

การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิค



เรือโท ปิยะภัทร คุ่มปรีดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1041-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 20358490

STUDY AND DEVELOPMENT OF RECUPERATOR FOR CERAMIC KILN



Junior Lieutenant Piyapat Coompreedee

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1041-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผา
เซรามิค

โดย

เรือโท ปิยะภัทร คุ่มปรีดี


สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

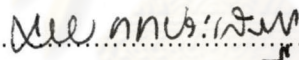
อาจารย์ที่ปรึกษา

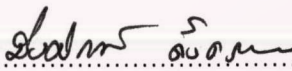
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตะกูล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตะกูล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

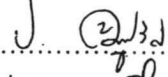
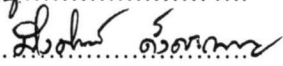
เรือโท ปิยะภัทร คุ่มปรีดี : การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิก. (STUDY AND DEVELOPMENT OF RECUPERATOR FOR CERAMIC KILN) อ. ที่ปรึกษา ผศ.มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล, 287 หน้า. ISBN 974-03-1014-9

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิก เตาเผาเซรามิกเป็นอุปกรณ์ที่มีสำคัญในกระบวนการผลิตเซรามิกและต้องการความร้อนสูงจากเชื้อเพลิงโดยตรงเป็นเวลานานในกระบวนการเผา ทำให้มีพลังงานที่ถูกปล่อยทิ้งโดยเฉลี่ยราว 35-50% ในรูปของความร้อนที่ปล่อยทิ้งทางปล่องควันซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 600-800 องศาเซลเซียส

จากการเก็บข้อมูลเตาเผาเซรามิกขนาดความจุ 0.5 ลบ.ม. พบว่าอุณหภูมิปล่อยทิ้งทางปล่องประมาณ 800 องศาเซลเซียส คิดเป็นพลังงานที่ถูกปล่อยทิ้ง 59.5 % ใช้ก๊าซ LPG ในการเผา 13.7 กิโลกรัม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเซรามิกเท่ากับ 1.7%

หลังการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศแบบ Recuperator โดยวิธีความแตกต่างของอุณหภูมิแบบล็อกมีน (logarithmic mean temperature difference, LMTD) ซึ่งการออกแบบคำนึงถึงค่าความร้อนในการเก็บกลับคืนจากก๊าซเสีย ความดันสูญเสียในระบบ ความเหมาะสมในการลงทุน ความสะดวกในการติดตั้ง สามารถสร้าง Recuperator แบบ Cross-Flow Four-Pass Heat Exchanger มีท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 22 ท่อ ก๊าซเสียไหลในท่อ 1 เที้ยว และอากาศไหลในเซลล์ 4 เที้ยว