคาปรับปรุงโครงสร้างจำนวนรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 22,379,928 บาท โดยค่าการปรับปรุงคิดจากผลต่างระหว่างราคาโครงสร้างจำนวนปัจจุบันกับราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างจำนวนใหม่ (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ข) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 2.57 ปี

6.2.2.7 การวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด หลังการปรับปรุงจำนวนด้วยกรณี 1

#### 1. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างของจำนวนเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 6.25 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีปรับปรุงโครงสร้างฉนวนด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย สะสมใน โครงสร้างฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย สะสมในโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์
หลังคาเตา	Heating	16.96	658	821	701	83	22,528	2,675
	Soaking	72.24	777	4,128	887	449	19,619	9,921
แผ่นรีด	Heating	5.33	396	155	446	17	25,548	953
	Soaking	28.52	630	1,320	711	142	22,934	4,579
รถยิงเหล็ก	Heating	5.33	396	155	446	17	25,548	953
	Soaking	28.52	630	1,320	711	142	22,934	4,579
หน้าเตา	-	7.58	625	348	655	35	26,479	1,405
หลังเตา	-	7.11	506	264	618	31	22,190	1,104
รวม	-	171.59	-	8,512	-	914	-	26,168

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 73.5 ชม./สัปดาห์\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 1.5 ชม./ครั้ง)



## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาหลัก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาหลัก โดยจากตารางที่ 6.25 สามารถสรุปผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 1 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.26

ตารางที่ 6.26 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาหลัก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	11,149	29,347	40,495
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	9,426	26,168	35,594
ผลต่าง	-1,723	-3,179	-4,901

จากตารางที่ 6.26 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 1 คือใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 มิลลิเมตร ติดตั้งติดกับฉนวนชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 1,722.44 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 3,178.84 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 4,901.27 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.26 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาหลักและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาหลัก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาหลักระหว่างการนำพลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการนำพลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.27

ตารางที่ 6.27 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีจำนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงเร่งเตา			
		จำนวนปัจจุบัน	จำนวนCF	ผลต่าง	หน่วย	จำนวนปัจจุบัน	จำนวนCF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>								
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	7,698	7,669	-29	Mcal/ครั้ง	7,705	7,085	-620
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	1,015	1,011	-4	Mcal/ครั้ง	943	867	-76
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	21	20	-1	Mcal/ครั้ง	21	19	-2
รวม	Mcal/hr	9,393	9,363	-30	Mcal/ครั้ง	8,669	7,971	-698
<b>ความร้อนออก</b>								
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	3,883	3,88.	0.00	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับ scale	Mcal/hr	123	123	0.00	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recuperator	Mcal/hr	2,624	2,614	-10	Mcal/ครั้ง	2,244	2,063	-181
ความร้อนสูญเสียจากการสะสมใน โครงสร้าง	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	4,192	3,738	-454
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	137	116	-21	Mcal/ครั้ง	157	131	-26
ความร้อนสูญเสียสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	1,148	1,148	0.00
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	Mcal/hr	2.63	2.62	-0.01	Mcal/ครั้ง	1.46	1.34	-0.12
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	2,624	2,624	0.00	Mcal/ครั้ง	926	926	0.00
รวม	Mcal/hr	9,393	9,363	-30	Mcal/ครั้ง	8,669	7,971	-698

ตารางที่ 6.28 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบันกับปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง รีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง เร่งเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงรวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	565,808	53,933	619,741
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	563,745	49,593	613,337
ผลต่าง	-2,063	-4,340	-6,404

\*ช่วงรีดเหล็ก 73.5 ชม./สัปดาห์ และ\*\*ช่วง เร่ง 7 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 1.5 ชม.)

จากตารางที่ 6.28 พบว่า ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง 6,403 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 673 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 13,460 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร ) เมื่อคิดการทำงาน 70% ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 452,266 บาท/ปี คิดเป็น 1.03 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลงได้ 10.83 เปอร์เซ็นต์ และคิดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลงได้ 15.45 เปอร์เซ็นต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงฉนวนโดยการติดตั้งฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 50 มิลลิเมตรกับผนังด้านในสุดของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ราคาราคา ค่าปรับปรุงโครงสร้างฉนวนราคาปรับปรุงโครงสร้างฉนวนรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 945,645.42 บาท (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ซ) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 2.10 ปี

6.2.2.8 การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด หลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณี 2

#### 1. ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 6.29 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย สะสมใน โครงสร้างฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย สะสมในโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์
หลังคาเตา	Heating	16.96	671	837	694	82	12,196	1,448
	Soaking	72.24	806	4,281	892	451	14,007	7,083
แผ่นรีด	Heating	5.33	397	155	439	16	13,667	510
	Soaking	28.52	643	1,349	713	142	13,160	2,627
รถยิงเหล็ก	Heating	5.33	397	155	439	16	13,667	510
	Soaking	28.52	643	1,349	713	142	13,160	2,627
หน้าเตา	-	7.58	601	335	622	33	12,735	676
หลังเตา	-	7.11	509	266	612	30	11,826	588
รวม	-	171.59	-	8,727	-	915	-	16,070

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 73.5 ชม./สัปดาห์และ\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์ (1.5 ชม./ครั้ง)

## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาหลัก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาหลัก โดยจากตารางที่ 6.29 สามารถสรุปผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 2 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.30

ตารางที่ 6.30 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาหลัก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	11,149	29,347	40,495
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	9,642	16,070	25,711
ผลต่าง	-1,507	-13,277	-14,784

จากตารางที่ 6.30 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 2 คือ ใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 75 มิลลิเมตร ร่วมกับการปรับปรุงฉนวนชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 1,507 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 13,277 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 14,784 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.30 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาหลักและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาหลัก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาหลักระหว่างการให้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการให้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.31

ตารางที่ 6.31 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงเร่งเตา			
		คำนวณปัจจุบัน	คำนวณCF	ผลต่าง	หน่วย	คำนวณปัจจุบัน	คำนวณCF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>								
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	7,698	7,674	-24	Mcal/ครั้ง	7,705	5,222	-2,483
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	1,015	1,012	-3	Mcal/ครั้ง	943	639	-304
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	21	21	0	Mcal/ครั้ง	21	14	-7
ความร้อนที่ได้จากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก	Mcal/hr	659	659	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
รวม	Mcal/hr	9,393	9,366	-27	Mcal/ครั้ง	8,669	5,874	-2,795
<b>ความร้อนออก</b>								
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	3,883	3,883	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับ scale	Mcal/hr	123	123	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recuperator	Mcal/hr	2,624	2,616	-8	Mcal/ครั้ง	2,244	1,521	-723
ความร้อนสูญเสียจากการสะสมใน โครงสร้าง	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	4,192	2,296	-1,897
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	137	119	-18	Mcal/ครั้ง	157	131	-26
ความร้อนสูญเสียสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr				Mcal/ครั้ง	1,148	1,148	0
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	2,624	2,624	0	Mcal/ครั้ง	926	926	0
รวม	Mcal/hr	9,393	9,366	-27	Mcal/ครั้ง	8,669	5,874	-2,795

ตารางที่ 6.32 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ในช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง รีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง เร่งเตา**	ความร้อนส่วนน้ำมัน เชื้อเพลิงรวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	565,808	53,933	619,741
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	564,031	36,552	600,582
ผลต่าง	-1,777	-17,381	-19,159

\*ช่วงรีดเหล็ก 73.5 ชม./สัปดาห์ และ\*\*ช่วง เร่ง 7 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 1.5 ชม.)

จากตารางที่ 6.32 พบว่า ปริมาณความร้อนส่วนเชื้อเพลิงลดลง 19,159 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 2,014 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 40,272.8 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร ) เมื่อคิดการทำงาน 70% ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 1,353,166 บาท/ปี คิดเป็น 3.09 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลงได้ 45.24 เปอร์เซ็นต์ และลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลงได้ 13.51 เปอร์เซ็นต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงฉนวนโดยการติดตั้งฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 75 มิลลิเมตรร่วมกับการปรับปรุงฉนวนด้านในสุดของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างฉนวนรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 1,561,316 บาท โดยค่าการปรับปรุงคิดจากผลต่างระหว่างราคาโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเฉพาะส่วนที่ถูกปรับปรุงกับราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างฉนวนใหม่ในส่วนนั้น (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ข) สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.15 ปี

#### 6.2.2.9 การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด หลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณี 3

##### 1. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 6.33 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนังด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย ผ่านโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสีย สะสมใน โครงสร้างฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อนสูญเสีย สะสมในโครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์
หลังคาเตา	Heating	16.96	455	567	439	52	2,996	356
	Soaking	72.24	536	2,848	556	281	3,529	1,784
แผ่นรีด	Heating	5.33	454	178	439	16	3,014	112
	Soaking	28.52	536	1,124	556	111	2,657	531
รดยิ่งเหล็ก	Heating	5.33	454	178	439	16	3,014	112
	Soaking	28.52	536	1,124	556	111	2,657	531
หน้าเตา	-	7.58	681	379	608	32	3,072	163
หลังเตา	-	7.11	536	280	556	28	2,641	131
รวม	-	171.59	-	6,678	-	648	-	3,720

\*เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 73.5 ชม./สัปดาห์และ\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง/สัปดาห์ (1.5 ชม./ครั้ง)



## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาหลัก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาหลัก โดยจากตารางที่ 6.33 สามารถสรุปผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 3 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.34

ตารางที่ 6.34 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาหลัก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	11,149	29,347	40,495
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	7,326	3,720	11,047
ผลต่าง	-3,822	-25,626	-29,449

จากตารางที่ 6.34 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 3 คือใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 มิลลิเมตร พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 3,822 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 25,626 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 29,449 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.10 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาหลักและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาหลัก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาหลักระหว่างการ ใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.35

ตารางที่ 6.35 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงเร่งเตา			
		คำนวณปัจจุบัน	คำนวณCF	ผลต่าง	หน่วย	คำนวณปัจจุบัน	คำนวณCF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>								
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	7,698	7,641	-57	Mcal/ครั้ง	7,705	2,923	-4,782
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	1,015	1,008	-7	Mcal/ครั้ง	943	358	-585
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	21	21	0	Mcal/ครั้ง	21	8	-13
ความร้อนที่ได้จากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก	Mcal/hr	659	659	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
รวม	Mcal/hr	9,393	9,329	-64	Mcal/ครั้ง	8,669	3,289	-5,380
<b>ความร้อนออก</b>								
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	3,883	3,883	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับ scale	Mcal/hr	123	123	0	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recuperator	Mcal/hr	2,624	2,605	-19	Mcal/ครั้ง	2,244	851	-1,393
ความร้อนสูญเสียจากการสะสมในโครงสร้าง	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	4,192	550	-3,642
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	137	95	-42	Mcal/ครั้ง	157	96	-60
ความร้อนสูญเสียสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	Mcal/ครั้ง	1,148	1,148	0
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	2,624	2,624	0	Mcal/ครั้ง	926	926	0
รวม	Mcal/hr	9,393	9,329	-64	Mcal/ครั้ง	8,669	3,289	-5,380

ตารางที่ 6.36 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ในช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง รีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงช่วง เร่งเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิงรวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	565,808	53,933	619,741
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	561,649	20,460	582,110
ผลต่าง	-4,158	-33,473	-37,631

\*ช่วงรีดเหล็ก 73.5 ชม./สัปดาห์ และ\*\*ช่วง เร่ง 7 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 1.5 ชม.)

จากตารางที่ 6.36 พบว่า ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง 37,631 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 3,955 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 79,104 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร ) เมื่อคิดการทำงาน 70% ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 2,657,88 บาท/ปี คิดเป็น 6.07 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลงได้ 87.32 เปอร์เซ็นต์ และคิดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลงได้ 34.27 เปอร์เซ็นต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงฉนวนโดยการติดตั้งฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 300 มิลลิเมตรของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด ราคาปรับปรุงโครงสร้างฉนวนรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 8,040,171 บาท โดยค่าการปรับปรุงคิดจากผลต่างระหว่างราคาโครงสร้างฉนวนปัจจุบันกับราคาปรับปรุงโครงสร้างฉนวนใหม่ (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ช) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 3.03 ปี

6.2.2.10 การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) หลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณี 1

#### 1. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 6.37 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ.แอด พี เอ็น เพลทิมิด จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโครงสร้างฉนวนด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนัง ด้าน	โซน	พื้นที่  m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงอุ่นเตา		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์
หลังคา เตา	Preheating	27.47	902	3,666	773	42	2,512	69	9,662	265
	Heating	36.94	1,184	6,475	832	61	3,025	112	25,261	933
	Soaking	50.99	1,193	9,003	1,193	122	3,579	182	0	0
แท่นรีด	Preheating	17.27	409	1,044	363	13	1,157	20	12,549	217
	Heating	28.45	499	2,100	384	22	1,324	38	32,357	921
	Soaking	34.10	501	2,531	501	34	1,504	51	0	0
วาง slab	Preheating	17.27	409	1,044	363	13	1,157	20	12,549	217
	Heating	28.45	499	2,100	384	22	1,324	38	32,357	921
	Soaking	34.10	501	2,531	501	34	1,504	51	0	0
หน้าเตา	-	25.99	890	3,423	890	46	2,670	69	0	0
หลังเตา	-	18.79	688	1,914	596	22	1,926	36	11,298	212
รวม	-	319.8	-	35,830	-	431	-	687	-	3,685

\* เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 163 ชม./สัปดาห์, \*\*เวลาทำงานช่วงอุ่นเตา 2 ชม./สัปดาห์ และ\*\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 1 ครั้ง/สัปดาห์

## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก โดยจากตารางที่ 6.37 สามารถสรุป ผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 1 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.38

ตารางที่ 6.38 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	44,601	3,905	48,506
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	36,948	3,685	40,633
ผลต่าง	-7,653	-220	-7,873

จากตารางที่ 6.38 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 1 คือใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 มิลลิเมตร คิดตั้งคิดกับฉนวนชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 17,653 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 220Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 7,873 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.38 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็กลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็กลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กระหว่างการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.39

ตารางที่ 6.39 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับหลังการปรับปรุงด้วยกรณี 1 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงอุ่นเตา			ช่วงเร่งเตา			
		จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	หน่วย	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>											
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	21,008	20,934	-73	10,333	10,248	-84	Mcal/ครั้ง	37,474	36,836	-638
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	4,438	4,422	-16	3,023	2,998	-25	Mcal/ครั้ง	11,031	10,843	-188
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	49	48	0	24	24	0	Mcal/ครั้ง	87	85	-2
รวม	Mcal/hr	26,547	26,457	-89	13,380	13,270	-109	Mcal/ครั้ง	48,591	47,764	-828
<b>ความร้อนออก</b>											
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	5,308	5,308	0	-	-	-	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recup	Mcal/hr	9,826	9,791	-34	7,547	7,485	-62	Mcal/ครั้ง	27,480	27,012	-468
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	292	242	-50	264	216	-49	Mcal/ครั้ง	835	687	-148
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	Mcal/hr	2,339	2,339	0	2,339	2,339	0	Mcal/ครั้ง	7,016	7,016	0
ความร้อนสูญเสียสะสมเข้าสู่โครงสร้างเตา	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	3,905	3,685	-220
ความร้อนสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	4,844	4,844	0
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	7,954	7,954	0	3,077	3,077	0	Mcal/ครั้ง	4,050	4,050	0
รวม	Mcal/hr	26,547	26,457	-89	13,380	13,270	-109	Mcal/ครั้ง	48,591	47,764	-828

ตารางที่ 6.40 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับหลังการปรับปรุงโดยการใช้เซรามิกไฟเบอร์ หนา 50 mm ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงรีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงอุ่นเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงเร่งเตา***	ความร้อนส่วนใช้ น้ำมันเชื้อเพลิง รวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
คำนวณปัจจุบัน	3,109,138	20,665	37,473	3,167,277
คำนวณเซรามิกไฟเบอร์	3,098,267	20,496	36,835	3,155,599
ผลต่าง	-10,871	-169	-638	-11,678

\*ช่วงรีดเหล็ก 163 ชม./สัปดาห์, \*\* ช่วงอุ่นเตา 2 ชม./สัปดาห์ และ\*\*\*ช่วงเร่งเตา 1 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 3 ชม.)

จากตารางที่ 6.40 พบว่า ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง 11,678 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 1,227 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 24,549 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร) เมื่อคิดการทำงาน 70 เฟอร์เซ็นต์ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 785,581 บาท/ปีคิดเป็น 0.37 เฟอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างจนลดลงได้ 5.63 เฟอร์เซ็นต์ และคิดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างจนลดลงได้ 17.16 เฟอร์เซ็นต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงจำนวนโดยการติดตั้งจำนวนเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 50 มิลลิเมตรกับผนังด้านในสุดของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) ราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างจำนวน รวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ประมาณ 50 เฟอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 2,865,978 บาท (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ข) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 3.60 ปี

#### 6.2.2.11 การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) หลังการปรับจำนวนด้วยกรณี 2

##### 1. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวน

ตารางที่ 6.41 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ.แอล พี เอ็น เฟลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนัง ด้าน	โซน	พื้นที่  m <sup>2</sup>	ช่วงริดเหล็ก		ช่วงอุ่นเตา		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์
หลังคา เตา	Preheating	27.47	588	2,392	490	27	1,618	44	5,206	143
	Heating	36.94	820	4,486	535	40	2,033	75	4,801	532
	Soaking	50.99	828	6,249	828	84	2,484	127	0	0
แผ่นริด	Preheating	17.27	352	899	305	11	985	17	3,125	162
	Heating	28.45	448	1,887	326	19	1,162	33	8,377	715
	Soaking	34.10	451	2,277	451	31	1,353	46	0	0
วาง slab	Preheating	17.27	352	899	305	11	985	17	3,125	162
	Heating	28.45	448	1,887	326	19	1,162	33	8,377	715
	Soaking	34.10	451	2,277	451	31	1,353	46	0	0
หน้าเตา	-	25.99	695	2,672	695	36	2,084	54	0	0
หลังเตา	-	18.79	505	1,404	424	16	1,394	26	2,449	138
รวม	-	319.8	-	27,331	-	323	-	519	-	2,567

\* เวลาทำงานช่วงริดเหล็ก 163 ชม./สัปดาห์, \*เวลาทำงานช่วงอุ่นเตา 2 ชม./สัปดาห์ และ\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 1 ครั้ง/สัปดาห์



## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาหลัก

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาหลัก โดยจากตารางที่ 6.41 สามารถสรุป ผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 2 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.42

ตารางที่ 6.42 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาหลัก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	44,601	3,905	48,506
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	28,173	2,567	30,739
ผลต่าง	-16,428	-1,338	-17,767

จากตารางที่ 6.42 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 2 คือ ใช้เซรามิกไฟเบอร์ ร่วมกับการปรับปรุงฉนวนชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวนลดลง 16,428 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 1,339 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 17,767 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.42 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาหลักและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาหลักลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาหลัก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาหลักระหว่างการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.43

ตารางที่ 6.43 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงอุ่นเตา			ช่วงเร่งเตา			
		จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	หน่วย	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>											
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	21,008	20,850	-158	10,333	10,154	-178	Mcal/ครั้ง	37,474	34,606	-2,868
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	4,438	4,404	-33	3,023	2,971	-52	Mcal/ครั้ง	11,031	10,186	-844
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	49	48	0	24	24	0	Mcal/ครั้ง	87	80	-7
รวม	Mcal/hr	26,547	26,355	-191	13,380	13,149	-231	Mcal/ครั้ง	48,591	44,873	-3,718
<b>ความร้อนออก</b>											
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	5,308	5,308	0	-	-	-	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recup	Mcal/hr	9,826	9,752	-74	7,547	7,416	-130	Mcal/ครั้ง	27,480	25,377	-2,103
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	292	185	-107	264	161	-103	Mcal/ครั้ง	835	519	-316
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	Mcal/hr	2,339	2,339	0	2,339	2,339	0.00	Mcal/ครั้ง	7,016	7,016	0.00
ความร้อนสูญเสียสะสมเข้าสู่โครงสร้างเตา	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	3,905	2,567	-1,339
ความร้อนสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	4,844	4,844	0.00
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	7,954	7,954	0	3,077	3,077	0.00	Mcal/ครั้ง	4,050	4,050	0.00
รวม	Mcal/hr	26,547	26,355	-191	13,380	13,149	-231	Mcal/ครั้ง	48,591	44,873	-3,718

ตารางที่ 6.44 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น แพลทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 2 ในช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงรีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงอุ่นเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงเร่งเตา***	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง รวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
คำนวณปัจจุบัน	3,109,138	20,665	37,473	3,167,277
คำนวณเซรามิกไฟเบอร์	3,085,793	20,228	34,606	3,140,628
ผลต่าง	-23,345	-436	-2,867	-26,649

\*ช่วงรีดเหล็ก 163 ชม./สัปดาห์, \*\* ช่วงอุ่นเตา 2 ชม./สัปดาห์ และ\*\*\*ช่วงเร่งเตา 1 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 3 ชม.)

จากตารางที่ 6.44 พบว่า ปริมาณความร้อนส่วนเชื้อเพลิงลดลง 26,649 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 2,801 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 56,019 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร) เมื่อคิดการทำงาน 70 เพลอร์เซ็นต์ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 1,792,608 บาท/ปี คิดเป็น 0.84 เพลอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างจนลดลงได้ 34.27 เพลอร์เซ็นต์ และลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างจนลดลงได้ 36.83 เพลอร์เซ็นต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงจำนวนโดยการติดตั้งจำนวนเซรามิกไฟเบอร์

การลงทุนปรับปรุงโครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 150 มิลลิเมตรร่วมกับการปรับปรุงจำนวนด้านในสุดของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น แพลทมิล จำกัด (มหาชน) ราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างจำนวนรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50 เพลอร์เซ็นต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 3,384,089 บาท โดยค่าการปรับปรุงคิดจากผลต่างระหว่างราคาโครงสร้างจำนวนปัจจุบันเฉพาะส่วนที่ถูกปรับปรุงกับราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างจำนวนใหม่ในส่วนนั้น (ข้อมูลราคาคำนวณอ้างอิงภาคผนวก ข) โดยสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.89 ปี

6.2.2.12. การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น แพลทมิล จำกัด (มหาชน) หลังปรับปรุงจำนวนด้วยกรณี 3

#### 1. ความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างจำนวนของเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 6.45 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน บ.แอล พี เอ็น เฟลทमित จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนที่ปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

ผนัง ด้าน	โซน	พื้นที่ m <sup>2</sup>	ช่วงรีดเหล็ก		ช่วงอุ่นเตา		ช่วงเร่งเตา			
			ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม* Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .h	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียผ่าน โครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวน kcal/m <sup>2</sup> .ครั้ง	ความร้อน สูญเสียสะสม ในโครงสร้าง ฉนวนรวม*** Mcal/สัปดาห์
หลังคา เตา	Preheating	27.47	388	1,576	322	18	1,064	29	3,828	105
	Heating	36.94	545	2,979	352	26	1,345	50	9,951	368
	Soaking	50.99	550	4,150	550	56	1,650	84	0	0
แท่นรีด	Preheating	17.27	388	990	321	11	1,063	18	3,853	67
	Heating	28.45	545	2,293	352	20	1,345	38	10,012	285
	Soaking	34.10	550	2,775	550	37	1,649	56	0	0
วาง slab	Preheating	17.27	388	990	321	11	1,063	18	3,853	67
	Heating	28.45	545	2,293	352	20	1,345	38	10,012	285
	Soaking	34.10	550	2,775	550	37	1,649	56	0	0
หน้าเตา	-	25.99	550	2,114	550	29	1,649	43	0	0
หลังเตา	-	18.79	388	1,078	321	12	1,063	20	3,853	72
รวม	-	319.8	-	24,012	-	278	-	452	-	1,248

\* เวลาทำงานช่วงรีดเหล็ก 163 ชม./สัปดาห์, \*\*เวลาทำงานช่วงอุ่นเตา 2 ชม./สัปดาห์ และ \*\*\*เวลาทำงานช่วงเร่งเตา 1 ครั้ง/สัปดาห์(3 ชม./ครั้ง)

## 2. การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผา

ความร้อนที่ต้องสูญเสียที่โครงสร้างฉนวน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างฉนวนของเตาเผา ช่วงเวลาการทำงานของเตาเผา และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก โดยจากตารางที่ 6.45 สามารถสรุป ผลหลังการปรับปรุงฉนวนด้วยกรณีที่ 3 ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.46

ตารางที่ 6.46 สรุป และเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนในปัจจุบันกับหลังปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียสะสม ในโครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์	ความร้อนสูญเสียรวมที่ โครงสร้างฉนวน Mcal/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	44,601	3,905	48,506
ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	24,742	1,248	25,990
ผลต่าง	-19,859	-2,657	-22,516

จากตารางที่ 6.46 ผลการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฉนวนที่ใช้ในปัจจุบันกับโครงสร้างฉนวนที่ได้ปรับปรุงใช้เซรามิกไฟเบอร์กรณี 3 คือใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 มิลลิเมตร พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนลดลง 19,859 Mcal/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนลดลง 2,657 Mcal/สัปดาห์ โดยคิดเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลดลง 22,516 Mcal/สัปดาห์

จากปริมาณความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงดังตารางที่ 6.10 ข้างต้น ส่งผลให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็กลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ จะมีผลต่อการลดลงของความร้อนสูญเสียที่ออกไปกับไอเสียในเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็กลดลงจากการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ด้วย ฉะนั้นในการพิจารณาเปรียบเทียบการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก จึงต้องนำผลของการลดลงของความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ มาพิจารณาร่วมด้วย โดยในการเปรียบเทียบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กระหว่างการใช้อุปกรณ์เชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนปัจจุบันเปรียบเทียบกับการใช้อุปกรณ์เชื้อเพลิงที่เกิดจากโครงสร้างฉนวนหลังการปรับปรุง ในช่วงการทำงานต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.47

ตารางที่ 6.47 เปรียบเทียบสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ช่วงการทำงานต่างๆ

พลังงานความร้อน	หน่วย	ช่วงรีดเหล็ก			ช่วงอุ่นเตา			ช่วงเร่งเตา			
		จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง	หน่วย	จำนวน ปัจจุบัน	จำนวน CF	ผลต่าง
<b>ความร้อนเข้า</b>											
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr	21,008	20,817	-191	10,333	10,115	-217	Mcal/ครั้ง	37,474	32,203	-5,271
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	4,438	4,397	-40	3,023	2,960	-64	Mcal/ครั้ง	11,031	9,479	-1,552
ความร้อนของเชื้อเพลิงช่วยเผาไหม้	Mcal/hr	49	48	-1	24	23	-1	Mcal/ครั้ง	87	75	-12
รวม	Mcal/hr	26,547	26,315	-231	13,380	13,098	-282	Mcal/ครั้ง	48,591	41,756	-6,835
<b>ความร้อนออก</b>											
ความร้อนที่ใช้ประโยชน์	Mcal/hr	5,308	5,308	0	-	-	-	Mcal/ครั้ง	-	-	-
ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซเสียก่อนเข้า Recup	Mcal/hr	9,826	9,736	-89	7,547	7,388	-159	Mcal/ครั้ง	27,480	23,615	-3,865
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Mcal/hr	292	162	-130	264	139	-126	Mcal/ครั้ง	835	452	-383
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	Mcal/hr	2,339	2,339	0	2,339	2,339	0	Mcal/ครั้ง	7,016	7,016	0
ความร้อนสูญเสียสะสมเข้าสู่โครงสร้างเตา	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	3,905	1,248	-2,657
ความร้อนสะสมที่เข้าสู่เหล็ก	Mcal/hr	-	-	-	-	-	-	Mcal/ครั้ง	4,844	4,844	0
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Mcal/hr	7,954	7,954	0	3,077	3,077	0	Mcal/ครั้ง	4,050	4,050	0
รวม	Mcal/hr	26,547	26,315	-231	13,380	13,098	-282	Mcal/ครั้ง	48,591	41,756	-6,835

ตารางที่ 6.48 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนส่วนน้ำมันเชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) กรณีคำนวณในปัจจุบันกับเมื่อปรับปรุงด้วยกรณี 3 ในช่วงการทำงานต่างๆ

กรณี	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงรีดเหล็ก*	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงอุ่นเตา**	ความร้อนส่วน น้ำมันเชื้อเพลิง ช่วงเร่งเตา***	ความร้อนส่วน เชื้อเพลิงรวม
	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์	Mcal/สัปดาห์
จนวนปัจจุบัน	3,109,139	20,665	37,474	3,167,278
เซรามิกไฟเบอร์	3,080,920	20,230	32,203	3,133,354
ผลต่าง	-28,219	-435	-5,271	-33,924

\*ช่วงรีดเหล็ก 163 ชม./สัปดาห์, \*\* ช่วงอุ่นเตา 2 ชม./สัปดาห์ และ\*\*\*ช่วงเร่งเตา 1 ครั้ง/สัปดาห์ (ครั้งละ 3 ชม.)

จากตารางที่ 6.48 พบว่า ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง 80,813 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 33,924 Mcal/สัปดาห์ คิดเป็นปริมาณการใช้น้ำมันที่ลดลง 3,566 ลิตร/สัปดาห์ คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันที่ลดลง 71,312 บาท/สัปดาห์ (เทียบกับน้ำมันเตา C ราคา 20 บาท/ลิตร) เมื่อคิดการทำงาน 70 เปอร์เซนต์ต่อปี จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน จะได้ว่าเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลดลงเป็นเงิน 2,281,971 บาท/ปี คิดเป็น 1.07 เปอร์เซนต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างจนลดลงได้ 68.05 เปอร์เซนต์ และลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างจนลดลงได้ 44.53 เปอร์เซนต์

### 3. การวิเคราะห์การลงทุนปรับปรุงจนวนโดยการติดตั้งจนวนเซรามิกไฟเบอร์

การการลงทุนปรับปรุงโครงสร้างจนวนของเตาเผาเหล็ก โดยการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 300 มิลลิเมตรของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) ราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างจนวนรวมค่าติดตั้งอุปกรณ์คิดที่ 50 เปอร์เซนต์ของค่าวัสดุ คิดเป็นเงินประมาณ 9,420,814 บาท โดยค่าการปรับปรุงคิดจากผลต่างระหว่างราคาโครงสร้างจนวนปัจจุบันกับราคาค่าปรับปรุงโครงสร้างจนวนใหม่ (ข้อมูลราคาจนวนอ้างอิงภาคผนวก ข) สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 4.10 ปี

### 6.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์หลังการปรับปรุงโครงสร้างจนวนของเตาเผาเหล็ก

ในการพิจารณามาตรการอนุรักษ์พลังงานที่มีการลงทุน จะมีความจำเป็นที่จะต้องใช้วิธีการทางการเงิน เพื่อประเมินผลตอบแทนที่จะได้จากสิ่งที่ลงทุน เพื่อที่จะเป็นแนวทางใน

การจัดลำดับความสำคัญของมาตรการอนุรักษ์พลังงาน และใช้งบประมาณและทรัพยากรที่มีอยู่ จำกัดอย่างคุ้มค่า วิธีการทางการเงินที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินผลตอบแทนของมาตรการอนุรักษ์พลังงาน ได้แก่ การคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย (Simple Payback Period) ระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย หมายถึง ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการที่มาตรการจะให้มูลค่าผลตอบแทนคืนมูลค่าของการลงทุนที่ใช้ไป การคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายของมาตรการอนุรักษ์พลังงานจะใช้เป็นหน่วยของจำนวนปี โดยผลตอบแทนก็คือ ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ต่อปีนั่นเอง

การคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย เป็นวิธีการที่ง่ายที่ทำให้คำนวณผลตอบแทนของโครงการได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมักใช้ทั่วไปกับมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่มีเงินลงทุนไม่มากนัก ข้อเสียของการคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายก็คือ ไม่ได้พิจารณามูลค่าทางการเงินที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลา ซึ่งเป็นผลจากอัตราดอกเบี้ยหรืออัตราเงินเฟ้อต่าง ๆ ดังนั้น ในมาตรการที่มีจำนวนเงินลงทุนสูง จึงไม่เหมาะสมกับมาตรการที่มีอายุการคำนวณนานๆ เช่น มากกว่า 2 ปี จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการทางการเงินอื่น ความหมายของระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่มีการลงทุนที่นิยมแปลผลจากการวิเคราะห์ ประกอบด้วย ระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายน้อยกว่า 2 ปี เป็นมาตรการที่มีผลตอบแทนสูงและสนใจในการดำเนินการ ส่วนในกรณีที่มาตรการมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายมากกว่า 2 ปี ในที่นี้จะพิจารณาอัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return) ประกอบ เนื่องจาก ในกรณีที่มาตรการมีระยะเวลาคืนทุนมากกว่า 2 ปี การพิจารณาในเรื่องดอกเบี้ยประกอบจะทำให้ค่าที่มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าการพิจารณาจากระยะคืนทุนอย่างง่าย โดยอัตราดอกเบี้ยที่ใช้เท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์ต่อปี

จากการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงจนวนกันความร้อนของเตาเผาเหล็กของโรงงาน ตัวอย่างข้างต้น ซึ่งประกอบวิธีการปรับปรุง 3 กรณี ประกอบด้วย กรณีที่ 1 ทำการปรับปรุงจนวนโดยการนำเซรามิกไฟเบอร์ขนาดความหนา 50 มิลลิเมตร กรณีที่ 2 ทำการปรับปรุงจนวนเฉพาะจนวนชั้นในสุดโดยการลดความหนาของ plastic refractory ลงเพื่อลดน้ำหนักวัสดุ และติดตั้งจนวนเซรามิกไฟเบอร์ติดกับ plastic refractory กรณีที่ 3 ทำการปรับปรุงจนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 มิลลิเมตร และข้อมูลอายุการใช้งานเฉลี่ยของเซรามิกไฟเบอร์แบบ felt ที่มีอายุใช้งานเฉลี่ยประมาณ 3 ปี, ข้อมูลอายุการใช้งานเฉลี่ยของเซรามิกไฟเบอร์แบบ Module ที่มีอายุใช้งานเฉลี่ยประมาณ 5 ปี สามารถสรุปได้ดังนี้



### 6.3.1 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

#### บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 6.49 สรุปผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

กรณีที่	ผลการ ประหยัด (บาท/ปี)	เงินลงทุน (บาท)	ระยะเวลาดิ้น ทุนอย่างง่าย (ปี)	อัตราผลตอบแทน การลงทุน (IRR) (%)	ความคุ้มค่าในการ ลงทุน
1	1,773,197	3,034,963	1.71	-	คุ้มค่าในการลงทุน
2	3,037,504	3,197,268	1.05	-	คุ้มค่าในการลงทุน
3	5,707,870	12,631,878	2.21	35.17	คุ้มค่าในการลงทุน

จากตารางข้างต้น จะเห็นว่า การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt ในการปรับปรุงนั้นคุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจากมีระยะเวลาดิ้นทุนอย่างง่ายน้อยกว่า 3 ปี ในขณะที่เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt มีอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 3 ปี สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีที่ 3 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ module ในการปรับปรุงนั้นเนื่องจากมีระยะเวลาดิ้นทุนอย่างง่ายมากกว่า 2 ปี จึงพิจารณาอัตราผลตอบแทนการลงทุนประกอบ พบว่า อัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ 35.17 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมากกว่า อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารที่ 7% แสดงว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นคุ้มค่าในการลงทุนทั้ง 3 กรณี

### 6.3.2 ผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 6.50 สรุปผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

กรณีที่	ผลการ ประหยัด (บาท/ปี)	เงินลงทุน (บาท)	ระยะเวลา คืนทุนอย่าง ง่าย (ปี)	อัตราผลตอบแทน การลงทุน (IRR) (%)	ความคุ้มค่าในการ ลงทุน
1	2,217,840	4,325,029	1.95	-	คุ้มค่าในการลงทุน

กรณีศึกษา	ผลการประหยัด (บาท/ปี)	เงินลงทุน (บาท)	ระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย (ปี)	อัตราผลตอบแทนการลงทุน (IRR) (%)	ความคุ้มค่าในการลงทุน
2	4,869,462	5,040,871	1.04	-	คุ้มค่าในการลงทุน
3	8,722,841	22,379,929	2.57	27.33	คุ้มค่าในการลงทุน

จากตารางข้างต้น จะเห็นว่า การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt ในการปรับปรุงนั้นคุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายน้อยกว่า 3 ปี ในขณะที่เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt มีอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 3 ปี สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีที่ 3 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ module ในการปรับปรุงนั้น เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายมากกว่า 2 ปี จึงพิจารณาอัตราผลตอบแทนการลงทุนประกอบ พบว่า อัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ 27.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่า อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารที่ 7% แสดงว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นคุ้มค่าในการลงทุนทั้ง 3 กรณี

### 6.3.3 ผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด

ตารางที่ 6.51 สรุปผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด

กรณีศึกษา	ผลการประหยัด (บาท/ปี)	เงินลงทุน (บาท)	ระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย (ปี)	อัตราผลตอบแทนการลงทุน (IRR) (%)	ความคุ้มค่าในการลงทุน
1	452,266	945,645	2.10	-	คุ้มค่าในการลงทุน
2	1,353,166	1,561,316	1.15	-	คุ้มค่าในการลงทุน
3	2,657,888	8,040,171	3.03	19.48	คุ้มค่าในการลงทุน

จากตารางข้างต้น จะเห็นว่า การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt ในการปรับปรุงนั้นคุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายน้อยกว่า 3 ปี ในขณะที่เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt มีอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 3 ปี สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

ของบ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีที่ 3 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ module ในการปรับปรุงนั้น เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายมากกว่า 2 ปี จึงพิจารณาอัตราผลตอบแทนการลงทุนประกอบ พบว่า อัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ 19.48 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมากกว่า อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคาร ที่ 7% แสดงว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การปรับปรุงโครงสร้างฉนวน ของเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นคุ้มค่าในการลงทุนทั้ง 3 กรณี

#### 6.3.4 ผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลท มิล จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 6.52 สรุปผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลท มิล จำกัด (มหาชน)

กรณีที่	ผลการ ประหยัด (บาท/ปี)	เงินลงทุน (บาท)	ระยะเวลา คืนทุนอย่าง ง่าย (ปี)	อัตราผลตอบแทน การลงทุน (IRR) (%)	ความคุ้มค่าในการ ลงทุน
1	785,581	2,865,978	3.60	-	ไม่คุ้มค่าในการลงทุน
2	1,792,608	3,384,089	1.89	-	คุ้มค่าในการลงทุน
3	2,281,971	9,420,814	4.1	6.74	ไม่คุ้มค่าในการลงทุน

จากตารางข้างต้น จะเห็นว่า การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลท มิล จำกัด (มหาชน) กรณีที่ 1 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt ในการปรับปรุงนั้น เมื่อพิจารณาการคืนทุนอย่างง่ายแล้วเห็นได้ว่าไม่คุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายมากกว่า 3 ปี ในขณะที่เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt มีอายุการใช้งานเฉลี่ยแค่ 3 ปี สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลท มิล จำกัด (มหาชน) กรณีที่ 3 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ module ในการปรับปรุงนั้น เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายมากกว่า 2 ปี จึงพิจารณาอัตราผลตอบแทนการลงทุนประกอบ พบว่า อัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ 6.74 เปอร์เซ็นต์ซึ่งน้อยกว่า อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารที่ 7% แสดงว่าไม่คุ้มค่าในการลงทุน อย่างไรก็ตามการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของบ. แอล พี เอ็น เพลท มิล จำกัด (มหาชน) กรณีที่ 2 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt ในการปรับปรุงนั้นคุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายน้อยกว่า 3 ปี

## บทที่ 7

### วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

#### 7.1 สรุปผลวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะการสูญเสียความร้อนจากโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก และวิธีการลดความร้อนสูญเสียจากโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก ของโรงงานตัวอย่างโดยออกแบบการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กด้วยการนำฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มาใช้ในการลดความร้อนสูญเสียในส่วนนี้ ซึ่งในการศึกษาวิเคราะห์ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ทำการปรับปรุงฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ขนาดความหนา 50 มิลลิเมตร ติดตั้งที่ผนังชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน กรณีที่ 2 ทำการปรับปรุงโดยลดความหนาของ plastic refractory ซึ่งเป็นฉนวนชั้นในสุดลงเพื่อลดน้ำหนักวัสดุ และติดตั้งฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ติดกับ plastic refractory และกรณีที่ 3 ทำการปรับปรุงฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 มิลลิเมตร โดยกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt ในการปรับปรุง ซึ่งอายุการใช้งานเฉลี่ยของเซรามิกไฟเบอร์แบบ felt เฉลี่ยประมาณ 3 ปี ส่วนในกรณีที่ 3 ใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ Module ในการปรับปรุง โดยข้อมูลอายุการใช้งานเฉลี่ยของเซรามิกไฟเบอร์แบบ Module ประมาณ 5 ปี ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

จากการศึกษาวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง คือ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) บริษัท ที ที เอส สตีล จำกัด และ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) พบว่าการทำงานของเตาเผาเหล็กจะประกอบด้วย 2 ช่วงหลัก คือ (1) ช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมิคงที่ คือ ช่วงรีดเหล็ก และ ช่วงอุ่นเตาของ บ.กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) และ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) ช่วงรีดเหล็ก ของ บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) และ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด (2) ช่วงที่อุณหภูมิไม่คงที่ คือ ช่วงเร่งเตาของ บ.กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) บริษัท ที ที เอส สตีล จำกัด และ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน)

สำหรับช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมิคงที่ คือ ช่วงรีดเหล็กและอุ่นเตา พลังงานความร้อนรวมเข้าสู่เตาเผาเหล็ก สามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง , พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ , พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง และพลังงานความร้อนจากการก่อดัวของสเกล สำหรับพลังงานความ

ร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 8 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มอุณหภูมิเหล็ก (ซึ่งไม่มีในช่วงอุ่นเตา), พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุดคือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก อย่างไรก็ตาม พลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออก recuperator, พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับช่องเปิด, พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก, พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับสเกล, พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น(ถ้ามี), พลังงานความร้อนสูญเสียไปกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ

สำหรับช่วงที่อุณหภูมิไม่คงที่ ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงเร่งเตา สามารถแบ่งพลังงานขาเข้าได้เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของอากาศ พลังงานความร้อนจากความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง สำหรับพลังงานความร้อนขาออกสามารถแบ่งได้เป็น 8 ส่วน ประกอบด้วย พลังงานความร้อนสูญเสียส่วนที่มากที่สุดคือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก อย่างไรก็ตาม พลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจาก recuperator, พลังงานความร้อนที่สะสมในโครงสร้างเตาเผาเหล็ก เนื่องจากต้องใช้พลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิจนวนกันความร้อนของเตาเผาเหล็ก พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก, พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น(ถ้ามี), ความร้อนที่สูญเสียไปผ่านช่องเปิดลม, พลังงานความร้อนที่สูญเสียสะสมเข้าสู่เหล็ก, พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ

จากผลการวิเคราะห์พบว่า การทำงานของเตาเผาเหล็กนั้น มีความร้อนที่ต้องสูญเสียไปเป็นความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างจนวนของเตาเผาเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของจนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของจนวนเตาเผาเหล็ก ในช่วงการทำงานต่างๆของเตาเผาเหล็ก โดยปริมาณของความร้อนสูญเสีย ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการทำงาน ลักษณะโครงสร้างของจนวนเตาเผาเหล็ก และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเตาเผาเหล็ก

แนวทางในการลดความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างเตาเผาเหล็ก คือ การปรับปรุงจนวนกันความร้อนของเตาเผาเหล็กให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของเตาเผา เมื่อพิจารณาเซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) นั้นเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง, ความหนาแน่นต่ำ และมีค่าการนำความร้อนต่ำ จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นจนวนกันความร้อน เพื่อลดความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างเตาเผาเหล็ก โดยจะสามารถลดได้ทั้งความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างเตาเผาเหล็ก เนื่องจากเป็นวัสดุจนวนที่มีความหนาแน่นต่ำ และความร้อนสูญเสียผ่าน

โครงสร้างเตาเผาเหล็ก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ โดยวิธีการปรับปรุง โครงสร้าง  
 ผนังสามารถทำได้ 3 กรณี ประกอบด้วย กรณีที่ 1 ทำการปรับปรุงผนังโดยการนำเซรามิกไฟ  
 เบอร์ขนาดความหนา 50 มิลลิเมตร กรณีที่ 2 ทำการปรับปรุงผนังเฉพาะผนัง 2 ชั้นในสุดโดย  
 การลดความหนาของ plastic refractory ลงเพื่อลดน้ำหนักวัสดุ และติดตั้งผนังเซรามิกไฟเบอร์ติด  
 กับ plastic refractory กรณีที่ 3 ทำการปรับปรุงผนังโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 มิลลิเมตร  
 จากผลการวิเคราะห์พบว่า

สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างผนังของเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก  
 จำกัด (มหาชน) โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นคุ้มค่าในการลงทุนทั้ง 3 กรณี อย่างไรก็ตามโดยการ  
 ลงทุนในกรณีที่ 2 โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นใช้การปรับปรุงโดยการปรับปรุงผนังเฉพาะผนัง 2  
 ชั้นในสุดโดยการลดความหนาของ plastic refractory ลงเพื่อลดน้ำหนักวัสดุ และติดตั้งผนังเซรา  
 มิกไฟเบอร์ความหนา 100 มิลลิเมตรซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมติดกับ plastic refractory มีระยะเวลา  
 คืนทุนเร็วที่สุด ใช้เงินลงทุนในการปรับปรุงโครงสร้างผนังเท่ากับ 3,197,368 บาท โดยสามารถ  
 ลดการใช้เชื้อเพลิงไปได้ 4,551,990 บาท/ปี (คิดราคานั้นเตา C ที่ 20 บาทต่อลิตร) คิดเป็น 1.96 %  
 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด และมีเวลาคืนทุนประมาณ 1.05 ปี

สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างผนังของเตาเผาเหล็กของ บ. อุตสาหกรรม  
 เหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นคุ้มค่าในการลงทุนทั้ง 3 กรณี อย่งไรก็  
 ตามโดยการลงทุนในกรณีที่ 2 โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นใช้การปรับปรุงโดยการปรับปรุงผนัง  
 เฉพาะผนัง 2 ชั้นในสุดโดยการลดความหนาของ plastic refractory ลงเพื่อลดน้ำหนักวัสดุ และ  
 ติดตั้งผนังเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 75 มิลลิเมตรซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมติดกับ plastic  
 refractory มีระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุด ใช้เงินลงทุนในการปรับปรุงโครงสร้างผนังเท่ากับ  
 5,040,870 บาท โดยสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงไปได้ 7,470,167 บาท/ปี (คิดราคานั้นเตา C ที่ 20  
 บาทต่อลิตร) คิดเป็น 3.69% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด และมีเวลาคืนทุนประมาณ 1.04 ปี

สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างผนังของเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล  
 จำกัด โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นคุ้มค่าในการลงทุนทั้ง 3 กรณี อย่งไรก็ตามโดยการลงทุนในกรณี  
 ที่ 2 โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นใช้การปรับปรุงโดยการปรับปรุงผนังเฉพาะผนัง 2 ชั้นในสุดโดย  
 การลดความหนาของ plastic refractory ลงเพื่อลดน้ำหนักวัสดุ และติดตั้งผนังเซรามิกไฟเบอร์  
 ความหนา 75 มิลลิเมตรซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมติดกับ plastic refractory มีระยะเวลาคืนทุนเร็ว  
 ที่สุด ใช้เงินลงทุนในการปรับปรุงโครงสร้างผนังเท่ากับ 1,561,316 บาท โดยสามารถลดการใช้  
 เชื้อเพลิงไปได้ 1,353,166บาท/ปี (คิดราคานั้นเตา C ที่ 20 บาทต่อลิตร) คิดเป็น 3.09 % ของพลังงาน  
 ที่ใช้ทั้งหมด และมีเวลาคืนทุนประมาณ 1.15 ปี

สำหรับ การปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลท มิล จำกัด (มหาชน) ในกรณีที่ 1 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt ในการปรับปรุงนั้นไม่คุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายมากกว่า 3 ปี ในขณะที่เซรามิกไฟเบอร์แบบ felt มีอายุการใช้งานเฉลี่ยแค่ 3 ปี สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของบริษัท แอล พี เอ็น เพลท มิล จำกัด (มหาชน) ในกรณีที่ 3 ซึ่งใช้เซรามิกไฟเบอร์แบบ module ในการปรับปรุงนั้นไม่คุ้มค่าในการลงทุนเช่นกัน เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายมากกว่า 2 ปี จึงพิจารณาอัตราผลตอบแทนการลงทุนประกอบ พบว่า อัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ 6.74 เปอร์เซ็นต์ซึ่งน้อยกว่า อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารที่ 7% แสดงว่าไม่คุ้มค่าในการลงทุน อย่างไรก็ตาม สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลท มิล จำกัด (มหาชน) ในกรณีที่ 2 โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์นั้นใช้การปรับปรุงโดยการปรับปรุงฉนวนเฉพาะฉนวน 2 ชั้นในสุดโดยการลดความหนาของ plastic refractory ลงเพื่อลดน้ำหนักวัสดุ และติดตั้งฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ความหนา 150 มิลลิเมตรซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมติดกับ plastic refractory จะคุ้มค่าในการลงทุน โดยใช้เงินลงทุนในการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเท่ากับ 3,384,089 บาท จะสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงไปได้ 1,792,608 บาท/ปี (คิดราคานั้นเตา C ที่ 20 บาทต่อลิตร) คิดเป็น 0.84 % ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด และมีเวลาคืนทุนประมาณ 1.89 ปี

จากผลการศึกษาการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กโดยการใช้เซรามิกไฟเบอร์ของโรงงานตัวอย่าง 4 โรงงานที่มีลักษณะการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง มีช่วงเวลากำหนดการทำงานและขนาดกำลังการผลิตที่แตกต่างกันในทั้ง 3 กรณี พบว่า

กรณี 1 คือ การติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ขนาดความหนา 50 มิลลิเมตรติดกับผนังชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบัน สามารถลดความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างฉนวนลงได้ โดยผลการประหยัดจากการลดลงของความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนจะมากกว่า การประหยัดจากการลดลงของความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน ทั้งนี้เพราะความหนาของโครงสร้างฉนวนเพิ่มขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างฉนวนได้น้อยลง ซึ่งสามารถลดได้ 15-20 เปอร์เซ็นต์ของความสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนปัจจุบัน ในขณะที่การลดลงของความร้อนสูญเสียสะสมที่โครงสร้างฉนวนในกรณีนี้เป็นผลมาจากในการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิการกระจายตัวในฉนวนแต่ละชั้นแคบลง ทำให้ช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิมีน้อยลง อีกทั้งเซรามิกไฟเบอร์เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้เมื่อติดตั้งเพิ่มเข้ากับผนังชั้นในสุดมวลของเตาเผาจึงเพิ่มขึ้นไม่มาก ด้วยเหตุเหล่านี้ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนจึงลดลง ซึ่งสามารถลดลงได้ 5-15 เปอร์เซ็นต์ของความสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนปัจจุบัน โดยผลการประหยัดรวมทั้งได้คิดเป็น 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ลักษณะ โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก ช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผา และ ลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก

กรณี 2 คือ การติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ขนาดความหนาที่เหมาะสมที่ได้มาจาก ความสัมพันธ์ของค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงส่วนความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนกับค่าการลงทุนปรับปรุงฉนวน คิดตั้งร่วมกับการปรับปรุงลดความหนาของฉนวนทนความร้อนชั้นในสุดของฉนวนปัจจุบันเพื่อลดมวลของผนังลง สามารถลดความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลงได้ โดยสามารถลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนได้ 35-55 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนปัจจุบัน และลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนได้ 15-35 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนปัจจุบัน โดยผลการประหยัดรวมที่ได้คิดเป็น 1-4 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ลักษณะ โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก ช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผา และลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก

กรณี 3 คือ การติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ขนาดความหนา 300 มิลลิเมตร ติดกับผนังเตาเผาเหล็ก สามารถลดความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลงได้ โดยสามารถลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนได้ 70-80 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนปัจจุบัน และลดความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนได้ 30-50 เปอร์เซ็นต์ของความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนปัจจุบัน โดยผลการประหยัดรวมที่ได้คิดเป็น 1-6 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ลักษณะ โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก ช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผา และลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก

จากผลการศึกษาการออกแบบปรับปรุง โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กโดยการใช้เซรามิกไฟเบอร์ของโรงงานตัวอย่างทั้ง 4 โรงงานที่มีลักษณะการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง มีลักษณะการทำงานและขนาดกำลังการผลิตที่แตกต่างกันนั้น พบว่า โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กที่มีความหนาแน่นมาก ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุฉนวนมีค่ามาก และความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วงที่มีการทำงานไม่ต่อเนื่องกับเป็นช่วงที่มีการทำงานต่อเนื่องของเตาเผาเหล็กมีค่ามาก จะทำให้ความร้อนสูญเสียสะสมใน โครงสร้างฉนวนมีค่ามากกว่ากรณีของโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กที่มีความหนาแน่น มีความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุฉนวน และ มีความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วงที่มีการทำงานไม่ต่อเนื่องกับเป็นช่วงที่มีการทำงานต่อเนื่องของเตาเผาเหล็กที่มีค่าน้อยกว่า ส่วนความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก ขึ้นอยู่กับความหนาของโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กและ ค่าการนำความร้อนของวัสดุฉนวน โดยที่ถ้าความหนาของโครงสร้างฉนวนมาก ความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างจะน้อย และถ้าค่าการนำความร้อนสูง ค่าความร้อนสูญเสียผ่าน โครงสร้างฉนวนก็จะมีค่าสูง ส่วนเมื่อพิจารณาเรื่องขนาดกำลังการผลิตที่



แตกต่างกันของเตาเผาเหล็กที่มีลักษณะการทำงานใกล้เคียงกัน พบว่า ขนาดกำลังการผลิตไม่ได้มีผลต่ออัตราความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก แต่มีผลต่อค่าใช้จ่ายที่ใช้ในกระบวนการผลิตเหล็ก

## 7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต

1. เนื่องจากการตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศและไอเสียทำได้ยาก การศึกษาครั้งนี้จึงทำการคำนวณอัตราการไหลต่างๆ จากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการเผาไหม้
2. ควรมีการทดลองติดตั้งฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ในเตาเผาเหล็ก เพื่อพิจารณาผลการใช้งานที่ได้จากการใช้งานฉนวนเซรามิกไฟเบอร์กับเตาเผาเหล็กจริง
3. ควรมีการศึกษาเรื่องการกัดกร่อนหรืออายุการใช้งานของเซรามิกไฟเบอร์ ว่ามีผลมาจากตัวแปรใดบ้าง เพื่อให้การพิจารณาวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์มีความแม่นยำ
4. งานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษาเตาเผาเหล็กแบบ Pusher type และ Walking beam โดยใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งงานวิจัยในอนาคตสามารถทำการศึกษาเตาเผาแบบอื่น นอกจากนี้สามารถศึกษาเตาเผาเหล็กที่มีการใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ อย่างเช่น การใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น
5. ควรมีการศึกษาถึงวิธีการติดตั้งที่เหมาะสมของฉนวนเซรามิกไฟเบอร์กับการใช้งานในลักษณะต่างๆ เนื่องการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์สามารถทำได้หลากหลายวิธี เพื่อให้การศึกษวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. โครงการการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่างๆ (SEC). กระทรวงพลังงาน, 2542-2547.
- [2] วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ. คู่มือประหยัดพลังงาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ภาพพิมพ์, 2525.
- [3] Bhattacharya, A.K., Ahuja and Dasgupta. Application of Ceramic Fibre in Steel Plant Furnaces for Energy Conservation. South East Asia Iron & Steel Institute 1 (Jan 1996) : 67-74.
- [4] David Hamling. Using Ceramic Fiber Materials in Corrosive Environments. The American Society Bullet 9 (Sep 1997) : 79-82.
- [5] Molloy and T.J. Delopments in The Use of Ceramic Fibre to Achieve Energy Reduction in Steel Reheating Furnace. South East Asia Iron & Steel Institute 3 (July 1985) : 14-26.
- [6] Ou, J. J., Ho and T.Y. Benefits of Veneering Ceramic Fibre in Reheating Furnace. South East Asia Iron & Steel Institute 7 (1984) : 1-16.
- [7] Routschka, Gerald and Majdic. Energy Saving Application of Ceramic Fibres in Reheating and Heat-Treating Furnaces. Metall Plant Technol 7 (1984) : 72-79.
- [8] Jerry Tonth.,Nigara Fall. and N.Y. Monolithic Monolithic Insulation System OffersFast Easy Repair and Energy Savings[Online]. Unifrax Corp, 2003. Available from: [www.unifrax.com](http://www.unifrax.com) [2008, November]
- [9] Brian Bradley. Foamfrax Provides Fast, Effective Furnace LiningMaintenance Solution for Nucor Hickman[Online]. Apenton Publication, 2002. Available from: [www.33metalproducing.com](http://www.33metalproducing.com) [2008, Semptember]
- [10] Niagara Falls. Case study Insulatio Story #3 Foamfrax insulation.[Online]. Unifrax Corp. 2003. Available from: [www.unifrax.com](http://www.unifrax.com) [2008, Semptember]
- [11] Bureau of Energy Efficiency. Furnaces. India : Ministry of Power, 2005.
- [12] Eiji Horie. Ceramic Fibre Insulation Theory and Practice. Japan : The Eibun Press, 1997.
- [13] W. Trinks. Industrial Furnaces. Sixth Edition. United States of America : John Wiley and Sons, 2004.
- [14] Frank P.Incropera and David P. Dewitt. Introduction to Heat Transfer. Third Edition. New York : John Wiley and Sons, 1996.

- [15] Unifrax Company. Application Ceramic Fiber[Online]. 2006. Available from:  
<http://www.UnifraxHome2.nsf/AllDocuments/27FB3C12D0C52F4C85256EE60044CD>  
[D4?OpenDocument](#) [2008, December]
16. Carbon Trust. Good Practice Guide 76-Continuous Steel Reheating Furnaces. UK : Efficiency Office, 1993.
17. Yunus A. Cengel and Michael A. Boles. Thermodynamics An Engineer Approach. Fifth Edition. Singapore : McGraw-Hill, 2006.
18. W.M. Kays and M.E. Crawford. Convective Heat and Mass Transfer. Third Edition. Singapore : McGraw-Hill, 1993.
19. Yunus A. Cengel and Michael A. Boles. Thermodynamics An Engineer Approach. Fifth edition. Singapore : McGraw-Hill, 2006.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ข้อมูลเบื้องต้นและลักษณะการทำงานของเตาเผา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ก.1 ข้อมูลเบื้องต้นและลักษณะการทำงานของเตาเผา

### 1. เตาเผาเหล็กของบริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

#### 1.1 ข้อมูลทั่วไปของเตาเผาเหล็ก

##### ข้อมูลเบื้องต้นเตาเผา

- เตาเผาเหล็กยี่ห้อ Danieli ประเทศอิตาลี
- ขนาดเตา 50 ตัน/ชั่วโมง ชนิด pusher
- ใช้น้ำมันเตา C อัตราการใช้ น้ำมัน 34 ลิตร/ตันเหล็ก
- เตา มี 2 โซน โดยแบ่งเป็น preheating zone และ heating zone
- อุณหภูมิในเตา 900-1,200 °C
- วัตถุดิบ : เหล็กแท่ง (billet)
- ผลิตภัณฑ์ : เหล็กกลม, เหล็กข้ออ้อย

##### ลักษณะการทำงานของเตาเหล็ก

- โรงงานใช้ไฟฟ้าแบบ TOD

วันจันทร์-อาทิตย์ 21.30 -18.30 น. ผลิต

18.30 -21.30 น. ไม่ผลิต

##### ข้อมูลอิฐทนไฟ

- เตาเผาเหล็กอายุ 14 ปี
- มีการปรับปรุงอิฐทนไฟบางส่วน
- อิฐทนไฟเป็นของในประเทศ
- ผนังเตาไม่มีน้ำหล่อเย็น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. เตาเผาเหล็กของบริษัท อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

### 2.1 ข้อมูลทั่วไปของเตาเผาเหล็กและข้อมูลโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผาเหล็ก :

- เตาฮีท้อ STEIN HEUEY ประเทศฝรั่งเศส
- ขนาด 120 ตัน/ชั่วโมง
- ใช้น้ำมันเตา C อัตราการใช้ น้ำมัน 40 ลิตร/ตันเหล็ก
- เตาเผาเหล็กเป็นชนิด walking beam
- เตาเผาเหล็กมี 2 โซน โดยแบ่งเป็น heating zone และ soaking zone
- อุณหภูมิในเตาเผาเหล็ก 900 -1,200 °C
- วัตถุดิบ : เหล็กแท่ง ( billet )
- การทำงานของเตาเผาเหล็ก
  - : วันจันทร์-ศุกร์ 22:00-09:00 น. ผลิต
  - 09:00-22:00 น. ไม่ผลิต
  - : วันเสาร์- อาทิตย์และวันนักขัตฤกษ์ ผลิต 24 ชั่วโมง
- ผลิตภัณฑ์ : เหล็กกลวด ลวดที่นอน ซึ่งลวดมอเตอร์ไซค์
- ลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก
- โรงงานใช้ไฟฟ้าแบบ TOU
- ช่วงหยุดผลิตช่วง partial peak เตาควบคุมอุณหภูมิในเตาที่ 700 °C

ข้อมูลอิฐทนไฟ

- เตาเผาเหล็กหยุด ปีละ 2 ครั้ง เพื่อซ่อม walking beam ไม่ค่อยได้ซ่อมผนังเตาเผาอิฐที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของต่างประเทศ
- เตาเผาเหล็กหยุด ปีละ 2 ครั้ง เพื่อซ่อม walking beam ไม่ค่อยได้ซ่อมผนังเตาเผา
- อิฐที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของต่างประเทศ

### 3. บริษัท ที.ที.เอส. สตีล จำกัด

ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา :

- เตาฮีท้อ YIU HWA ของประเทศไต้หวัน
- ขนาด 28 ตัน/ชั่วโมง
- ใช้น้ำมันเตาซี อัตราการใช้ น้ำมัน 40 ลิตร/ตันเหล็ก
- เตาเป็นชนิด pusher
- เตามี 2 โซน โดยแบ่งเป็น heating zone และ soaking zone
- อุณหภูมิในเตา 900 -1,220 °C
- วัตถุดิบ : billet
- การทำงานของเตา  
: ทำงาน 6 วัน จาก 07.00 – 18.00 น. หยุดวันจันทร์  
เริ่มอุ่นเตา 05.00 – 06.00 น.
- ผลิตภัณฑ์ : เหล็กเส้น เหล็กข้ออ้อย

ลักษณะการทำงานของเตา

- โรงงานใช้ไฟฟ้าแบบ TOU

ข้อมูลอิฐทนไฟ

- เตามีเอกสารของโครงสร้างครบ
- อิฐที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของต่างประเทศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4. บริษัท แอล พี เอ็น เฟลทมิล จำกัด(มหาชน)

ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา :

- เตาฮีท้อ Salem ของประเทศสหรัฐอเมริกา
- ขนาด 100 ตัน/ชั่วโมง
- ใช้น้ำมันเตาซี อัตราการใช้ น้ำมัน 60 ลิตร/ตันเหล็ก
- เตาเป็นชนิด walking beam
- เตามี 3 โซน โดยแบ่งเป็น preheating zone , heating zone และ soaking zone
- อุณหภูมิในเตา 900 -1,250 °C
- วัตถุดิบ : เหล็กแผ่น
- การทำงานของเตา : ทำงานทุกวัน 24 hr ทำงานต่อเนื่อง จากประสบการณ์มีช่วงอุ่นเตา (down time) ประมาณ 10%
- ผลิตภัณฑ์ : เหล็กแผ่น

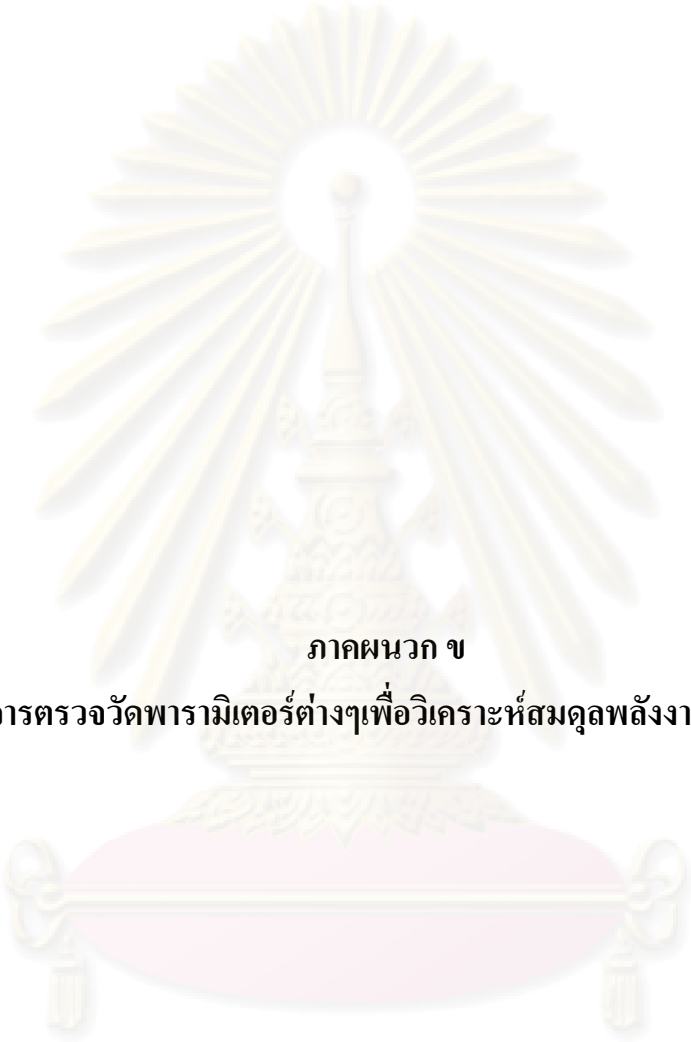
ลักษณะการทำงานของเตา

- โรงงานใช้ไฟฟ้าแบบ TOU
- ทำงาน 24 ชม หยุดมีเฉพาะช่วงอุ่นเตา(down time) ประมาณ 10%

ข้อมูลอิฐทนไฟ

- เตามีเอกสารของโครงสร้างครบให้ข้อมูลมาแล้ว
- ผนังเตามีน้ำหล่อเย็น
- อิฐที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของต่างประเทศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข  
ข้อมูลการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อวิเคราะห์สมมูลพลังงานเตาเผาเหล็ก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข.1 ข้อมูลการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานเต

### 1. บริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

ข้อมูลการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานในสภาวะการทำงาน 3 แบบ ประกอบด้วย

#### 1.1 สภาวะการทำงาน : ช่วงอุ่นเตเผา

ลักษณะการให้ความร้อน : ใช้หัวเผาเฉพาะที่ท้ายเตที่ heating zone

##### 1.1.1 ข้อมูลการผลิตและสเกล

- ไม่มีการนำเหล็กเข้าและออกจากเตา เพียงแต่ควบคุมอุณหภูมิให้สูงกว่า 800 °C
- สเกล ใช้ค่าเฉลี่ยทั้งปี ประมาณ 2.1-2.2%

##### 1.1.2 ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C มีอุณหภูมิก่อนเข้า burner 80°C
- อัตราการใช้เชื้อเพลิง

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)
19:40	20:00	20	58.8	176
20:00	20:20	20	76.4	229
20:20	20:40	20	47.0	141
20:40	21:00	20	104.2	312
			เฉลี่ย	215

##### 1.1.3 ข้อมูลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 33 °C
- ความเร็วของอากาศที่ดูดเข้า blower 21.6-23.5 m/s (วัดโดยใช้ anemometer แบบใบพัด)
- ขนาดของ inlet ของ blower 638 mm. (Dia.)

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลอุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพมหานคร  
จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
19:40	110.3
20:00	110.1
20:20	108.4
20:40	107.0
21:00	108.5

#### 1.1.4 ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	
	Pre-heating Zone	Heating Zone
19:40	843	1,037
20:00	843	1,037
20:20	839	1,036
20:40	837	1,034
21:00	870	1,091

- ความดันของเตาอ่านได้จากเตาตัวที่ 2 ได้ 0.4 mm.ปรอท

#### 1.1.5 ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ข.4 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
19:40	594.5
20:00	591.5
20:20	588.1

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
20:40	585.4
21:00	590.5

ตารางที่ ข.5 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากrecuperator และค่าอื่นๆ จาก flue gas analyzer ช่วงอุ่นเตา บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	%O <sub>2</sub>	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	หมายเหตุ
19:40	194.0	19.25	11	1.29	-
20:00	195.0	-	-	-	-
20:20	204.5	19.27	17	1.28	-
20:40	211.0	-	-	-	-
21:00	201.0	19.45	12	1.14	-

#### 1.1.6 ข้อมูลช่องเปิด

- ขนาดช่องเปิดขาเข้า (สี่เหลี่ยม) ขนาด 500 x 7,000 mm.( สูงxกว้าง)
- ขนาดช่องเปิดขาออก (สี่เหลี่ยม) ขนาด 500 x 500 mm. ( สูงxกว้าง)

### 1.2 สถานะการทำงาน : ช่วงเร่งเตา

ลักษณะการให้ความร้อน : ให้ความร้อนโดยใช้หัวเผาทั้งที่ heating zone และ soaking zone

#### 1.2.1 ข้อมูลการผลิตและสเกล

- ไม่มีการนำเหล็กเข้าและออกจากเตา เป็นช่วงเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการในการรีดเหล็ก

#### 1.2.2 ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C มีอุณหภูมิก่อนเข้า burner 80 °C

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)
21:00	20:15	15	484.25	1,937
20:15	20:30	15	490.5	1,962
			เฉลี่ย	1,937

### 1.2.3 ข้อมูลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 32 °C

ตารางที่ ข.7 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
21:00	105.2
21:15	103.8
21:30	104.1

### 1.2.4 ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

ตารางที่ ข.8 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	
	Pre-heating Zone	Heating Zone
21:00	870	1,091
21:15	903	1,118
21:30	920	1,131

- ความดันของเตาอ่านได้จากเตาตัวที่ 2 ได้ 0.4 mm.ปรอท

### 1.2.5 ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ข.9 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผา ก่อนเข้า recuperator ช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
21:00	587.8
21:15	595.0
21:30	598.4

ตารางที่ ข.10 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator และค่าอื่นๆจาก flue gas analyzer ช่วงเร่งเตา บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน)

ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	%O <sub>2</sub>	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	หมายเหตุ
21:00	207.5	18.13	6	2.12	-
20:15	205.0	-	-	-	-
20:30	204.0	18.14	1	2.11	-

### 1.2.6 ข้อมูลช่องเปิด

- ขนาดช่องเปิดขาเข้า (สี่เหลี่ยม) ขนาด 500 x 7,000 mm. ( สูงxกว้าง)
- ขนาดช่องเปิดขาออก (สี่เหลี่ยม) ขนาด 500 x 500 mm. ( สูงxกว้าง)

### 1.3 สถานะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

ลักษณะการให้ความร้อน : ให้ความร้อนโดยใช้หัวเผาทั้งที่ pre-heating zone และ heating zone

#### 1.3.1 ข้อมูลการผลิตและสเกล

- billet ขนาด 130 x 130 mm. ยาว 6.68 m.

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลอัตราการผลิตเหล็กช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลา เริ่มต้น	เวลา สุดท้าย	เวลา (นาที)	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา (แท่ง)			การผลิต (ตัน/ ชม.)
			แท่ง	กก./แท่ง	กก.	
10:15	11:15	60	56	868	48,608	48.61
11:15	12:15	60	70	868	60,760	60.76
12:15	13:15	60	53	868	46,004	46.00
13:15	14:15	60	54	868	46,872	46.87
เฉลี่ย						50.56

- สเกล ใช้ค่าเฉลี่ยทั้งปี ประมาณ 2.1-2.2%

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลอุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
10:15	1,130
11:15	1,030
12:15	1,080
13:15	1,050
14:15	1,060

### 1.3.2 ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C มีอุณหภูมิก่อนเข้า burner 80 °C

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้ (ลิตร/ชม.)
10:15	11:15	60	1,411.2	1,411
11:15	12:15	60	1,528.8	1,529
12:15	13:15	60	1,495.2	1,495
13:15	14:15	60	1,537.2	1,537
			เฉลี่ย	1,493

### 1.3.3 ข้อมูลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 35 °C
- ความเร็วของอากาศที่ดูดเข้า blower 33.2 - 34.1 m/s (วัดโดยใช้ anemometer แบบใบพัด)
- ขนาดของ inlet ของ blower 638 mm. (Dia.)

ตารางที่ ข.14 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
10:15	173.1
11:15	173.7



เวลา	อุณหภูมิ (°C)
12:15	159.2
13:15	159.2
14:15	162.1

#### 1.3.4 ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

ตารางที่ ข.15 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	
	Pre-heating Zone	Heating Zone
10:15	1,176	1,261
11:15	1,158	1,249
12:15	1,146	1,223
13:15	1,155	1,228
14:15	1,137	1,244

- ความดันของเตาอ่านได้จากเตาตัวที่ 2 ได้ 0.4 - 0.8 mm.ปรอท

#### 1.3.5 ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ข.16 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผา ก่อนเข้า recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
10:15	747.0
11:15	745.1
12:15	748.7
13:15	752.6
14:15	762.8

ตารางที่ ข.17 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator และ ค่าอื่นๆจาก flue gas analyzer ช่วงรีดเหล็ก  
 บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน)

ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	%O <sub>2</sub>	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	หมายเหตุ
10:15	390.0	9.74	3	8.31	-
11:15	385.7	9.59	23	8.42	-
12:15	381.5	9.44	3	8.53	-
13:15	352.4	11.3	2	7.16	-
14:15	349.3	10.23	2	7.95	-

### 1.3.6 ข้อมูลช่องเปิด

- ขนาดช่องเปิดขาเข้า (สี่เหลี่ยม) ขนาด 500 x 7,000 mm.( สูงxกว้าง)
- ขนาดช่องเปิดขาออก (สี่เหลี่ยมด้าน) ขนาด 500 x 500 mm. ( สูงxกว้าง)

## 2. บริษัท อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

### 2.1 สถานะการทำงาน : ช่วงเร่งเตา

- ลักษณะการให้ความร้อน : ใช้หัวเผาเฉพาะที่ท้ายเตาที่ soaking zone

#### 2.1.1 ข้อมูลการผลิตและสเกล

ไม่มีการนำเหล็กเข้าและออกจากเตา เพียงแต่ควบคุมอุณหภูมิให้สูงกว่า 800 oC

#### 2.1.2 ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C มีอุณหภูมิก่อนเข้า burner 80°C

ตารางที่ ข.18 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)
14:30	15:00	30	334.5	669
15:00	15:30	30	268.8	538
15:30	16:00	30	242.7	485
16:00	16:30	30	256.0	512
16:30	19:00	30	279.8	560
19:00	19:30	30	294.4	589
			เฉลี่ย	559

### 2.1.3 ข้อมูลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 35°C

ตารางที่ ข.19 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
14:30	265
15:00	276
15:30	265
16:00	281.0
16:30	251
19:00	274

### 2.1.4 ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

ตารางที่ ข.20 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)											
	Heating Zone				Soaking Zone							
	Zone1		Zone2		Zone3		Zone4		Zone5		Zone6	
14:30	627	656	679	689	777	758	744	744	858	878	881	844
15:30	663	680	735	748	950	971	969	935	872	847	812	813
16:30	686	706	729	752	885	898	911	892	896	857	855	855
19:30	718	727	765	746	926	925	928	905	943	892	872	873

- ความดันของเตาอ่านได้จากเตาได้ 0 ถึง 2 Pa

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.1.5 ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ข.21 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
14:30	405
15:00	422
15:30	412
16:00	424
16:30	433
19:00	448

ตารางที่ ข.22 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator โดยข้อมูลจากโรงงานช่วงเร่งเตา บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

ครั้งที่	อุณหภูมิ(°C)	%O <sub>2</sub>	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	หมายเหตุ
14:30	117.0	8.58	-	-	-
15:00	112.0	8.58	-	-	-
15:30	111.0	8.62	-	-	-
16:00	114.0	13.33	-	-	-
16:30	113.0	12.79	-	-	-
19:00	111.0	12.71	-	-	-

## 2.2 สถานะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

ลักษณะการให้ความร้อน : ให้ความร้อนโดยใช้หัวเผาทั้งที่ heating zone และ soaking zone

### 2.2.1 ข้อมูลการผลิตและสเกล

- billet ขนาด 130 x 130 mm. ยาว 12 m.

ตารางที่ ข.23 ข้อมูลอัตราผลิตเหล็กช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลา เริ่มต้น	เวลา สุดท้าย	เวลา (นาที)	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา (แท่ง)			การผลิต (ตัน/ชม.)
			แท่ง	กก./แท่ง	กก.	
22:30	23:00	30	12	1,500	18,000	36.00
23:00	23:30	30	16	1,500	24,000	48.00
23:30	0:00	30	15	1,500	22,500	45.00
0:00	0:30	30	22	1,500	33,000	66.00
0:30	1:00	30	14	1,500	21,000	42.00
1:00	1:30	30	16	1,500	24,000	48.00
					เฉลี่ย	47.50

- สเกล ใช้ค่าเฉลี่ยทั้งปี ประมาณ 1.00%

ตารางที่ ข.24 อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
22:30	1,100
23:00	1,004
23:30	1,044
0:00	1,066
0:30	1,007
1:00	1,003

### 2.2.2 ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C มีอุณหภูมิก่อนเข้า burner 90 °C

ตารางที่ ข.25 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้ (ลิตร/ชม.)
22:30	23:00	30	610	1,221
23:00	23:30	30	609	1,218

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้ (ลิตร/ชม.)
23:30	0:00	30	859	1,718
0:00	0:30	30	1,070	2,139
0:30	1:00	30	758	1,517
1:00	1:30	30	822	1,643
			เฉลี่ย	1,574

### 2.2.3 ข้อมูลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 33°C

ตารางที่ ข.26 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
22:30	305
23:00	302
23:30	307
0:00	308
0:30	312
1:00	304

### 2.2.4 ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

ตารางที่ ข.27 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)											
	Heating Zone				Soaking zone Zone							
	Zone1		Zone2		Zone3		Zone4		Zone5		Zone6	
22:30	932	977	941	959	1,070	1,076	1,090	1,082	1,076	1,057	1,044	1,044
23:00	959	975	953	973	1,071	1,075	1,096	1,088	1,061	1,076	1,086	1,044
23:30	971	980	986	986	1,080	1,068	1,105	1,107	1,066	1,078	1,081	1,050
0:00	971	986	986	987	1,081	1,077	1,106	1,105	1,068	1,079	1,093	1,056

- ความดันของเตาอ่านได้จากเตาได้ -1 ถึง 2 Pa

### 2.2.5 ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ข.28 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้า recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
22:30	552.0
23:00	556.0
23:30	563.0
0:00	565.0
0:30	566.0
1:00	565.0

ตารางที่ ข.29 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator โดยข้อมูลจากโรงงานช่วงรีดเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

ครั้งที่	อุณหภูมิ(°C)	%O <sub>2</sub>	CO (%)	CO <sub>2</sub> (%)	หมายเหตุ
22:30	180.0	8.43	-	-	-
23:00	181.0	5.32	-	-	-
23:30	178.0	4.51	-	-	-
0:00	177.7	5.63	-	-	-
0:30	178.0	5.82	-	-	-
1:00	169.0	5.42	-	-	-
1:30	180.0	4.73	-	-	-

### 2.2.6 ข้อมูลช่องเปิด

- ขนาดช่องเปิดขาเข้า (สี่เหลี่ยม) ขนาด 350 x 350 mm.( สูงxกว้าง)
- ขนาดช่องเปิดขาออก (สี่เหลี่ยม) ขนาด 300 x 400 mm. ( สูงxกว้าง)

### 3. บริษัท ที ที เอส จำกัด

3.1 สถานะการทำงาน : ช่วงเร่งเตา

ลักษณะการให้ความร้อน : ใช้หัวเผาทุกหัว

3.1.1 ข้อมูลการผลิตและสเกล

- ไม่มีการนำเหล็กเข้าและออกจากเตา

3.1.2 ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C มีอุณหภูมิก่อนเข้า burner 90 °C

ตารางที่ ข.30 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ลิตร/ครั้ง)
5:00	5:15	15	76.7	-
5:15	5:30	15	79.1	-
5:30	5:45	15	70.6	-
5:45	6:00	15	84.3	-
6:00	6:15	15	262.9	-
6:15	6:30	15	236.2	-
		รวม		809.8

3.1.3 ข้อมูลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 28.4 °C

ตารางที่ ข.31 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
5:00	246
5:15	275
5:30	269
5:45	267
6:00	248
6:15	229
6:30	235
เฉลี่ย	253



### 3.1.4 ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

ตารางที่ ข.32 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	
	heating zone	soaking zone
5:00	587	752
5:15	666	1,048
5:30	681	1,107
5:45	689	1,145
6:00	1,009	1,161
6:15	1,087	1,196
6:30	1,138	1,235
เฉลี่ย	837	1,092

### 3.1.5 ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ข.33 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผา ก่อนเข้า recuperator ช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
5:00	428
5:15	433
5:30	445
5:45	560
6:00	570
6:15	580
6:30	600
เฉลี่ย	517

ตารางที่ ข.34 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator และค่าอื่นๆจาก flue gas analyzer ช่วงเร่งเตา บ. ที ที เอส จำกัด

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	%O <sub>2</sub>	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	หมายเหตุ
5:00	228	8.4	39	9.5	-
5:15	233	7.1	21	10.5	-
5:30	237	9.6	30	8.6	-
5:45	196	12.5	27	6.4	-
6:00	192	12.5	35	6.4	-
6:15	190	3.5	40	13.2	-
6:30	204	4.6	33	12.4	-

### 3.1.6 ข้อมูลช่องเปิด

- ขนาดช่องเปิดขาเข้า (สี่เหลี่ยม) ความกว้าง 0.294 เมตร ความยาว 3.60 เมตร
- ขนาดช่องเปิดขาออก (สี่เหลี่ยม) ความกว้าง 0.6 เมตร ความยาว 0.6 เมตร

### 3.2 สถานะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

ลักษณะการให้ความร้อน : ใช้หัวเผาทุกโซน

#### 3.2.1 ข้อมูลการผลิตและสเกล3

- billet ขนาดกว้าง x ยาว x สูง 120 mm x 120 mm x 3 m

ตารางที่ ข.35 อัตราการผลิตเหล็กช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา (แท่ง)			การผลิต (ตัน/ชม.)
			แท่ง	กก./แท่ง	แท่ง	
7:30	8:00	30	35	333	11,655	23.3
8:00	8:30	30	24	333	7,992	16.0
8:30	9:00	30	54	333	17,982	36.0
9:00	9:30	30	43	333	14,319	28.6
9:30	10:00	30	45	333	14,985	30.0
10:00	10:30	30	46	333	15,318	30.6
10:30	11:00	30	48	333	15,984	32.0
11:00	11:30	30	44	333	14,652	29.3
					เฉลี่ย	28.2

- สเกล ใช้ค่าเฉลี่ยทั้งปี ประมาณ 1.5-2.0%

### 3.2.2 ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C มีอุณหภูมิก่อนเข้า burner 90 °C

ตารางที่ ข.36 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาท)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)
7:30	8:00	30	265.8	532
8:00	8:30	30	305.2	610
8:30	9:00	30	388.9	778
9:00	9:30	30	395.1	790
9:30	10:00	30	492.0	984
10:00	10:30	30	444.0	888
10:30	11:00	30	529.3	1,059
11:00	11:30	30	416.1	832
			เฉลี่ย	809

### 3.2.3. ข้อมูลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 30.1 °C

ตารางที่ ข.37 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
7:30	320
8:00	315
8:30	322
9:00	333
9:30	337
10:00	344
10:30	349
11:00	354
11:30	357
เฉลี่ย	337

### 3.2.4 ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

ตารางที่ ข.38 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	
	heating zone	soaking zone
7:30	1,182	1,194
8:00	1,187	1,195
8:30	1,127	1,182
9:00	1,176	1,179
9:30	1,174	1,182
10:00	1,165	1,189
10:30	1,179	1,188
11:00	1,183	1,192
11:30	1,183	1,193
เฉลี่ย	1,173	1,188

### 3.2.5 ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ข.39 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผา ก่อนเข้า recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
7:30	737
8:00	745
8:30	746
9:00	740
9:30	750
10:00	745
10:30	755
11:00	760
11:30	760
เฉลี่ย	765

ตารางที่ ข.40 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากrecuperator และค่าอื่นๆจาก flue gas analyze ช่วงรีดเหล็ก บ. ที ที เอส จำกัด

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	%O <sub>2</sub>	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)
7:30	290.3	5.6	59	11.6
8:00	310.5	4.7	75	12.3
8:30	300.8	4.8	73	12.2
9:00	315.2	5.3	71	11.8
9:30	372.5	3.1	89	13.5
10:00	367.6	4.4	75	12.5
10:30	333.9	5	67	12
11:00	383.5	5.9	92	11.4
11:30	326.5	5.2	75	11.9

### 3.2.6 ข้อมูลช่องเปิด

- ขนาดช่องเปิดขาเข้า (สี่เหลี่ยม) ความกว้าง 0.294 เมตร ความยาว 3.6 เมตร
- ขนาดช่องเปิดขาออก (สี่เหลี่ยม) ความกว้าง 0.6 เมตร ความยาว 0.6 เมตร

## 4. บริษัท แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

### 4.1 สถานะการทำงาน : ช่วงอุ่นเตา

ลักษณะการให้ความร้อน : ใช้หัวเผา zone 2, 3, 4, 6, 7 และ 8

#### 3.1.1 ข้อมูลการผลิตและสเกล

- ไม่มีการนำเหล็กเข้าและออกจากเตา

#### 3.1.2 ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C มีอุณหภูมิก่อนเข้า burner 100 °C

ตารางที่ ข.41 ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงอุ่น บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)
13:00	13:30	30	543.0	1,086
13:30	14:00	30	506.0	1,012
14:00	14:30	30	555.0	1,110
14:30	15:00	30	722.0	1,444

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)
15:00	15:30	30	709.0	1,418
15:30	16:00	30	611.0	1,222
16:00	16:30	30	1,348.0	2,696
16:30	17:00	30	742.0	1,484
17:00	17:30	30	543.0	1,434
			เฉลี่ย	1,086

### 3.1.3 ข้อมูลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 32.5 °C

ตารางที่ ข.42 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
13:00	430
13:30	426
14:00	424
14:30	422
15:00	421
15:30	421
16:00	420
16:30	420
17:00	421
เฉลี่ย	423

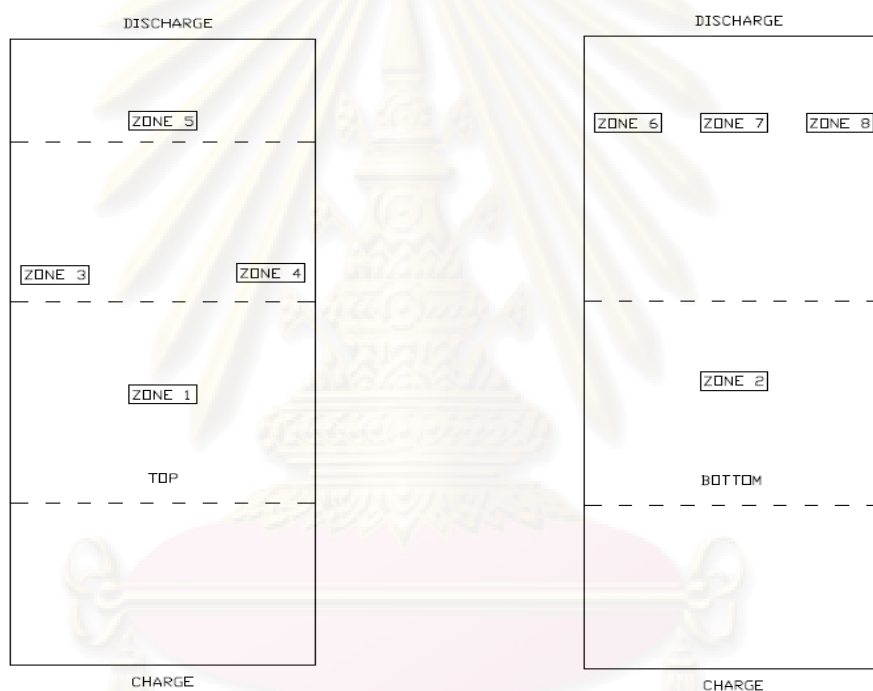
### 3.1.4 ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

ตารางที่ ข.43 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)							
	โซน 1*	โซน 2*	โซน 3*	โซน 4*	โซน 5*	โซน 6*	โซน 7*	โซน 8*
13:00	1,094	1,183	1,249	1,234	1,162	1,213	1,191	1,208
13:30	1,071	1,156	1,237	1,220	1,153	1,207	1,201	1,194

14:00	1,059	1,137	1,233	1,220	1,151	1,211	1,200	1,207
14:30	1,052	1,122	1,227	1,212	1,145	1,206	1,199	1,201
15:00	1,046	1,113	1,223	1,206	1,143	1,204	1,199	1,204
15:30	1,043	1,107	1,220	1,201	1,141	1,200	1,199	1,199
16:00	1,039	1,103	1,219	1,199	1,139	1,197	1,198	1,200
16:30	1,038	1,101	1,216	1,199	1,137	1,198	1,200	1,199
17:00	1,034	1,099	1,216	1,198	1,136	1,204	1,199	1,195
เฉลี่ย	1,053	1,125	1,227	1,210	1,145	1,204	1,198	1,201

หมายเหตุ \* แสดงตำแหน่งโซนต่างๆ ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ไคอะแกรมแสดงตำแหน่งการแบ่งโซนการตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก บ. แอล  
พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ ข.44 ความดันของเตาช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

เวลา	mm W.C.
13:00	0.23
13:30	0.71
14:00	0.63
14:30	0.67

เวลา	mm W.C.
15:00	0.65
15:30	0.77
16:00	0.67
16:30	0.79
17:00	0.69
เฉลี่ย	0.65

หมายเหตุ W.C. = Water Column

### 3.1.5 ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ข.45 อุณหภูมิไอเสียและคุณสมบัติของไอเสียที่ออกจากเตาเผาช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	%O <sub>2</sub>	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)
13:00	955	12.1	13.0	6.7
13:30	934	12.0	15.0	6.8
14:00	929	11.6	13.0	7.1
14:30	930	11.8	17.0	6.9
15:00	930	11.5	19.0	7.1
15:30	931	11.5	22.0	7.1
16:00	932	11.7	24.0	7.0
16:30	933	11.7	24.0	7.0
17:00	934	11.7	19.0	7.0

ตารางที่ ข.46 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากเตาเผาและผสมอากาศเย็นก่อนเข้า recuperator ช่วงอุ่นเตา บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
13:00	798
13:30	798
14:00	796
14:30	795



เวลา	อุณหภูมิ (°C)
15:00	794
15:30	795
16:00	796
16:30	795
17:00	796
เฉลี่ย	796

ตารางที่ ข.47 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator ช่วงอุ่นเตา บ.แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
13:00	542
13:30	541
14:00	543
14:30	544
15:00	545
15:30	544
16:00	542
16:30	541
17:00	544
เฉลี่ย	543

### 3.1.6 ข้อมูลช่องเปิด

- ขนาดช่องเปิดขาเข้า (สี่เหลี่ยม) ความกว้าง 0.320 เมตร ความยาว 5.50 เมตร
- ขนาดช่องเปิดขาออก (สี่เหลี่ยม) ความกว้าง 0.320 เมตร ความยาว 5.50 เมตร

### 3.3 สถานะการทำงาน :

ช่วงรีดเหล็ก

ลักษณะการให้ความร้อน :

ใช้หัวเผาทุกโซน

#### 3.3.1 ข้อมูลการผลิตและสเกล

- แผ่นเหล็ก (slab) ขนาดกว้าง x ยาว x สูง = 1.8 m x 2.0 m x 0.2 m

ตารางที่ ข.48 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา (แท่ง)		การผลิต (ตัน/ชม.)
			แท่ง	ตัน	
10:00	10:30	30	3	21.9	43.80
10:30	11:00	30	3	21.9	43.80
11:00	11:30	30	2	14.5	29.00
11:30	12:00	30	3	21.8	43.60
20:15	20:45	30	2	14.8	29.60
20:45	21:15	30	1	7.4	14.80
21:15	21:45	30	3	19.1	38.20
21:45	22:15	30	4	25.4	50.80
เฉลี่ย					36.70

- สเกล ใช้ค่าเฉลี่ยทั้งปี ประมาณ 2.1-2.2%

### 3.3.2 ข้อมูลของเชื้อเพลิง

- เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C มีอุณหภูมิก่อนเข้า burner 100 °C

ตารางที่ ข.49 อัตราการใช้เชื้อเพลิงช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

เวลาเริ่มต้น	เวลาสุดท้าย	เวลา (นาที)	ผลต่าง (ลิตร)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)
10:30	11:00	30	773.0	1,546
11:00	11:30	30	1,821.0	3,642
11:30	12:00	30	1,037.0	2,074
20:15	20:45	30	900.0	1,800
20:45	21:15	30	1,022.0	2,044
21:15	21:45	30	1,093.0	2,186
21:45	22:15	30	1,082.0	2,164
เฉลี่ย				2,208

### 3.3.3 ข้อมูลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

- อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม 29.6 °C

ตารางที่ ข.50 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้หลัง recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
10:30	435
11:00	433
11:30	432
12:00	432
20:15	432
20:45	439
21:15	429
21:45	424
เฉลี่ย	421

### 3.3.4 ข้อมูลของอุณหภูมิและความดันภายในเตาเผา

ตารางที่ ข.51 อุณหภูมิภายในเตาเผาช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)							
	โซน 1*	โซน 2*	โซน 3*	โซน 4*	โซน 5*	โซน 6*	โซน 7*	โซน 8*
10:30	1,247	1,262	1,289	1,279	1,225	1,277	1,284	1,268
11:00	1,242	1,263	1,290	1,281	1,226	1,283	1,290	1,276
11:30	1,254	1,268	1,296	1,286	1,233	1,288	1,297	1,286
12:00	1,255	1,263	1,292	1,283	1,237	1,276	1,283	1,282
20:15	1,260	1,253	1,260	1,260	1,237	1,211	1,208	1,218
20:45	1,241	1,229	1,255	1,248	1,208	1,206	1,192	1,212
21:15	1,254	1,236	1,248	1,234	1,193	1,192	1,179	1,199
21:45	1,241	1,234	1,250	1,237	1,194	1,200	1,197	1,208
22:15	1,199	1,221	1,249	1,236	1,197	1,206	1,216	1,212
เฉลี่ย	1,244	1,248	1,270	1,260	1,217	1,238	1,238	1,240

หมายเหตุ \*แสดงตำแหน่งโซนต่างๆ ดังรูปที่ ข.1

ตารางที่ ข.52 ความดันของเตาอ่านได้ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

เวลา	mm W.C.
10:30	0.65
11:00	0.67
11:30	0.63
12:00	0.88
20:15	0.63
20:45	0.57
21:15	0.69
21:45	0.53
22:15	0.68
เฉลี่ย	0.66

หมายเหตุ W.C. = Water Column

### 3.3.5 ข้อมูลของไอเสีย

ตารางที่ ข.53 อุณหภูมิไอเสียและคุณสมบัติของไอเสียที่ออกจากเตาเผาช่วงรีดบ. แอล พี เอ็น เพทมิท จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)	%O <sub>2</sub>	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)
10:30	1,054	4.7	23.0	12.3
11:00	1,051	3.8	26.0	13.0
11:30	1,047	3.6	17.0	13.1
12:00	1,058	3.4	22.0	13.3
20:15	1,062	4.7	38.0	12.3
20:45	1,054	4.6	43.0	12.3
21:15	1,080	5.1	36.0	11.9
21:45	1,060	5.9	37.0	11.4
22:15	1,013	2.8	25.0	13.7

ตารางที่ ข.54 อุณหภูมิไอเสียออกจากเตาและผสมกับอากาศเย็นก่อนเข้า recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
10:30	818
11:00	817
11:30	812
12:00	815
20:15	815
20:45	793
21:15	819
21:45	815
22:15	812
เฉลี่ย	811

ตารางที่ ข.55 อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก recuperator ช่วงรีดเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน)

เวลา	อุณหภูมิ (°C)
13:00	542
13:30	543
14:00	543
14:30	544
15:00	542
15:30	544
16:00	540
16:30	542
17:00	541
เฉลี่ย	542

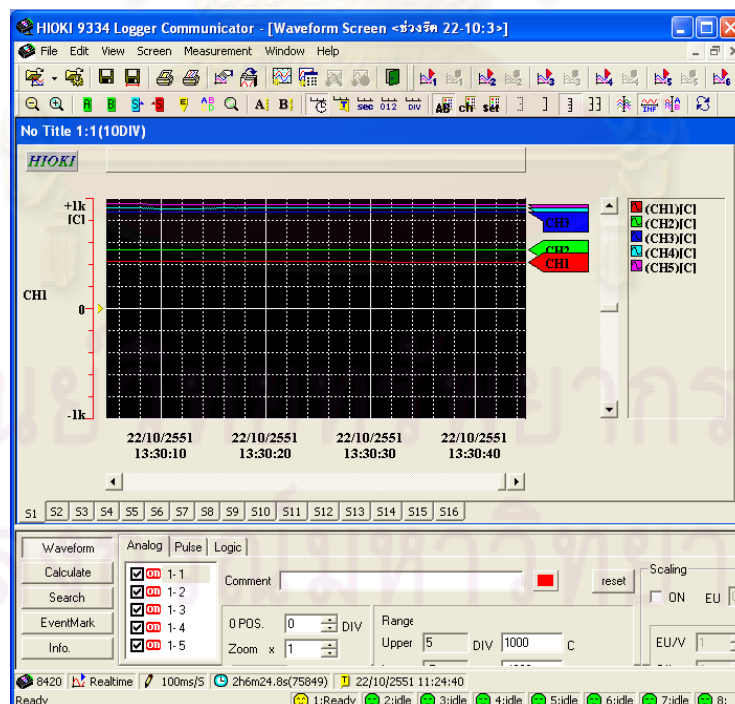
### 3.3.6 ข้อมูลช่องเปิด

- ขนาดช่องเปิดขาเข้า (สี่เหลี่ยม) ความกว้าง 0.320 เมตร ความยาว 5.50 เมตร
- ขนาดช่องเปิดขาออก (สี่เหลี่ยม) ความกว้าง 0.320 เมตร ความยาว 5.50 เมตร

5. ค่าการตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน)

Absolute	1- 1 [C]	1- 2 [C]	1- 3 [C]	1- 4 [C]	1- 5 [C]
22/10/2551 11:24:40	+441.000000	+491.500000	+875.500000	+911.500000	+955.000000
22/10/2551 11:26:20	+435.000000	+511.500000	+876.000000	+911.500000	+953.500000
22/10/2551 11:28:00	+440.500000	+523.500000	+878.500000	+913.000000	+951.500000
22/10/2551 11:29:40	+443.000000	+528.500000	+878.500000	+912.500000	+954.000000
22/10/2551 11:31:20	+440.500000	+533.000000	+879.000000	+912.500000	+952.000000
22/10/2551 11:33:00	+441.000000	+532.000000	+878.000000	+913.000000	+954.500000
22/10/2551 11:34:40	+439.000000	+535.500000	+880.500000	+911.000000	+953.500000
22/10/2551 11:36:20	+440.000000	+535.500000	+879.500000	+914.000000	+954.500000
22/10/2551 11:38:00	+440.000000	+538.000000	+880.500000	+912.000000	+954.000000
22/10/2551 11:39:40	+440.000000	+536.000000	+879.000000	+913.500000	+955.000000
22/10/2551 11:41:20	+440.000000	+540.500000	+881.000000	+912.500000	+954.000000
22/10/2551 11:43:00	+439.500000	+541.000000	+883.000000	+912.000000	+953.500000
22/10/2551 11:44:40	+439.000000	+541.000000	+880.500000	+912.500000	+954.000000
22/10/2551 11:46:20	+438.500000	+540.000000	+881.500000	+912.000000	+954.000000
22/10/2551 11:48:00	+438.000000	+539.500000	+882.500000	+913.500000	+953.500000
22/10/2551 11:49:40	+437.500000	+539.000000	+880.500000	+912.500000	+953.500000
22/10/2551 11:51:20	+440.000000	+538.000000	+880.500000	+914.500000	+956.000000
22/10/2551 11:53:00	+440.000000	+540.500000	+880.500000	+914.500000	+955.500000
22/10/2551 11:54:40	+438.000000	+539.000000	+880.500000	+914.500000	+955.000000
22/10/2551 11:56:20	+438.500000	+538.500000	+880.500000	+915.000000	+955.500000
22/10/2551 11:58:00	+435.500000	+539.500000	+881.000000	+916.500000	+952.500000

รูปที่ ข.2 ค่าการตรวจวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน) ผนังด้านวาง slab ช่วงอุณหภูมิที่ระยะ 75, 100, 150, 200 และ 250 mm.



รูปที่ ข.3 กราฟลักษณะกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน) ผนังด้านวาง slab ช่วงอุณหภูมิที่ระยะ 75, 100, 150, 200 และ 250 mm



ภาคผนวก ค

ข้อมูลอุณหภูมิผิวโดยใช้ thermocouple

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

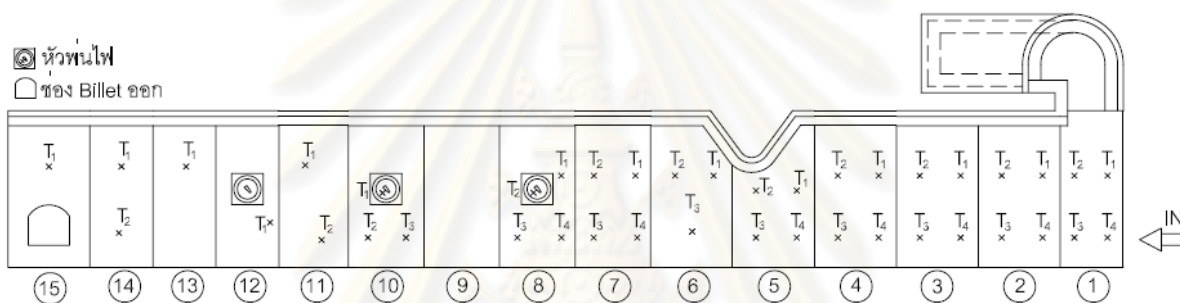
**ค.1 ข้อมูลอุณหภูมิผิวโดยใช้ Thermocouple**

ข้อมูลในภาคผนวกนี้เป็นข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิผิวของเตาเผาเหล็กโดยใช้ thermalcouple ที่ตำแหน่งต่างๆ และสภาวะการทำงานต่างๆ โดยข้อมูลนี้จะนำไปหาปริมาณพลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเหล็ก นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลในการตรวจสอบสภาพการเป็นฉนวนของฉนวนเตาเผาเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆของโรงงานตัวอย่างในปัจจุบัน

**1. บริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)**

**1.1 สภาวะการทำงานช่วงรีดเหล็ก**

ด้านแท่นรีด



รูปที่ ค.1 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวนั่งด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงรีดเหล็ก

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิผิวนั่งด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

อุณหภูมิ (°C) Section	T1	T2	T3	T4
1	57.1	59.2	48.2	55.0
2	63.8	63.2	57.4	57.6
3	61.9	62.5	59.5	54.5
4	61.6	63.0	60.9	57.9
5	61.4	61.6	61.5	60.0
6	66.3	66.0	212.0	-
7	63.2	83.0	79.0	68.0
8	192.0	95.0	151.0	162.0
9	-	-	-	-



อุณหภูมิ (°C) Section	T1	T2	T3	T4
10	96.0	160.0	180.0	-
11	105.3	77.2	-	-
12	160.0	-	-	-
13	110.0	-	-	-
14	114.0	106.0	-	-
15	116.8	-	-	-

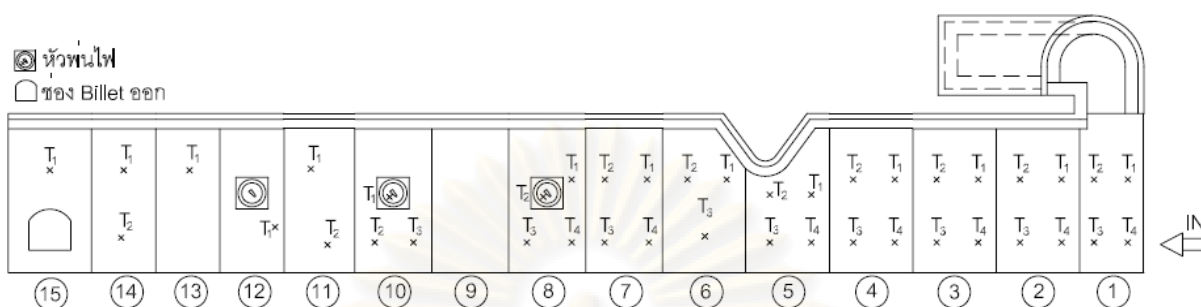
**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.2 สถานะการทำงานช่วงอุ่นเตา

ด้านแท่นรีด



รูปที่ ค.2 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงอุ่นเตา

ตารางที่ ค.2 อุณหภูมิผิวผนังด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงอุ่นเตา

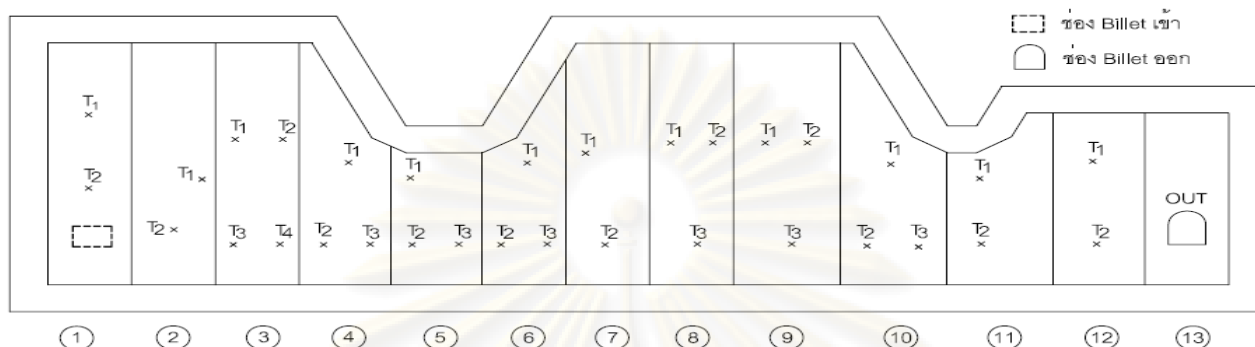
Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1	59.6	58.4	52.2	49.5
2	57.7	60.2	56.3	53.9
3	59.4	55.5	54.7	57.5
4	62.1	58.5	58.3	59.8
5	59.9	61.9	59.0	52.6
6	65.7	67.6	170.9	-
7	65.3	74.5	87.9	72.3
8	202.0	77.0	171.8	168.2
9	139.0	222.0	-	-
10	235.0	75.2	169.6	177.2
11	81.1	81.7	-	-
12	162.8	74.1	-	-
13	126.4	82.1	104.4	-
14	93.6	85.5	-	-
15	108.9	59.8	-	-

**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก

## 2. บริษัท อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

### 2.1 สถานะการทำงานช่วงรีดเหล็ก

ด้านแทนรีด

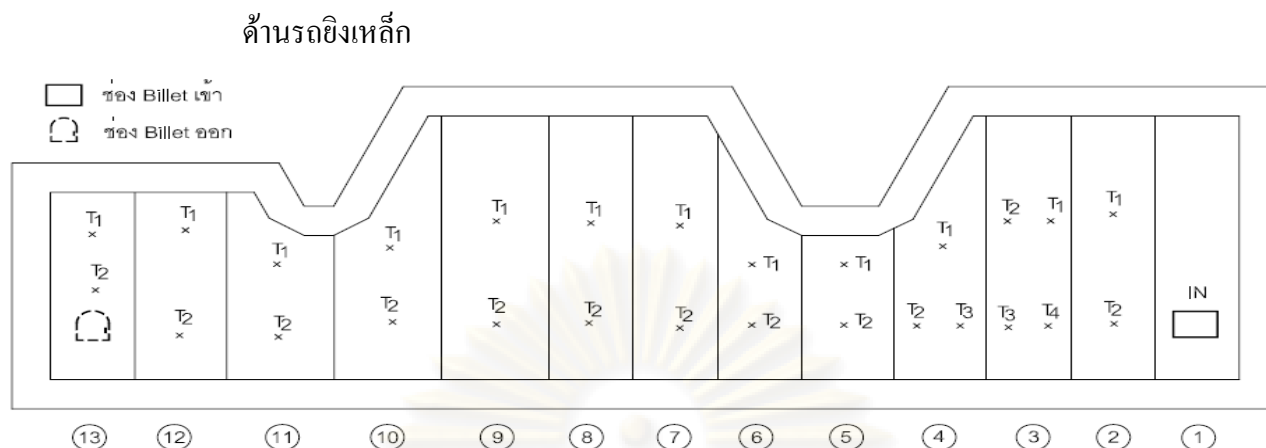


รูปที่ ค.3 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านแทนรีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

ตารางที่ ค.3 อุณหภูมิผิวผนังด้านแทนรีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1	70.3	71.5	-	-
2	90.8	86.9	-	-
3	88.0	82.7	82.9	84.9
4	74.2	79.5	83.6	94.9
5	90.4	102.2	110.7	-
6	92.6	96.3	100.8	-
7	121.6	115.8	-	-
8	87.2	77.2	115.8	-
9	83.8	84.8	89.0	-
10	76.6	93.0	90.4	-
11	102.5	108.0	-	-
12	84.3	87.5	-	-
13	-	-	-	-

หมายเหตุ ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก



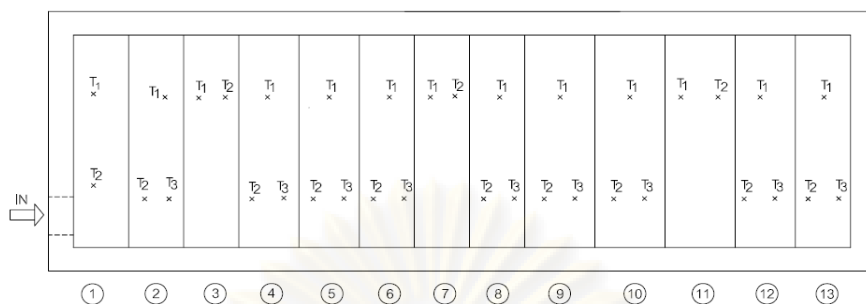
รูปที่ ค.4 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านรดยิ่งเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงรีดเหล็ก

ตารางที่ ค.4 อุณหภูมิผิวผนังด้านแทนรีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1	-	-	-	-
2	87.8	82.1	-	-
3	77.1	81.0	88.6	56.1
4	79.0	97.3	87.7	-
5	105.2	107.7	-	-
6	118.2	108.7	-	-
7	139.3	123.7	-	-
8	85.9	90.6	-	-
9	85.0	97.1	-	-
10	100.3	102.0	-	-
11	113.2	121.2	-	-
12	101.7	117.9	-	-
13	112.5	116.3	-	-

**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก

## ด้านหลังเตา



รูปที่ ค.5 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_1$	$T_2$	$T_3$
	1		51.4	61.3
2		69.7	64.7	66.4
3		90.3	82.2	-
4		81.3	68.6	68.0
5		67.9	71.3	67.0
6		78.2	64.6	68.4
7		61.7	59.8	-
8		72.9	67.7	64.7
9		63.6	59.8	61.8
10		62.9	64.4	62.7
11		70.6	69.5	-
12		68.9	62.8	66.6
13		69.7	66.9	65.1

**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก

## ด้านหน้าเตา



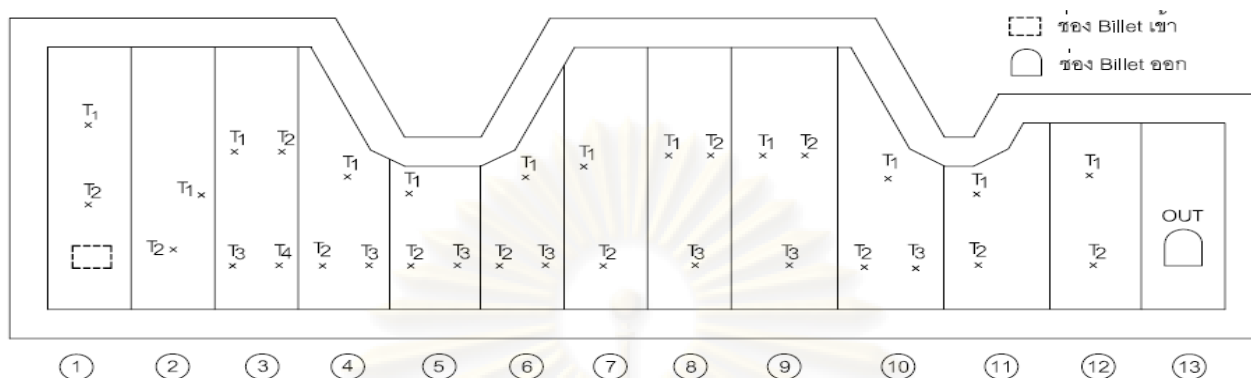
รูปที่ ค.6 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงวัดเหล็ก

ตารางที่ ค.6 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงวัดเหล็ก

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
1	88.6	97.1	-
2	92.9	100.7	-
3	106.8	114.5	-
4	136.9	121.9	-
5	97.4	103.8	137.2
6	137.8	119.2	-
7	89.7	111.3	92.6
8	124.1	116.4	-
9	96.6	-	-
10	119.5	105.4	-
11	119.3	128.2	-

หมายเหตุ ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก

## 2.2 สถานะการทำงานช่วงเร่งเตา ด้านแท่นรีด

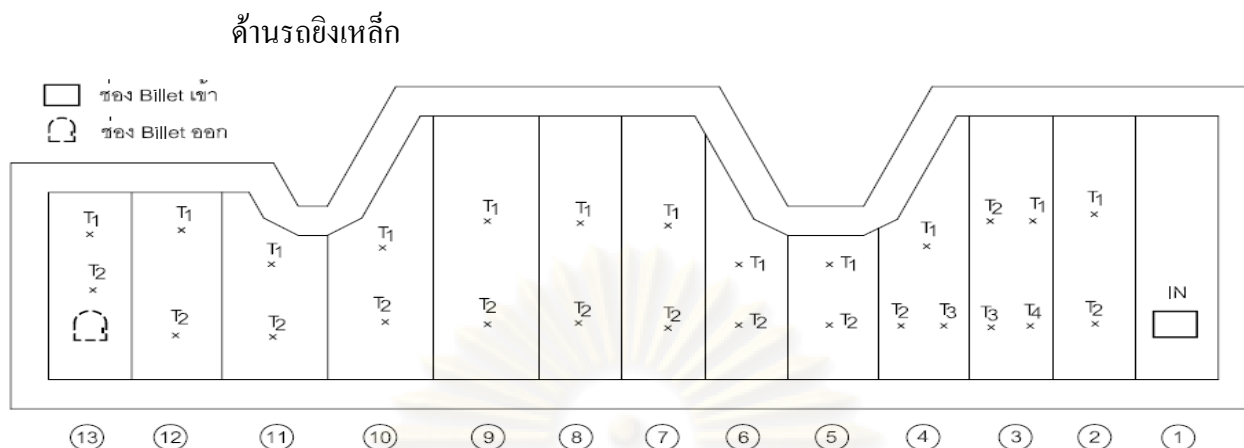


รูปที่ ค.7 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงเร่งเตา

ตารางที่ ค.7 อุณหภูมิผิวผนังด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

Section	อุณหภูมิ (°C)			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
1	61.9	59.6	-	-
2	70.6	59.7	-	-
3	80.6	81.7	81.7	85.9
4	78.9	82.8	92.7	-
5	98.9	106.5	115.9	-
6	94.1	106.1	111.0	-
7	109.0	115.7	-	-
8	89.9	82.4	104.1	-
9	83.9	83.1	100.5	-
10	80.9	96.0	93.8	-
11	100.4	145.8	119.4	129.9
12	124.5	114.9	119.7	-
13	101.0	-	-	-

**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก



รูปที่ ค.8 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านรดยิ่งเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermo couple ช่วงเร่งเตา

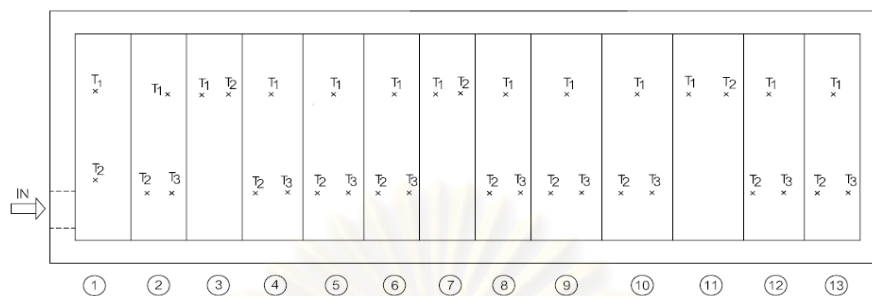
ตารางที่ ค.8 อุณหภูมิผิวผนังด้านรดยิ่งเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1	83.1	-	-	-
2	85.2	86.1	-	-
3	81.5	83.8	88.7	81.1
4	77.2	111.7	80.2	-
5	105.1	131.4	-	-
6	108.3	119.2	-	-
7	127.3	121.8	-	-
8	92.6	102.1	-	-
9	85.5	107.3	-	-
10	106.8	114.7	-	-
11	116.8	161.3	121.8	130.4
12	155.2	127.6	-	-
13	116.4	120.5	-	-

**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก



## ด้านหลังเตา



รูปที่ ค.9 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

ตารางที่ ค.9 อุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
1	55.1	61.1	-
2	72.1	66.2	73.6
3	72.2	73.4	-
4	82.3	72.9	69.1
5	72.7	72.1	71.6
6	81.4	69.8	73.0
7	66.5	63.9	-
8	78.0	71.5	69.7
9	67.8	71.7	72.0
10	67.3	66.6	67.8
11	78.8	70.8	-
12	72.3	67.0	69.8
13	77.4	77.1	74.4

**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก

## ด้านหน้าเตา



รูปที่ ค.10 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

ตารางที่ ค.10 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

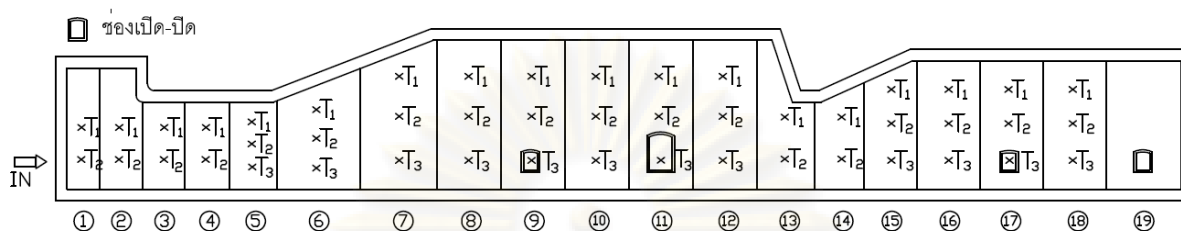
Section	อุณหภูมิ (°C)		
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
1	101.5	107.9	-
2	143.8	118.4	-
3	129.5	162.4	-
4	156.9	118.3	-
5	103.5	99.4	94.1
6	132.3	-	-
7	107.8	130.3	104.3
8	133.5	106.6	-
9	102.7	-	-
10	91.2	95.3	-
11	81.4	107.5	-

หมายเหตุ ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก

### 3 บริษัท ที. ที. เอส. สตีล จำกัด

#### 3.1 สถานะการทำงานช่วงรีดเหล็ก

ด้านแทนรีด



รูปที่ ค.11 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านแทนรีด เตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด  
โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

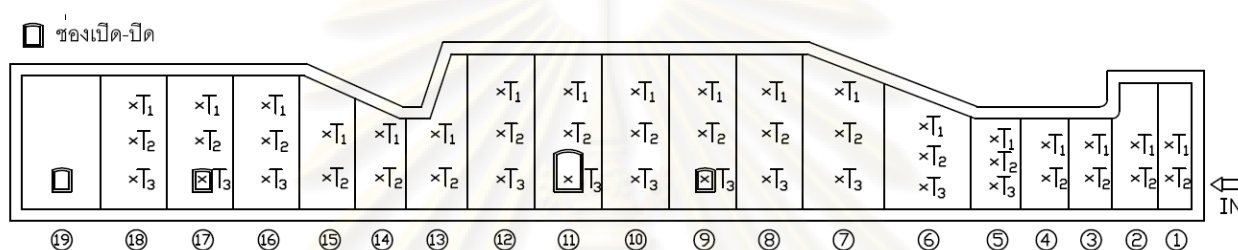
ตารางที่ ค.11 อุณหภูมิผิวผนังด้านทิศเหนือ ด้านแทนรีด เตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
1	63.1	62.8	-
2	67	69.8	-
3	80.8	77.4	-
4	79.4	78.2	-
5	78.3	78.8	-
6	83.9	87.1	-
7	100	100.3	97.6
8	102.4	101.9	104.4
9	77.2	81.9	99.5
10	90.5	88.5	93.6
11	84.2	81.1	158.5
12	86.1	85.5	84.9
13	77	74.3	-
14	75.9	81.5	-
15	79.4	81.5	-
16	86.2	82.8	86.7

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
17	80.2	80.9	79.7
18	86	84.8	86.7
19	-	-	-

**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก

ด้านรดยิ่งเหล็ก



รูปที่ ค.12 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านรดยิ่งเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด

โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

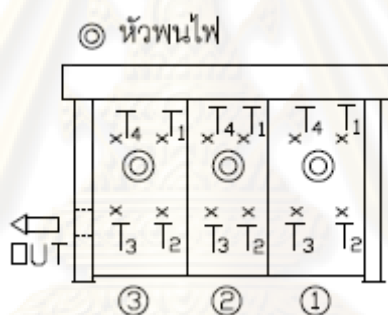
ตารางที่ ค.12 อุณหภูมิผิวผนังด้านทิศเหนือด้านรดยิ่งเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
1	68.1	68	-
2	73	73.5	-
3	78.8	85.3	-
4	80.1	69.5	-
5	83.5	78.8	-
6	93.1	95.5	90.1
7	96.8	93.3	93.3
8	97.7	93	94.4
9	99.9	98.5	92
10	86.8	84.2	81.8
11	83.8	82.6	134.4

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
12	86.4	88.5	85.7
13	81.5	80.7	-
14	77.8	75.8	-
15	106.4	105.3	-
16	85.6	87.3	89.2
17	75.5	72.7	106.3
18	87.6	87.3	88.9
19	-	-	-

หมายเหตุ ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแก๊สเหล็ก

ด้านหลังเตา



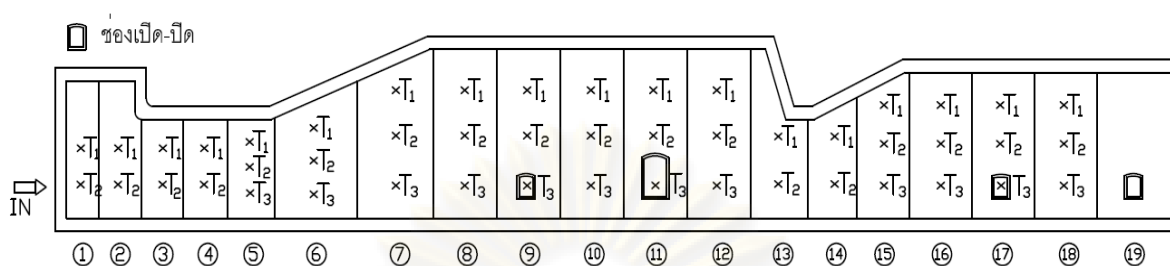
รูปที่ ค.13 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

ตารางที่ ค.13 อุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1	115	141.3	150.1	117.1
2	115.5	141.8	126.9	117.4
3	126.7	131.5	116.5	114.6

### 3.2 สถานะการทำงานช่วงเร่งเตา

ด้านแท่นรีด



รูปที่ ค.14 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด

โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

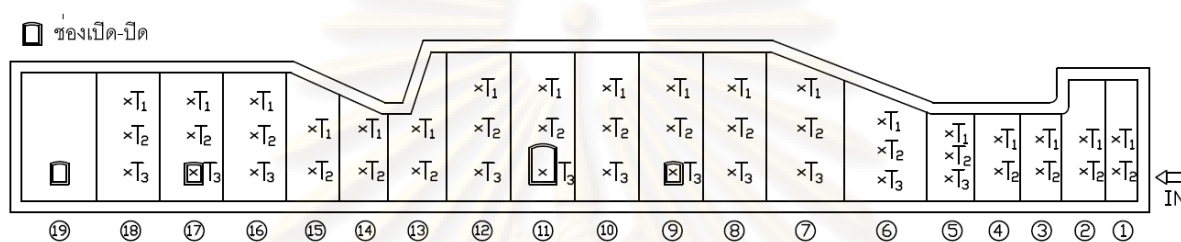
ตารางที่ ค.14 อุณหภูมิผิวผนังด้านแท่นรีดเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

Section \ อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_1$	$T_2$	$T_3$
1	60.1	58.8	-
2	64.0	65.8	-
3	77.8	73.4	-
4	76.4	74.2	-
5	75.3	74.8	-
6	78.9	83.1	-
7	95.0	96.3	90.8
8	97.4	96.6	97.6
9	72.2	76.6	92.7
10	85.5	83.2	86.8
11	79.2	75.8	151.7
12	81.1	80.2	78.1
13	71.0	69.0	-
14	69.9	76.8	-
15	73.4	76.8	-
16	80.2	78.1	79.3
17	74.2	76.2	72.3

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
18	80.0	80.1	79.3
19	-	-	-

หมายเหตุ ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแก๊สเหล็ก

ด้านรยิงเหล็ก



รูปที่ ค.15 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านรยิงเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

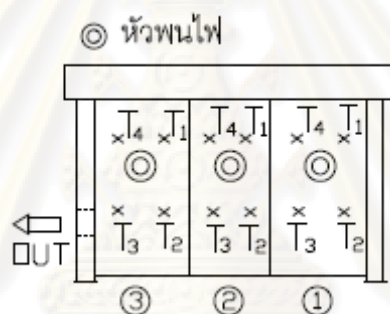
ตารางที่ ค.15 อุณหภูมิผิวผนังด้านรยิงเหล็กเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
1	61.4	62.2	-
2	66.3	67.7	-
3	72.1	79.5	-
4	73.4	63.7	-
5	76.8	73.0	-
6	86.4	89.7	85.2
7	90.1	87.5	88.4
8	91.0	87.2	89.5
9	93.2	92.7	87.1
10	80.1	78.4	76.9
11	78.5	76.4	129.5
12	81.1	82.3	80.8

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
13	76.2	74.5	-
14	72.5	69.6	-
15	101.1	99.1	-
16	80.3	81.1	84.4
17	70.2	66.5	101.5
18	82.3	81.1	84.1
19	-	-	-

**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแก๊สเหล็ก

ด้านหลังเตา



รูปที่ ค.16 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

ตารางที่ ค.16 อุณหภูมิผิวผนังด้านหลังเตาเผาเหล็ก บ. ที. ที. เอส. สตีล จำกัด โดยใช้ thermocouple ช่วงเร่งเตา

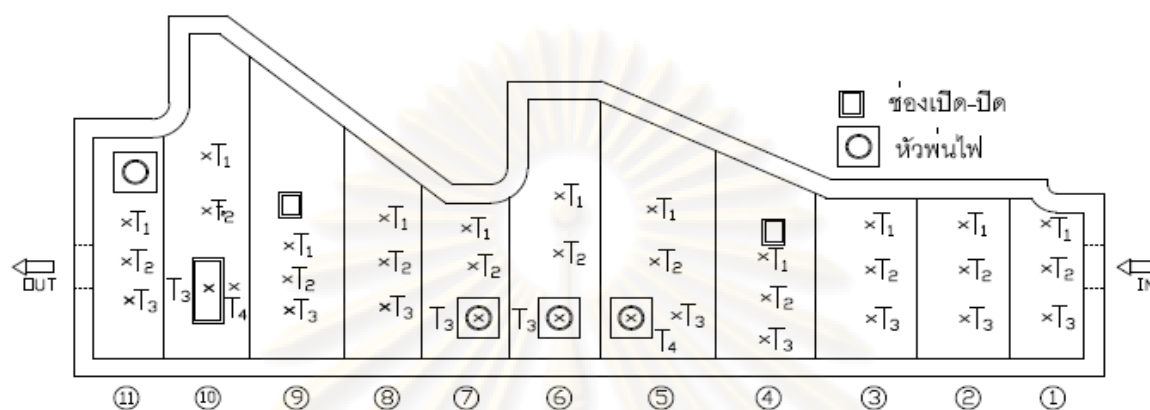
Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1	111.1	135.4	145.5	112.4
2	111.6	135.9	122.3	112.7
3	122.8	125.6	111.9	109.9



#### 4. บริษัท แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน)

##### 4.1 สถานะการทำงานช่วงรีดเหล็ก

ด้านทิศใต้ (ด้านแทนรีด)



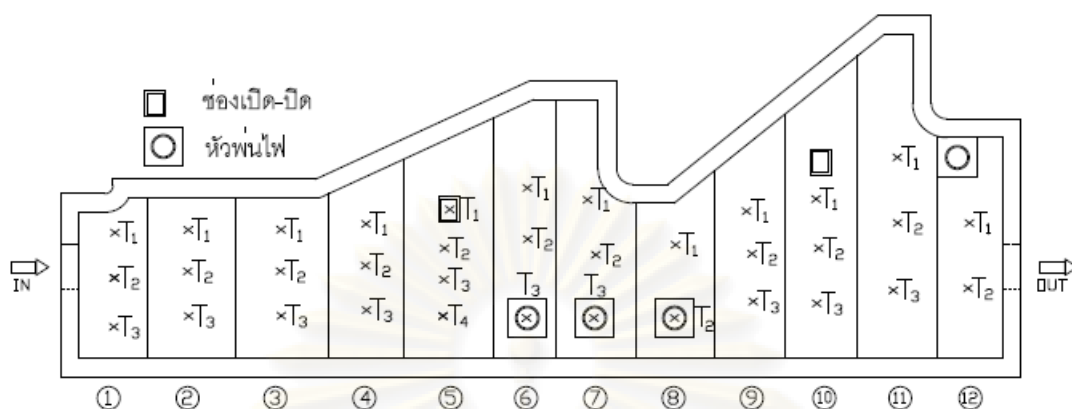
รูปที่ ค.17 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านทิศใต้ (ด้านแทนรีด)เตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

ตารางที่ ค.17 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
1	105.2	98.5	108.2	-
2	132.6	107.9	114.4	-
3	102.4	106.6	106.6	-
4	167.1	173.2	99.6	-
5	139.4	121.5	135.2	164.5
6	135.4	110.4	169.2	-
7	131.1	121.8	165.0	-
8	132.5	121.9	110.4	-
9	121.0	110.8	121.5	-
10	124.0	131.0	118.4	136.6
11	165.0	146	129.0	-

**หมายเหตุ** ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก

ด้านทิศเหนือ (ด้านที่วาง slab)



รูปที่ ค.18 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านทิศเหนือ(ด้านที่วาง slab)เตาเผาเหล็ก

บ. แอล พี เอ็น เฟลทमित จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

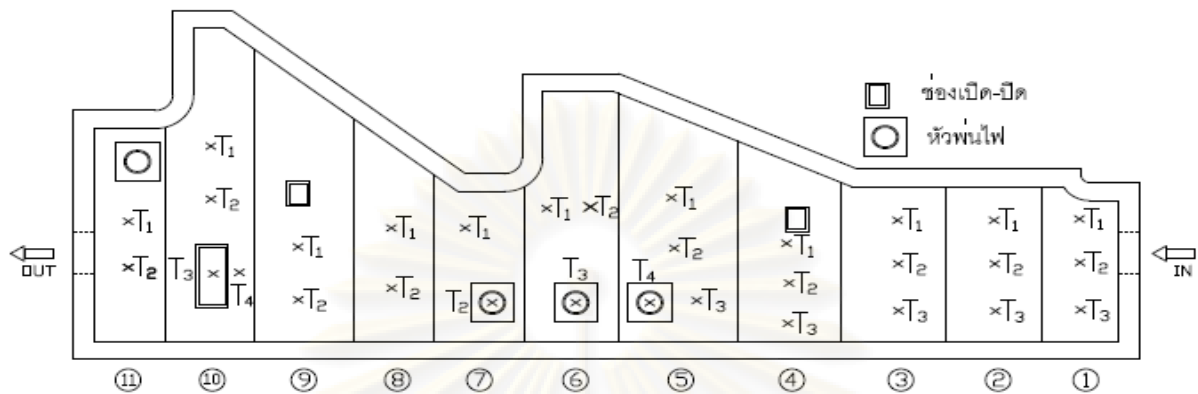
ตารางที่ ค.18 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เฟลทमित จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงรีดเหล็ก

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
1	106.3	99.3	112.5	-
2	106.1	105.2	96.6	-
3	104.4	101.4	99.8	-
4	128.7	131.2	126.7	-
5	116.8	144.2	121.1	129.0
6	133.4	139.2	166.0	-
7	142.1	125.1	168.0	-
8	151.0	176.6	-	-
9	137.1	143.2	115.6	-
10	135.2	121.5	111.4	-
11	135.7	112.9	111.8	-
12	128.8	122.8	-	-

หมายเหตุ ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแก๊สเหล็ก

## 4.2 สถานะการทำงานช่วงอุณหเตา

ด้านทิศใต้ (ด้านแท่นรีด)



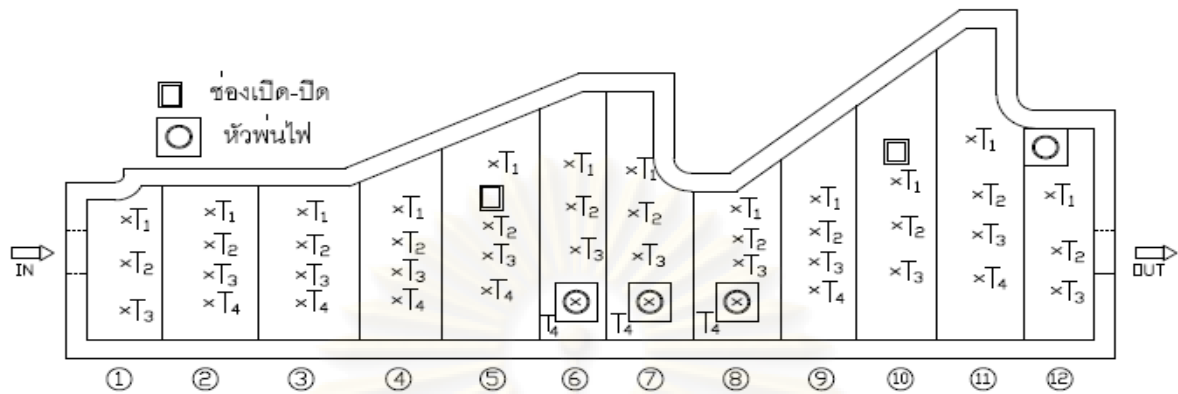
รูปที่ ค.19 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านทิศใต้ (ด้านแท่นรีด) เตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงอุณหเตา

ตารางที่ ค.19 อุณหภูมิผิวผนังด้านหน้าเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงอุณหเตา

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1	120.1	119.3	134.4	-
2	116.3	115.8	121.2	-
3	106.3	107.4	107.6	-
4	179.3	102.6	123.8	-
5	145.2	146.8	118.9	155.4
6	229.0	201.0	170.9	-
7	184.6	191.1	-	-
8	141.0	141.2	-	-
9	121.2	117.4	-	-
10	139.5	249.0	118.4	204.0
11	170.9	150.6	-	-

หมายเหตุ ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแท่งเหล็ก

ด้านทิศเหนือ (ด้านที่วาง slab)



รูปที่ ค.20 ภาพแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้านทิศเหนือ (ด้านที่วาง slab) เตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เฟลทมิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้ thermocouple ช่วงอุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ ค.20 อุณหภูมิผิวผนังด้านทิศเหนือ (ด้านที่วาง slab) เตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เฟลทมิล จำกัด (มหาชน) วัดโดยใช้ thermocouple ช่วงอุณหภูมิต่ำ

Section	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
1	112.9	125.7	129.6	-
2	132.4	130.6	118.5	108.8
3	128.0	116.6	115.5	108.3
4	106.7	135.2	120.1	122.5
5	138.6	123.6	124.6	150.5
6	177.9	207.0	188.8	189.2
7	165	201.0	225.0	146.8
8	187.0	199.0	215.0	157.7
9	169.3	155.4	157.6	122.9
10	138.6	126.4	129.8	-
11	170.3	161.2	152.1	115.2
12	177.8	159.8	159.0	-

หมายเหตุ ลำดับการเรียง section เรียงตามการไหลของแก๊สเหล็ก



ภาคผนวก ง

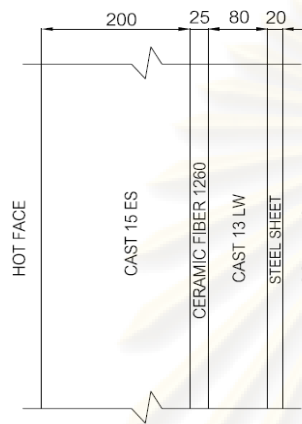
โครงสร้างนวนของตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

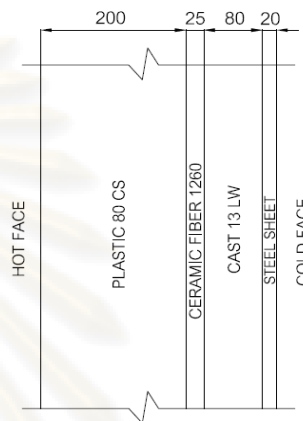
### ง.1 โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง

ข้อมูลในภาคผนวกนี้เป็นข้อมูลชนิดของวัสดุและความหนาความหนาของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่าง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### 1. บริษัท กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)



Unit : mm.



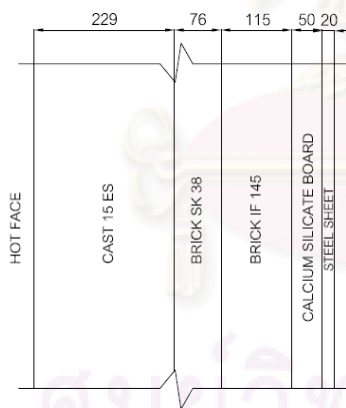
Unit : mm.

รูปที่ ง.1 หลังคาเตาของ Preheating Zone

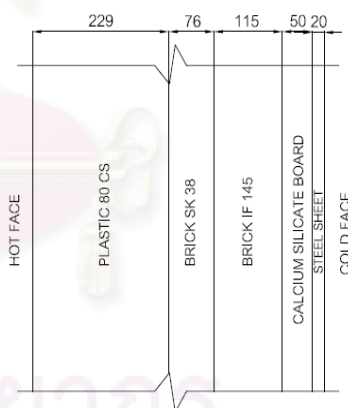
รูปที่ ง.2 หลังคาเตาของ Heating Zone

บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)



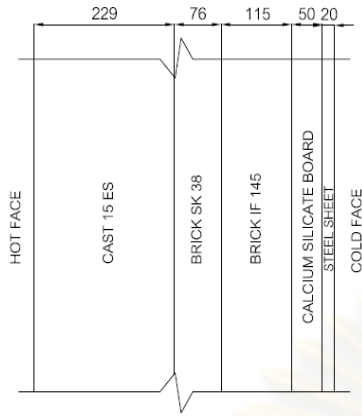
Unit : mm.



Unit : mm.

รูปที่ ง.3 ผนังเตาด้านแทนริดและด้านรดยิงเหล็กของ Preheating Zone บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

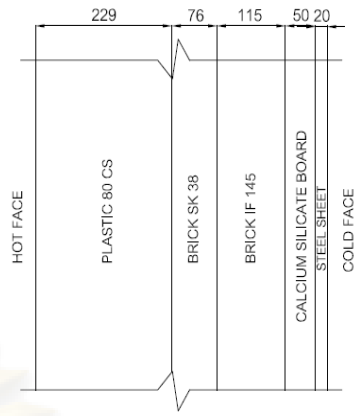
รูปที่ ง.4 ผนังเตาด้านแทนริดและด้านรดยิงเหล็กของ Heating Zone บ. กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)



Unit : mm.

รูปที่ 3.5 ผนังเตาด้านหลัง

บ.กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

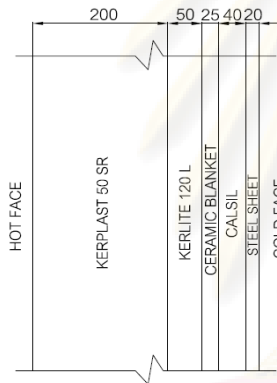


Unit : mm.

รูปที่ 3.6 ผนังเตาด้านหน้า

บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

2. บริษัท อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)



Unit : mm.

รูปที่ 3.7 หลังคาเตา Heating Zone

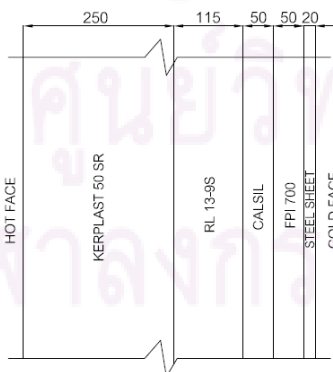
บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)



Unit : mm.

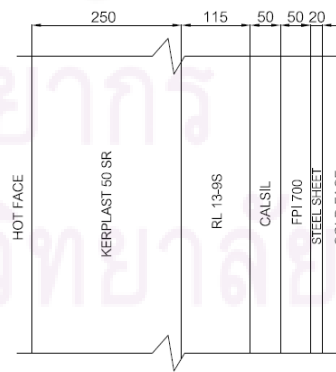
รูปที่ 3.8 หลังคาเตา Soaking Zone

บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)



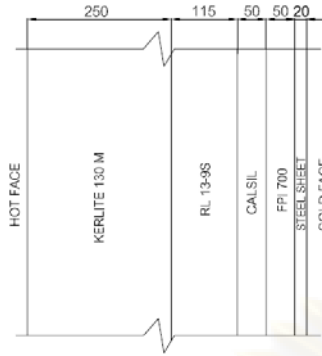
Unit : mm.

รูปที่ 3.9 ผนังด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็กของ Heating Zone บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)



Unit : mm.

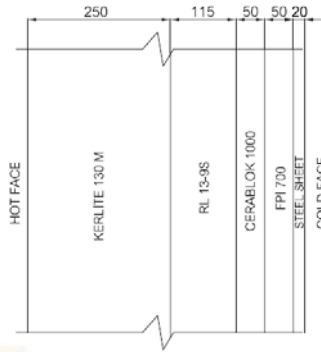
รูปที่ 3.10 ผนังด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็กของ Soaking Zone บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)



Unit : mm.

รูปที่ ง.11 ผนังด้านหลัง

บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

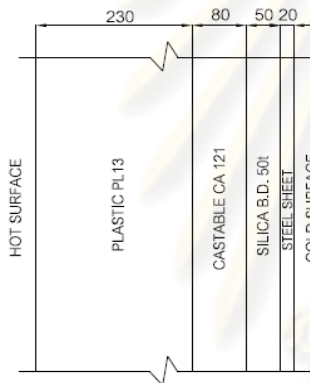


Unit : mm.

รูปที่ ง.12 ผนังด้านหน้า

บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)

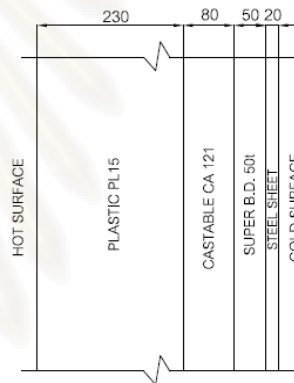
3. บริษัท ที ที เอส สตีล จำกัด



Unit : mm.

รูปที่ ง.13 หลังคาเตา Heating Zone

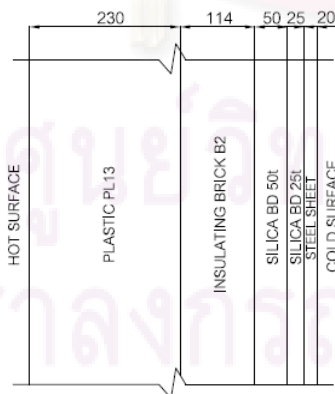
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด



Unit : mm.

รูปที่ ง.14 หลังคาเตา Soaking Zone

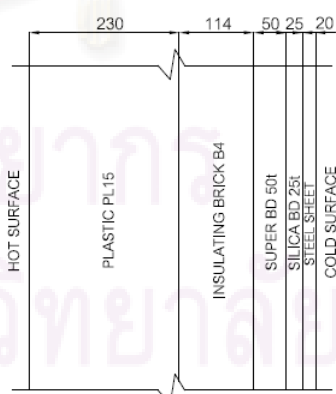
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด



Unit : mm.

รูปที่ ง.15 ผนังด้านแทนริดและรอยิงเหล็กของ Heating Zone

บ. ที ที เอส สตีล จำกัด

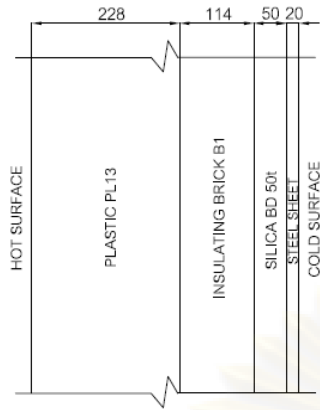


Unit : mm.

รูปที่ ง.16 ผนังด้านแทนริดและรอยิงเหล็กของ Soaking Zone

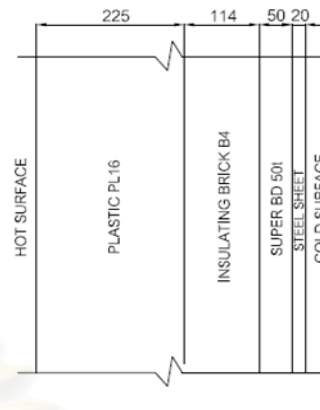
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด





Unit : mm.

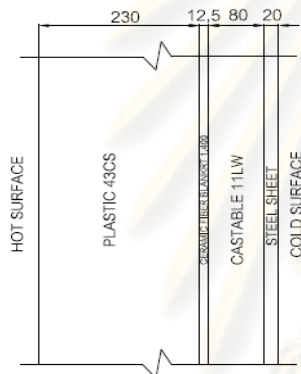
รูปที่ ง.17 ผนังด้านหลัง บ. ที ที เอส สตีล จำกัด



Unit : mm.

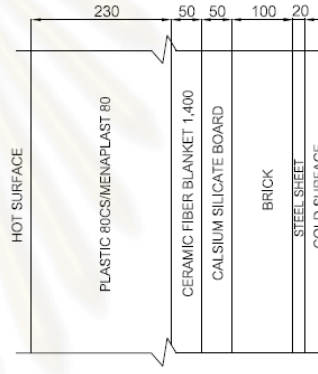
รูปที่ ง.18 ผนังด้านหน้า บ. ที ที เอส สตีล จำกัด

4. บริษัท แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน)



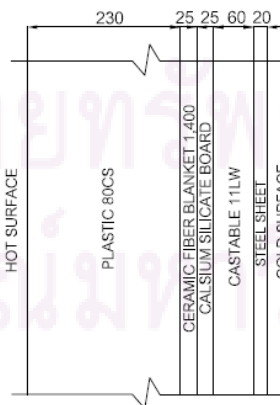
Unit : mm.

รูปที่ ง.19 หลังคาเตา Heating และ Soaking Zone บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน)



Unit : mm

รูปที่ ง.20 ผนังเตาด้านทิศเหนือและด้านทิศใต้ Heating Zone และ Soaking Zone บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน)



Unit : mm.

รูปที่ ง.21 ผนังเตาด้านเหล็กเข้าและด้านเหล็กออกบ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน)



ภาคผนวก จ  
ตัวอย่างการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## จ.1 ตัวอย่างการคำนวณ

เนื่องจากการคำนวณต่างๆในงานวิจัย ในเตาเผาเหล็กแต่ละโรงงานมีขั้นตอนการคำนวณที่ไม่แตกต่างกันดังนั้นในที่นี้จึงของยกตัวอย่างการคำนวณของโรงงานเพียงหนึ่งโรงงาน คือ การคำนวณของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

### 1. สมดุลมวลของเตาเผา ประกอบด้วย

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

ผลจากการตรวจวัดพบว่า ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย 2,208 ลิตร/ชั่วโมง โดยมีค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.93 kg/liter จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ  $\dot{m}_{fuel}$  ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{fuel} = \rho_{fuel} \dot{V}_{fuel} = 0.93 \times 2,208 / 3600 = 0.5704 \text{ kg/s}$$

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

เริ่มจากการคำนวณตัวคูณสำหรับการปรับแก้ของปริมาณอากาศส่วนเกินขณะปิดประตูยิงเหล็ก ดังสมการ

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

ผลจากการตรวจวัด พบว่า เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนภายในไอเสียขณะปิดประตูยิงเหล็กมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.23% จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาค่า  $\lambda$  ได้เท่ากับ 1.2413 จากนั้นคำนวณค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (actual air-fuel ratio,  $AF_{actual}$ ) ดังสมการ

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

จากสมการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงได้เท่ากับ 17.28 kg<sub>air</sub>/kg<sub>fuel</sub> ซึ่งนำมาคำนวณอัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ได้ ดังนี้

$$\dot{m}_{air} = AF_{actual} \times \dot{m}_{fuel} = 17.28 \times 0.5704 = 9.8565 \text{ kg/s}$$

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

จากกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) จะสามารถคำนวณอัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ได้ ดังนี้

$$\dot{m}_{flue} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air} = 0.5704 + 9.8565 = 10.4269 \text{ kg/s}$$

## 2. การคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก

### ช่วงรีดเหล็ก

พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย

#### 1. ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

$$Q_{in1} = V_{fuel} \times LHV$$

$$V_{fuel} = 2,208.00 \text{ L/hr} \text{ และ } LHV = 39.77 \text{ MJ/L}$$

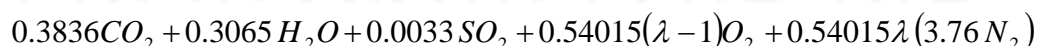
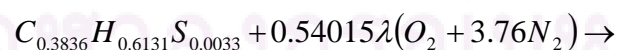
ดังนั้น ความร้อนจากการเชื้อเพลิง;  $Q_{in1} = 87,812.16 \text{ MJ/hr} = 21,007.69 \text{ Mcal/hr}$

#### 2. ความร้อนสัมผัสของอากาศ

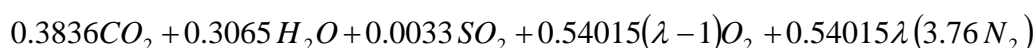
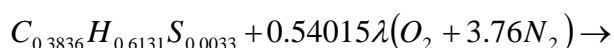
เมื่อทราบค่าอุณหภูมิของอากาศหลังจากการอุ่นด้วยไอเสียที่ recuperator เฉลี่ยเท่ากับ  $421.56 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และผลจากการคำนวณสมดุลมวลของเตาเผา ทำให้ทราบค่าอัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ  $9.8565 \text{ kg/s}$  โดยจะสามารถคำนวณ  $\dot{Q}_{air, preheat}$  ได้ดังสมการ

$$\dot{Q}_{in2} = \frac{\dot{m}_{O_2, air}}{M_{O_2}} \left( \int_T^{T_{air}} \bar{c}_{p, O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2, air}}{M_{N_2}} \left( \int_T^{T_{air}} \bar{c}_{p, N_2} dT \right)$$

โดยการคำนวณเริ่มจากหาสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ซึ่งจะพิจารณาจากสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา



โดยการคำนวณเริ่มจากหาสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ซึ่งจะพิจารณาจากสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา



ดังสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา จะเห็นได้ว่าปริมาณของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้คือ  $0.54015\lambda(O_2 + 3.76N_2)$  โดยค่า  $\lambda$  จะสามารถคำนวณได้จากอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

จากสมมูลมวลของเตาเผาทราบว่า อัตราไหลของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 0.5704 kg/s และมีอัตราไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ 9.8565 kg/s ซึ่งจะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง ( $AF_{actual}$ ) ได้ดังนี้

$$AF_{actual} = \dot{m}_{air} / \dot{m}_{fuel} = 9.8565 / 0.5704 = 17.2800 \text{ kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$$

จากนั้นเมื่อทราบค่า  $AF_{actual}$  จะสามารถคำนวณหาค่า  $\lambda$  ได้ดังนี้

$$\lambda = AF_{actual} / AF_{stoic} = 17.2800 / 13.92 = 1.2414$$

เมื่อทราบค่า  $\lambda$  จะสามารถหาจำนวนโมลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ได้เท่ากับ  $0.6815(O_2 + 3.76N_2)$  ทำให้สามารถทราบถึงสัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบภายในอากาศ เพื่อนำไปหาค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ ดังแสดงไว้ในตาราง จ.1

ตารางที่ จ.1 แสดงสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ

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

จากตาราง จ.1 เมื่อทราบค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในอากาศ ซึ่งจะนำมาคำนวณหาอัตราไหลของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนภายในอากาศที่ใช้เผาไหม้ ดังนี้

$$\dot{m}_{O_2,air} = 0.2329 \times \dot{m}_{air} = 0.2329 \times 9.8565 = 2.2956 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{N_2,air} = 0.7671 \times \dot{m}_{air} = 0.7671 \times 9.8565 = 7.5610 \text{ kg/s}$$

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะสามารถคำนวณ  $\dot{Q}_{in2}$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{in2} &= \frac{\dot{m}_{O_2,air}}{M_{O_2}} \left( \int_{T_0}^{T_{air}} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{N_2,air}}{M_{N_2}} \left( \int_{T_0}^{T_{air}} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= \frac{2.2956}{31.999} \left( \int_{298.15}^{694.15} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) + \frac{7.5610}{28.013} \left( \int_{298.15}^{694.15} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \\ &= 890.6892 + 4,261.858 = 5,152.5472 \text{ kW} \\ &= 18,549.17 \text{ MJ/hr} = 4,437.6 \text{ Mcal/hr}\end{aligned}$$

### 3. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง

$$Q_{in3} = V_{fuel} \times \rho_{fuel} \times C_{p,fuel} \times (T_{fuel} - T_{sur})$$

$$V_{fuel} = 2,208.00 \text{ L/hr}, \rho_{fuel} = 0.93 \text{ kg/L}, C_{p,fuel} = 1.8 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}, T_{fuel} = 80 \text{ }^\circ\text{C} \text{ และ}$$

$$T_{sur} = 33 \text{ }^\circ\text{C}$$

ดังนั้น ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง;  $Q_{in3} = 203.29 \text{ MJ/hr} = 48.63 \text{ Mcal/hr}$

### 4. ความร้อนที่เกิดจากการก่อตัวของสเกล

$$Q_{in4} = \% \times m_{steel} \times HF$$

$$\% = 2.15\%, m_{steel} = 36.70 \text{ kg/hr} \quad HF = 5,576.12 \text{ MJ/kg}$$

ดังนั้น ความร้อนที่เกิดจากการก่อตัวของสเกล;  $Q_{in4} = 4,339.84.00 \text{ MJ/hr} = 1,052.59 \text{ Mcal/hr}$

### พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก ซึ่งประกอบด้วย

#### 1. ความร้อนสัมผัสของเหล็กที่ออกจากเตาเผา

$$Q_{out1} = m_{steel} \times C_{p,steel} \times (T_{o,steel} - T_{sur})$$

$$m_{steel} = 36.70 \text{ kg/hr}, C_{p,steel} = 0.5 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}, T_{o,steel} = 1,238.67 \text{ }^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 29.64 \text{ }^\circ\text{C}$$

ดังนั้น ความร้อนที่ใช้ประโยชน์;  $Q_{out1} = 22,185.56 \text{ MJ/hr} = 5,307.55 \text{ Mcal/hr}$

#### 2. ความร้อนสูญเสียสเกล

$$Q_{out2} = \% \times m_{steel} \times C_{p,steel} \times (T_{o,steel} - T_{sur})$$

$$\% = 2.15, m_{\text{steel}} = 36.70 \text{ kg/hr}, C_{p,\text{scale}} = 0.90 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}, T_{o,\text{steel}} = 1,238.67^\circ\text{C} \text{ และ}$$

$$T_{\text{sur}} = 29.64^\circ\text{C}$$

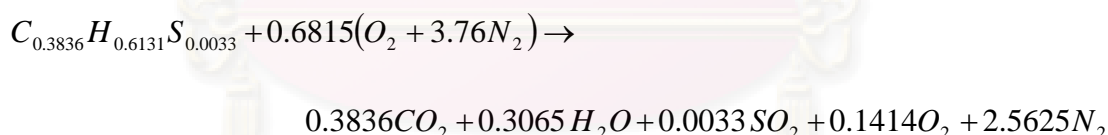
ดังนั้น ความร้อนสูญเสียสเกล;  $Q_{\text{out}2} = 858.58 \text{ MJ/hr} = 205.40 \text{ Mcal/hr}$

### 3. ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย

เมื่อทราบค่าอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเตาเผาก่อนเข้าสู่ recuperator เฉลี่ยเท่ากับ  $1053.22^\circ\text{C}$  และจากการคำนวณสมดุลมวลของเตาเผา ทำให้ทราบค่าอัตราไหลของไอเสียเท่ากับ  $10.4269 \text{ kg/s}$  จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ  $\dot{Q}_{\text{out}3}$  ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{out}3} = & \frac{\dot{m}_{\text{CO}_2,\text{flue}}}{M_{\text{CO}_2}} \left( \int_T^{T_{\text{flue}}} \bar{c}_{p,\text{CO}_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O},\text{flue}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \left( \int_T^{T_{\text{flue}}} \bar{c}_{p,\text{H}_2\text{O}} dT \right) \\ & + \frac{\dot{m}_{\text{SO}_2,\text{flue}}}{M_{\text{SO}_2}} \left( \int_T^{T_{\text{flue}}} \bar{c}_{p,\text{SO}_2} dT \right) + \frac{\dot{m}_{\text{O}_2,\text{flue}}}{M_{\text{O}_2}} \left( \int_T^{T_{\text{flue}}} \bar{c}_{p,\text{O}_2} dT \right) \\ & + \frac{\dot{m}_{\text{N}_2,\text{flue}}}{M_{\text{N}_2}} \left( \int_T^{T_{\text{flue}}} \bar{c}_{p,\text{N}_2} dT \right) \end{aligned}$$

การคำนวณเริ่มต้นจากการหาสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบไอเสีย ซึ่งจะพิจารณาจากสมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา เมื่อทราบค่า  $\lambda = 1.2617$  เพื่อนำมาแทนค่าลงในสมการการเผาไหม้ ทำให้สามารถหาจำนวนโมลของแต่ละองค์ประกอบภายในไอเสีย ดังสมการต่อไปนี้



จากสมการการเผาไหม้ดังกล่าวข้างต้น ทำให้ทราบถึงสัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบภายในไอเสีย เพื่อนำไปหาค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสีย ดังแสดงไว้ในตาราง จ.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.2 แสดงสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสีย

i	$N_i$ (kmol <sub>i</sub> )	$Y_i$ (kmol <sub>i</sub> /kmol <sub>total</sub> )	$M_i$ (kg <sub>i</sub> /kmol <sub>i</sub> )	$Y_i * M_i$ (kg <sub>i</sub> )	$Y_i * M_i / \sum Y_i * M_i$ (kg <sub>i</sub> /kg <sub>total</sub> )
CO <sub>2</sub>	0.3836	0.1129	44.01	4.9687	0.1706
H <sub>2</sub> O	0.3065	0.0902	18.015	1.6250	0.0558
SO <sub>2</sub>	0.0033	0.0010	64.063	0.0641	0.0022
O <sub>2</sub>	0.1414	0.0416	31.999	1.3312	0.0458
N <sub>2</sub>	2.5625	0.7543	28.013	21.1302	0.7256
$\sum$ (Flue)	3.3973	1	-	29.1192	1

จากตาราง จ.2 เมื่อทราบค่าสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบภายในไอเสีย จะนำมาคำนวณหาอัตราไหลขององค์ประกอบภายในไอเสียได้ โดยอัตราไหลของไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้คืออัตราไหลของเชื้อเพลิงรวมกับอัตราไหลของอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\dot{m}_{flue,comb} = 0.5704 + 9.8565 = 10.4269$  kg/s จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นสามารถคำนวณอัตราไหลของแต่ละองค์ประกอบภายในไอเสีย ดังนี้

$$\dot{m}_{CO_2,flue} = 0.1706 \times \dot{m}_{flue,comb} = 0.1706 \times 10.4263 = 1.7788 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{H_2O,flue} = 0.0558 \times \dot{m}_{flue,comb} = 0.0558 \times 10.4263 = 0.5818 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{SO_2,flue} = 0.0022 \times \dot{m}_{flue,comb} = 0.0022 \times 10.4263 = 0.0229 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{O_2,flue} = 0.0458 \times \dot{m}_{flue,comb} = 0.0458 \times 10.4263 = 0.4776 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{N_2,flue} = 0.7256 \times \dot{m}_{flue,comb} = 0.7256 \times 10.4263 = 7.5656 \text{ kg/s}$$

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะสามารถคำนวณ  $\dot{Q}_{out3}$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{out3} = & \frac{1.778}{44.01} \left( \int_{298.15}^{1326.37} \bar{c}_{p,CO_2} dT \right) + \frac{0.5818}{18.015} \left( \int_{298.15}^{1326.37} \bar{c}_{p,H_2O} dT \right) \\ & + \frac{0.0229}{64.063} \left( \int_{298.15}^{1326.37} \bar{c}_{p,SO_2} dT \right) + \frac{0.4776}{31.999} \left( \int_{298.15}^{1326.37} \bar{c}_{p,O_2} dT \right) \\ & + \frac{7.5656}{28.013} \left( \int_{298.15}^{1326.37} \bar{c}_{p,N_2} dT \right) \end{aligned}$$



$$= 1,611.83 + 1,000.26 + 18.43 + 1,933.66 + 6,844.54$$

$$= 11,408.72 \text{ kW} = 41,070.85 \text{ MJ/hr}$$

### 5. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา

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

อุณหภูมิของผิวผนังด้านหน้าเตาเฉลี่ย  $111.82^\circ\text{C}$  ( $384.97 \text{ K}$ )

พื้นที่ของผนังด้านหน้าเตาเท่ากับ  $25.99 \text{ m}^2$  และมีความสูงผนังเตาเฉลี่ย  $3.71 \text{ m}$

$h_m = 2.95 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  โดยสามารถคำนวณดังต่อไปนี้

$$T_f = \frac{(T_{wall} + T_{amb})}{2} = \frac{(384.97 + 302.79)}{2} = 343.88 \text{ K}$$

และ

$$\beta = 1/T_f = 1/343.88 = 0.00291$$

โดยค่า Rayleigh number สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Ra_L = \frac{g\beta L^3 (T_{wall} - T_{amb})}{\nu\alpha} = \frac{0.98 \times 0.00291 \times 3.71^3 \times (384.97 - 302.79)}{(1.235 \times 10^{-5})(2.8922 \times 10^{-5})} = 3.349 \times 10^9$$

เมื่อ  $Ra_L = 3.349 \times 10^9$  จะมีลักษณะการไหลของแบบ Turbulent Flow ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า Nusselt number ดังสมการ

$$\overline{Nu}_L^{1/2} = 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} = 0.825 + \frac{0.387 \times (3.349 \times 10^9)^{1/6}}{[1 + (0.492/0.7018)^{9/16}]^{8/27}} = 19.23$$

จากนั้นสามารถคำนวณหา  $h_m$  ดังสมการ

$$h_m = \frac{\overline{Nu}_L \times k}{L} = 3.71 = 2.95 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

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

$$= \{2.95 \times 25.99 \times (384.97 - 302.79)\} + \{0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 25.99 \times (384.97^4 - 302.79^4)\}$$

$$= 6.301 + 17.981 = 24.28 \text{ kW} = 87.4152 \text{ MJ/hr หรือ } 20.91 \text{ Mcal/hr}$$

คำนวณในลักษณะเดียวกันกับผนังด้านอื่นๆจะได้

ผนังเตาด้านหลังคาเตา

$$T_{\text{wall}} = 135.17 \text{ }^{\circ}\text{C}, A = 122.80 \text{ m}^2, h = 6.73 \text{ kcal/hr.m}^2.\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ และ } \varepsilon = 0.9$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านหลังคา;  $Q_{\text{out5,2}} = 187.04 \text{ Mcal/hr}$

ผนังเตาด้านทิศใต้ (แทนรีด)

$$T_{\text{wall}} = 128.11 \text{ }^{\circ}\text{C}, A = 79.82 \text{ m}^2, h = 4.73 \text{ kcal/hr.m}^2.\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ และ } \varepsilon = 0.9$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านทิศใต้ (แทนรีด);  $Q_{\text{out5,3}} = 68.82 \text{ Mcal/hr}$

ผนังเตาด้านทิศเหนือ (ด้านวาง slab)

$$T_{\text{wall}} = 129.51 \text{ }^{\circ}\text{C}, A = 79.82 \text{ m}^2, h = 4.73 \text{ kcal/hr.m}^2.\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ และ } \varepsilon = 0.9$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านทิศใต้ (แทนรีด);  $Q_{\text{out5,4}} = 68.82 \text{ Mcal/hr}$

ผนังเตาด้านหลังเตา

$$T_{\text{wall}} = 111.82 \text{ }^{\circ}\text{C}, A = 18.79 \text{ m}^2, h = 4.52 \text{ kcal/hr.m}^2.\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ และ } \varepsilon = 0.9$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านทิศใต้ (แทนรีด);  $Q_{\text{out5,5}} = 19.62 \text{ Mcal/hr}$

6. ความร้อนสูญเสียจากน้ำระบายความร้อน

$$Q_{\text{out6}} = m_{\text{water}} \times C_{p,w} \times (T_{w,o} - T_{w,i})$$

$$m_{\text{water}} = 1.230.84 \text{ m}^3/\text{hr}, C_{p,w} = 4.18 \text{ kJ/kg-}^{\circ}\text{C}, T_{w,o} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_{w,i} = 33.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น;  $Q_{\text{out6}} = 9,775.33 \text{ MJ/hr} = 2,338.60 \text{ Mcal/hr}$

7. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ได้มาจากความแตกต่างของพลังงานความร้อนเข้าสู่

เตาเผาเหล็กกับพลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก

$$Q_{\text{out7}} = Q_{\text{in1}} + Q_{\text{in2}} + Q_{\text{in3}} + Q_{\text{in4}} - Q_{\text{out1}} - Q_{\text{out2}} - Q_{\text{out3}} - Q_{\text{out4}} - Q_{\text{out5}} - Q_{\text{out6}}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} Q_{\text{out7}} &= 21,007.69 + 4,437.60 + 48.63 + 1,052.59 - 5,307.55 - 205.40 - 9,825.56 \\ &\quad - 2,338.60 \\ &= 7,926.17 \text{ Mcal/hr} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียอื่นๆ;  $Q_{\text{out7}} = 7,926.17 \text{ Mcal/hr}$

### 3. การคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างเตาเผาเหล็ก

ในที่นี้เป็นการอธิบายตัวอย่างการกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างของ ฉนวนเตาเผาเหล็ก โดยจะยกตัวอย่างการคำนวณการกระจายของอุณหภูมิตามโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น เพลทมิท จำกัด (มหาชน) ในช่วงรีดเหล็กของผนังด้านหลังคาเตา heating zone ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณอธิบายได้ดังนี้

1. จากการหลักการถ่ายความร้อน ที่ผนังเตาเผาเหล็ก คือ

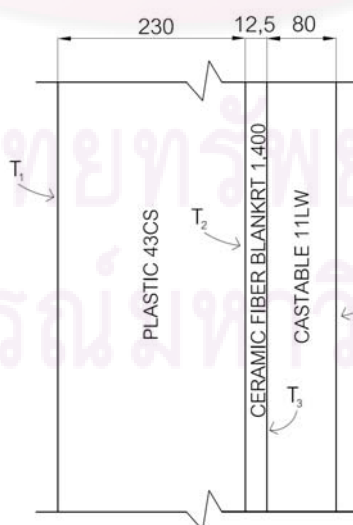
$$Q_{conduction} = Q_{convection} + Q_{radiation}$$

โดยที่

$$Q_{wall} (kcal/hr) = U_{cond} A (T_h - T) = hA (T - T_{sur}) + 4.88A \varepsilon \left\{ \left( \frac{273+T}{100} \right)^4 - \left( \frac{273+T_{sur}}{100} \right)^4 \right\}$$

สมมติอุณหภูมิของฉนวน เพื่อคำนวณหา ค่า k ของฉนวนแต่ละชั้น เนื่องจากค่า k ของฉนวนแต่ละชั้นเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ จากโครงสร้างของฉนวนดังรูป สามารถสมมติอุณหภูมิเริ่มต้นได้ดังนี้

- อุณหภูมิเริ่มต้น plastic 43CS เท่ากับ  $1,000^{\circ}\text{C}$  จะได้ค่า  $k_1 = 1.3 \text{ kcal/hr.m.}^{\circ}\text{C}$  และ  $L_1 = 0.23 \text{ m}$
- อุณหภูมิเริ่มต้น ceramic fiber blanket 1400 เท่ากับ  $800^{\circ}\text{C}$  จะได้ค่า  $k_2 = 0.1735 \text{ kcal/hr.m.}^{\circ}\text{C}$  และ  $L_2 = 0.0125 \text{ m}$
- อุณหภูมิเริ่มต้น castable 11 LW เท่ากับ  $600^{\circ}\text{C}$  จะได้ค่า k, เท่ากับ  $0.17 \text{ kcal/hr.m.}^{\circ}\text{C}$  และ  $L_3 = 0.08 \text{ m}$



รูปที่ จ.1 ตัวอย่างโครงสร้างของฉนวนหลังคาของ heating zone

2. คำนวณหาค่าอุณหภูมิผิวของฉนวนชั้นนอกสุดโดยการแทนค่าต่างๆ ลงในสมการในข้อ 1 โดยทำการสมมติอุณหภูมิผิวชั้นนอกสุด ( $T_4$ ) ในที่นี้เริ่มต้นสมมติที่  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิ  $T_1$  เท่ากับอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก คือ  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$  และค่าต่างๆ ที่ใช้ในสมการมีดังนี้

$$U_{cond} = \frac{k_1}{L_1} + \frac{k_2}{L_2} + \frac{k_3}{L_3}$$

$A$  = พื้นที่ผนังเตาด้านหลังคา heating zone  $36.94\text{ m}^2$ ,

$T_h$  = เท่ากับอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก  $1,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

$T_{sur} = 32.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

h. ใช้ค่าที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อการสูญเสียความร้อนผ่านผนัง

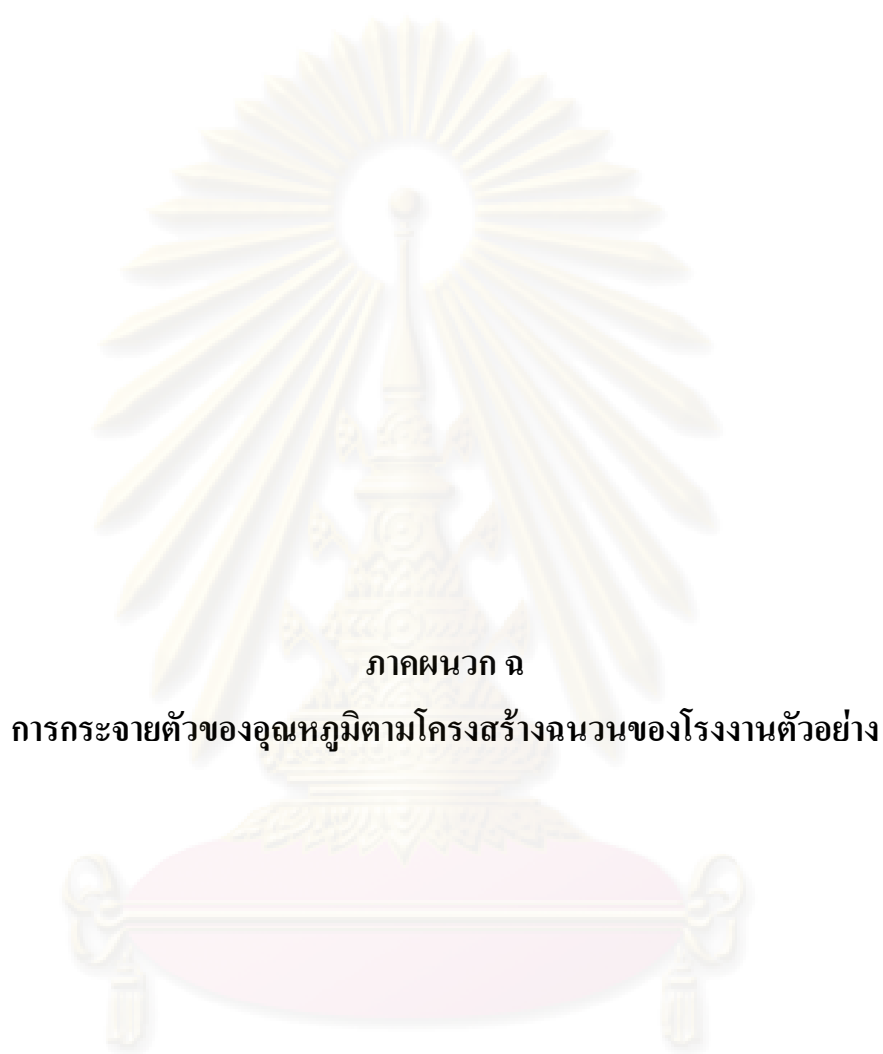
$$\varepsilon = 0.9$$

3. แทนค่าที่ได้ต่างๆ จากข้อ 2 ลงในสมการข้อ 1. และปรับค่าอุณหภูมิชั้นนอกสุดใหม่จนกระทั่งสมการทางด้านซ้ายและขวาเท่ากัน โดยในที่นี้จากการคำนวณ จะได้อุณหภูมิชั้นนอกสุดเท่ากับ  $T_4 = 136.12\text{ }^{\circ}\text{C}$

4. คำนวณหาอุณหภูมิของผนังฉนวนแต่ละชั้น (โดยใช้อุณหภูมิของผนังชั้นนอกสุดที่ได้จากข้อ 3 เป็นเกณฑ์ โดยในที่นี้จะได้อุณหภูมิผิวของฉนวนแต่ละชั้นดังนี้  $T_1 = 1,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 976.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3 = 886.58\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $T_4 = 136.12\text{ }^{\circ}\text{C}$

5. ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแต่ละชั้นเพื่อหาอุณหภูมิแต่ละฉนวนกันความร้อน เพื่อนำไปหาค่า  $k$  ของฉนวนแต่ละชั้น จากนั้นก็จะได้  $Q_{conduction} = 1,540.17\text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr.}$ ,  $Q_{convection} = 693.02\text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr.}$ ,  $Q_{radiation} = 847.15\text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr.}$  และ อุณหภูมิผิวชั้นนอกสุด  $T_4 = 136.12\text{ }^{\circ}\text{C}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ฉ

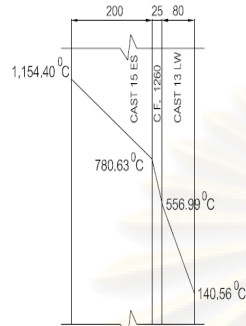
การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของโรงงานตัวอย่าง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

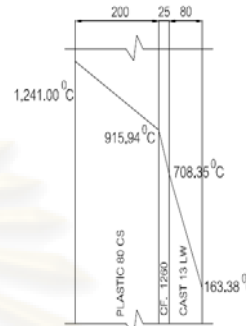
ฉ.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนปัจจุบันของโรงงานตัวอย่าง

1.1 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผา

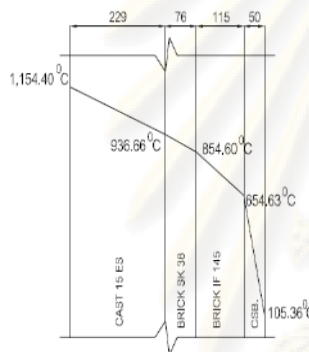
เหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน)



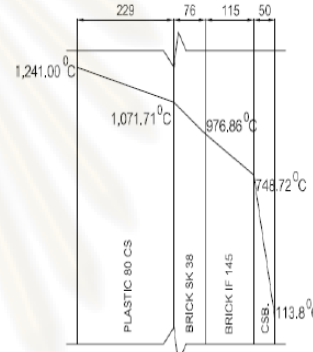
(a) ผนังเตาด้านหลังคา pre-heating zone



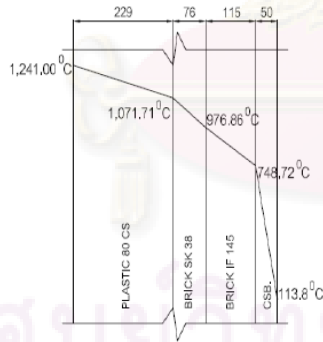
(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



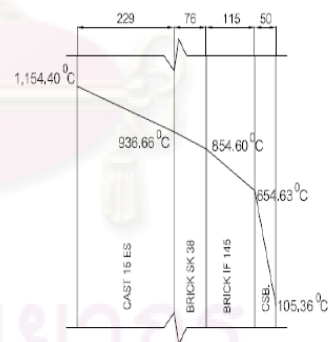
(c) ด้านแท่นรีดและรอยยิงเหล็ก preheating zone



(d) ด้านแท่นรีดและรอยยิงเหล็ก heating zone



(e) ผนังเตาด้านหน้า

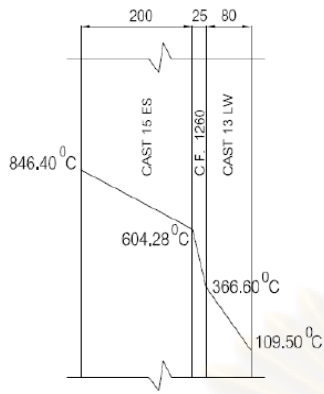


(f) ผนังเตาด้านหลัง

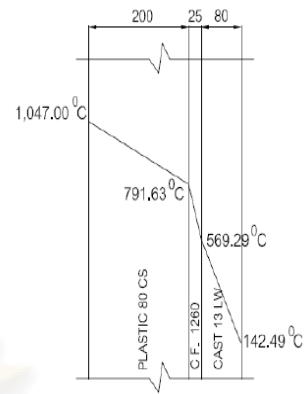
หมายเหตุ CF = ceramic fiber blanket ,Unit (mm) และ CSB = calcium silicate board

รูปที่ ฉ.1 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก

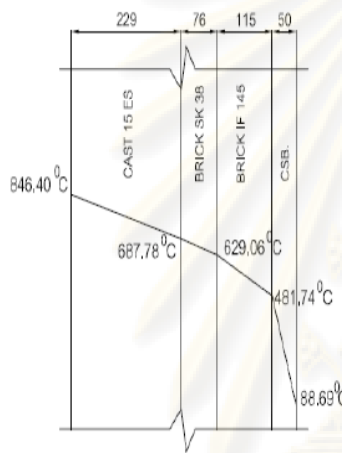
บ.กรุงเทพมหานคร จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงรีดเหล็ก



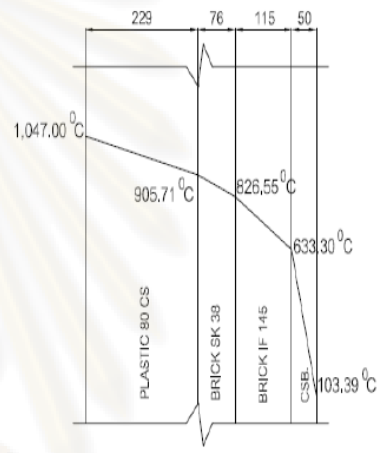
(a) ผนังเตาด้านหลังคา pre-heating zone



(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



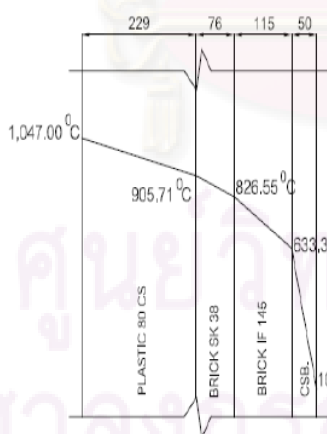
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก



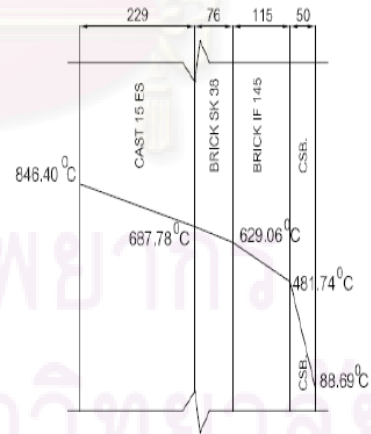
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก

pre-heating zone

heating zone



(e) ผนังเตาด้านหน้า

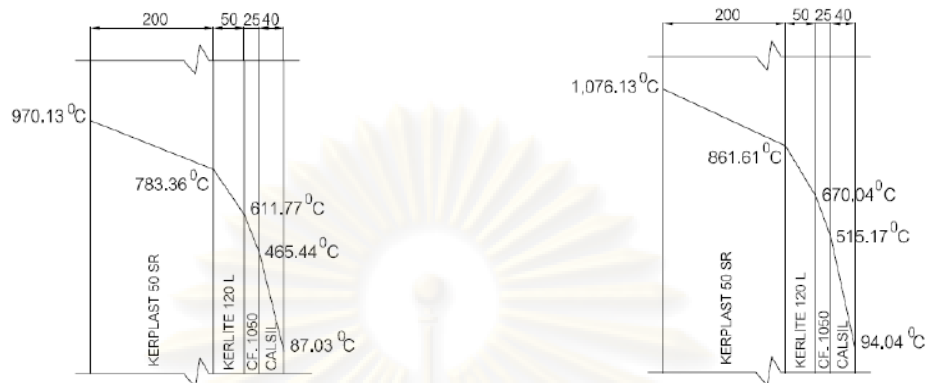


(f) ผนังเตาด้านหลัง

หมายเหตุ CF = ceramic fiber blanket ,Unit (mm) และ CSB = calcium silicate board

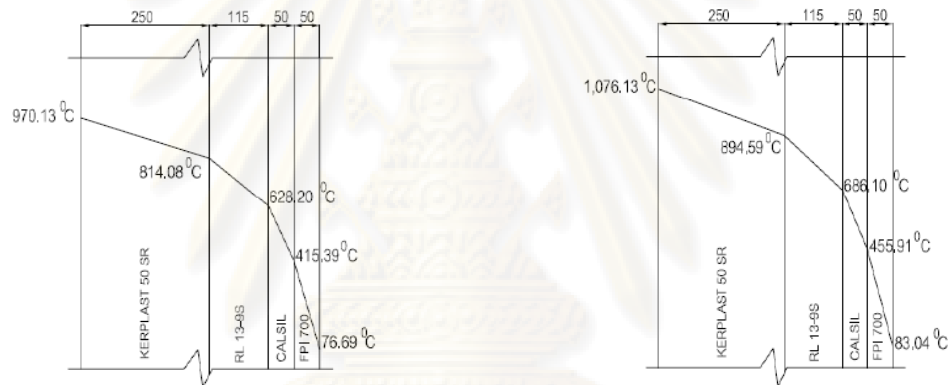
รูปที่ ๓.2 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร  
จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงเร่งเตา

1.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนปัจจุบันฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน)



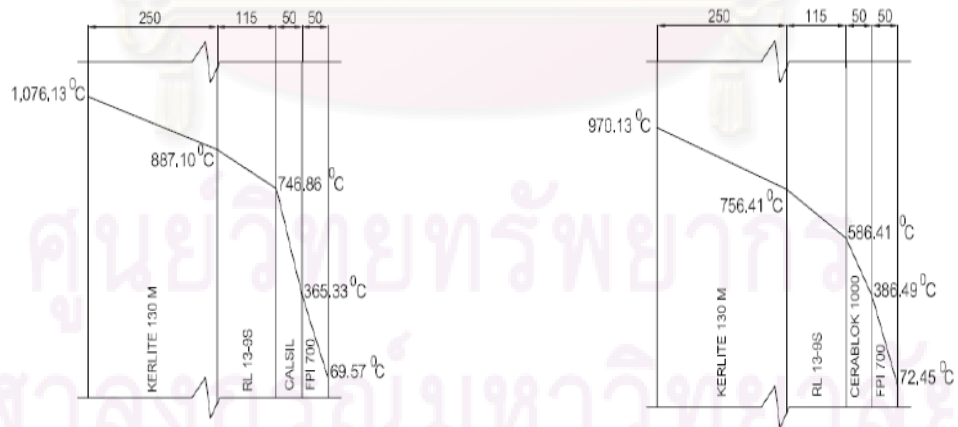
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone

(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



(c) ด้านแทนรีดและรยึงเหล็ก heating zone

(d) ด้านแทนรีดและรยึงเหล็ก soaking zone



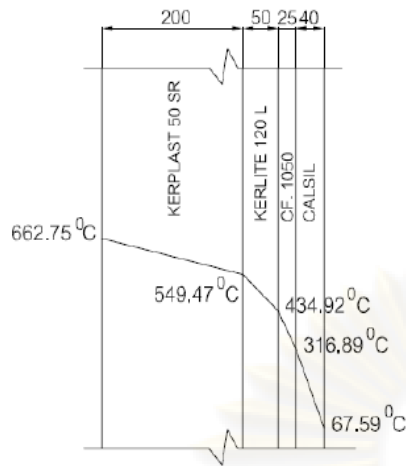
(e) ผนังเตาด้านหน้า

(f) ผนังเตาด้านหลัง

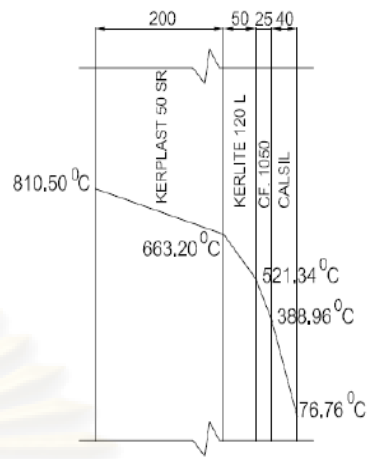
หมายเหตุ CF = ceramic fiber blanket และ Unit (mm)

รูปที่ ๓.3 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทยจำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงรีดเหล็ก

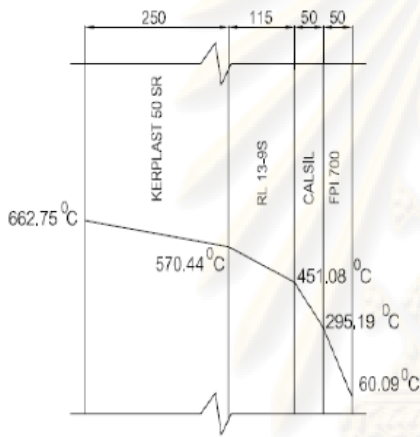




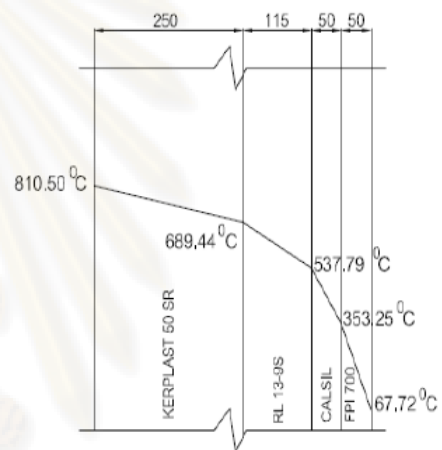
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



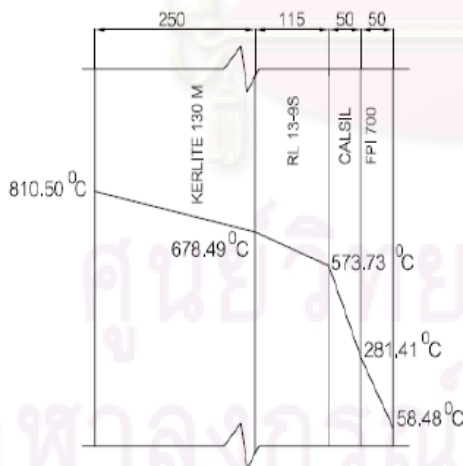
(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



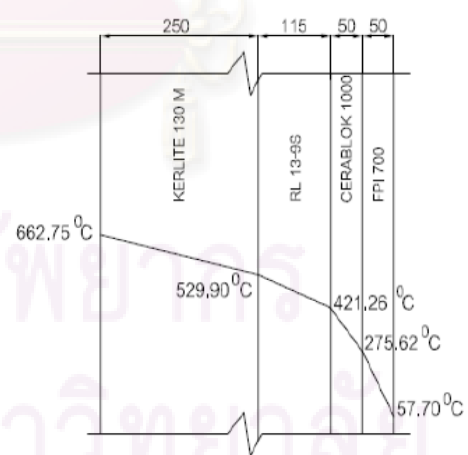
(c) ด้านด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก heating zone



(d) ด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก soaking zone



(e) ผนังเตาด้านหน้า

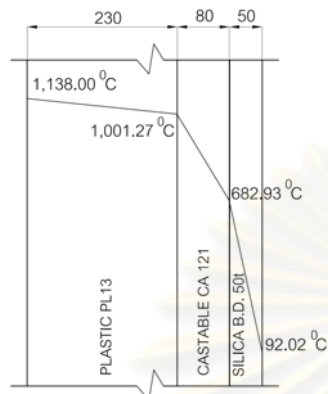


(f) ผนังเตาด้านหลัง

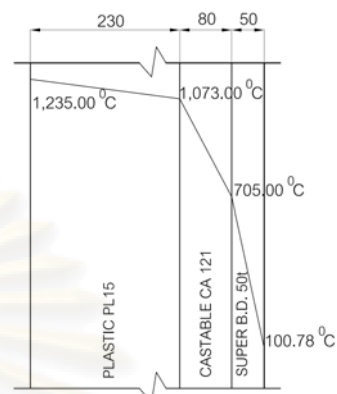
หมายเหตุ CF = ceramic fiber blanket และ Unit (mm)

รูปที่ ๓.4 อุณหภูมิฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงเร่งเตา

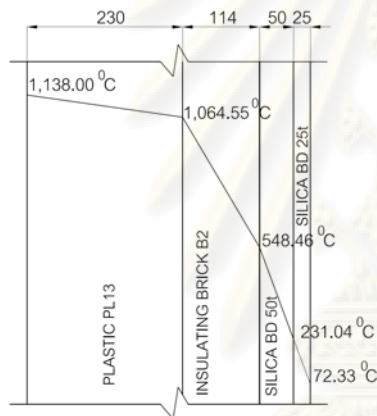
1.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนปัจจุบันของเตาเผาเหล็กของ บ. ที ที เอส สตีล จำกัด



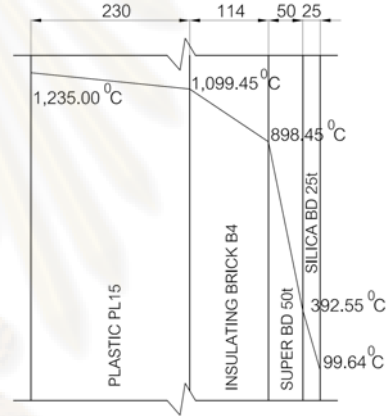
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



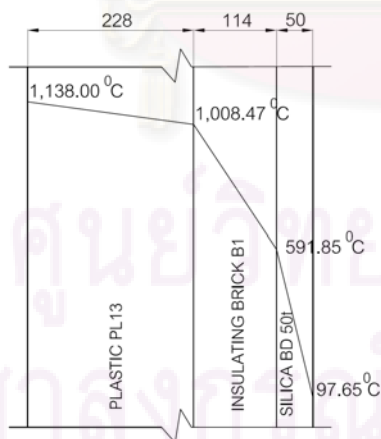
(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



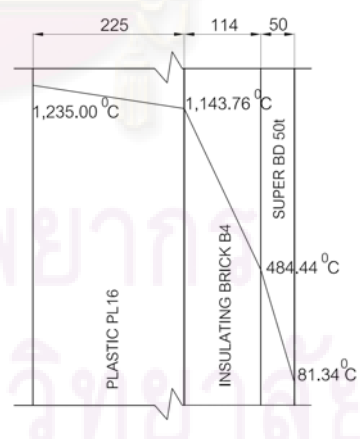
(c) ด้านแท่นรีดและรดยิงเหล็ก heating zone



(d) แท่นรีดและรดยิงเหล็กsoaking zone



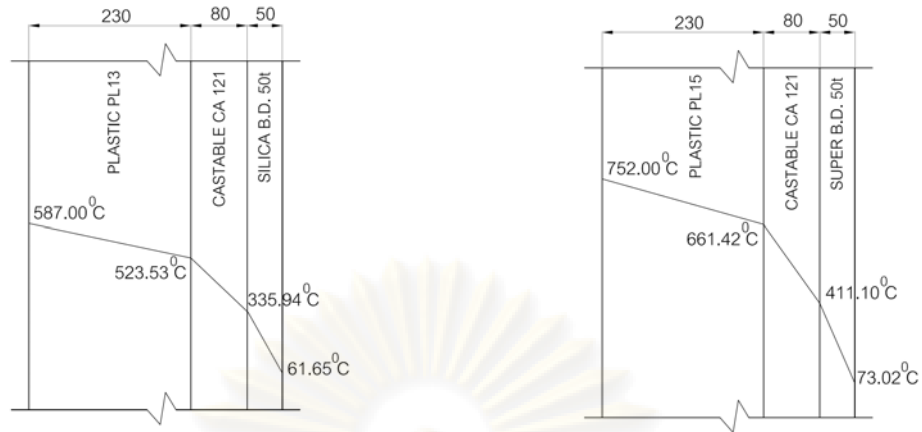
(e) ผนังเตาด้านหน้า



(f) ผนังเตาด้านหลัง

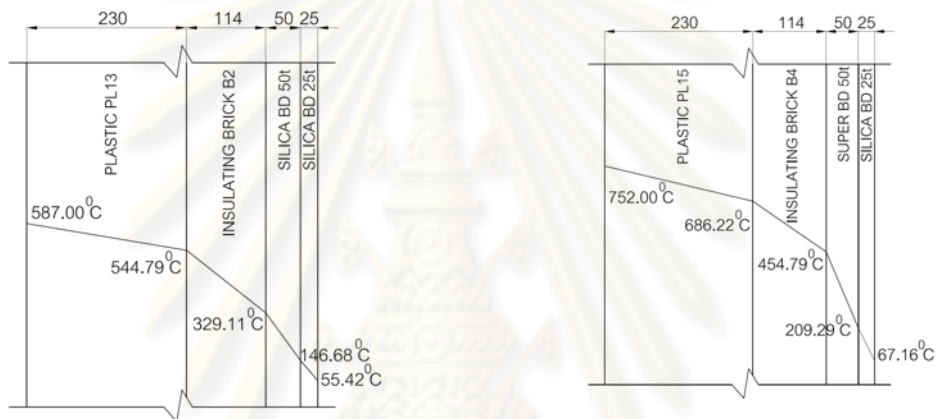
หมายเหตุ Unit (mm)

รูปที่ ๓.5 อุณหภูมิฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงรีดเหล็ก



(a) ผนังเตาหลังคา heating zone

(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone

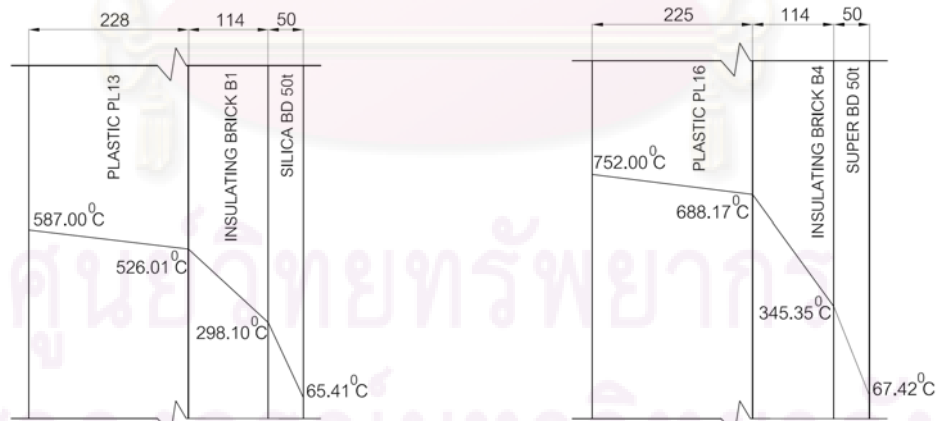


(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรอยยิงเหล็ก heating zone

(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรอยยิงเหล็ก soaking zone

heating zone

soaking zone



(e) ผนังเตาด้านหน้า heating zone

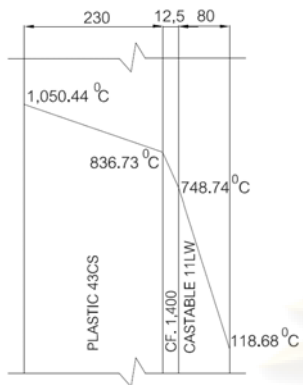
(f) ผนังเตาด้านหลัง soaking zone

หมายเหตุ Unit (mm)

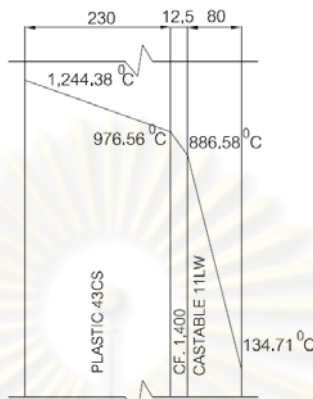
รูปที่ ๖.6 อุณหภูมิจนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก

บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีจนวนปัจจุบัน ช่วงเร่งเตา

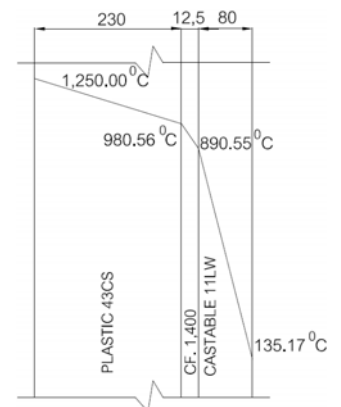
1.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กของ บ. แอล พี เอ็น  
เพลมิล จำกัด (มหาชน)



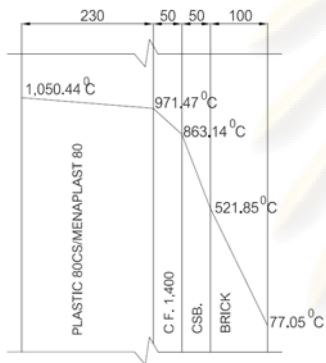
(a) ผนังเตาด้านหลังคา preheating zone



(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone

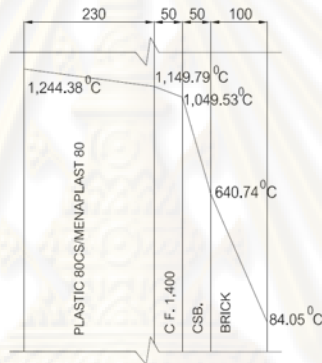


(c) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



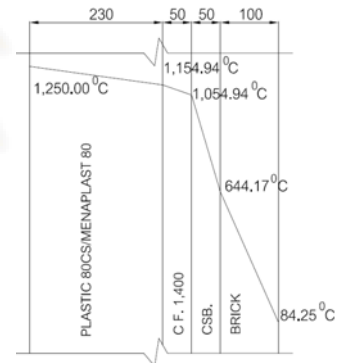
(d) ผนังเตาด้านแท่นรีดและวาง slab

preheating zone



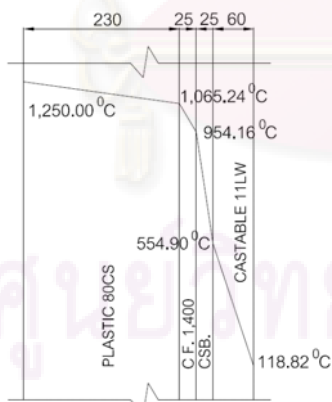
(e) ผนังเตาด้านแท่นรีดและวาง slab

heating zone

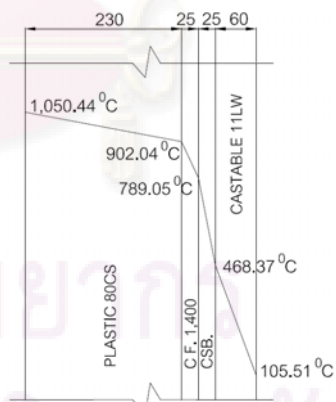


(f) ผนังเตาด้านแท่นรีดและวาง slab

soaking zone



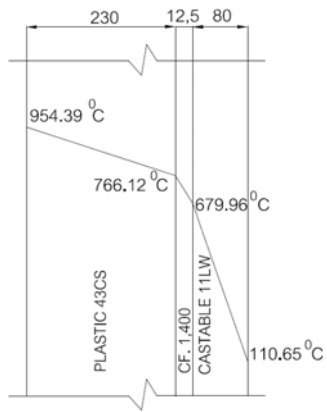
(g) ผนังเตาด้านหน้า



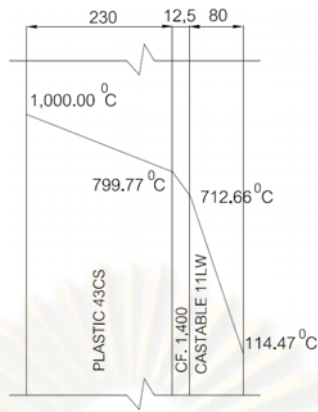
(h) ผนังเตาด้านหลัง

หมายเหตุ Unit (mm), CF = ceramic fiber blanket และ CSB = calcium silicate board

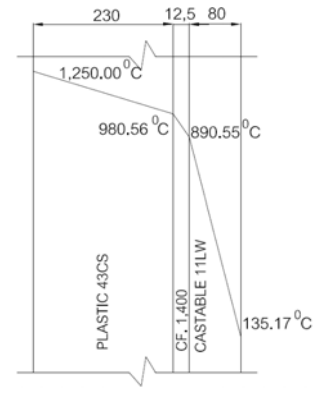
รูปที่ ๗.7 อุณหภูมิฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก  
บ.แอล พี เอ็น เพลมิล จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงรีดเหล็ก



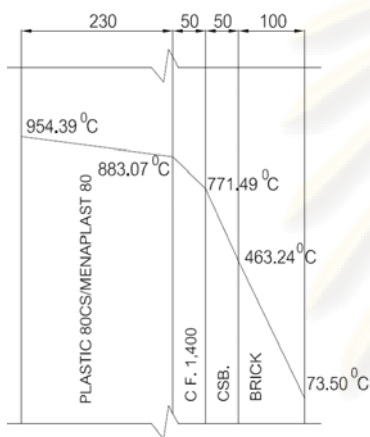
(a) ผนังเตาด้านหลังคา preheating zone



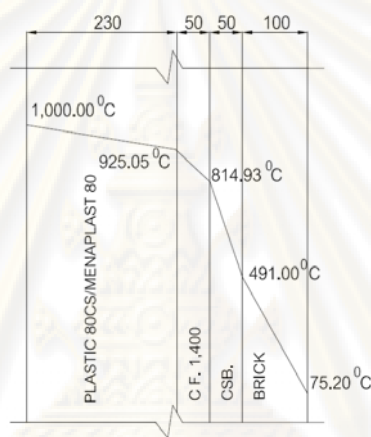
(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



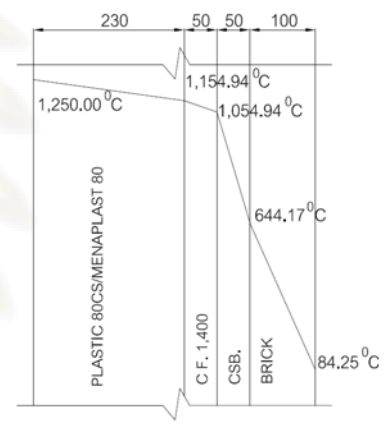
(c) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



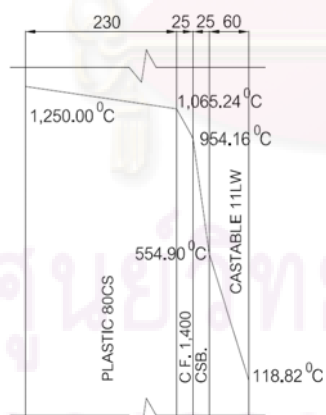
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและวาง slab preheating zone



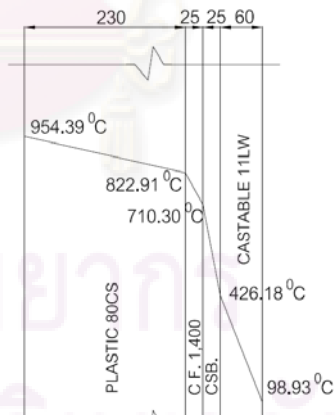
(e) ผนังเตาด้านแทนรีดและวาง slab heating zone



(f) ผนังเตาด้านแทนรีดและวาง slab soaking zone



(g) ผนังเตาด้านหน้า



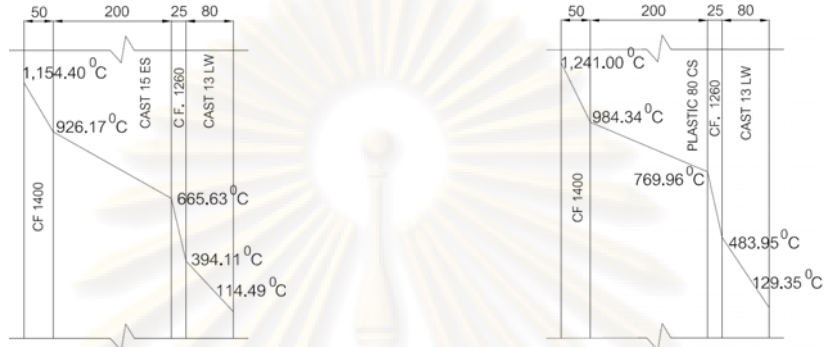
(h) ผนังเตาด้านหลัง

หมายเหตุ Unit (mm), CF = ceramic fiber blanket และ CSB = calcium silicate board

รูปที่ ๘.๘ อุณหภูมิฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิค จำกัด (มหาชน) กรณีฉนวนปัจจุบัน ช่วงเร่งเตา

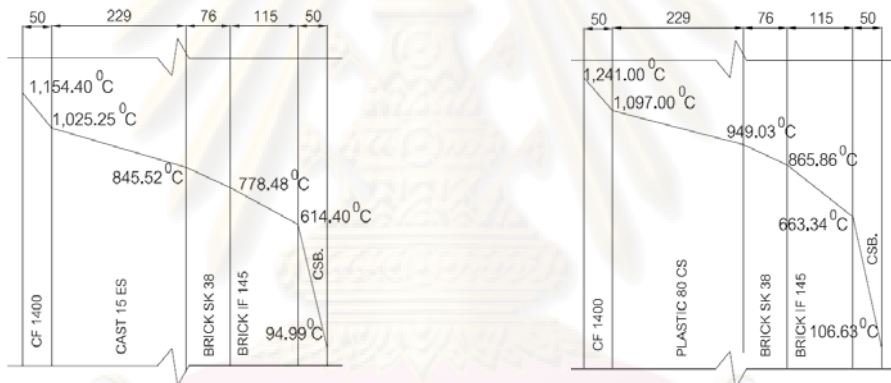
2. การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กของโรงงานตัวอย่างหลังการปรับปรุง

2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) หลังการปรับปรุงด้วยกรณี 1



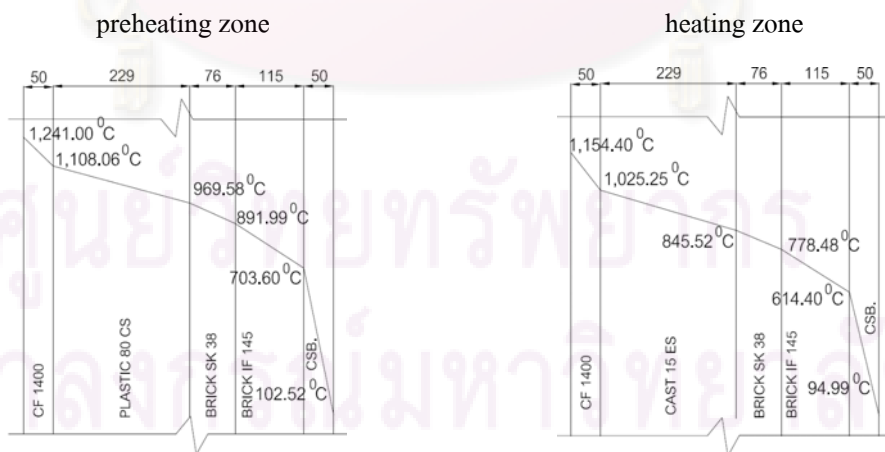
(a) ผนังเตาด้านหลังคา pre-heating zone

(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรยึงเหล็ก preheating zone

(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรยึงเหล็ก heating zone

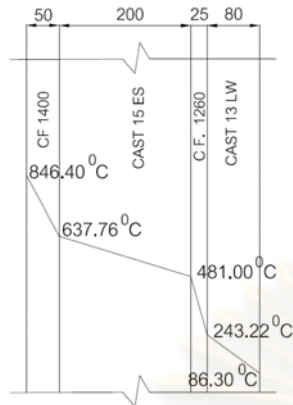


(a) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

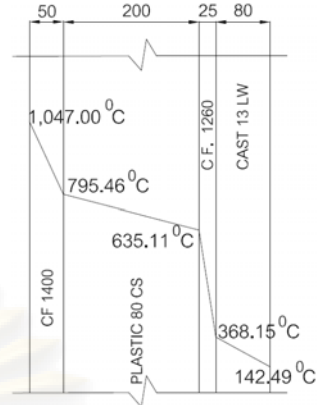
(b) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

Unit (mm), CF = ceramic fiber CSB = calcium silicate board

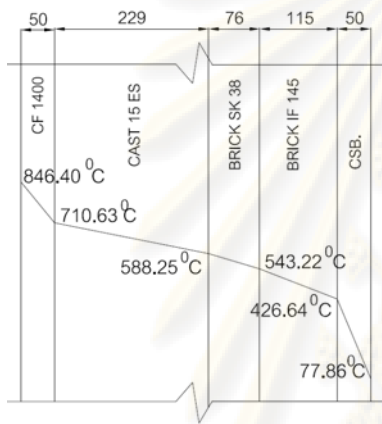
รูปที่ ๓.9 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.กรุงเทพมหานคร เหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ช่วงรีดเหล็ก



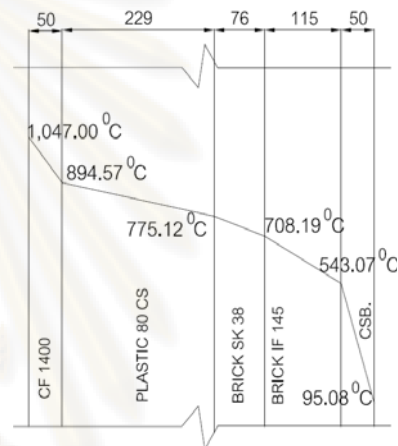
(a) ผนังเตาด้านหลังคา pre-heating zone



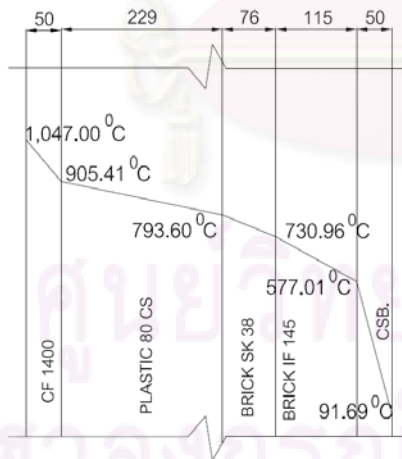
(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



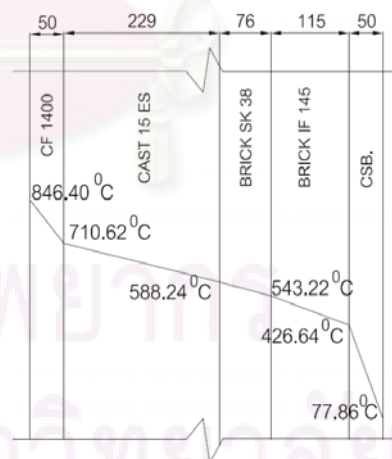
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรยิงเหล็ก preheating zone



(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรยิงเหล็ก heating zone



(a) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

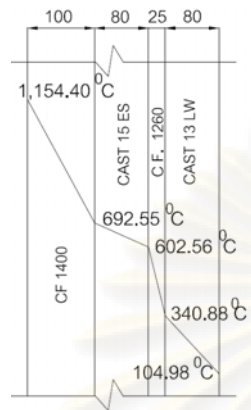


(b) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

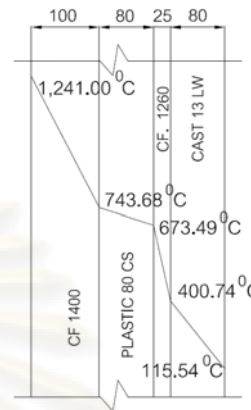
Unit (mm), CF = ceramic fiber, CSB = calcium silicate board

รูปที่ ๑.10 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ช่วงเร่งเตา

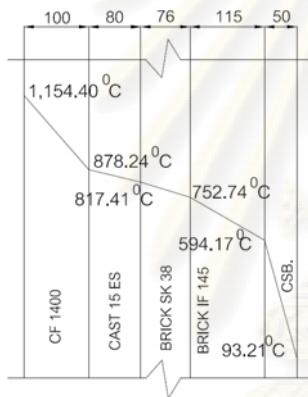
2.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร  
เหล็ก จำกัด (มหาชน) เมื่อปรับปรุงด้วยกรณีที่ 2



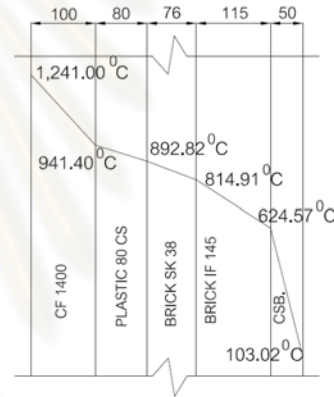
(a) ผนังเตาด้านหลังคา preheating zone



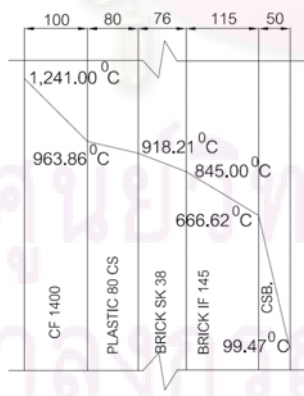
(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



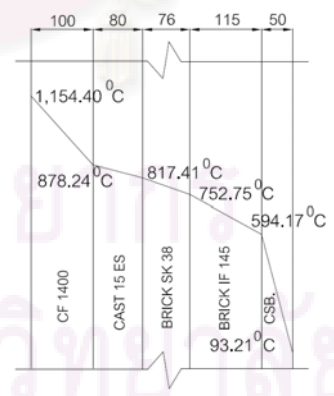
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก  
preheating zone



(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก  
heating zone



(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

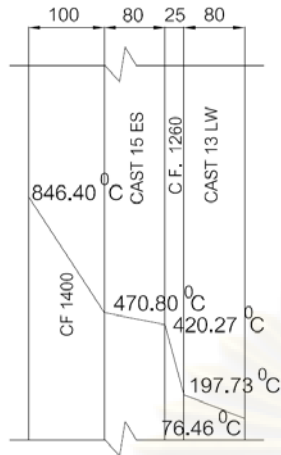


(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

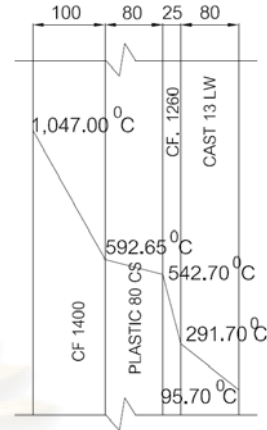
Unit (mm), CF = ceramic fiber และ CSB = calcium silicate board

รูปที่ ๑.11 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.กรุงเทพมหานครเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 100 mm ช่วงรีดเหล็ก

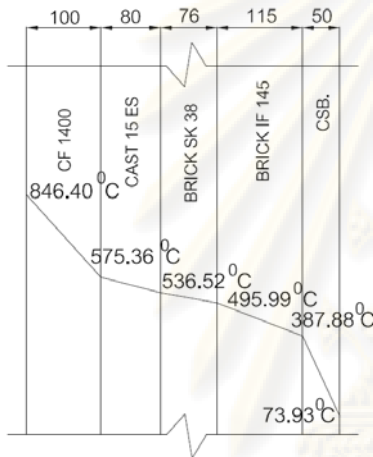




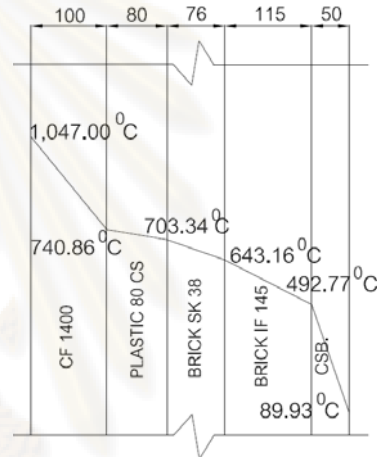
(a) ผนังเตาด้านหลังคา preheating zone



(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



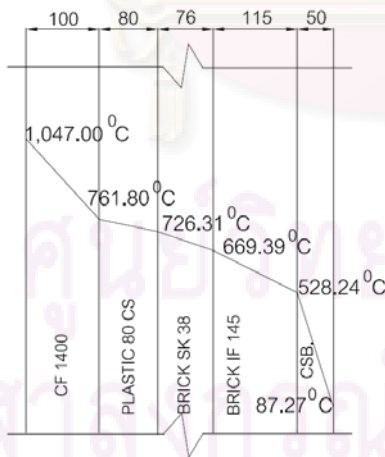
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก



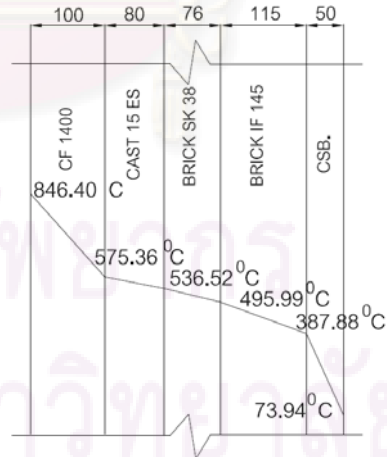
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก

preheating zone

heating zone



(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

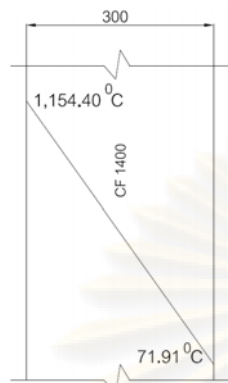


(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

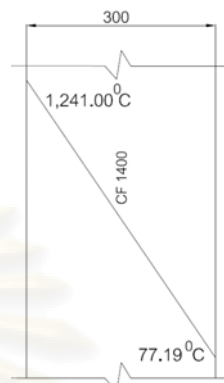
Unit (mm), CF = ceramic fiber และ CSB = calcium silicate board

รูปที่ ๑.12 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 100 mm ช่วงเร่งเตา

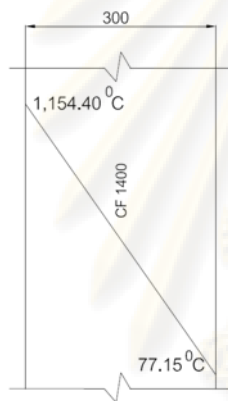
2.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. กรุงเทพมหานคร  
เหล็ก จำกัด (มหาชน) เมื่อปรับปรุงด้วยกรณีที่ 3



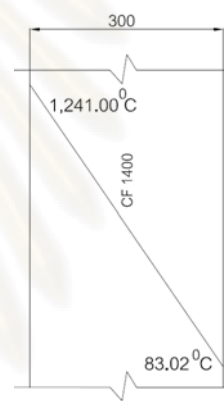
(a) ผนังเตาด้านหลังคา preheating zone



(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



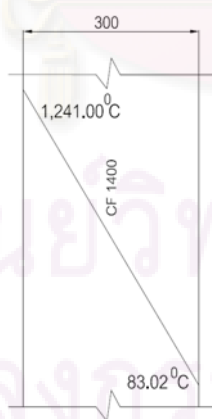
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิงเหล็ก



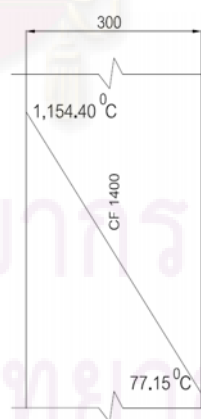
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิงเหล็ก

preheating zone

heating zone



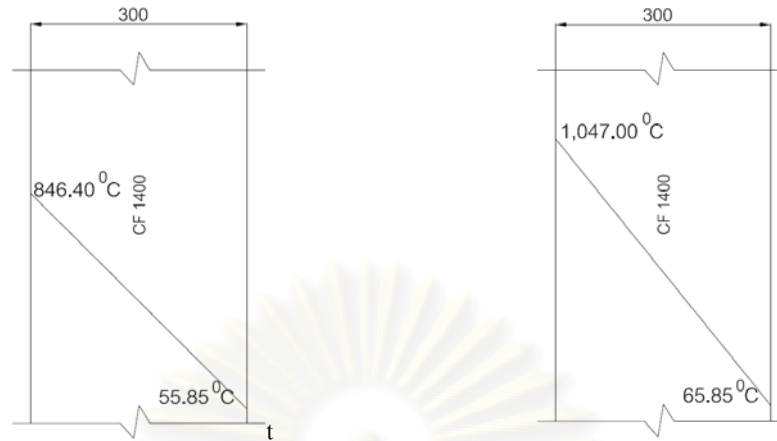
(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก



(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

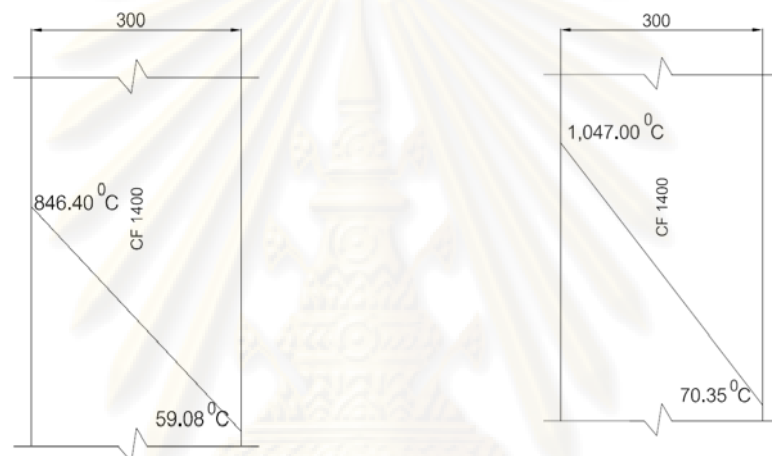
Unit (mm), CF = ceramic fiber

รูปที่ จ.13 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.กรุงเทพมหานคร  
จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงรีดเหล็ก



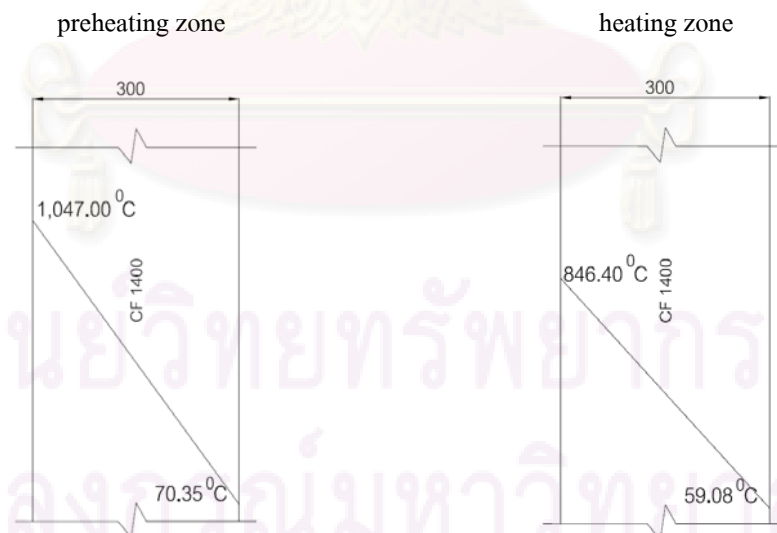
(a) ผนังเตาด้านหลังคา preheating zone

(b) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก

(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก



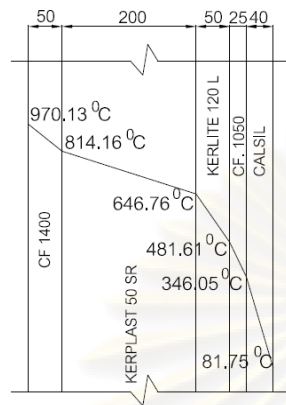
(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

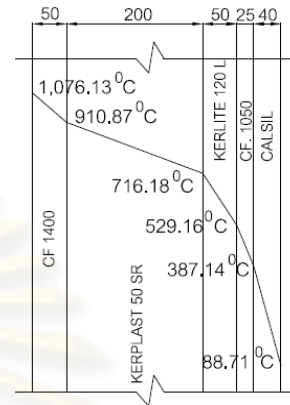
Unit (mm), CF = ceramic fiber

รูปที่ ๑๔. อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงเร่งเตา

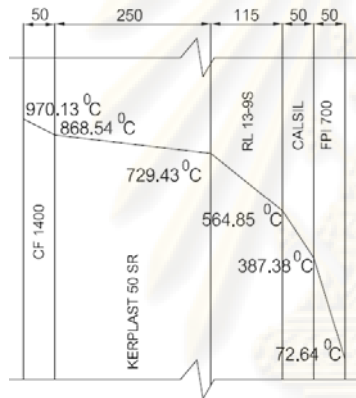
2.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กไทย จำกัด (มหาชน) เมื่อปรับปรุงด้วยกรณีที่ 1



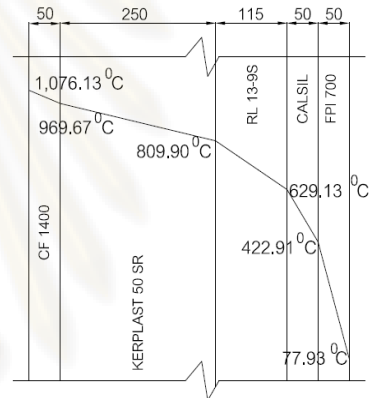
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



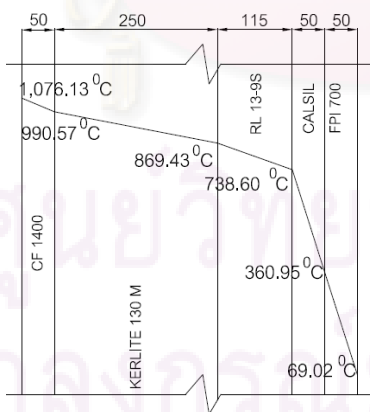
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิงเหล็ก



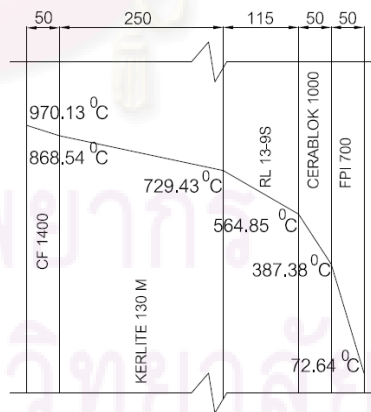
(d) ผนังเตาด้านหลังคาแทนรีดและรดยิงเหล็ก

heating zone

เหล็ก soaking zone



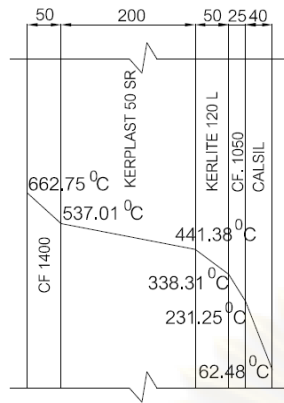
(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก



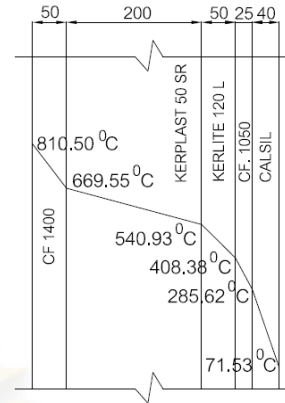
(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

Unit (mm), CF = ceramic fiber

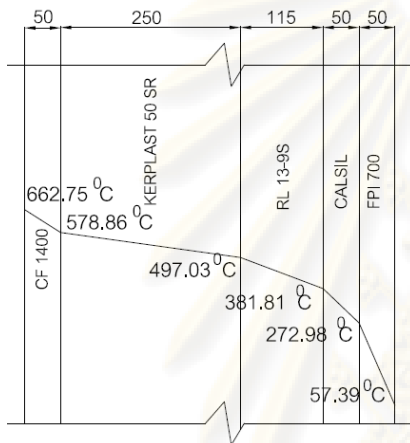
รูปที่ จ.15 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ช่วงรีดเหล็ก



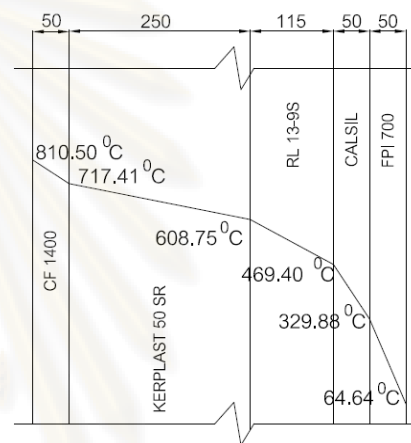
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



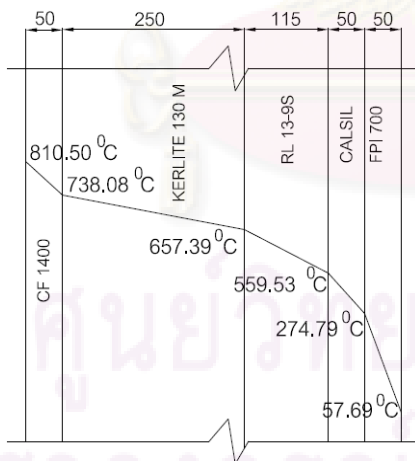
(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



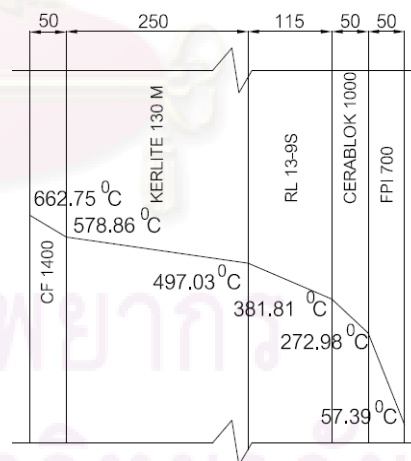
(c) ผนังเตาด้านหน้ารีดและรยึงเหล็ก heating zone



(d) ผนังเตาด้านหลังคาแทนรีดและรยึงเหล็ก soaking zone



(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

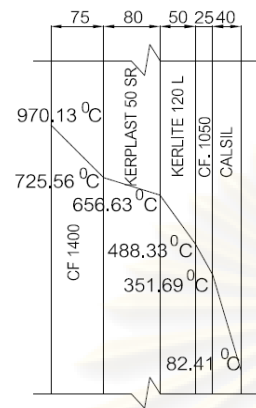


(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

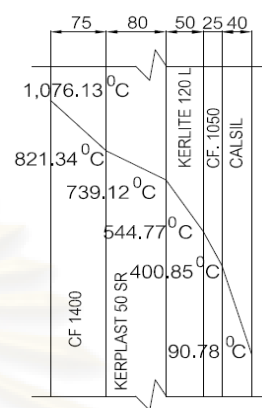
Unit (mm), CF = ceramic fiber

รูปที่ 16 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ช่วงเร่งเตา

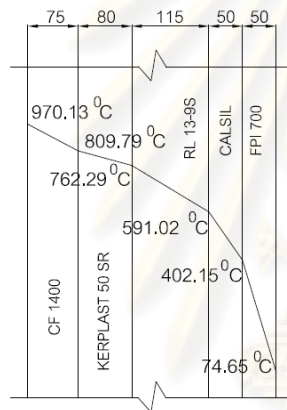
2.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กไทย จำกัด (มหาชน) เมื่อปรับปรุงด้วยกรณีที่ 2



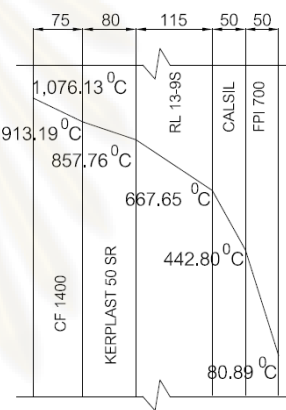
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



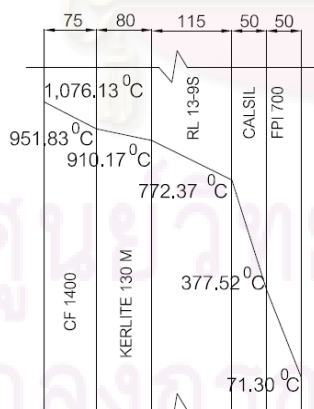
(c) ผนังเตาด้านแท่นรีดและรดยิงเหล็ก



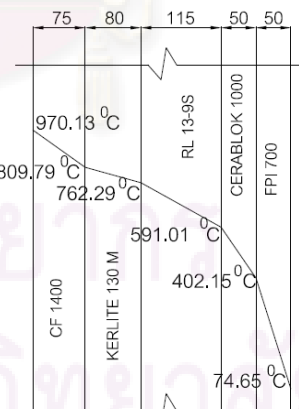
(d) ผนังเตาด้านหลังคาแท่นรีดและรดยิงเหล็ก

heating zone

soaking zone



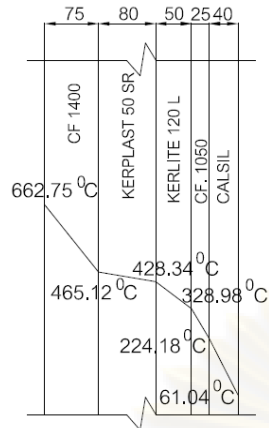
(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก



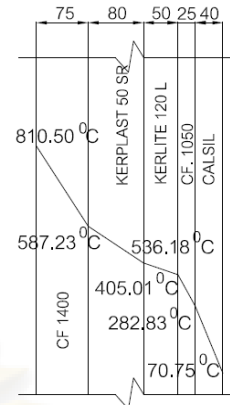
(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

Unit (mm), CF = ceramic fiber

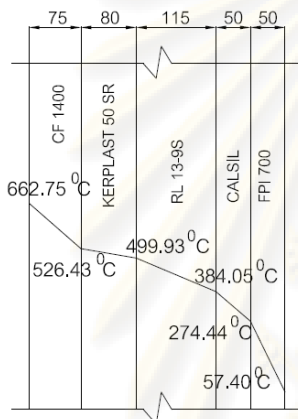
รูปที่ จ.17 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 75 mm ช่วงรีดเหล็ก



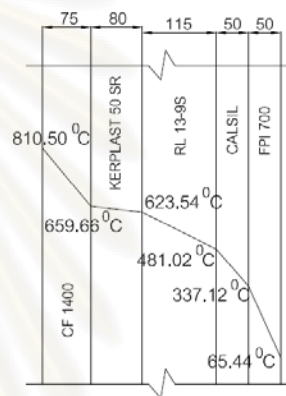
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



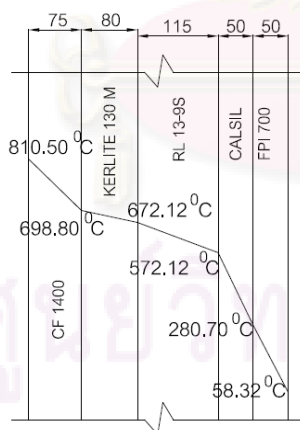
(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



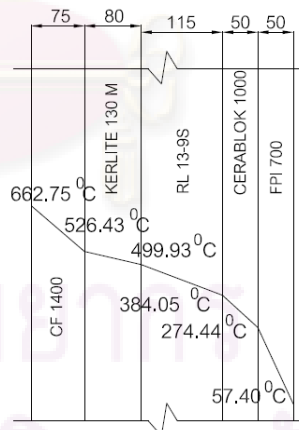
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรอยยิงเหล็ก heating zone



(d) ผนังเตาด้านหลังคาแทนรีดและรอยยิงเหล็ก soaking zone



(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

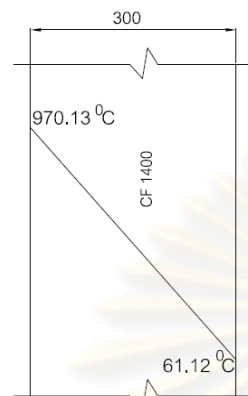


(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

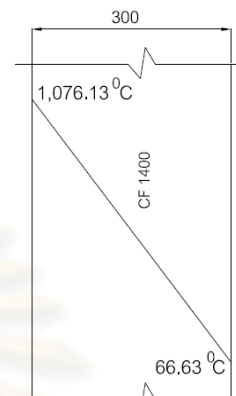
Unit (mm), CF = ceramic fiber

รูปที่ ๑.18 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 75 mm ช่วงเร่งเตา

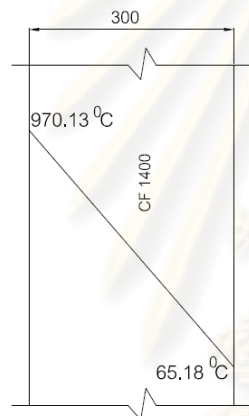
2.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างจนวนของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กไทย จำกัด (มหาชน) เมื่อปรับปรุงด้วยกรณีที่ 3



(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone

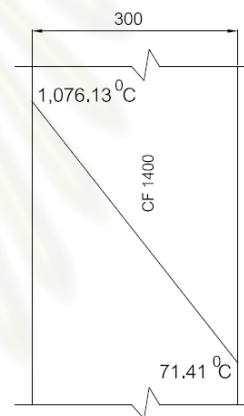


(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



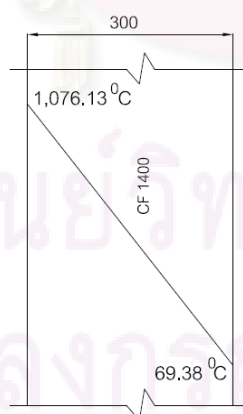
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิงเหล็ก

heating zone

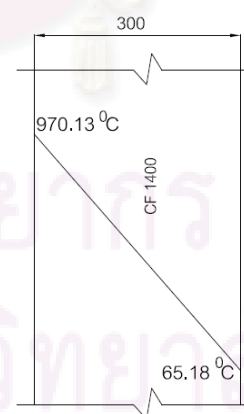


(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิงเหล็ก

soaking zone



(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

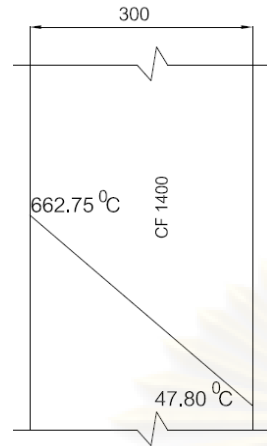


(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

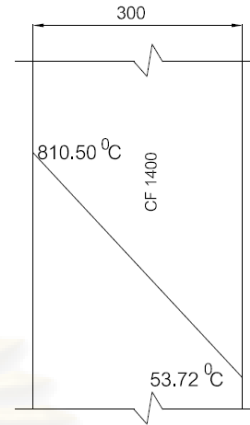
Unit (mm), CF = ceramic fiber

รูปที่ ๑๙ อุณหภูมิของจนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงรีดเหล็ก

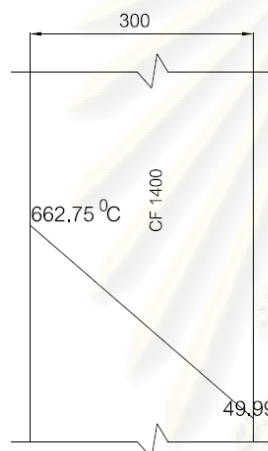




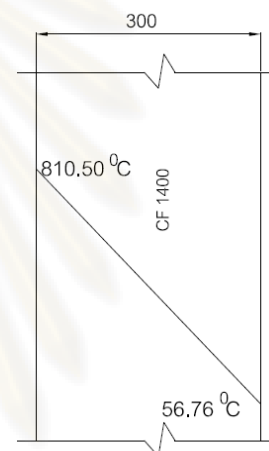
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



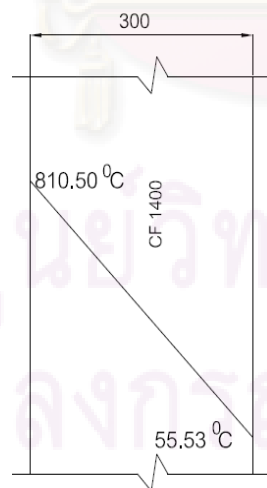
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรยึงเหล็ก



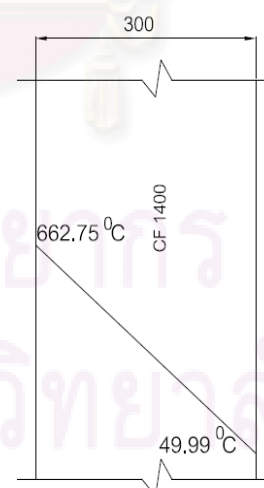
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรยึงเหล็ก

heating zone

soaking zone



(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

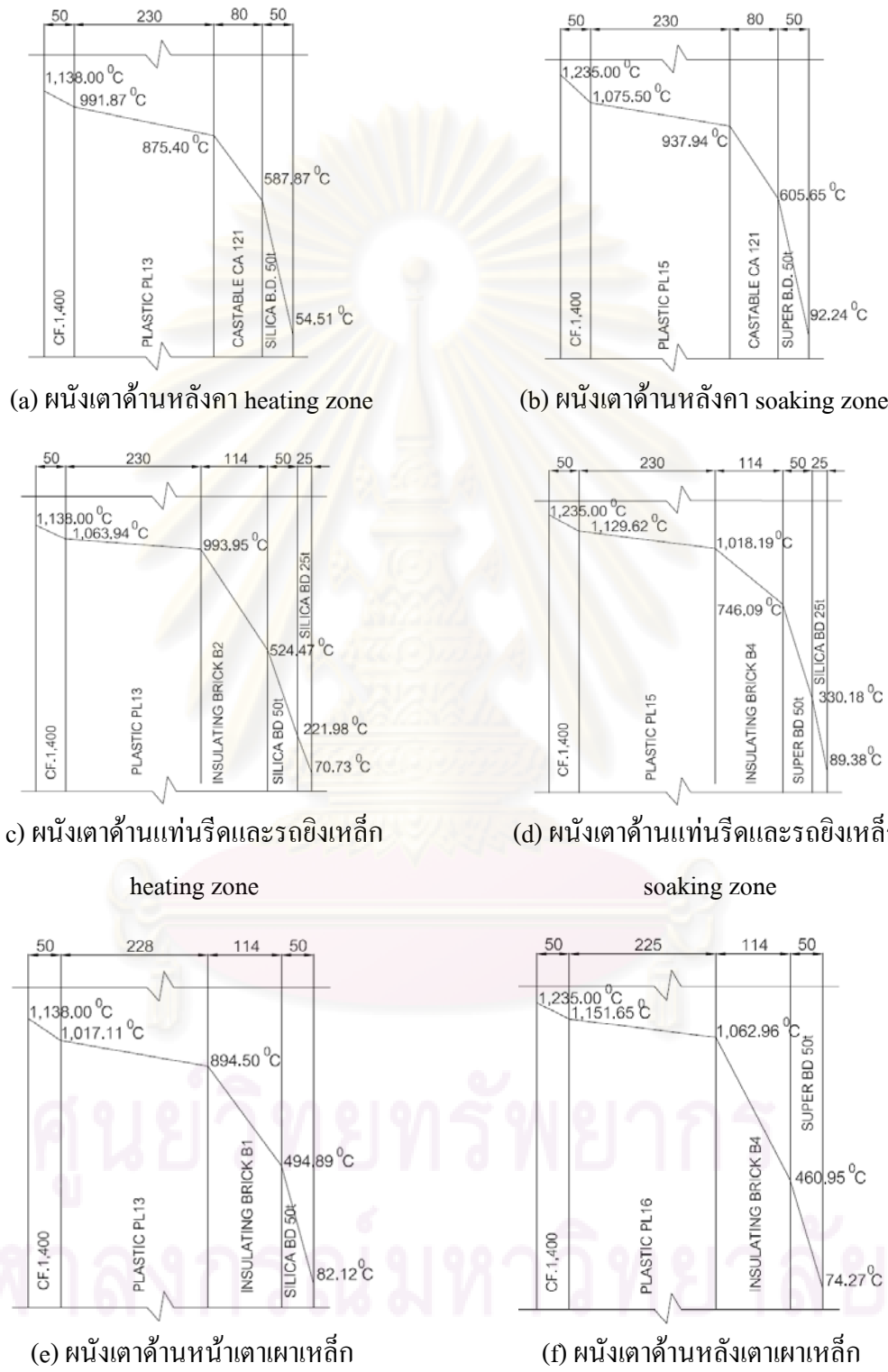


(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

Unit (mm), CF = ceramic fiber

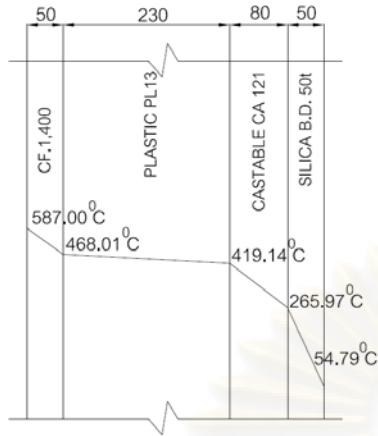
รูปที่ จ.20 อุณหภูมิของจนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไทย จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงเร่งเตา

2.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด เมื่อปรับปรุงด้วยกรณีที่ 1

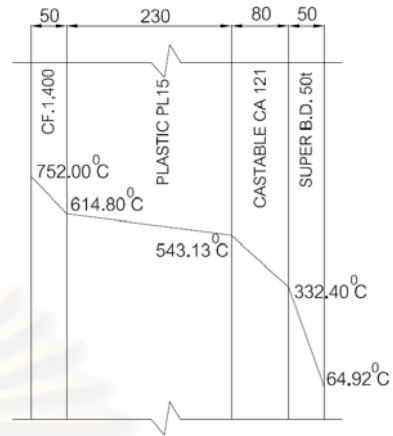


Unit (mm), CF = ceramic fiber

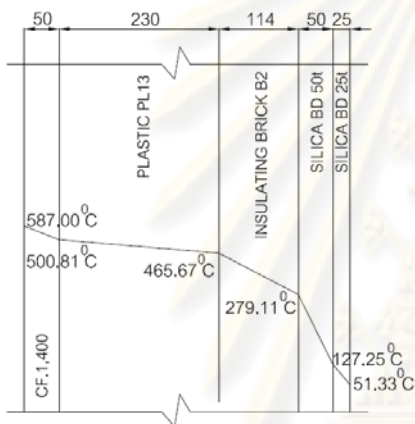
รูปที่ ๓.21 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ช่วงรีดเหล็ก



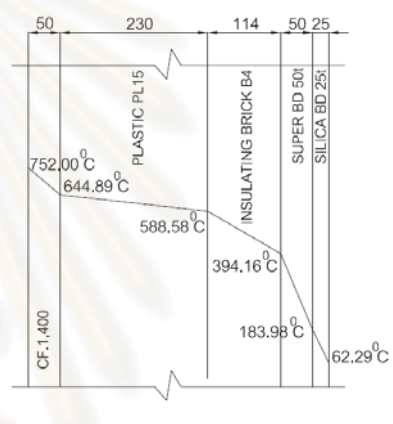
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



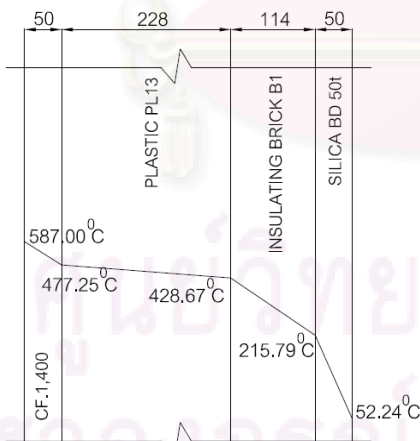
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก



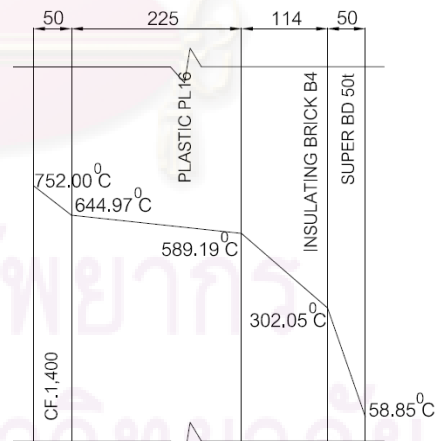
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก

heating zone

soaking zone



(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

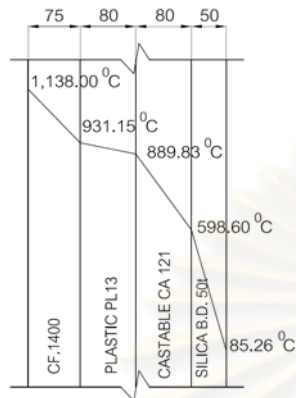


(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

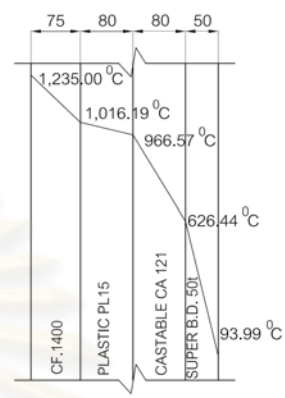
Unit (mm), CF = ceramic fiber

รูปที่ ๓.๒๒ อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด  
 กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ช่วงเร่งเตา

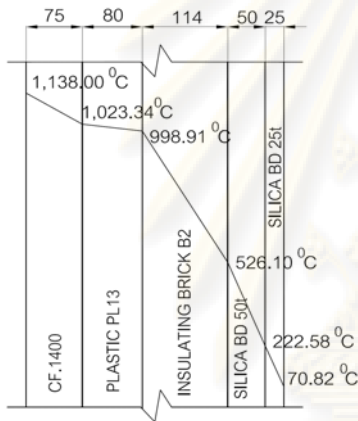
2.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด หลังปรับปรุงด้วยกรณีที่ 2



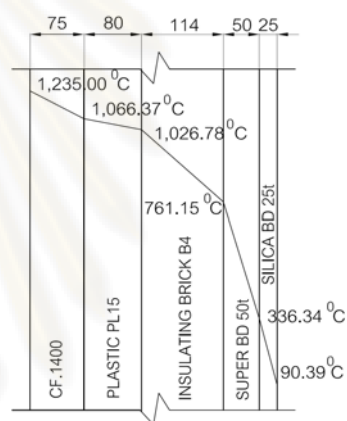
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



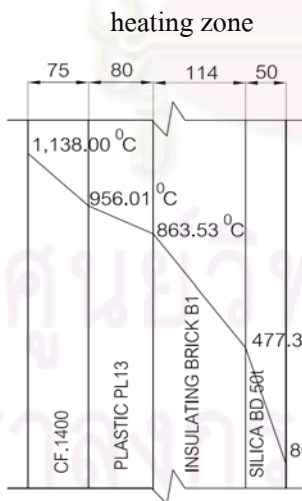
(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



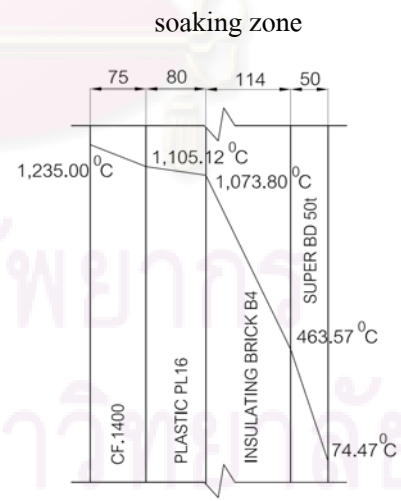
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก heating zone



(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก soaking zone



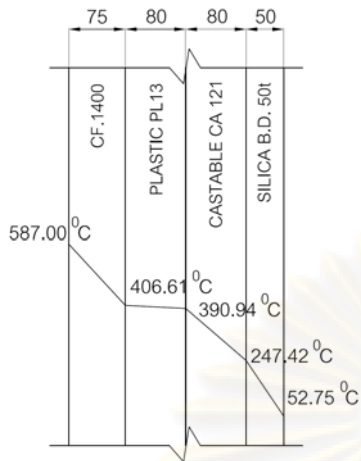
(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก heating zone



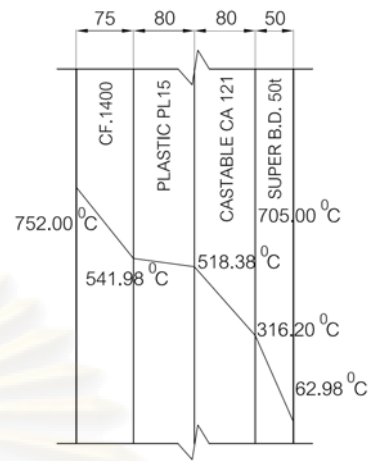
(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก soaking zone

Unit (mm), CF = ceramic fiber

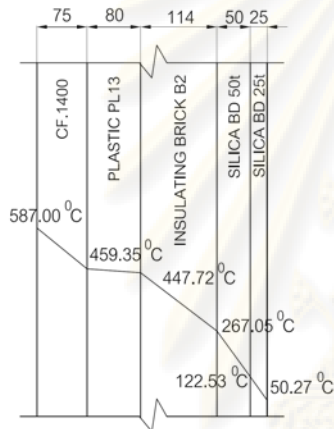
รูปที่ จ.23 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 75 mm ช่วงรีดเหล็ก



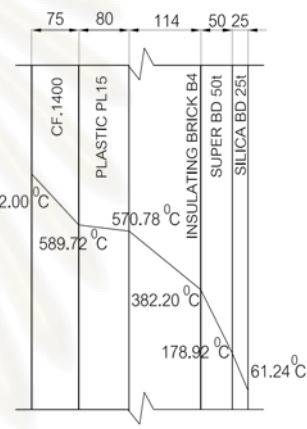
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



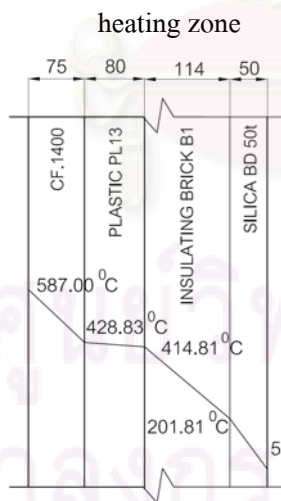
(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



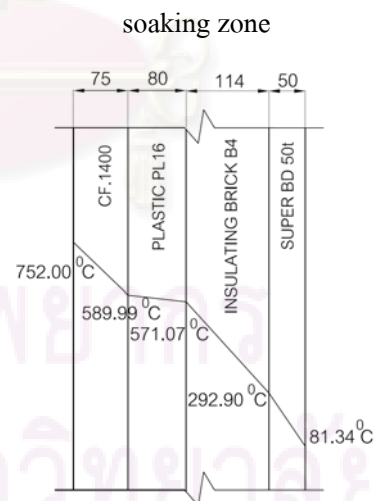
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก



(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก



(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

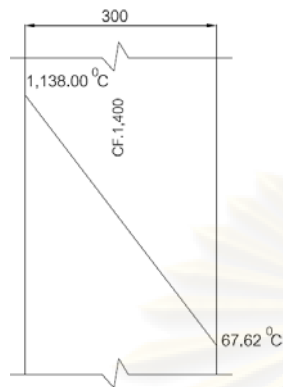


(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

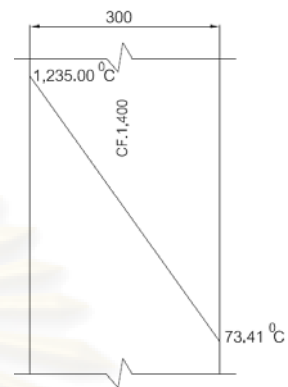
Unit (mm), CF = ceramic fiber

รูปที่ ๓.24 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก  
 บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 75 mm ช่วงเร่งเตา

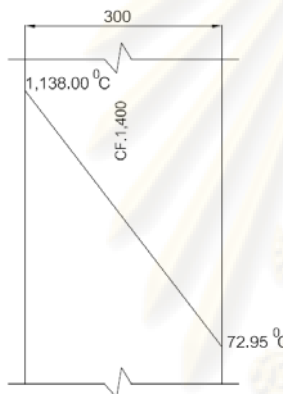
2.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. ที ที เอส สตีล  
จำกัด หลังปรับปรุงด้วยกรณีที่ 3



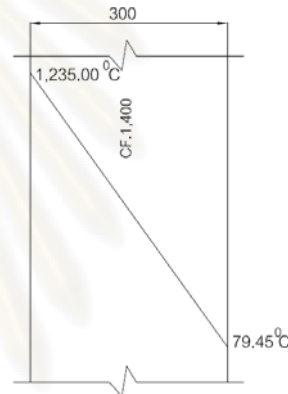
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



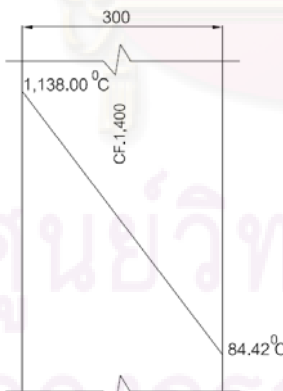
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก



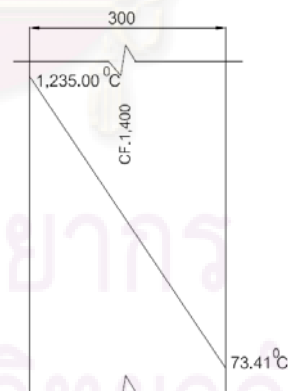
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรดยิ่งเหล็ก

heating zone

soaking zone



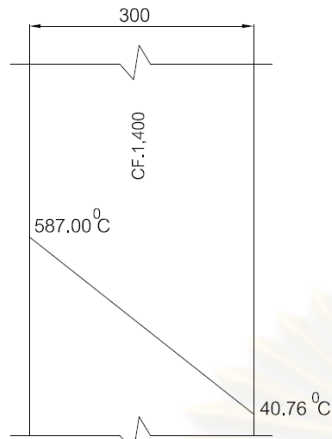
(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก



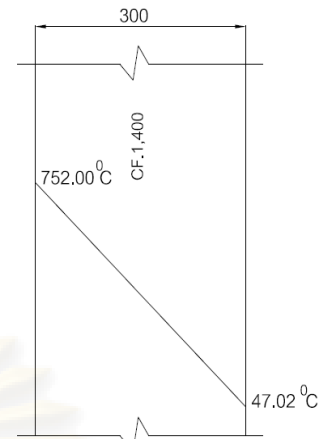
(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

Unit (mm), CF = ceramic fiber

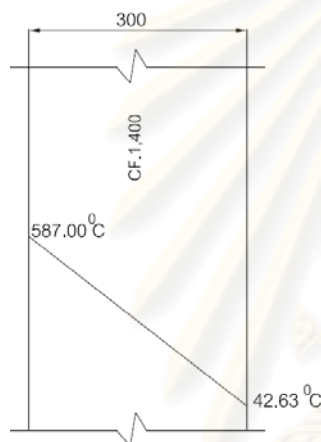
รูปที่ จ.25 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก  
บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงรีดเหล็ก



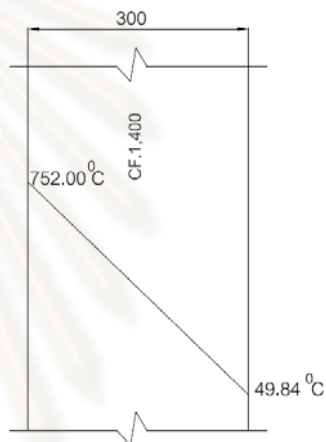
(a) ผนังเตาด้านหลังคา heating zone



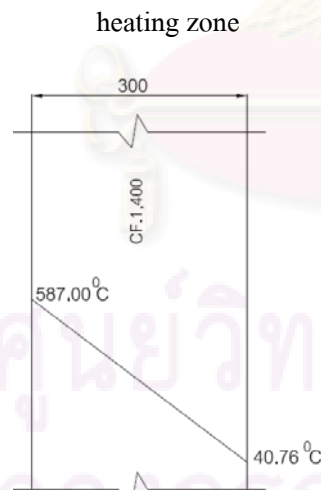
(b) ผนังเตาด้านหลังคา soaking zone



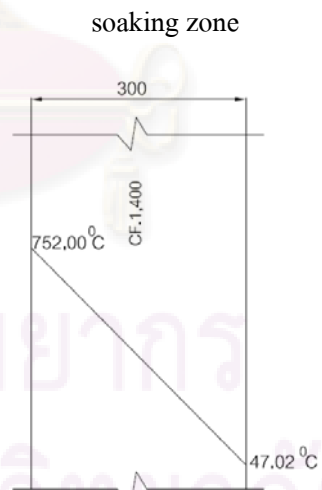
(c) ผนังเตาด้านแทนรีดและรยึงเหล็ก



(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและรยึงเหล็ก



(e) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

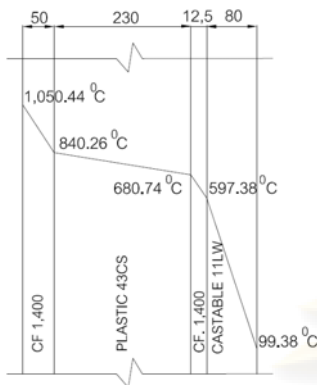


(f) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

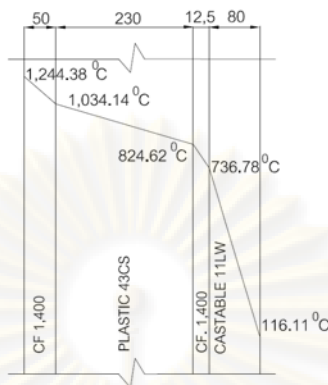
Unit (mm), CF = ceramic fiber

รูปที่ จ.26 อุณหภูมิของจนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก  
 บ. ที ที เอส สตีล จำกัด กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงเร่งเตา

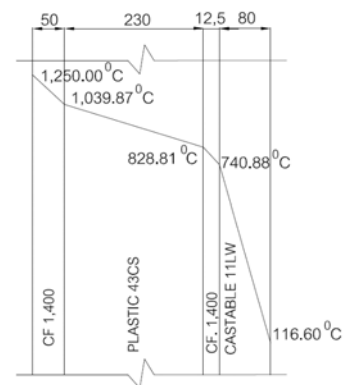
2.10 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพท  
มิล จำกัด (มหาชน) หลังปรับปรุงด้วยกรณีที่ 1



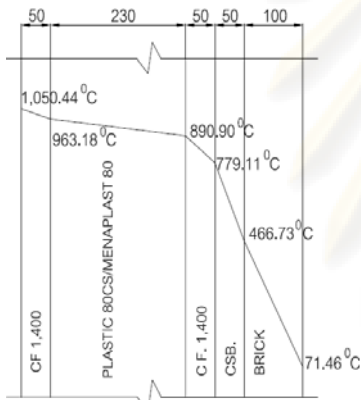
(a) ผนังเตาด้านหลังคา  
preheating zone



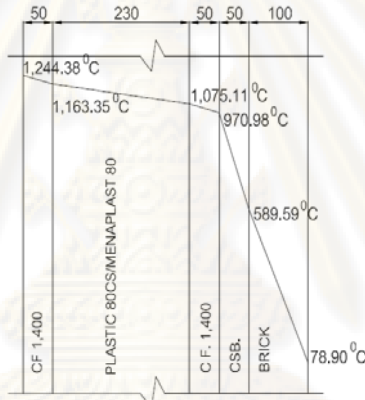
(b) ผนังเตาด้านหลังคา  
heating zone



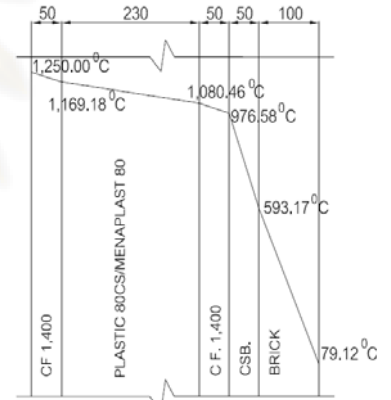
(c) ผนังเตาด้านหลังคา  
soaking zone



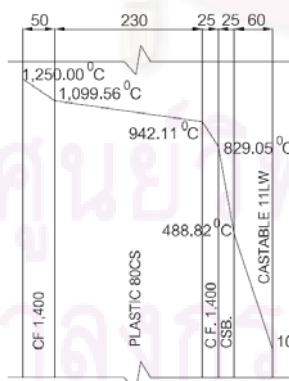
(d) ผนังเตาด้านแทนริดและที่วาง  
slab preheating zone



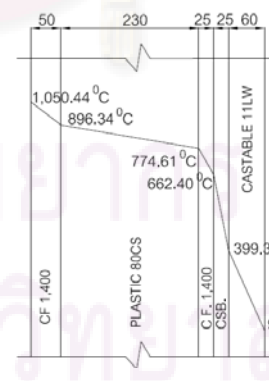
(e) ผนังเตาด้านแทนริดและที่วาง  
slab heating zone



(f) ผนังเตาด้านแทนริดและที่วาง  
slab soaking zone



(g) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

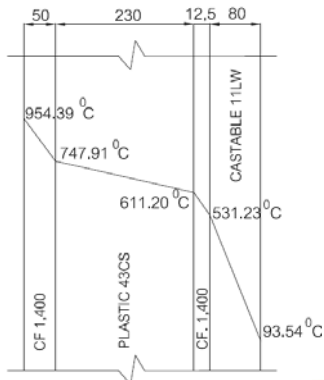


(h) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

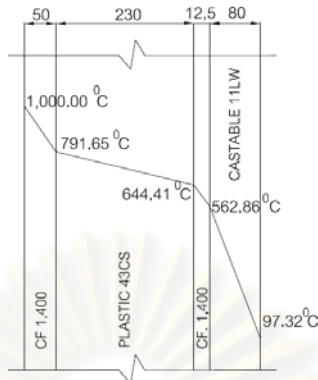
Unit (mm), CF = ceramic fiber และ CSB = calcium silicate board

รูปที่ ๓.27 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพท  
มิล จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ช่วงริดเหล็ก

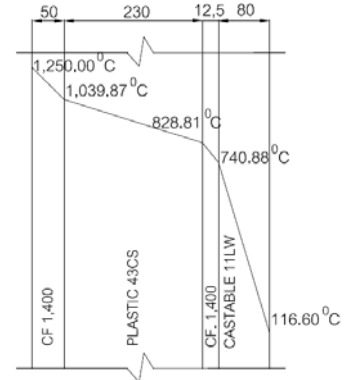




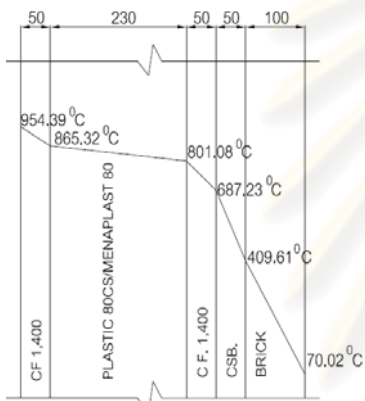
(a) ผนังเตาด้านหลังคา  
preheating zone



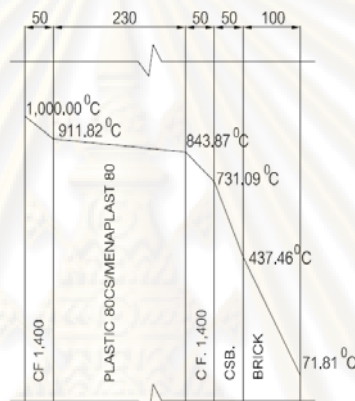
(b) ผนังเตาด้านหลังคา  
heating zone



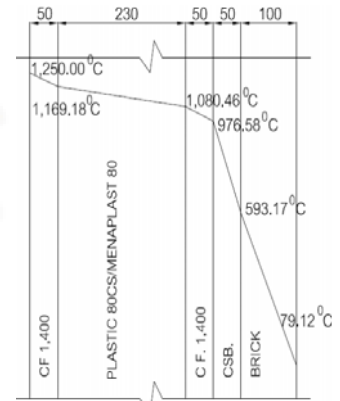
(c) ผนังเตาด้านหลังคา  
soaking zone



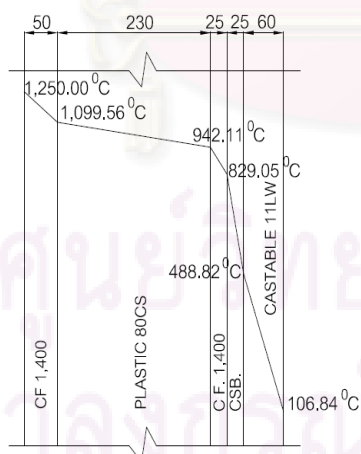
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง slab  
preheating zone



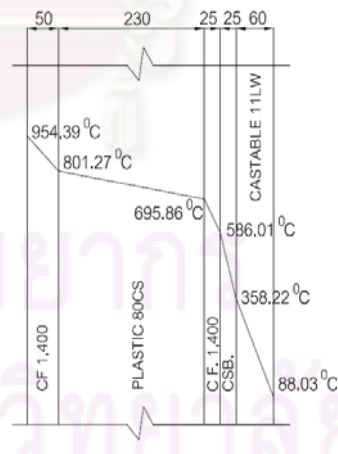
(e) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง slab  
slab heating zone



(f) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง slab  
slab soaking zone



(g) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

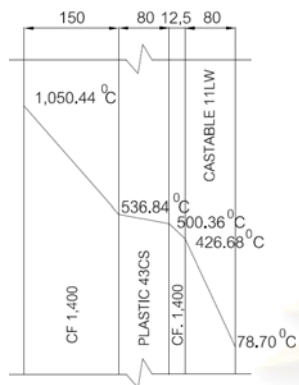


(h) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

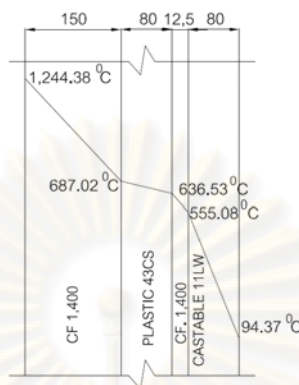
Unit (mm), CF = ceramic fiber และ CSB = calcium silicate board

รูปที่ ๓.๒๘ อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ช่วงเร่งเตา

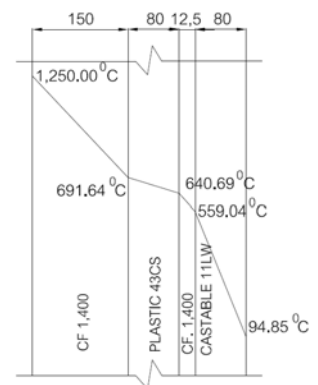
2.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน) หลังปรับปรุงด้วยกรณีที่ 2



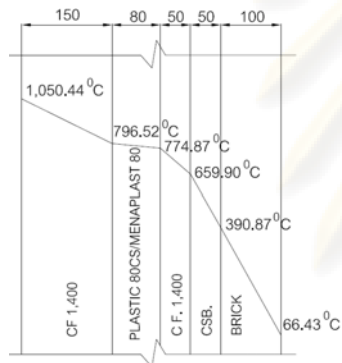
(a) ผนังเตาด้านหลังคา  
preheating zone



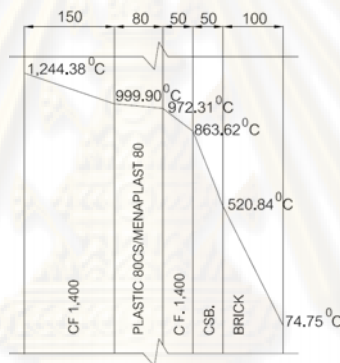
(b) ผนังเตาด้านหลังคา  
heating zone



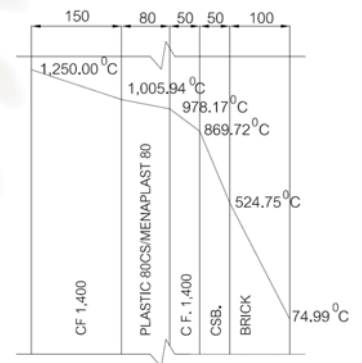
(c) ผนังเตาด้านหลังคา  
soaking zone



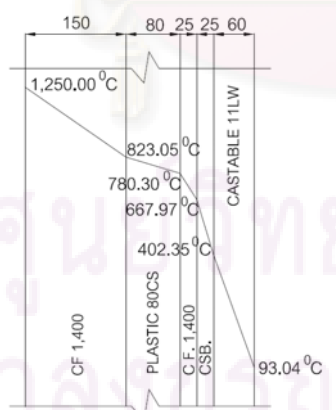
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง  
slab preheating zone



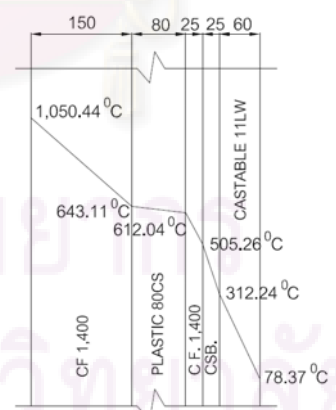
(e) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง  
slab heating zone



(f) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง  
slab soaking zone



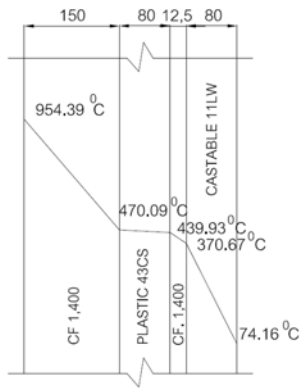
(g) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก



(h) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

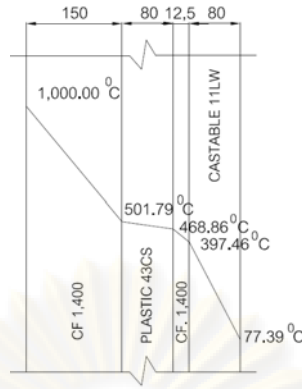
Unit (mm), CF = ceramic fiber และ CSB = calcium silicate board

รูปที่ จ.29 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 150 mm ช่วงรีดเหล็ก



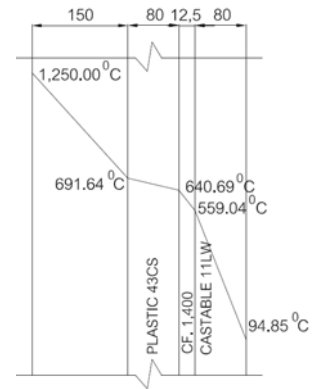
(a) ผนังเตาด้านหลังคา

preheating zone



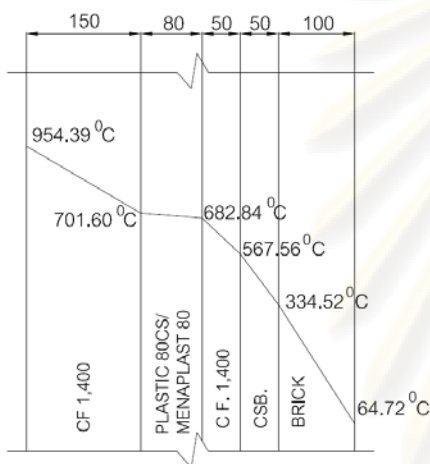
(b) ผนังเตาด้านหลังคา

heating zone



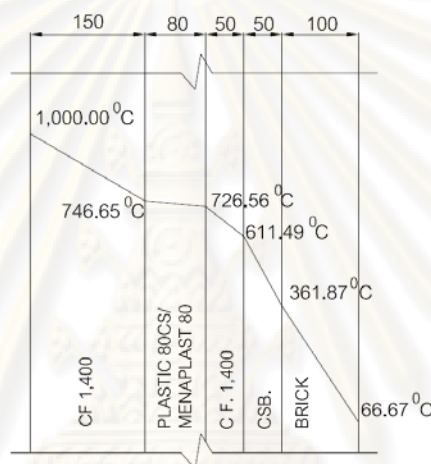
(c) ผนังเตาด้านหลังคา

soaking zone



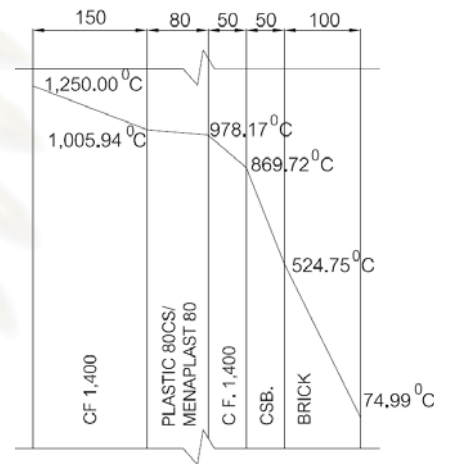
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง

slab preheating zone



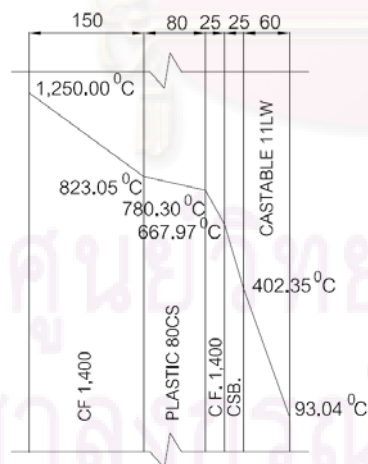
(e) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง slab

heating zone

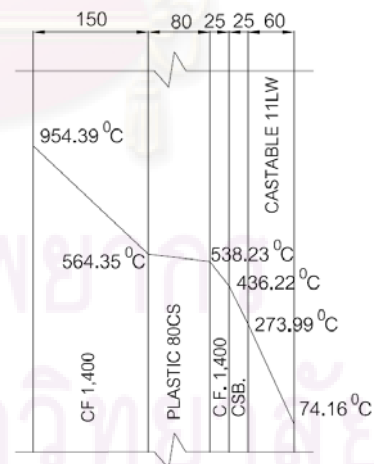


(f) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง

slab soaking zone



(g) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก

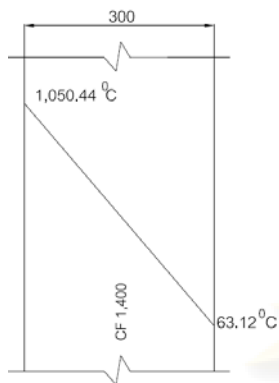


(h) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

Unit (mm), CF = ceramic fiber และ CSB = calcium silicate board

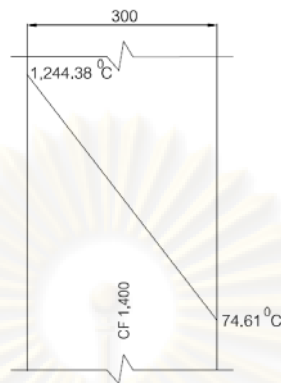
รูปที่ ๓.30 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิล จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 150 mm ช่วงเร่งเตา

2.12 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก บ. แอล พี เอ็น เพท  
มิล จำกัด (มหาชน) หลังปรับปรุงด้วยกรณีที่ 3



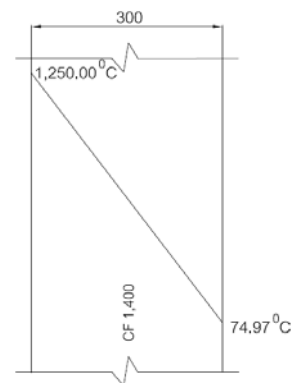
(a) ผนังเตาด้านหลังคา

preheating zone



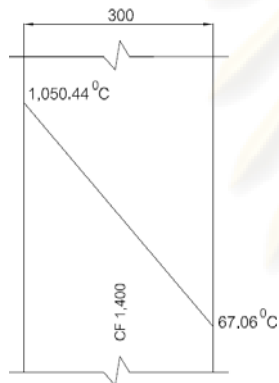
(b) ผนังเตาด้านหลังคา

heating zone



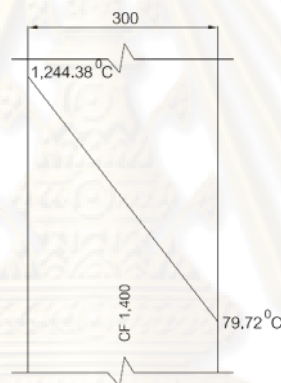
(c) ผนังเตาด้านหลังคา

soaking zone



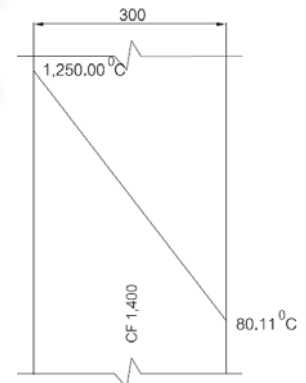
(d) ผนังเตาด้านแท่นรีดและที่วาง

slab preheating zone



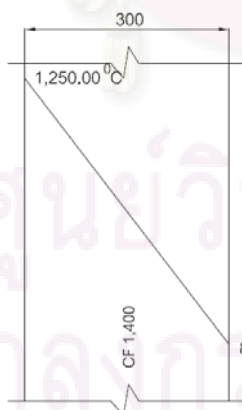
(e) ผนังเตาด้านแท่นรีดและที่วาง

slab heating zone

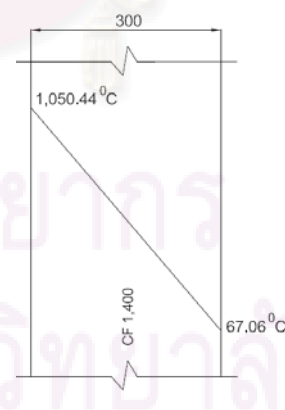


(f) ผนังเตาด้านแท่นรีดและที่วาง

slab soaking zone



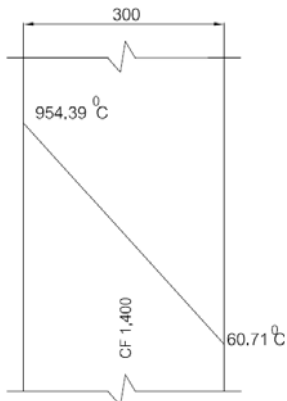
(g) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก



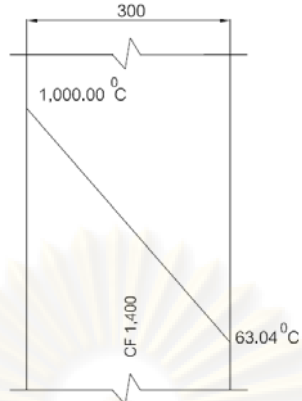
(h) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

Unit (mm), CF = ceramic fiber และ CSB = calcium silicate board

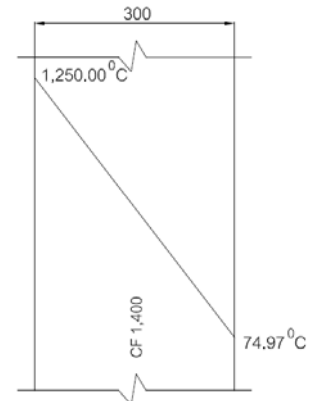
รูปที่ ๓.31 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพท  
มิล จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงรีดเหล็ก



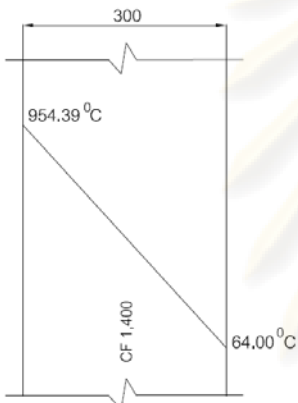
(a) ผนังเตาด้านหลังคา  
preheating zone



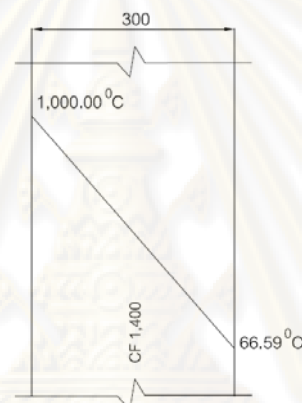
(b) ผนังเตาด้านหลังคา  
heating zone



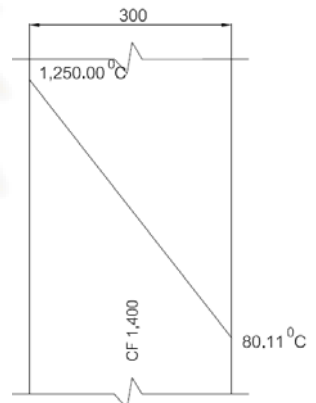
(c) ผนังเตาด้านหลังคา  
soaking zone



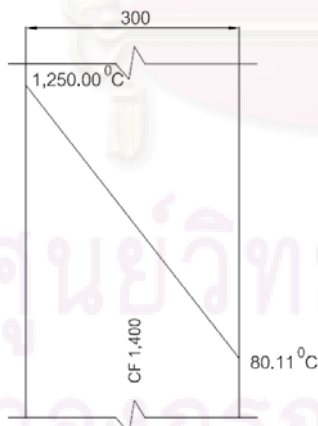
(d) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง  
slab preheating zone



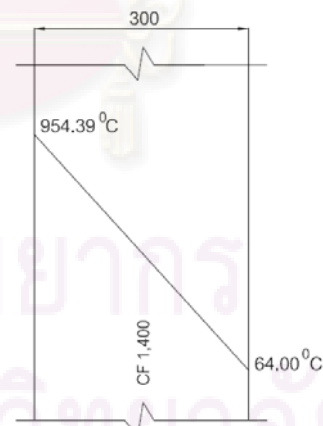
(e) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง  
slab heating zone



(f) ผนังเตาด้านแทนรีดและที่วาง  
slab soaking zone



(g) ผนังเตาด้านหน้าเตาเผาเหล็ก



(h) ผนังเตาด้านหลังเตาเผาเหล็ก

Unit (mm), CF = ceramic fiber และ CSB = calcium silicate board

รูปที่ จ.32 อุณหภูมิของฉนวนแต่ละชั้นของผนังแต่ละด้านของเตาเผาเหล็ก บ.แอล พี เอ็น เพลทมิต  
จำกัด (มหาชน) กรณีปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 300 mm ช่วงเร่งเตา



ภาคผนวก ข  
ราคาคนวนเซรามิกไฟเบอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ข.1 ราคาฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

ตารางที่ ข.1 แสดงราคาเซรามิกไฟเบอร์แบบ felt [15]

Part Number	Description Density/Thickness/Width/Length (inches)	Base Price/Sq. Ft. FOB Tonawanda, N.Y.			
		Less Than 1,000	1,000 4,999	5,000 9,999	10,000 & Over
724261200	LC FELT 6-0.250x24.0x50LF	\$3.21	\$2.50	\$2.31	\$2.25
724261400	LC FELT 6-0.250x48.0x50LF	3.21	2.50	2.31	2.25
724281200	LC FELT 6-0.500x24.0x25LF	4.67	3.64	3.36	3.27
724281400	LC FELT 6-0.500x48.0x25LF	4.67	3.64	3.36	3.27
724311200	LC FELT 6-1.000x24.0x12.5LF	9.56	7.46	6.88	6.69
724311400	LC FELT 6-1.000x48.0x12.5LF	9.56	7.46	6.88	6.69

ตารางที่ ข.2 แสดงราคาเซรามิกไฟเบอร์แบบ Module [15]

Part Number	Description Density/Thickness/Length/Width (inches)	Base Price/Module FOB New Carlisle, Ind. 12 Lb./Ft. <sup>3</sup>		
		Less Than 100	100 - 999	1,000 & Over
795370000	WL1260C 12 4T X 12L X 12W	\$67.32	\$58.84	\$51.16
795380000	WL1260C 12 5T X 12L X 12W	81.90	71.58	62.24
795390000	WL1260C 12 6T X 12L X 12W	94.73	82.79	72.00
795400000	WL1260C 12 7T X 12L X 12W	103.90	90.81	78.96
795410000	WL1260C 12 8T X 12L X 12W	114.13	99.75	86.74
795420000	WL1260C 12 9T X 12L X 12W	125.60	109.77	95.46
795430000	WL1260C 12 10T X 12L X 12W	136.96	119.70	104.09
795440000	WL1260C 12 11T X 12L X 12W	150.32	131.38	114.24
795450000	WL1260C 12 12T X 12L X 12W	159.73	139.60	121.40
795280000	WL1260C 12 4T X 12L X 6W	44.42	38.82	33.76
795290000	WL1260C 12 5T X 12L X 6W	53.92	47.13	40.98
795300000	WL1260C 12 6T X 12L X 6W	57.29	50.07	43.54
795310000	WL1260C 12 7T X 12L X 6W	63.11	55.16	47.96
795320000	WL1260C 12 8T X 12L X 6W	68.92	60.24	52.38
795330000	WL1260C 12 9T X 12L X 6W	76.16	66.56	57.88
795340000	WL1260C 12 10T X 12L X 6W	82.60	72.19	62.78
795350000	WL1260C 12 11T X 12L X 6W	89.31	78.06	67.88
795360000	WL1260C 12 12T X 12L X 6W	96.64	84.46	73.45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 แสดงราคาหมวดและตัวจับยึดหมวดในการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ [15]

**Fiberwall® Studs 1/8" x 1/4"**

Part Number	Description	Base Price/Ea., FOB Shipping Point			
		100 - 900	1,000 - 2,400	2,500 - 4,900	5,000 & Over
774641000	SS304 FBR WL ST 3.50 LG	\$1.38	\$1.12	\$1.03	\$0.93
774661000	SS304 FBR WL ST 4.50 LG	1.60	1.30	1.19	1.08
774691000	SS304 FBR WL ST 6.00 LG	1.90	1.54	1.42	1.28
774731000	SS304 FBR WL ST 8.00 LG	2.40	1.94	1.79	1.62
773141000	SS310 FBR WL ST 3.50 LG	1.86	1.51	1.39	1.26
773161000	SS310 FBR WL ST 4.50 LG	2.22	1.80	1.65	1.50
773191000	SS310 FBR WL ST 6.00 LG	2.76	2.24	2.06	1.86
773231000	SS310 FBR WL ST 8.00 LG	3.29	2.67	2.45	2.22
773641000	RA330 FBR WL ST 3.50 LG	2.01	1.63	1.50	1.36
773661000	RA330 FBR WL ST 4.50 LG	2.40	1.94	1.79	1.62
773691100	RA330 FBR WL ST 6.00 LG	3.08	2.50	2.30	2.08
773731000	RA330 FBR WL ST 8.00 LG	3.69	2.99	2.75	2.49
774141000	INC601 FBR WL ST 3.50 LG	2.91	2.36	2.17	1.96
774161000	INC601 FBR WL ST 4.50 LG	3.56	2.88	2.65	2.40
774191000	INC601 FBR WL ST 6.00 LG	4.59	3.72	3.42	3.10
774231000	INC601 FBR WL ST 8.00 LG	5.83	4.72	4.34	3.94

**Fiberwall® Washers**

Part Number	Description	Base Price/Ea., FOB Shipping Point			
		100 - 900	1,000 - 2,400	2,500 - 4,900	5,000 & Over
774901000	SS304 FBR WL WASHER	\$1.34	\$1.09	\$1.00	\$0.90
773501000	SS310 FBR WL WASHER	2.22	1.80	1.65	1.50
773901000	RA330 FBR WL WASHER	2.77	2.24	2.06	1.87
774401000	INC601 FBR WL WASHER	3.97	3.22	2.96	2.68


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ข  
บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทความที่ตีพิมพ์ในการประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงาน  
แห่งประเทศไทยครั้งที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ Study of Energy Conservation for Reheating Furnace by Using Ceramic

บรรยเวกษ์ก์ สงฤทธิ์\* ณัฐเดช เพ็ญวรวงค์  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร E-mail: banyawake14@hotmail.com

Banyawake Songrit and Nattadate Fuangworawong  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University  
Pathumwan, Bangkok E-mail: banyawake14@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กของโรงงานที่มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องตามการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOU และ TOD โดยในโรงงานที่มีการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOU มีการคิดค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วง 09:00-22:00 ของวันจันทร์-ศุกร์ ส่วนในโรงงานที่มีการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOD มีการคิดค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วง 18:30-21:30 ของทุกวัน ทำให้ในช่วงเวลาดังกล่าวโรงงานไม่มีการรีดเหล็ก แต่ในการออกแบบโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กโดยส่วนใหญ่ จะออกแบบเพื่อให้มีการใช้งานที่ต่อเนื่อง ดังนั้น การใช้งานที่ไม่ตรงกับเงื่อนไขในการออกแบบนี้ จึงอาจจะเป็นสาเหตุทำให้การสูญเสียความร้อนรวมทั้งโครงสร้างฉนวนมีค่าสูง และเมื่อได้ทำการสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก พบว่าการสูญเสียความร้อนรวมทั้งโครงสร้างฉนวน ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ความร้อนสูญเสียที่ผ่านและสะสมในโครงสร้างฉนวน จากการศึกษาแนวทางการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนเพื่อลดความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างฉนวนนั้น พบว่าการใช้เซรามิกไฟเบอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและทนความร้อนได้สูง จะสามารถลดค่าความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างฉนวนลงได้ โดยในระบบค่าไฟฟ้าแบบ TOU ความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างฉนวนลดลง 59.56 % และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.6 ปี ส่วนในระบบค่าไฟฟ้าแบบ TOD ความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างฉนวนลดลง 63.32 % และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.3 ปี โดยการใช้เซรามิกไฟเบอร์ความหนา 200 มม. ในทั้ง 2 ระบบ

### Abstract

A reheating furnace is conducted in this study. The reheating furnace is operated in Time of Use (TOU) rate in electricity charge and Time of Day (TOD) rate in electricity charge. In the TOU rate, the period of 09:00-22:00 in Monday to Friday is a peak-time period. In the TOD rate, the period of 18:30-21:30 is a

peak-time period. The demand of electrical energy is charged. However, a reheating furnace is designed for using continuously. From this reason, heavy thermal mass insulation might be one of many reasons of heat loss because the high-thermal mass insulation needs more heat storage to increase its temperature. Furthermore, there are a few information about heat balance of a reheating furnace operation in each working condition. From the heat balance of each working condition, the total heat losses at wall are heat loss through surface and heat storage in insulation lining. Using ceramic low-thermal mass insulation material (LTM) can reduce the total heat losses at wall further than conventional insulation material. In case TOU; the total heat losses at wall is reduced 59.56 %. The pay back period is about 1.6 years. In case TOD; the total heat losses at wall is reduced 63.32 %. The pay back period is about 1.3 years. By using ceramic fiber thickness is 200 mm in two case.

### 1. บทนำ

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญอุตสาหกรรมหนึ่งกับโครงสร้างอุตสาหกรรมของประเทศไทย โดยประเทศไทยมีเฉพาะอุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลางและอุตสาหกรรมเหล็กชั้นปลาย เตาเผาเหล็ก(Reheating Furnace) เป็นอุปกรณ์หลักอุปกรณ์หนึ่งในกระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าชั้นปลาย ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานความร้อนจำนวนมาก โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้พลังงานความร้อน เช่น น้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ จากการสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิตพบว่า เตาเผาเหล็กในประเทศไทยมีการใช้พลังงานสูงกว่าเตาเผาเหล็กของโรงงานที่เป็นมาตรฐานของโลกในประเทศญี่ปุ่น นอกจากนี้ การทำงานของเตาเผาเหล็กในประเทศไทยแบ่งการทำงานเป็นช่วงๆ ตามลักษณะของช่วงเวลาการคิดค่าไฟ (แบบ

TOD และ TOU) โดยวัตถุประสงค์ คือต้องการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า ซึ่งไม่ตรงตามเงื่อนไขการออกแบบจนกว่าความร้อนที่โดยส่วนใหญ่ออกแบบเพื่อให้มีการใช้งานที่ต่อเนื่อง การใช้งานซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขในการออกแบบนี้ อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นสูงที่โครงสร้างจนส่งผลต่อการใช้พลังงานในการผลิต จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับเตาเผาเหล็ก เช่น ในปี 1984 Routschka[1] ได้ศึกษาลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็กที่ทำงานแบบไม่ต่อเนื่องพบว่า การปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ สามารถลดความร้อนสูญเสียลงได้ และในปีเดียวกันนี้ Ou และ Ho[2] ได้ศึกษาลักษณะการทำงานและวิธีการปรับปรุงเตาเผาเหล็กที่คล้ายคลึงกับ Routschka กับเตาเผาในประเทศจีนพบว่า สามารถลดความร้อนสูญเสียสะสมได้ 40% ส่งผลให้การใช้พลังงานเชื้อเพลิงลดลง 6.33% ต่อมาในปี 1985 Molloy[3] ได้ศึกษาและทดลองปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กแบบ walking beam ที่ใน 1 สัปดาห์มีการเดินเตาเผาเหล็ก 6 วัน และหยุด 1 วันโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ติดตั้งแบบ veneering พบว่าการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตลดลง 20% และในปี 1996 Bhattacharya[4] ทำการทดลองศึกษาการนำฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มาใช้กับเตาเผาในอุตสาหกรรมเหล็กที่มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องพบว่า สามารถประหยัดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงได้ 5-25% จากผลการศึกษาข้างต้น จึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ในการทำการศึกษ วิจัยออกแบบ และปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กโดยการนำฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มาใช้เพื่อลดการสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาที่มีลักษณะการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องในประเทศไทย

## 2. เตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace)

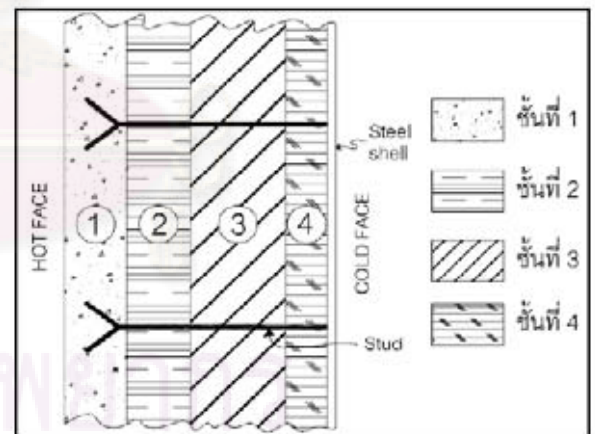
### 2.1 ลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก

โรงงานผลิตเหล็กที่ทำการวิจัย กรณีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU นั้นใช้เตาเผาแบบคานเคลื่อนที่ (walking beam) โดยเตาเผาเหล็กประกอบด้วย 2 โซน คือ heating zone และ soaking zone มีอุณหภูมิใช้งานประมาณ 900-1,200 °C ใช้น้ำมันเตา C เป็นเชื้อเพลิงผลิตเหล็กพลัดที่นอน และซีลวตมอเตอรืไซต์ ในระบบไฟฟ้าแบบ TOU จะมีการคิดค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วง 09:00-22:00 ของวันจันทร์-ศุกร์ ดังนั้นช่วงเวลาดังกล่าวจึงไม่มีการรีดเหล็ก ซึ่งจะไม่มีการใช้เชื้อเพลิงกับเตาเผาเหล็กในช่วงเวลา 09:00-14:00 ทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กลดลง โดยจะควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่ 700 °C และ ของ soaking zone ไว้ที่ 870 °C หลังจากนั้นในช่วงเวลา 14:00-22:00 จะใช้เชื้อเพลิงกับเตาเผาเหล็ก เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กโดยเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเร่งเตา ซึ่งใน 1 สัปดาห์ จะมีช่วงเร่งเตา 5 ครั้ง ครั้งละ 8 ชั่วโมง สำหรับช่วงที่มีการรีดเหล็ก เป็นช่วงที่เหล็กได้รับความร้อนจากเตาเผาเหล็ก และผลิตออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่ 970 °C และ ของ soaking zone ไว้ที่ 1,080 °C และเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงรีดเหล็ก ใน 1 สัปดาห์ จะมีช่วงรีดเหล็ก 103 ชั่วโมง ส่วนในกรณีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOD นั้น ใช้เตาเผาผลักดัน (pusher) โดยเตาเผาเหล็กประกอบด้วย 2 โซน คือ pre-heating zone และ heating zone มีอุณหภูมิใช้งาน

ประมาณ 900-1,200 °C ใช้น้ำมันเตา C เป็นเชื้อเพลิง ผลิตเหล็กแท่งเป็นเหล็กกลม และเหล็กข้ออ้อย ในระบบไฟฟ้าแบบ TOD มีการคิดค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วง 18:30-21:30 ของทุกวัน ดังนั้นช่วงเวลาดังกล่าวจึงไม่มีการรีดเหล็ก เตาเผาเหล็กจะอุ่นและควบคุมอุณหภูมิของ pre-heating zone ไว้ที่ 850 °C และ ของ heating zone ไว้ที่ 1,050 °C และเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอุ่นเตา ใน 1 สัปดาห์ จะมีช่วงอุ่นเตา 17.5 ชั่วโมง สำหรับช่วงที่มีการรีดเหล็ก เป็นช่วงที่เหล็กได้รับความร้อนจากเตาเผาเหล็ก และผลิตออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยควบคุมอุณหภูมิของ Pre-heating Zone ไว้ที่ 1,150 °C และ ของ Heating Zone ไว้ที่ 1,250 °C และเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงรีดเหล็ก ใน 1 สัปดาห์ จะมีช่วงรีดเหล็ก 147 ชั่วโมง นอกจากนั้นจะเป็นช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กจากอุณหภูมิช่วงอุ่นเตาไปเป็นอุณหภูมิช่วงรีดเหล็ก เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเร่งเตา โดยใน 1 สัปดาห์ จะมีช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง ครั้งละ 30 นาที

### 2.2 โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก

โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กในปัจจุบันของโรงงานที่มีการคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOU และ TOD แสดงดังรูปที่ 1 และตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้งานกับลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง และพิจารณาออกแบบตามความเหมาะสมของราคาเชื้อเพลิงในช่วงระยะเวลาที่ออกแบบ โครงสร้างของฉนวนปัจจุบันนี้โดยเฉพาะ Plastic Refractory ซึ่งมีคุณสมบัติในการทนต่อความร้อนได้ดี แต่มีความหนาแน่นสูงและมีการนำความร้อนสูง ทำให้เมื่อนำมาใช้กับการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องจะเกิดการสะสมของความร้อนในโครงสร้างของฉนวนปริมาณสูง ส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการผลิต



รูปที่ 1 โครงสร้างฉนวนเตาเผาเหล็กในปัจจุบัน (TOUและTOD)

ตารางที่ 1 ชนิดของฉนวนเตาเผาที่ใช้คิดค่าไฟฟ้าระบบ TOU

ผนังด้าน	โซน	ชั้นที่ (ความหนา mm.)			
		1	2	3	4
หลังคา	Heating	A(200)	C(50)	B(25)	-
	Soaking	A(200)	C(50)	B(25)	-
แท่นรีด & รดยิ้งเหล็ก	Heating	A(250)	D(115)	E(50)	D(50)
	Soaking	A(250)	D(115)	E(50)	D(50)
หน้า	-	C(250)	D(115)	E(50)	D(50)
หลัง	-	C(250)	D(115)	E(50)	D(50)

ตารางที่ 2 ชนิดของฉนวนเตาเผาที่ใช้คิดค่าไฟฟ้าระบบ TOD

ผนังด้าน	โซน	ชั้นที่ (ความหนา mm.)			
		1	2	3	4
หลังคา	Preheating	C(200)	B(25)	C(80)	-
	Heating	A(200)	B(25)	C(80)	-
แท่นรีด & รดยิ้งเหล็ก	Preheating	C(229)	D(76)	D(115)	E(50)
	Heating	A(229)	D(76)	D(115)	E(50)
หน้า	-	C(229)	D(76)	D(115)	E(50)
หลัง	-	A(229)	D(76)	D(115)	E(50)

หมายเหตุ A คือ Plastic Refractory, B คือ Ceramic Fiber Blanket, C คือ Castable, D คือ Brick Insulation และ E คือ Calcium Silicate Board

### 3 เส้นใยเซรามิกไฟเบอร์

เส้นใยเซรามิกเป็นวัสดุฉนวนที่มีค่าการนำความร้อนต่ำและความหนาแน่นต่ำ โดยทั่วไปเส้นใยเซรามิกผลิตขึ้นโดยการผสมและหลอมอะลูมินาและซิลิกาเข้าด้วยกัน เส้นใยเซรามิกจะถูกผลิตออกมาในรูปแบบของปุยเส้นใย จากนั้นจึงถูกเย็บเข้าด้วยกันเป็นแผ่นผ้าที่มีความหนาแน่นต่างๆ กันตั้งแต่ 64 ถึง 190 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คุณสมบัติของเส้นใยเซรามิกที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นฉนวนในเตาเผาเหล็ก ได้แก่ มีค่าการนำความร้อนต่ำและ ความหนาแน่นต่ำ, ทำให้เกิดความร้อนสะสมในวัสดุน้อย, มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน, และสามารถคืนสภาพเชิงกลได้ดี

### 4 ทฤษฎีการวิเคราะห์พลังงาน

พิจารณาเตาเผาเหล็กเป็นปริมาตรควบคุม สมดุลพลังงานในเตาเผาเหล็กในช่วงเวลา  $\Delta t$  ใดๆ จะได้

ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็ก=ความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก

#### 4.1 พลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

1. ความร้อนจากเชื้อเพลิง เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงเคมีเป็นพลังงานความร้อนโดยวิธีการเผาไหม้
2. ความร้อนสัมผัสของอากาศ เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากอุณหภูมิอากาศที่เข้าเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยสำหรับเตาเผาเหล็กความร้อนสัมผัสของอากาศได้รับมาจากการนำ

ความร้อนกลับจากความร้อนสูญเสียจากไอเสีย โดยใช้ recuperator ในการนำความร้อนกลับ

3. ความร้อนสัมผัสสัมผัสของเชื้อเพลิง เป็นความร้อนที่ได้จากการที่เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยสำหรับเตาเผาเหล็กความร้อนในส่วนนี้ได้รับมาจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า

4. ความร้อนจากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก

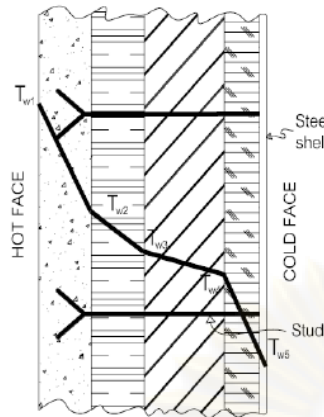
#### 4.2 พลังงานความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

1. ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ เป็นความร้อนที่ติดไปกับเหล็กก่อนเข้าแท่นรีด เนื่องจากอุณหภูมิของเหล็กออกจากแท่นรีดมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
2. ความร้อนสูญเสียสเกล เป็นความร้อนที่ออกไปกับสเกลโดยสเกลนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
3. ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย เป็นความร้อนที่ออกไปกับไอเสียที่ออกจากเตาเผาเหล็ก ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
4. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด เป็นความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กทางช่องเปิดต่างๆ เนื่องจากความร้อนของก๊าซเสียมีความดันสูงหรือต่ำกว่าความดันบรรยากาศ
5. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา เป็นพลังงานความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิของผนังเตาเผาเหล็กมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
6. ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น เป็นพลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำระบายความร้อน ความร้อนในส่วนนี้ จะมีเฉพาะเตาเผาเหล็กที่มีการใช้น้ำระบายความร้อน
7. ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก เป็นความร้อนที่สะสมในโครงสร้างเตาเผาเหล็ก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโครงสร้างเตาเผาเหล็ก
8. ความร้อนสูญเสียสะสมที่เหล็ก เป็นความร้อนที่สะสมที่เหล็ก ซึ่งค้างอยู่ในเตาเผาเหล็กขณะเพิ่มอุณหภูมิในช่วงเร่งเตา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหล็ก
9. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ได้มาจากความแตกต่างของความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็กกับความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก

#### 5.การวิเคราะห์และแนวทางการปรับปรุง

##### 5.1 การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างฉนวน

การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างนั้นเพื่อให้ทราบถึงลักษณะและปริมาณความร้อนที่สูญเสียที่ผนัง ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์การกระจายตัว และสมดุลพลังงานในช่วงการทำงานต่างๆ



รูปที่ 2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ

ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในโครงสร้างฉนวนเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนในเตาเผาเหล็กไปสู่ผนังของชั้นในสุด (hot face) ของเตาเผาเหล็ก โดยวิธีการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน หลังจากนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากชั้นในสุดไปชั้นต่างๆ โดยวิธีการนำความร้อน และท้ายที่สุดความร้อนจะถ่ายเทจากผนังนอกสุด (cold face) ของเตาเผาเหล็กไปสู่อากาศภายนอกโดยการพาความร้อน จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงจากผิวด้านในสุด (hot face) มายังผิวด้านนอกสุด (cold face) ทั้งนี้ระดับการลดลงของอุณหภูมินั้นขึ้นอยู่กับความหนาและคุณสมบัติของวัสดุ ฉะนั้นในการออกแบบจึงมีความจำเป็นต้องคำนึงการกระจายตัวของอุณหภูมิเพื่อให้สามารถเลือกใช้วัสดุได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อการสูญเสียความร้อนและการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็ก

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กของโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU และ TOD แบ่งออกเป็นช่วงตามการทำงานของเตาเผาเหล็ก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กทั้งสองนั้นพบว่า ในช่วงเร่งเตา เป็นช่วงที่มีการสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างเกิดขึ้นสูงที่สุด โดยในโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU ความร้อนที่สูญเสียจากการสะสมที่โครงสร้างคิดเป็น 32.74% นอกนั้นเป็นการสูญเสียความร้อนในส่วนอื่นๆซึ่งประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่สูญเสียกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กคิดเป็น 23.05% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ recuperator คิดเป็น 4.65% , พลังงานความร้อนสูญเสียสะสมที่เหล็กคิดเป็น 22.12% พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็กคิดเป็น 2.01% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 6.57 % ส่วนในโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOD ความร้อนที่สูญเสียจากการสะสมที่โครงสร้างซึ่งคิดเป็น 53.73% นอกนั้นเป็นการสูญเสียความร้อนในส่วนอื่นๆซึ่งประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่สูญเสียกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กคิดเป็น 29.31% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ recuperator คิดเป็น 8.91% , พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็กคิดเป็น

4.56% , ความร้อนสูญเสียสะสมที่เหล็กคิดเป็น 6.78% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆ คิดเป็น 5.62 %

จากผลการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างฉนวนในช่วงการทำงานต่างๆ ของโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU นั้นพบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนมีค่า 512,074 MJ/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนมีค่า 1,006,783 MJ/สัปดาห์ ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงสำหรับความร้อนสูญเสียผ่านและสูญเสียสะสมที่โครงสร้างฉนวนคิดเป็น 19,220,700 บาท/ปี ส่วนในโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOD นั้นพบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนมีค่า 639,804 MJ/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนมีค่า 706,591 MJ/สัปดาห์ ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงสำหรับความร้อนสูญเสียผ่านและสูญเสียสะสมในโครงสร้างคิดเป็น 17,062,683 บาท/ปี (เมื่อคิดการทำงาน 70% และเทียบกับน้ำมันเตา C ที่ราคา 15 บาท/ลิตร) โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างของโรงงานเหล็กที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU

ความร้อนสูญเสีย		ปริมาณน้ำมัน		ค่าน้ำมัน	
ผ่านฉนวน MJ/สัปดาห์	สะสมในฉนวน MJ/สัปดาห์	ผ่านฉนวน ลิตร/สัปดาห์	สะสมในฉนวน ลิตร/สัปดาห์	ผ่านฉนวน บาท/สัปดาห์	สะสมในฉนวน บาท/สัปดาห์
512,074	1,006,783	12,857	25,279	192,861	379,183
1,518,857		38,136		572,044	

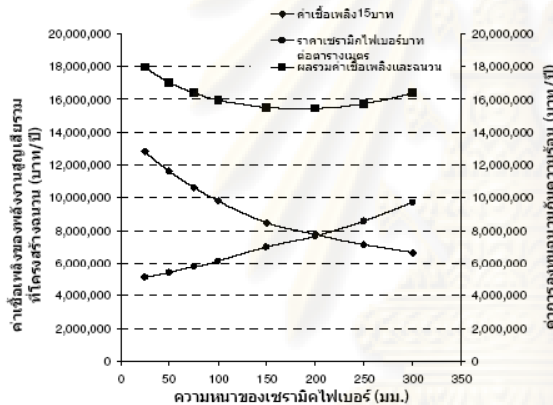
ตารางที่ 4 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างของเตาเผาเหล็กที่มีการคิดระบบค่าไฟฟ้าแบบ TOD

ความร้อนสูญเสีย		ปริมาณน้ำมัน		ค่าน้ำมัน	
ผ่านฉนวน MJ/สัปดาห์	สะสมในฉนวน MJ/สัปดาห์	ผ่านฉนวน ลิตร/สัปดาห์	สะสมในฉนวน ลิตร/สัปดาห์	ผ่านฉนวน บาท/สัปดาห์	สะสมในฉนวน บาท/สัปดาห์
639,804	706,591	16,088	17,767	241,314	266,504
1,346,395		33,855		507,818	

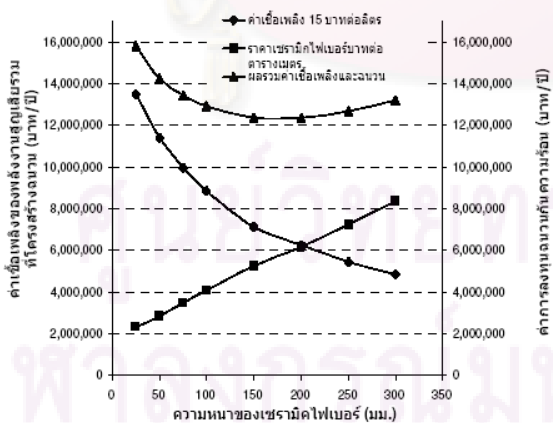
## 5.2. แนวทางการปรับปรุง

แนวทางในการลดความร้อนสูญเสียรวมในโครงสร้างของฉนวน (ความร้อนสูญเสียผ่านและสูญเสียสะสม) คือ การใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำเป็นฉนวนด้านในสุดของผนังเตาเผา ในที่นี้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ คือ เซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) โดยติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ด้วยวิธีการแบบ veneering ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสม โดยนำเซรามิกไฟเบอร์แบบ blanket มายึดติดกับโครงสร้างของเตาเผาชั้นในสุดแล้วใช้ stud เป็นตัวจับยึดกับผนังที่เป็น plastic refractory และมีเซรามิกไฟเบอร์แบบ textile เป็นตาข่ายสำหรับป้องกันการฟุ้งกระจายของเซรามิกไฟเบอร์ ซึ่งความหนาของเซรามิกไฟเบอร์จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพื่อให้สามารถใช้

เซรามิกไฟเบอร์ได้เหมาะสมกับราคาวัสดุจนกว่าความร้อนและค่าเชื้อเพลิง เนื่องจากความหนาของเซรามิกไฟเบอร์มีผลกับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและเรื่องการลงทุน การหาความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์ของโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU และ TOD แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงของพลังงานสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างฉนวน (สูญเสียผ่านและสะสมที่โครงสร้างฉนวน) จะลดลงตามความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ แต่ค่าการลงทุนจะมากขึ้นตามความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ ซึ่งจะได้ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมประมาณ 200 mm ในทั้งสองกรณี สำหรับราคาน้ำมันเตา C ที่ 15 บาท/ลิตร โดยโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กที่ทำการปรับมีลักษณะคล้ายกันกับโครงสร้างดังรูปที่ 2 แต่ได้ทำการออกแบบชนิดและความหนาของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนใหม่เพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นที่โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กลง โดยชนิดของวัสดุและความหนาของฉนวนในแต่ละชั้นที่ทำการปรับปรุงแสดงตารางที่ 5 และ 6



รูปที่ 3 การหาความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์กรณีโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU



รูปที่ 4 การหาความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์กรณีโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOD

ตารางที่ 5 ชนิดของฉนวนที่ใช้ปรับปรุงเตาเผาในระบบ TOU

ผนังด้าน	โซน	ชั้นที่ (ความหนา mm.)			
		1	2	3	4
หลังคา	Heating	B(200)	A(50)	B(25)	E(40)
	Soaking	B(200)	A(50)	B(25)	E(40)
แท่นรีด & รดยิงเหล็ก	Heating	B(200)	A(115)	E(50)	D(50)
	Soaking	B(200)	A(115)	E(50)	D(50)
หน้า	-	B(200)	A(115)	E(50)	D(50)
หลัง	-	B(200)	A(115)	E(50)	D(50)

ตารางที่ 6 ชนิดของฉนวนที่ใช้ปรับปรุงเตาเผาในระบบ TOD

ผนังด้าน	โซน	ชั้นที่ (ความหนา mm.)				
		1	2	3	4	5
หลังคา	Preheating	B(200)	B(25)	C(80)	-	-
	Heating	B(200)	B(25)	C(80)	-	-
แท่นรีด & รดยิงเหล็ก	Preheating	B(200)	A(76)	D(115)	E(50)	-
	Heating	B(200)	A(76)	D(115)	E(50)	-
หน้า	-	B(200)	A(76)	D(115)	E(50)	-
หลัง	-	B(200)	A(76)	D(115)	E(50)	-

หมายเหตุ A คือ Plastic Refractory, B คือ Ceramic Fiber Blanket, C คือ Castable, D คือ Brick Insulation และ E คือ Calcium Silicate Board

5.3. ผลการวิเคราะห์หลังการปรับปรุง

ในโรงงานเหล็กที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU เมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 200 mm เมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนจะพบว่า สามารถประหยัดพลังงานได้ 726,617 MJ/สปีดาร์ และความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนสามารถประหยัดพลังงานได้ 178,077 MJ/สปีดาร์ โดยคิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงสำหรับความร้อนสูญเสียผ่านและสะสมที่โครงสร้างฉนวนที่ลดลงเป็นเงิน 11,463,984 บาท/ปี ส่วนในโรงงานเหล็กที่มีการคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOD เมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 200 mm เมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนจะพบว่า สามารถประหยัดพลังงานได้ 478,909 MJ/สปีดาร์ และความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวนสามารถประหยัดพลังงานได้ 373,568.63 MJ/สปีดาร์ โดยคิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงสำหรับความร้อนสูญเสียผ่านและความร้อนสูญเสียสะสมที่โครงสร้างที่ลดลงเป็นเงิน 10,803,334 บาท/ปี (คิดการทำงาน 70 % และคิดเทียบกับน้ำมันเตา C ที่ราคา 15 บาท/ลิตร) โดยสามารถสรุปได้ดังแสดงที่ 7 และ 8

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบความร้อนสูญเสียระหว่างฉนวนปัจจุบันและฉนวนปรับปรุง ของโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU

กรณี	ความร้อนรวม MJ/สัปดาห์	ปริมาณน้ำมัน ลิตร/สัปดาห์	ค่าน้ำมัน บาท/สัปดาห์
ปัจจุบัน	1,518,858	38,191	572,865
ปรับปรุง	614,233	15,445	231,675
ผลต่าง	-904,625	-22,746	-341,190

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบความร้อนสูญเสียระหว่างฉนวนปัจจุบันและฉนวนปรับปรุง ของโรงงานที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOD

กรณี	ความร้อนรวม MJ/สัปดาห์	ปริมาณน้ำมัน ลิตร/สัปดาห์	ค่าน้ำมัน บาท/สัปดาห์
ปัจจุบัน	1,346,395	33,855	507,818
ปรับปรุง	493,917	12,419	186,285
ผลต่าง	-852,478	-21,436	-321,533

## 6. สรุป

โรงงานผลิตเหล็กที่มีระบบการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องถ้ามีการปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงจะสามารถประหยัดพลังงานในการผลิตได้ จากงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงโครงสร้างฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 200 mm. ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและสามารถทนต่ออุณหภูมิสูง กับโรงงานเหล็กที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU และ TOD พบว่า ในโรงงานเหล็กที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOU สามารถลดความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างของฉนวนลงได้ 59.56% คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ลดลงได้ประมาณ 11,463,984 บาท/ปี และมีระยะเวลาคืนทุน 1.6 ปี ส่วนในโรงงานเหล็กที่มีการใช้ไฟฟ้าระบบ TOD สามารถลดความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างของฉนวนลงได้ 63.32% คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ลดลงได้ประมาณ 10,803,334 บาท/ปี และมีระยะเวลาคืนทุน 1.3 ปี

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย และขอบคุณคำวิจารณ์และข้อเสนอแนะจากคุณหิน นววงศ์, รศ.ดร. พงษ์ภรณ์ จรัญญากรณ์, ผศ.มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล และคุณจิตติชัย จันทรินทร์ เป็นอย่างสูง

## เอกสารอ้างอิง


- 1 Routschka, Gerald; Majdic. 1984 Energy Saving Application of Ceramic Fibres in Reheating and Heat-Treating Furnaces ,Metall Plant Technol Vol.7:72-79
- 2 Ou, J. J.; Ho, T. Y., 1984. Benefits of Veneering Ceramic Fibre in Reheating Furnace., South East Asia Iron & Steel Institute.: 1-16
- 3 Molloy, T.J., 1985. Delopments in The Use of Ceramic Fibre to Achieve Energy Reduction in Steel Reheating Furnace., South East Asia Iron & Steel Institute. Vol.14 No.3 July :14-26

4 Bhattacharya, A.K.; Ahuja, A.K.; Dasgupta, A.K.; 1996. Application of Ceramic Fibre in Steel Plant Furnaces for Energy Conservation. South East Asia Iron & Steel Institute. Vol.25 No.1 Jan:67-74

5 The Carbon Trust. Efficiency Office. 1993 Good Practice Guide 76-Continuous Steel Reheating Furnaces: Specification Design and Equipment. Energy UK Government.

6 W. Trinks .2004. Industrial Furnaces. Sixth Edition. United States of America John Wiley and Sons Inc





บทความที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ กรณีศึกษาโรงงานที่ใช้อัตราการคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOU

### Study of Energy Conservation for Reheating Furnace by Using Ceramic Fiber Case Study for a Furnace Operating in Time of Use (TOU) Rate of Electric Charge

บรรยเวกษ์ก์ สงฤทธิ, ณัฐเดช เฟื่องวรวงษ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร

E-mail: banyawake14@hotmail.com

Banyawake Songrit, Nattadate Fuangworawong

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Pathumwan, Bangkok,

E-mail: banyawake14@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กของโรงงานที่มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องโดยมีการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOU ซึ่งมีการคิดค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วง 09:00-22:00 ของวันจันทร์-ศุกร์ ดังนั้นช่วงเวลาดังกล่าวจึงไม่มีการรีดเหล็ก โดยในช่วงเวลา 09:00-14:00 จะไม่มีการใช้เชื้อเพลิงกับเตาเผาเหล็ก ทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กลดลง หลังจากนั้นในช่วงเวลา 14:00-22:00 จะมีการใช้เชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กและเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเร่งเตา โดยใน 1 สัปดาห์จะมีช่วงเร่งเตา 40 ชั่วโมงแบ่งออกเป็น 5 ครั้ง (ครั้งละ 8 ชั่วโมง) สำหรับช่วงที่มีการรีดเหล็ก เป็นช่วงที่เหล็กได้รับความร้อนจากเตาเผาเหล็กและเคลื่อนที่เข้าสู่ลูกรีดเพื่อผลิตออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงรีดเหล็ก โดยใน 1 สัปดาห์มีช่วงรีดเหล็ก 103 ชั่วโมง แต่ในการออกแบบจะคำนวณกับความร้อนของเตาเผาเหล็กโดยส่วนใหญ่จะออกแบบเพื่อให้มีการใช้งานที่ต่อเนื่อง ดังนั้น การใช้งานที่ไม่ตรงกับเงื่อนไขในการออกแบบ จึงอาจจะเป็นสาเหตุทำให้การสูญเสียความร้อนรวมที่โครงสร้างฉนวนมีค่าสูง เมื่อได้ทำการสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก พบว่าการสูญเสียความร้อนรวมที่โครงสร้างฉนวน ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวน และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน จากการศึกษาแนวทางการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กเพื่อลดความร้อนสูญเสียรวม พบว่าการใช้เซรามิกไฟเบอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและทนความร้อนได้สูง จะสามารถลดค่าความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างฉนวนลงได้ ซึ่งสามารถลดลงได้ 59.56% โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ความหนา 200 มิลลิเมตร และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.6 ปี

คำหลัก เตาเผาเหล็ก, ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

#### Abstract

A reheating furnace is conducted in this study. The reheating furnace is operated in Time of Use (TOU) rate in electricity charge. In the TOU rate, the period of 09:00-22:00 in Monday to Friday is a peak-time period. The demand of electrical energy is charged. The reheating furnace is operated to discharge the heating raw material to rolling mill during 103 hr per week. The reheating furnace will have idle time during 14:00-22:00, which is 40 hr per week, because the rolling mill is not operated. This reheating furnace increase temperature five times per week (8 hours per time) from temperature of idle time to the temperature of operating time. However, a reheating furnace is designed for using continuously. From this reason, heavy thermal mass insulation might be one of many reasons of heat loss because the high-thermal mass insulation needs more heat storage to increase its temperature. Furthermore, there are a few information about heat balance of a reheating furnace operation in each working condition. From the heat balance of each working condition, the total heat losses at wall are heat loss through surface and heat storage in insulation lining. Using ceramic low-thermal mass insulation material (LTM) can reduce the total heat losses at wall further than conventional insulation material. The total heat losses at wall is reduced 59.56% by using ceramic fiber thickness is 200 mm. The pay back period is about 1.6 years

**Keywords:** Reheating Furnace, Ceramic Fiber

**บทนำ**

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญอุตสาหกรรมหนึ่งกับโครงสร้างอุตสาหกรรมของประเทศไทย โดยประเทศไทยมีเฉพาะอุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลางและอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย เตาเผาเหล็ก(Reheating Furnace) เป็นอุปกรณ์หลักอุปกรณ์หนึ่งในกระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าขั้นปลาย ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานความร้อนจำนวนมาก โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้พลังงานความร้อน เช่น น้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ จากการสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิตพบว่า เตาเผาเหล็กในประเทศไทยมีการใช้พลังงานสูงกว่าเตาเผาเหล็กของโรงงานเป็นมาตรฐานของโลกในประเทศญี่ปุ่น นอกจากนี้ การทำงานของเตาเผาเหล็กในประเทศไทย แบ่งการทำงานเป็นช่วงๆ ตามลักษณะของช่วงเวลาคิดค่าไฟ (แบบ TOD และ TOU) โดยวัตถุประสงค์ คือต้องการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า ซึ่งไม่ตรงตามเงื่อนไขการออกแบบฉนวนกันความร้อนที่โดยส่วนใหญ่ออกแบบเพื่อให้มีการใช้งานที่ต่อเนื่อง การใช้งานซึ่งไม่ตรงกับเงื่อนไขในการออกแบบนี้ อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นสูงที่โครงสร้างฉนวนส่งผลต่อการใช้พลังงานในการผลิต จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับเตาเผาเหล็ก เช่น ในปี 1984 Routschka[1] ได้ศึกษาลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็กที่ทำงานแบบไม่ต่อเนื่องพบว่าการปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ สามารถลดความร้อนสูญเสียลงได้ และในปีเดียวกันนี้ OuและHo[2] ได้ศึกษาลักษณะการทำงานและวิธีการปรับปรุงเตาเผาเหล็กที่คล้ายคลึงกับ Routschka กับเตาเผาในประเทศจีนพบว่า สามารถลดความร้อนสูญเสียสะสมได้ 40% ต่อมาในปี 1985 Molloy[3] ได้ศึกษาและทดลองปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กแบบ walking beam ที่ใน 1 สัปดาห์มีการเดินเตาเผาเหล็ก 6 วัน และหยุด 1 วันโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 50 mm ติดตั้งแบบ veneering พบว่าการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตลดลง 20% และในปี 1996 Bhattacharya[4] ทำการทดลองศึกษานำฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มาใช้กับเตาเผาในอุตสาหกรรมเหล็กที่มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องพบว่า สามารถประหยัดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงได้ 5-25% จากผลการศึกษาข้างต้น จึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ในการทำการศึกษ วิจัยออกแบบ และปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กโดยการนำฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มาใช้เพื่อลดการสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างฉนวนของเตาเผาที่มีลักษณะการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องในประเทศไทย

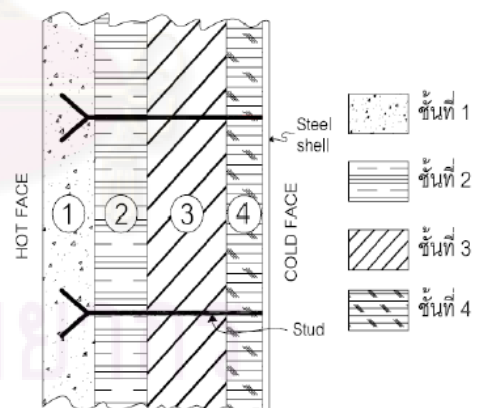
**ลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก**

ในงานวิจัยนี้ศึกษาโรงงานผลิตเหล็กที่ใช้เตาเผาเหล็กชนิด walking beam โดยเตาเผาเหล็กมี 2 โซน คือ heating zone และ soaking zone ใช้ น้ำมันเตา C ผลิตเหล็กกลวด และซีลวดมอเตอร์ไซด์ โดยมีการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOU ซึ่งมีการคิดค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วง 09:00-22:00 ของวันจันทร์-ศุกร์ ดังนั้นช่วงเวลากว่าจึงไม่มีการรีดเหล็ก โดยจะไม่มีการใช้เชื้อเพลิงกับ

เตาเผาเหล็ก ในช่วงเวลา 09:00-14:00 ดังนั้นอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กจะลดลง โดยทั่วไปจะลดลงจนมีอุณหภูมิของ heating zone ที่อุณหภูมิ 700 °C และ ควบคุมอุณหภูมิของ soaking zone ไว้ที่อุณหภูมิ 870 °C หลังจากนั้นในช่วงเวลา 14:00-22:00 เป็นช่วงที่มีการใช้เชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาเหล็กโดยเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเร่งเตา ในเวลา 1 สัปดาห์ จะมีช่วงเร่งเตา 5 ครั้ง ครั้งละ 8 ชั่วโมง สำหรับช่วงที่มีการรีดเหล็ก เป็นช่วงที่เหล็กได้รับความร้อนจากเตาเผาเหล็ก โดยควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 970 °C และ ควบคุมอุณหภูมิของ soaking zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,080 °C โดยเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงรีดเหล็ก ในเวลา 1 สัปดาห์ จะมีช่วงรีดเหล็ก คิดเป็นเวลา 103 ชั่วโมง

**โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก**

โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กในปัจจุบันแสดงดังรูปและตารางที่ 1 ซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้งานกับลักษณะการดำเนินงานแบบต่อเนื่อง และพิจารณาตามความเหมาะสมของราคาเชื้อเพลิงในช่วงระยะเวลาที่ออกแบบ โดยโครงสร้างของฉนวนปัจจุบันนี้ โดยเฉพาะ Plastic Refractory ซึ่งมีความสามารถในการทนต่อความร้อนได้ดี แต่มีความหนาแน่นสูงและมีค่าการนำความร้อนสูง ทำให้เมื่อนำมาใช้กับการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องทำให้เกิดการสะสมของความร้อนในโครงสร้างของฉนวนมีค่าสูง ส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิต โครงสร้างของฉนวนจะแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆตามระดับของอุณหภูมิใช้งานในแต่ละโซนและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในฉนวนแต่ละชั้น



รูปที่ 1 โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กในปัจจุบัน

ตารางที่ 1 แสดงชนิดของวัสดุกันความร้อน

ผนังด้าน	โซน	ชั้นที่ (ความหนา mm.)			
		1	2	3	4
หลังคา	Heating	A(200)	C(50)	B(25)	-
	Soaking	A(200)	C(50)	B(25)	-
แท่นรีด&รดยิ่งเหล็ก	Heating	A(250)	D(115)	E(50)	D(50)
	Soaking	A(250)	D(115)	E(50)	D(50)
หน้า	-	C(250)	D(115)	E(50)	D(50)
หลัง	-	C(250)	D(115)	E(50)	D(50)

หมายเหตุ A คือ Plastic Refractory B คือ Ceramic Fiber Blanket C คือ Castable D คือ Brick Insulation และ E คือ Calcium Silicate Board

### เส้นใยเซรามิกไฟเบอร์

เส้นใยเซรามิกเป็นวัสดุฉนวนที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ และความหนาแน่นต่ำ โดยทั่วไปเส้นใยเซรามิกผลิตขึ้นโดยการผสมและหลอมอะลูมินาและซิลิกาเข้าด้วยกัน เส้นใยเซรามิกจะถูกผลิตออกมาในรูปแบบของปุยเส้นใย จากนั้นจึงถูกเย็บเข้าด้วยกันเป็นผืนผ้าที่มีความหนาแน่นต่างๆ กันตั้งแต่ 64 ถึง 190 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คุณสมบัติของเส้นใยเซรามิกที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นฉนวนในเตาเผาเหล็ก ได้แก่ มีค่าการนำความร้อนต่ำ, ความหนาแน่นต่ำ, ทำให้เกิดความร้อนสะสมในวัสดุน้อย, มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน, และสามารถคืนสภาพเชิงกลได้ดี

### ทฤษฎีการวิเคราะห์พลังงาน

พิจารณาเตาเผาเหล็กเป็นปริมาตรควบคุมสมดุลงานพลังงานในเตาเผาเหล็กในช่วงเวลา  $\Delta t$  ใดๆ จะได้ว่า ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็ก = ความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก พลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

1. ความร้อนจากเชื้อเพลิง เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานความร้อนโดยวิธีการเผาไหม้

$$Q_{in1} = m_{fuel} \times LHV \quad (1)$$

โดยที่  $m_{fuel}$  คืออัตราการใช้เชื้อเพลิง และ  $LHV$  คือ Low Heating Value

2. ความร้อนสัมผัสของอากาศ เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากอุณหภูมิอากาศที่เข้าเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยสำหรับเตาเผาเหล็กความร้อนสัมผัสของอากาศได้รับมาจากการนำความร้อนกลับจากความร้อนสูญเสียจากไอเสีย โดยใช้ recuperator ในการนำความร้อนกลับ

$$Q_{in2} = m_{air} \times \rho_{air} \times c_{p,a} \times (T_{air} - T_{sur}) \quad (2)$$

โดยที่  $m_{air}$  คืออัตราการไหลอากาศ  $\rho_{air}$  คือความหนาแน่นของอากาศ  $c_{p,a}$  คือค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ  $T_{air}$  คืออุณหภูมิอากาศที่ผ่าน recuperator และ  $T_{sur}$  คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

3. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง เป็นความร้อนที่ได้จากการที่เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยสำหรับเตาเผาเหล็กความร้อนในส่วนนี้ได้รับมาจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า

$$Q_{in3} = m_{fuel} \times \rho_{fuel} \times c_{p,f} \times (T_{fuel} - T_{sur}) \quad (3)$$

โดยที่  $m_{fuel}$  คืออัตราการใช้เชื้อเพลิง  $\rho_{fuel}$  คือความหนาแน่นของเชื้อเพลิง  $c_{p,f}$  คือค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง  $T_{fuel}$  คืออุณหภูมิที่ผ่านฮีตเตอร์ และ  $T_{sur}$  คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

4. ความร้อนจากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก

$$Q_{in4} = \% \times m_{steel} \times HV_{scale} \quad (4)$$

โดยที่ % คือเปอร์เซ็นต์การเกิด scale  $m_{steel}$  คือปริมาณเหล็ก และ  $HV_{scale}$  คือความร้อนที่คายออกจากการเปลี่ยนเหล็กและออกซิเจนไปเป็นเหล็กออกไซด์ของสเกล

พลังงานความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

1. ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ เป็นความร้อนที่ติดไปกับเหล็กก่อนเข้าแท่นรีด เนื่องจากอุณหภูมิของเหล็กออกจากแท่นรีดมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

$$Q_{out1} = m_{steel} \times c_{p,s} \times (T_o - T_{sur}) \quad (5)$$

โดยที่  $m_{steel}$  คืออัตราการผลิตเหล็ก  $c_{p,s}$  คือค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก  $T_o$  คืออุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา และ  $T_{sur}$  คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

2. ความร้อนสูญเสียสเกล เป็นความร้อนที่ออกไปกับสเกล โดยสเกลนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

$$Q_{out2} = \% \times m_{steel} \times c_{p,s} \times (T_o - T_{sur}) \quad (6)$$

โดยที่ % คือเปอร์เซ็นต์การเกิด scale  $m_{steel}$  คืออัตราการผลิตเหล็ก  $c_{p,s}$  คือค่าความร้อนจำเพาะของ scale  $T_o$  คืออุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา และ  $T_{sur}$  คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

3. ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย เป็นความร้อนที่ออกไปกับไอเสียที่ออกจากเตาเผาเหล็ก ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

$$Q_{out3} = m_{fuel} \times c_{p,f} \times (T_g - T_{sur}) \quad (7)$$

โดยที่  $m_{fuel}$  คืออัตราการใช้เชื้อเพลิง  $c_{p,f}$  คือความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง  $T_g$  คืออุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ปล่อยไอเสีย และ  $T_{sur}$  คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

4. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด เป็นความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กทางช่องเปิดต่างๆ เนื่องจากความร้อนของก๊าซเสียมีความดันสูงหรือต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

$$Q_{out4} = C_{rad} \times C_{rad,black} \times \varepsilon \times A_o \quad (8)$$

โดยที่  $C_{rad}$  คือตัวคูณการแผ่รังสีความร้อน  $C_{rad,black}$  คือการแผ่รังสีจากวัตถุดำ  $\varepsilon$  คือ Emissivity ของผนังเตาเผาเหล็ก และ  $A_o$  คือพื้นที่ของช่องเปิดเตาเผาเหล็ก

5. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา เป็นพลังงานความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิของผนังเตาเผาเหล็กมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

$$Q_{out5} = hA(T_s - T_{sur}) + 4.88A\varepsilon \left[ \left( \frac{273 + T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + T_{sur}}{100} \right)^4 \right] \quad (9)$$

โดยที่  $h$  คือ convective heat transfer coefficient  $A$  คือพื้นที่ผนังเตาเผาเหล็ก  $\varepsilon$  คือ Emissivity ของผนังเตาเผาเหล็ก  $T_s$  คืออุณหภูมิของผนัง และ  $T_{sur}$  คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

6. ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น เป็นพลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำระบายความร้อน ความร้อนในส่วนนี้ จะมีเฉพาะเตาเผาเหล็กที่มีการใช้น้ำระบายความร้อน

$$Q_{out6} = m_{water} \times C_{p,w} \times (T_{w,o} - T_{w,i}) \quad (10)$$

โดยที่  $m_{water}$  คืออัตราการการไหลของน้ำ  $C_{p,w}$  คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ  $T_{w,o}$  คืออุณหภูมิของน้ำที่ออกจากเตาเผา และ  $T_{w,i}$  คืออุณหภูมิของน้ำที่เข้าสู่เตาเผา

7. ความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก เป็นความร้อนที่สะสมในโครงสร้างเตาเผาเหล็ก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโครงสร้างเตาเผาเหล็ก

$$Q_{out7} = A \left[ \left[ l_1 \times \rho_1 \times c_{p1} \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right) + l_2 \times \rho_2 \times c_{p2} \left( \frac{T_2 + T_3}{2} \right) + \dots + l_n \times \rho_n \times c_{pn} \left( \frac{T_n + T_{n+1}}{2} \right) \right] - \left[ l_1 \times \rho_1 \times c_{p1} \left( \frac{T_{1s} + T_{2s}}{2} \right) + l_2 \times \rho_2 \times c_{p2} \left( \frac{T_{2s} + T_{3s}}{2} \right) + \dots + l_n \times \rho_n \times c_{pn} \left( \frac{T_{ns} + T_{n+1s}}{2} \right) \right] \right] \quad (11)$$

โดยที่ A คือพื้นที่ผนังเตาเผาเหล็ก  $l_1, l_2, \dots, l_n$  คือความหนาของฉนวนแต่ละชนิด  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  คือความหนาแน่นของฉนวนแต่ละชนิด  $C_{p1}, C_{p2}, \dots, C_{pn}$  คือความร้อนจำเพาะของฉนวนแต่ละชนิด  $T_1, T_2, \dots, T_{n+1}$  คืออุณหภูมิมิระหว่างผิวของฉนวนแต่ละชนิด (สภาวะสุดท้าย) และ  $T_{1s}, T_{2s}, \dots, T_{n+1s}$  คืออุณหภูมิมิระหว่างผิวของฉนวนแต่ละชนิด (สภาวะตั้งต้น)

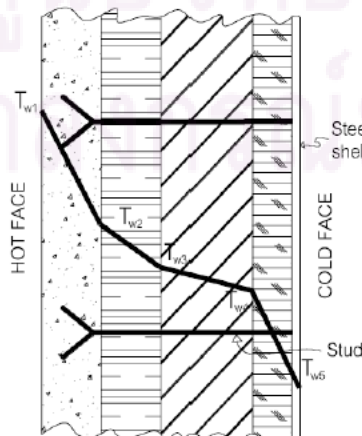
8. ความร้อนสูญเสียสะสมที่เหล็ก เป็นความร้อนที่สะสมที่เหล็ก ซึ่งค้างอยู่ในเตาเผาเหล็กขณะเพิ่มอุณหภูมิในช่วงเร่งเตา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหล็ก

$$Q_{out8} = m_{steel} \times C_{p,s} \times T'_{steel} \quad (12)$$

โดยที่  $m_{steel}$  คือมวลของเหล็กที่ค้างอยู่ในเตา  $C_{p,s}$  คือค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก และ  $T'_{steel}$  คืออัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเหล็ก

9. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ได้มาจากความแตกต่างของความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็กกับความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก

$$Q_{out9} = Q_{in1} + Q_{in2} + Q_{in3} + Q_{in4} - Q_{out1} - Q_{out2} - Q_{out3} - Q_{out4} - Q_{out5} - Q_{out6} - Q_{out7} - Q_{out8} \quad (13)$$



รูปที่ 2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ

### การวิเคราะห์และแนวทางการปรับปรุง

การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนรวมทั้งโครงสร้างฉนวน

การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างนั้น เพื่อให้ทราบถึงลักษณะและปริมาณความร้อนที่สูญเสียที่ผนัง ซึ่งประกอบด้วยวิเคราะห์การกระจายตัว และสมดุลพลังงานในช่วงการทำงานต่างๆ

ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในโครงสร้างของฉนวนเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนในเตาเผาเหล็ก ไปสู่ผนังของชั้นในสุด (hot face) ของเตาเผาเหล็ก โดยวิธีการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน หลังจากนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากชั้นในสุดไปชั้นต่างๆ โดยวิธีการนำความร้อน และท้ายที่สุดความร้อนจะถ่ายเทจากผนังนอกสุด (cold face) ของเตาเผาเหล็ก ไปสู่อากาศภายนอกโดยการพาความร้อน จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงจากผิวด้านในสุด (hot face) มายังผิวด้านนอกสุด (cold face) ทั้งนี้ระดับการลดลงของอุณหภูมินั้นขึ้นอยู่กับความหนาและคุณสมบัติของวัสดุ ฉะนั้นในการออกแบบจึงมีความจำเป็นต้องคำนึงการกระจายตัวของอุณหภูมิเพื่อให้สามารถเลือกใช้วัสดุได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อการสูญเสียความร้อนและการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็ก

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ช่วงตามการทำงานของเตาเผาเหล็ก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานนั้นพบว่า ในช่วงเร่งเตา เป็นช่วงที่เกิดการสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างเกิดขึ้นสูงที่สุด โดยเป็นความร้อนที่สูญเสียจากการสะสมที่โครงสร้างซึ่งคิดเป็น 32.74% นอกนั้นเป็นการสูญเสียความร้อนในส่วนอื่นๆซึ่งประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่สูญเสียกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กคิดเป็น 23.05% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ recuperator คิดเป็น 4.65% , พลังงานความร้อนสูญเสียสะสมที่เหล็กคิดเป็น 22.12% พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็กคิดเป็น 2.01% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่นๆคิดเป็น 6.57 %

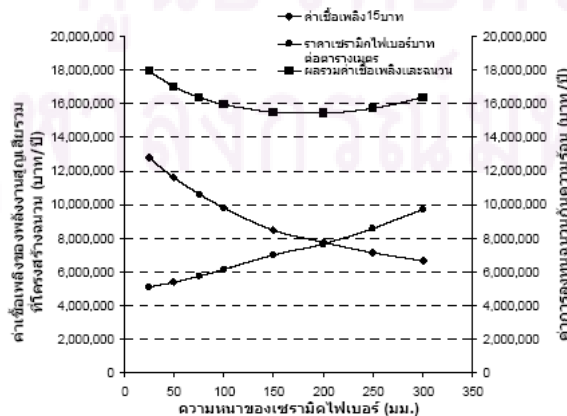
จากผลการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างฉนวนในช่วงการทำงานต่างๆนั้น พบว่า ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนมีค่า 512,074 MJ/สัปดาห์ และเมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวน พบว่า สูญเสียพลังงานไปเป็น 1,006,783 MJ/สัปดาห์ ดังนั้นเมื่อคิดการทำงาน 70% จะต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงสำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างคิดเป็น 19,220,700 บาท/ปี (เทียบกับน้ำมันเตา C ที่ราคา 15 บาท/ลิตร) โดยสามารถสรุปได้ดังแสดงที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างในช่วงการทำงานต่างๆ

ความร้อนสูญเสีย		ปริมาณน้ำมัน		ค่าน้ำมัน	
ผ่านฉนวน MJ/สัปดาห์	สะสมในฉนวน MJ/สัปดาห์	ผ่านฉนวน ลิตร/สัปดาห์	สะสมในฉนวน ลิตร/สัปดาห์	ผ่านฉนวน บาท/สัปดาห์	สะสมในฉนวน บาท/สัปดาห์
512,074	1,006,783	12,857	25,279	192,861	379,183
1,518,857		38,136		572,044	

**แนวทางการปรับปรุง**

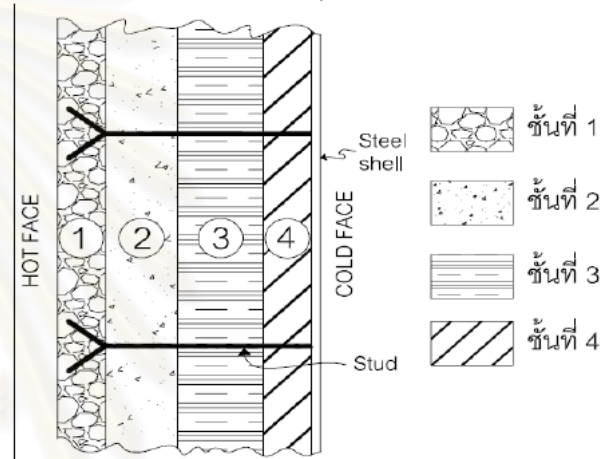
แนวทางในการลดความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวน คือ การใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำเป็นฉนวนด้านในสุดของผนังเตาเผา ในที่นี้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ คือ เซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) โดยติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ด้วยวิธีการแบบ veneering ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสม โดยนำเซรามิกไฟเบอร์แบบ blanket มายึดติดกับโครงสร้างของเตาเผาชั้นในสุดแล้วใช้ stud เป็นตัวจับยึดกับผนังที่เป็น plastic refractory และมีเซรามิกไฟเบอร์แบบ textile เป็นตาข่ายสำหรับป้องกันการพังกระจายของเซรามิกไฟเบอร์ ซึ่งความหนาของเซรามิกไฟเบอร์จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพื่อให้สามารถใช้เซรามิกไฟเบอร์ได้เหมาะสมกับราคาวัสดุฉนวนกันความร้อนและค่าเชื้อเพลิง เนื่องจากความหนาของเซรามิกไฟเบอร์มีผลกับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กและเรื่องการลงทุน การหาความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์แสดงดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงของพลังงานสูญเสียรวม (สูญเสียผ่านและสะสมที่โครงสร้างฉนวน) ที่โครงสร้างฉนวนจะลดลงตามความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ แต่การลงทุนจะมากขึ้นตามความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ ซึ่งจะได้ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมประมาณ 200 mm สำหรับราคาน้ำมันเตา C ที่ 15 บาท/ลิตร โดยโครงสร้างและชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนในการปรับปรุงโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4 และตารางที่ 3



รูปที่ 3 การหาความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์

**ผลการวิเคราะห์หลังการปรับปรุง**

เมื่อทำการปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 200 mm เมื่อพิจารณาความร้อนสะสมในโครงสร้างจะพบว่า สามารถประหยัดพลังงานได้ 178,077 MJ/สัปดาห์ และความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างสามารถประหยัดพลังงานได้ 726,617 MJ/สัปดาห์ ดังนั้น เมื่อคิดการทำงาน 70% สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงสำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างและความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างคิดเป็น 11,463,984 บาท/ปี (เทียบกับน้ำมันเตา C ที่ราคา 15 บาท/ลิตร) โดยสามารถสรุปได้ดังแสดงที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กที่ปรับปรุง

ตารางที่ 3 แสดงชนิดของวัสดุกันความร้อนที่ปรับปรุง

ผนังด้าน	โซน	ชั้นที่ (ความหนา mm.)			
		1	2	3	4
หลังคา	Heating	B(200)	A(50)	B(25)	E(40)
	Soaking	B(200)	A(50)	B(25)	E(40)
แท่นรีด&รดยิ่งเหล็ก	Heating	B(200)	A(115)	E(50)	D(50)
	Soaking	B(200)	A(115)	E(50)	D(50)
หน้า	-	B(200)	A(115)	E(50)	D(50)
หลัง	-	B(200)	A(115)	E(50)	D(50)

หมายเหตุ A คือ Plastic Refractory B คือ Ceramic Fiber Blanket C คือ Castable D คือ Brick Insulation และ E คือ Calcium Silicate Board

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบความร้อนสูญเสียระหว่างฉนวนปัจจุบันและฉนวนปรับปรุง

กรณี	ความร้อนรวม MJ/สัปดาห์	ปริมาณน้ำมัน ลิตร/สัปดาห์	ค่าน้ำมัน บาท/สัปดาห์
ปัจจุบัน	1,518,858	38,191	572,865
ปรับปรุง	614,233	15,445	231,675
ผลต่าง	-904,625	-22,746	-341,190

## สรุป


โรงงานผลิตเหล็กที่มีระบบการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องถ้ามีการปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงจะสามารถประหยัดพลังงานในการผลิตลงได้ จากงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงโครงสร้างฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 200 mm. ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและสามารถทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถลดความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้างของฉนวนลงได้ 59.56% สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตลงได้ประมาณ 11,465,000 บาท/ปี และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.6 ปี

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย และขอขอบคุณคำวิจารณ์และข้อเสนอแนะจาก คุณหิน นววงศ์, รศ.ดร. พงษ์ธรรม์ จรรย์ญากรณ์, ผศ.มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล และคุณจิตติชัย จันทรทิน เป็นอย่างสูง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Routschka, Gerald; Majdic. 1984 Energy Saving Application of Ceramic Fibres in Reheating and Heat-Treating Furnaces ,Metall Plant Technol Vol.7:72-79
- [2] Ou, J. J.; Ho, T. Y, 1984. Benefits of Veneering Ceramic Fibre in Reheating Furnace., South East Asia Iron & Steel Institute.: 1-16
- [3] Molloy, T.J., 1985. Delopments in The Use of Ceramic Fibre to Achieve Energy Reduction in Steel Reheating Furnace., South East Asia Iron & Steel Institute. Vol.14 No.3 July :14-26
- [4] Bhattacharya, A.K.; Ahuja, A.K.; Dasgupta, A.K.; 1996. Application of Ceramic Fibre in Steel Plant Furnaces for Energy Conservation. South East Asia Iron & Steel Institute. Vol.25 No.1 Jan:67-74
- [5] The Carbon Trust. Efficiency Office. 1993 Good Practice Guide 76-Continuous Steel Reheating Furnaces: Specification Design and Equipment. Energy UK Government.
- [6] W. Trinks .2004. Industrial Furnaces. Sixth Edition. United States of America John Wiley and Sons Inc



บทความที่ตีพิมพ์ในการประชุมเสนอ  
ผลงานวิจัยระดับบัณฑิตวิทยาลัย ครั้งที่ 9

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การประชุมเสริม@งานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 14-15 มีนาคม 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

การศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์

กรณีศึกษาโรงงานที่ใช้อัตราการคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOD

STUDY OF ENERGY CONSERVATION FOR REHEATING FURNACE BY USING CERAMIC  
FIBER CASE STUDY FOR A FURNACE OPERATING IN TIME OF DAY (TOD) RATE OF  
ELECTRIC CHARGE

บรรยเวกษ์ สงฤทธิ์ และณัฐเดช เพ็ญจรวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร

E-mail: banyawake14@hotmail.com

Banyawake Songrit and Nattadate Fuangworawong

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

E-mail: banyawake14@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กของโรงงานที่มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOD ในประเทศไทย ซึ่งมีการคิดค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วง 18:30-21:30 ของทุกวัน ดังนั้นช่วงเวลาดังกล่าวจึงไม่มีการรีดเหล็กและเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอุ่นเตา สำหรับช่วงที่มีการรีดเหล็กเป็นช่วงที่เหล็กได้รับความร้อนจากเตาเผาเหล็กและรีดเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงรีดเหล็ก นอกจากนั้นเป็นช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจากช่วงอุ่นเตาไปเป็นอุณหภูมิช่วงรีดเหล็ก เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเร่งเตา แต่ในการออกแบบคำนวณกันความร้อนของเตาเผาเหล็กโดยส่วนใหญ่ จะออกแบบเพื่อให้มีการใช้งานที่ต่อเนื่อง ดังนั้นการใช้งานที่ไม่ตรงกับเงื่อนไขในการออกแบบ จึงอาจจะเป็นสาเหตุทำให้การสูญเสียความร้อนรวมทั้งโครงสร้างฉนวนมีค่าสูงเมื่อได้ทำการสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก พบว่าการสูญเสียความร้อนรวมทั้งโครงสร้างฉนวน ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างฉนวน และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน จากการศึกษาแนวทางการปรับปรุงโครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็กเพื่อลดความร้อนสูญเสียรวม พบว่าการใช้เซรามิกไฟเบอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและทนความร้อนได้สูง จะสามารถลดค่าความร้อนสูญเสียรวมทั้งโครงสร้างฉนวนลงได้ ซึ่งสามารถลดความร้อนสูญเสียสะสมได้ลง 61% โดยใช้เซรามิกไฟเบอร์ความหนา 100 มิลลิเมตร และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 2.3 ปี

คำสำคัญ: เตาเผาเหล็ก/ ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

### บทนำ

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญอุตสาหกรรมหนึ่งกับโครงสร้างอุตสาหกรรมของประเทศไทย โดยประเทศไทยมีเฉพาะอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางและอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย เตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace) เป็นอุปกรณ์หลักอุปกรณ์หนึ่งในกระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า

ชั้นปลาย ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานความร้อนจำนวนมาก โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้พลังงานความร้อน เช่น น้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ จากการสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิตพบว่า เตาเผาเหล็กในประเทศไทยมีการใช้พลังงานสูงกว่าเตาเผาเหล็กของโรงงานเป็นมาตรฐานของโลกในประเทศญี่ปุ่น นอกจากนี้ การทำงานของเตาเผาเหล็กในประเทศไทย แบ่งการทำงานเป็นช่วง ๆ ตามลักษณะของช่วงเวลาคงการคิดค่าไฟ (แบบ TOD และ TOU) โดยวัตถุประสงค์ คือต้องการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า ซึ่งไม่ตรงตามเงื่อนไขการ ออกแบบจนวนกันความร้อนที่โดยส่วนใหญ่ออกแบบเพื่อให้มีการใช้งานที่ต่อเนื่อง การใช้งานซึ่งไม่ตรงกับ เงื่อนไขในการออกแบบนี้อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นสูงที่โครงสร้างจนวนส่งผล ต่อการใช้พลังงานในการผลิต จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับเตาเผาเหล็ก เช่น ในปี 1984 Routschka (1984) ได้ ศึกษาลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็กที่ทำงานแบบไม่ต่อเนื่องพบว่า การปรับปรุงโครงสร้างของจนวน โดยใช้ เชมรามิกไฟเบอร์ สามารถลดความร้อนสูญเสียลงได้ และในปีเดียวกันนี้ Ou and Ho (1984) ได้ศึกษาลักษณะการ ทำงานและวิธีการปรับปรุงเตาเผาเหล็กที่คล้ายคลึงกับ Routschka กับเตาเผาในประเทศจีนพบว่า สามารถลดความ ร้อนสูญเสียสะสมได้ 40% ส่งผลให้การใช้พลังงานเชื้อเพลิงลดลง 6.33% ต่อมาในปี 1985 Molloy (1985) ได้ ศึกษาและทดลองปรับปรุงโครงสร้างของจนวนเตาเผาเหล็กแบบ Walking Beam ที่ใน 1 สัปดาห์มีการเดินเตาเผา เหล็ก 6 วัน และหยุด 1 วัน โดยใช้เชรมามิกไฟเบอร์หนา 50 mm คิดตั้งแบบ Veneering พบว่าการใช้เชื้อเพลิงใน กระบวนการผลิตลดลง 20% และในปี 1996 Bhattacharya, Ahuja and Dasgupta (1996) ทำการทดลองศึกษาการ นำจนวนเชรมามิกไฟเบอร์มาใช้กับเตาเผาในอุตสาหกรรมเหล็กที่มีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องพบว่า สามารถ ประหยัดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงได้ 5-25% จากผลการศึกษาข้างต้น จึงนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ในการ ทำการศึกษา วิจัยออกแบบ และปรับปรุงโครงสร้างของจนวนเตาเผาเหล็กโดยการนำจนวนเชรมามิกไฟเบอร์มาใช้ เพื่อลดการสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างจนวนของเตาเผาที่มีลักษณะการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องในประเทศไทย

#### ลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็ก

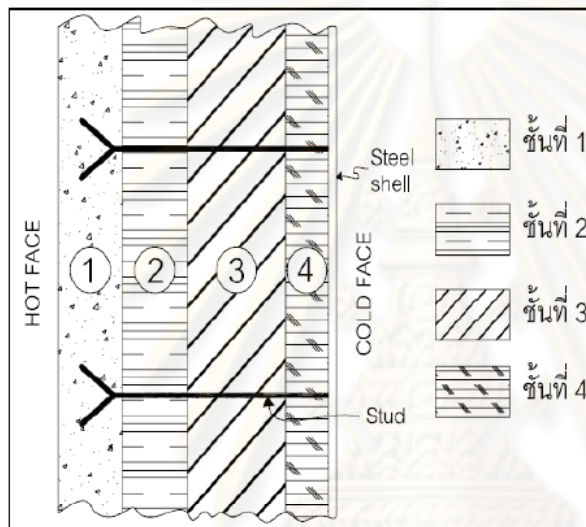
โรงงานผลิตเหล็กที่ทำการศึกษาใช้เตาเผาแบบผลักดัน (Pusher) โดยเตาเผาเหล็กมี 2 โซน คือ Pre-Heating Zone และ Heating Zone อุณหภูมิใช้งานประมาณ 900-1,200 °C ใช้น้ำมันเตา C ผลิตเหล็กแท่งเป็นเหล็ก กลม และเหล็กข้ออ้อย โดยมีการใช้ระบบไฟฟ้าแบบ TOD ซึ่งมีการคิดค่าความต้องการไฟฟ้าในช่วง 18:30-21:30 ของทุกวัน ดังนั้นช่วงเวลากลางวันจึงไม่มีการรีดเหล็ก เตาเผาเหล็กจะอุ่นควบคุมอุณหภูมิของ Pre-Heating Zone ไว้ ที่ 850 °C และ ควบคุมอุณหภูมิของ Heating Zone ไว้ที่ 1,050 °C โดยเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอุ่นเตา ใน 1 สัปดาห์ มีช่วง อุ่นเตา 17.5 ชั่วโมง สำหรับช่วงที่มีการรีดเหล็ก เป็นช่วงที่เหล็กได้รับความร้อนจากเตาเผาเหล็ก โดยควบคุม อุณหภูมิไว้ของ Pre-Heating Zone ไว้ที่ 1,150 °C และ ควบคุมอุณหภูมิของ Heating Zone ไว้ที่ 1,250 °C โดยเรียก ช่วงนี้ว่า ช่วงรีดเหล็ก ใน 1 สัปดาห์ จะมีช่วงรีดเหล็ก 147 ชั่วโมง นอกจากนี้ช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจาก อุณหภูมิช่วงอุ่นเตาไปเป็นอุณหภูมิช่วงรีดเหล็ก เรียกว่า ช่วงเร่งเตา โดยใน 1 สัปดาห์ จะมีช่วงเร่งเตา 7 ครั้ง ครั้งละ 30 นาที

#### โครงสร้างจนวนของเตาเผาเหล็ก

โครงสร้างของจนวนเตาเผาเหล็กในปัจจุบันแสดงผังรูปและตารางที่ 1 ซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้งานกับ ลักษณะการดำเนินแบบต่อเนื่อง และพิจารณาตามความเหมาะสมของราคาเชื้อเพลิงในช่วงระยะเวลาที่ออกแบบ

การประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 14-15 มีนาคม 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

โดยโครงสร้างของฉนวนปัจจุบันนี้ โดยเฉพาะ Plastic Refractory ซึ่งมีความสามารถในการทนต่อความร้อนได้ดี แต่มีความหนาแน่นสูงและมีค่าการนำความร้อนสูงทำให้เมื่อนำมาใช้กับการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องทำให้เกิดการสะสมของความร้อนในโครงสร้างของฉนวนมีค่าสูง ส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิต โครงสร้างของฉนวนจะแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามระดับของอุณหภูมิใช้งานในแต่ละโซนและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในฉนวนแต่ละชั้น



ภาพที่ 1 โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กในปัจจุบัน

ตารางที่ 1 แสดงชนิดของวัสดุกันความร้อน

ผนังด้าน	โซน	ชั้นที่ (ความหนา mm.)			
		1	2	3	4
หลังคา	Preheating	C(200)	B(25)	C(80)	-
	Heating	A(200)	B(25)	C(80)	-
แท่นรีด&รดยิ่งเหล็ก	Preheating	C(229)	D(76)	D(115)	E(50)
	Heating	A(229)	D(76)	D(115)	E(50)
หน้า	-	C(229)	D(76)	D(115)	E(50)

หมายเหตุ: A คือ Plastic Refractory B คือ Ceramic Fiber Blanket C คือ Castable D คือ Brick Insulatoin และ E คือ Calcium Silicate Board

เซรามิกไฟเบอร์

การประชุมเสวนา@งานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 14-15 มีนาคม 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

เส้นใยเซรามิกเป็นวัสดุฉนวนที่มีค่าการนำความร้อนและความหนาแน่นต่ำ โดยทั่วไปเส้นใยเซรามิกผลิตขึ้นโดยการผสมและหลอมอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และซิลิกา ( $SiO_2$ ) เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิ 1,800-2,000 °C บางครั้งจะมีการผสมอะลูมิโนซิลิเกต ( $ZrO_2$ ) เข้าไปเพื่อช่วยลดระดับการหดตัวและทำให้เส้นใยเหมาะกับการใช้งานในอุณหภูมิสูง ในขั้นต้นเส้นใยเซรามิกจะถูกผลิตออกมาในรูปแบบของปุยเส้นใย จากนั้นจึงถูกเย็บเข้าด้วยกันเป็นเส้นใยที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กันตั้งแต่ 64 ถึง 190 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ช่วงอุณหภูมิที่แนะนำสำหรับการเลือกใช้เซรามิกไฟเบอร์ที่ส่วนผสมต่าง ๆ แสดงดังตาราง ที่ 2

ตารางที่ 2 อุณหภูมิแนะนำสำหรับการใช้งานอย่างค่อเนื่องของเส้นใย

ระดับอุณหภูมิ	ปริมาณส่วนผสมในเซรามิกไฟเบอร์		
	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$ZrO_2$
1,150 °C	43-47 เปอร์เซ็นต์	53-57 เปอร์เซ็นต์	-
1,250 °C	52-56 เปอร์เซ็นต์	44-48 เปอร์เซ็นต์	-
1,325 °C	33-35 เปอร์เซ็นต์	47-50 เปอร์เซ็นต์	17-20 เปอร์เซ็นต์

คุณสมบัติของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุทนความร้อนสำหรับเตาเผาเหล็ก เช่น มีค่าการนำความร้อนต่ำ, มีน้ำหนักเบา, เก็บความร้อนได้น้อยกว่า, มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน, มีความต้านทานต่อสารเคมี, มีความยืดหยุ่นสูง และ ทำการบำรุงรักษาได้ง่าย เป็นต้น

### ทฤษฎีการวิเคราะห์พลังงาน

#### การถ่ายเทความร้อนเตาเผาเหล็ก

การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กเกิดจากการที่ก๊าซร้อนภายในเตาเผาเหล็กถ่ายเทความร้อนไปสู่ผนังชั้นนอกสุด (Cold Face) ของเตาเผาเหล็ก ซึ่งสามารถถ่ายเทได้ โดย 3 วิธี คือ การนำความร้อน, การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยที่ความร้อนจะถ่ายเทจากก๊าซร้อนในเตาเผาเหล็กไปสู่ผนังของชั้นในสุด (Hot Face) ของเตาเผาเหล็ก โดยวิธีการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน หลังจากนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากชั้นในสุดไปสู่ชั้นต่าง ๆ โดยวิธีการนำความร้อน และท้ายที่สุดความร้อนจะถ่ายเทจากผนังนอกสุดของเตาเผาเหล็กไปสู่อากาศภายนอกโดยการพาความร้อน

#### สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก

พิจารณาเตาเผาเหล็กเป็นปริมาตรควบคุม สมดุลพลังงานในเตาเผาเหล็กในช่วงเวลา  $\Delta t$  ใด ๆ จะให้ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็ก=ความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก

#### พลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

1. ความร้อนจากเชื้อเพลิง  $Q_{in1}$  เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานความร้อนโดยวิธีการเผาไหม้

การประชุมเสวนา@งานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 14-15 มีนาคม 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

2. ความร้อนสัมผัสของอากาศ  $Q_{in2}$  เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากอุณหภูมิอากาศที่เข้าเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยสำหรับเตาเผาเหล็กความร้อนสัมผัสของอากาศได้รับมาจากการนำความร้อนกลับจากความร้อนสูญเสียจากไอเสีย โดยใช้ Recuperator ในการนำความร้อนกลับ

3. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง  $Q_{in3}$  เป็นความร้อนที่ได้จากได้จากการที่เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยสำหรับเตาเผาเหล็กความร้อนในส่วนนี้ได้รับมาจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า

4. ความร้อนจากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก  $Q_{in4}$  เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเกิดออกไซด์ของเหล็ก

**พลังงานความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย**

1. ความร้อนที่ใช้ประโยชน์  $Q_{out1}$  เป็นความร้อนที่ติดไปกับเหล็กก่อนเข้าแท่นรีด เนื่องจากอุณหภูมิของเหล็กก่อนเข้าแท่นรีดมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{out1} = m_{steel} \times C_{p,s} \times (T_o - T_{sur})$$

โดยที่  $m_{steel}$  = อัตราการผลิตเหล็ก (kg/hr),  $C_{p,s}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก (kcal/kg-°C),  $T_o$  = อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา (°C) และ  $T_{sur}$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (°C)

2. ความร้อนสูญเสียสเกล  $Q_{out2}$  เป็นความร้อนที่ออกไปกับสเกล โดยสเกลนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{out2} = \% \times m_{steel} \times C_{p,s} \times (T_o - T_{sur})$$

โดยที่ % = เปอร์เซ็นต์การเกิด Scale,  $m_{steel}$  = อัตราการผลิตเหล็ก (kg/hr),  $T_o$  = อุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา (°C),  $C_{p,s}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของ Scale (kcal/kg-°C) และ  $T_{sur}$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (°C)

3. ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย  $Q_{out3}$  เป็นความร้อนที่ออกไปกับไอเสียที่ออกจากเตาเผาเหล็ก ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{out3} = m_{fuel} \times C_{p,f} \times (T_g - T_{sur})$$

โดยที่  $m_{fuel}$  = อัตราการใช้เชื้อเพลิง (L/hr),  $C_{p,f}$  = ความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง (kcal/kg-°C),  $T_g$  = อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ปล่อยไอเสีย (°C) และ  $T_{sur}$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (°C)

4. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด  $Q_{out4}$  เป็นความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กทางช่องเปิดต่าง ๆ เนื่องจากความร้อนของก๊าซเสียมีความดันสูงหรือต่ำกว่าความดันบรรยากาศ สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{out4} = C_{rad} \times C_{rad,black} \times \varepsilon \times A_o$$

การประชุมวิชาการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 14-15 มีนาคม 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

โดยที่  $C_{rad}$  = ตัวคูณการแผ่รังสีความร้อน,  $C_{rad,black}$  = การแผ่รังสีจากวัตถุดำ (kcal/cm<sup>2</sup>/hr),  
 $\varepsilon$  = Emissivity ของผนังเตาเผาเหล็ก และ  $A_o$  = พื้นที่ของช่องเปิดเตาเผาเหล็ก (cm<sup>2</sup>)

5. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา  $Q_{out5}$  เป็นพลังงานความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็ก เนื่องจากอุณหภูมิของผนังเตาเผาเหล็กมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{out5} = hA(T_s - T_{sur}) + 4.88A\varepsilon \left[ \left( \frac{273 + T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + T_{sur}}{100} \right)^4 \right]$$

โดยที่  $h$  = Convective Heat Transfer Coefficient (kcal/m<sup>2</sup>.hr. °C),  $A$  = พื้นที่ผนังเตาเผาเหล็ก (m<sup>2</sup>),  
 $T_s$  = อุณหภูมิของผนัง (°C),  $T_{sur}$  = อุณหภูมิของอากาศ (°C) และ  $\varepsilon$  = Emissivity ของผนังเตาเผาเหล็ก

6. ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น  $Q_{out6}$  เป็นพลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำระบายความร้อน ความร้อนในส่วนนี้ จะมีเฉพาะเตาเผาเหล็กที่มีการใช้น้ำระบายความร้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{out6} = m_{water} \times C_{p,w} \times (T_{w,o} - T_{w,i})$$

โดยที่  $m_{water}$  = อัตราการไหลของน้ำ (L/hr),  $C_{p,w}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kcal/kg-°C),  
 $T_{w,o}$  = อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากเตาเผา (°C) และ  $T_{w,i}$  = อุณหภูมิของน้ำที่เข้าสู่เตาเผา (°C)

7. ความร้อนสูญเสียสะสมที่เหล็ก  $Q_{out7}$  เป็นความร้อนที่สะสมที่เหล็ก ซึ่งค้างอยู่ในเตาเผาเหล็กขณะเพิ่มอุณหภูมิในช่วงเร่งเตา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหล็ก สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{out7} = m_{steel} \times C_{p,s} \times T'_{steel}$$

โดยที่  $m_{steel}$  = มวลของเหล็กที่ค้างอยู่ในเตา (kg),  $C_{p,s}$  = ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก (kcal/kg-°C)  
 และ  $T'_{steel}$  = อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเหล็ก (°C/hr)

8. ความร้อนสูญเสียสะสมใน โครงสร้างฉนวนของเตาเผาเหล็ก  $Q_{out8}$  เป็นความร้อนที่สะสมใน โครงสร้างเตาเผาเหล็ก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโครงสร้างเตาเผาเหล็ก ซึ่งเกิดจากลักษณะการทำงานของเตาเผาเหล็กแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งหากการออกแบบฉนวนมีความเหมาะสมกับการใช้งานจริง จะสามารถลดความสูญเสียในส่วนนี้ได้ สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{out8} = A \left\{ \left[ l_1 \times \rho_1 \times c_{p1} \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right) + l_2 \times \rho_2 \times c_{p2} \left( \frac{T_2 + T_3}{2} \right) + \dots + l_n \times \rho_n \times c_{pn} \left( \frac{T_n + T_{n+1}}{2} \right) \right] - \left[ l_1 \times \rho_1 \times c_{p1} \left( \frac{T_{1s} + T_{2s}}{2} \right) + l_2 \times \rho_2 \times c_{p2} \left( \frac{T_{2s} + T_{3s}}{2} \right) + \dots + l_n \times \rho_n \times c_{pn} \left( \frac{T_{ns} + T_{n+1s}}{2} \right) \right] \right\}$$

การประชุมและงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 14-15 มีนาคม 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

โดยที่  $A$  = พื้นที่ผืนเงาเผาเหล็ก ( $m^2$ ),  $l_1, l_2, \dots, l_n$  = ความหนาของฉนวนแต่ละชนิด ( $m$ ),  
 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  = ความหนาแน่นของฉนวนแต่ละชนิด ( $kg/m^3$ ),  $c_{p1}, c_{p2}, \dots, c_{pn}$  = ความร้อนจำเพาะของ  
 ฉนวนแต่ละชนิด ( $kcal/kg \cdot ^\circ C$ ),  $T_1, T_2, \dots, T_{n+1}$  = อุณหภูมิระหว่างผิวของฉนวนแต่ละชนิด (สภาวะสุดท้าย)  
 ( $^\circ C$ ) และ  $T_{1s}, T_{2s}, \dots, T_{ns+1}$  = อุณหภูมิระหว่างผิวของฉนวนแต่ละชนิด (สภาวะตั้งต้น) ( $^\circ C$ )

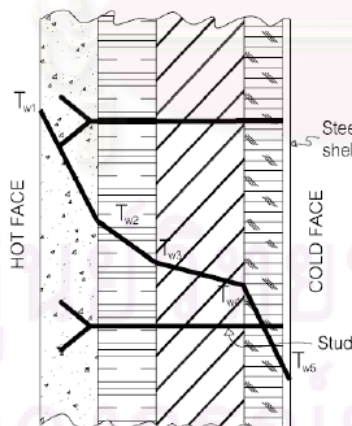
9. ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ  $Q_{out9}$  ได้มาจากความแตกต่างของความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็กกับความร้อน  
 ออกจากเตาเผาเหล็ก สามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{out9} = Q_{in1} + Q_{in2} + Q_{in3} + Q_{in4} - Q_{out1} - Q_{out2} - Q_{out3} - Q_{out4} - Q_{out5} - Q_{out6} - Q_{out7} - Q_{out8}$$

### การวิเคราะห์และแนวทางการปรับปรุง

#### การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนรวมที่โครงสร้างฉนวน

การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างนั้นเพื่อให้ทราบถึงลักษณะและปริมาณความร้อนที่  
 สูญเสียที่ผนัง ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์การกระจายตัว และสมดุลพลังงานในช่วงการทำงานต่าง ๆ  
 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในโครงสร้างของฉนวนเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนในเตาเผา  
 เหล็กไปสู่ผนังของชั้นในสุด (Hot Face) ของเตาเผาเหล็ก โดยวิธีการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน  
 หลังจากนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากชั้นในสุดไปชั้นต่าง ๆ โดยวิธีการนำความร้อนและท้ายที่สุดความร้อนจะ  
 ถ่ายเทจากผนังนอกสุด (Cold Face) ของเตาเผาเหล็กไปสู่อากาศภายนอกโดยการพาความร้อน จากภาพที่ 2 จะ  
 เห็นได้ว่า



ภาพที่ 2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ

การกระจายตัวของอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงจากผิวด้านในสุด (Hot Face) มายังผิวด้านนอกสุด (Cold  
 Face) ทั้งนี้ระดับการลดลงของอุณหภูมินั้นขึ้นอยู่กับความหนาและคุณสมบัติของวัสดุ ฉะนั้นในการออกแบบจึงมี

ความจำเป็นต้องคำนึงการกระจายตัวของอุณหภูมิเพื่อให้สามารถเลือกใช้วัสดุได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อการสูญเสียความร้อนและการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็ก

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กแบ่งออกเป็น 3 ช่วงตามการทำงานของเตาเผาเหล็ก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานนั้นพบว่า ในช่วงเร่งเตา เป็นช่วงที่เกิดการสูญเสียความร้อนที่โครงสร้างเกิดขึ้นสูงสุด โดยเป็นความร้อนที่สูญเสียจากการสะสมที่โครงสร้างซึ่งคิดเป็น 57.39% นอกนั้นเป็นการสูญเสียความร้อนในส่วนอื่น ๆ ซึ่งประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่สูญเสียกับไอเสียร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กคิดเป็น 31.37% อย่างไรก็ตามพลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะถูกนำกลับมาบางส่วนโดย Recuperator ซึ่งจะมีความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียออกจากเตาเผาเหล็กและ Recuperator คิดเป็น 9.54%, พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเหล็กคิดเป็น 4.88% และพลังงานความร้อนสูญเสียอื่น ๆ คิดเป็น 6.36 %

จากผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กในช่วงการทำงานต่าง ๆ นั้น พบว่า การสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นที่โครงสร้างของฉนวนเป็นหลัก โดยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างของฉนวน และความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างฉนวน ส่งผลต่อการใช้พลังงานที่สูงในกระบวนการผลิต ซึ่งเมื่อคิดการทำงานของเตาเผา 70% ต่อปี จะต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงสำหรับความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างและความร้อนสูญเสียสะสมในโครงสร้างคิดเป็น 7,608,024 บาท/ปี (เทียบกับน้ำมันเตา C ที่ราคา 15 บาท/ลิตร) ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่สูง โดยสามารถสรุปได้ดังแสดงที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างในช่วงการทำงานต่าง ๆ

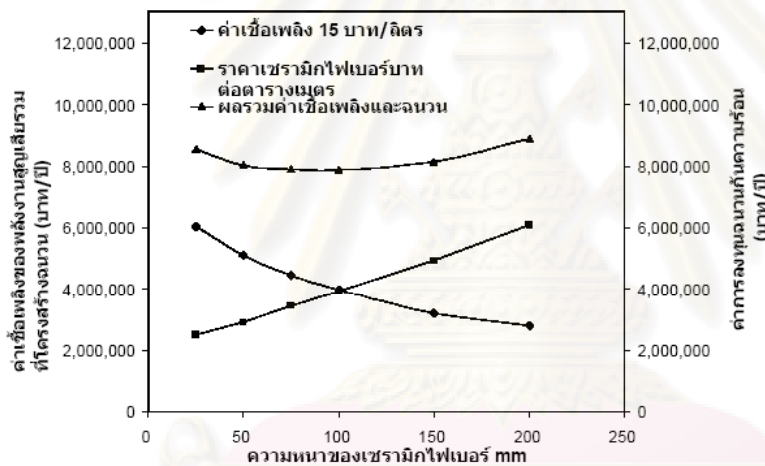
ความร้อนสูญเสีย		ปริมาณน้ำมัน		ค่าน้ำมัน	
ผ่านฉนวน MJ/สัปดาห์	สะสมในฉนวน MJ/สัปดาห์	ผ่านฉนวน ลิตร/สัปดาห์	สะสมในฉนวน ลิตร/สัปดาห์	ผ่านฉนวน บาท/สัปดาห์	สะสมในฉนวน บาท/สัปดาห์
284,648	316,554	7,147	7,949	107,207	119,223
601,202		15,096		226,429	

#### แนวทางการปรับปรุง

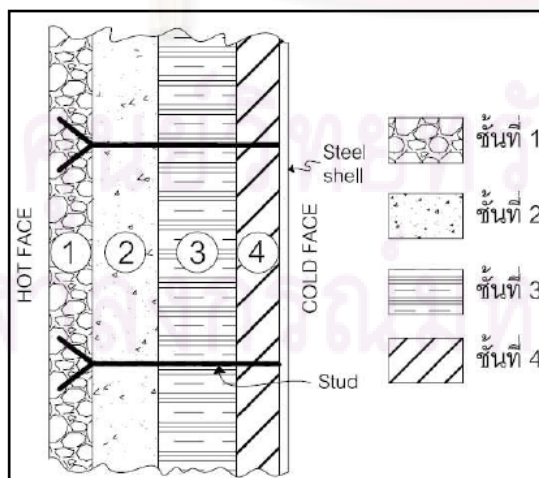
แนวทางในการลดความร้อนสูญเสียที่โครงสร้างของฉนวน คือ การใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำเป็นฉนวนด้านในสุดของผนังเตาเผา ในที่นี้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ คือ เซรามิก ไฟเบอร์ (Ceramic Fiber) โดยติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ด้วยวิธีการแบบ Veneering ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสม โดยนำเซรามิกไฟเบอร์แบบ Blanket มายึดติดกับโครงสร้างของเตาเผาชั้นในสุดแล้วใช้ Stud เป็นตัวจับยึดกับผนังที่เป็น Plastic Refractory และมีเซรามิกไฟเบอร์แบบ Textile เป็นค้ำยันสำหรับป้องกันการฟุ้งกระจายของเซรามิกไฟเบอร์ ซึ่งความหนาของเซรามิกไฟเบอร์จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง เพื่อให้สามารถใช้เซรามิกไฟเบอร์ได้เหมาะสมกับราคาวัสดุฉนวนกันความร้อนและค่าเชื้อเพลิง เนื่องจากความหนาของเซรามิกไฟเบอร์มีผลกับความร้อนสูญเสียผ่านและสะสมที่โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กกับเรื่องการลงทุน การหาความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์ได้พิจารณาจากการวิเคราะห์ ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจากความร้อนสูญเสียผ่านและสะสม



ที่โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กกับค่าการลงทุนฉนวนกันความร้อน แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่เกิดจากความร้อนสูญเสียรวมที่โครงสร้าง (ความร้อนสูญเสียผ่านและสะสมที่โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็ก) กับค่าการลงทุนฉนวนกันความร้อนของเตาเผาเหล็กที่คำนวณราคาของฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ต่อตารางเมตร (การลงทุนฉนวนกันความร้อนเซรามิกไฟเบอร์ สามารถใช้งานได้ 2.5 ปี และ วัสดุทนไฟอื่น ๆ สามารถใช้งานได้ 5 ปี) ซึ่งจะได้ความหนาของเซรามิกไฟเบอร์ที่เหมาะสมประมาณ 100 mm โดยในการติดตั้งเซรามิกไฟเบอร์ที่ผนังด้านในของเตาเผาเหล็กนั้นต้องทำการปรับปรุงผนังในส่วน Plastic Refractory ซึ่งการปรับปรุงผนังในส่วนนี้จะทำให้เกิดความเสียหายกับผนังในส่วนอื่น ๆ ดังนั้นการลงทุน ต้องคิดค่าวัสดุทั้งหมดของเตาเผาเหล็ก ราคาปรับปรุงโครงสร้าง (เฉพาะค่าวัสดุ) คิดเป็นเงินประมาณ 8,400,000 บาท โดยโครงสร้างและชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนในการปรับปรุงโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 4 และตารางที่ 4



ภาพที่ 3 การหาความหนาที่เหมาะสมของเซรามิกไฟเบอร์



ภาพที่ 4 โครงสร้างของฉนวนเตาเผาเหล็กที่ปรับปรุง

การประชุมเสวนาของกลางวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 14-15 มีนาคม 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

ตารางที่ 4 แสดงชนิดของวัสดุกันความร้อน

ผนังด้าน	โซน	ชั้นที่ (ความหนา mm.)			
		1	2	3	4
หลังคา	Preheating	B(100)	B(25)	C(80)	-
	Heating	B(100)	B(25)	C(80)	-
แท่นรีด&	Preheating	B(100)	A(76)	D(115)	E(50)
รถยิงเหล็ก	Heating	B(100)	A(76)	D(115)	E(50)
หน้า	-	B(100)	A(76)	D(115)	E(50)

หมายเหตุ: A คือ Plastic Refractory B คือ Ceramic Fiber Blanket C คือ Castable D คือ Brick Insulatoin และ E คือ Calcium Silicate Board

#### ผลการวิเคราะห์หลังการปรับปรุง

เมื่อทำการปรับปรุงโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 100 mm เมื่อพิจารณาความร้อนสะสมในโครงสร้างจะพบว่า สามารถประหยัดพลังงานได้ 193,843 MJ/สัปดาห์ หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ลดลงเป็นเงิน 2,453,029 บาท/ปี และความร้อนสูญเสียผ่านโครงสร้างสามารถประหยัดพลังงานได้ 93,944 MJ/สัปดาห์ หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ลดลงเป็นเงิน 1,188,833 บาท/ปี (คิดการทำงาน 70%และน้ำมันเตา C ที่ราคา 15 บาท/ลิตร โดยสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบความร้อนสูญเสียระหว่างฉนวนปัจจุบันและฉนวนปรับปรุง

รายละเอียด	ความร้อนสูญเสีย		ปริมาณน้ำมัน		ค่าน้ำมัน	
	ผ่านฉนวน	สะสมในฉนวน	ผ่านฉนวน	สะสมในฉนวน	ผ่านฉนวน	สะสมในฉนวน
	MJ/สัปดาห์	MJ/สัปดาห์	ลิตร/สัปดาห์	ลิตร/สัปดาห์	บาท/สัปดาห์	บาท/สัปดาห์
ฉนวนปัจจุบัน	284,648	316,554	7,147	7,949	107,207	119,223
ฉนวนปรับปรุง	190,705	122,709	4,788	3,081	71,824	46,215
ค่าการประหยัด	93,943	193,845	2,359	4,868	35,383	73,008
ประหยัดรวม	287,788		15,096		108,391	

#### สรุป

โรงงานผลิตเหล็กที่มีระบบการทำงานแบบไม่ต่อเนื่องถ้ามีการปรับปรุงโครงสร้างของฉนวนให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงจะสามารถประหยัดพลังงานในการผลิตลงได้ จากงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุง

การประชุมและงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 9 วันที่ 14-15 มีนาคม 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงสร้างฉนวนโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์หนา 100 mm. และใช้เงินลงทุนประมาณ 8,400,000 บาท ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและสามารถทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถลดความร้อนสูญเสียในโครงสร้างของฉนวนลงได้ 61% สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตลงได้ประมาณ 3,650,000 บาท/ปี และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 2.3 ปี

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย และขอบคุณคำวิจารณ์และข้อเสนอแนะจาก คุณหิน นววงศ์, รศ.ดร. พงษ์ธรรม์ จรรย์ญากรณ์, ผศ.มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล และคุณจิตติชัย จันทร์ทิน เป็นอย่างสูง

#### เอกสารอ้างอิง

- Bhattacharya, A. K., Ahuja, A. K., & Dasgupta, A. K. (1996, Jan). Application of ceramic fibre in steel plant furnaces for energy conservation. *South East Asia Iron & Steel Institute*, 25(1), 67-74
- Ou, J. J., & Ho, T. Y. (1984). Benefits of veneering ceramic fibre in reheating furnace. *South East Asia Iron & Steel Institute*, 1-16.
- Routschka, G. M. (1984). Energy saving application of ceramic fibres in reheating and heat-treating furnaces. *Metall Plant Technol*, 7,72-79
- Molloy, T. J. (1985, July). Delopments in the use of ceramic fibre to achieve energy reduction in steel reheating furnace. *South East Asia Iron & Steel Institute*, 14(3), 14-26
- The Carbon Trust, Efficiency Office. (1993). *Good Practice Guide 76-Continuous Steel Reheating Furnaces: Specification Design and Equipment*. UK: Energy UK Government.
- Trinks, W. (2004). *Industrial Furnaces* (6<sup>th</sup> ed.). United States of America: John Wiley and Sons Inc.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย บรรยเวกษ์ก์ สงฤทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2525 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2547 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย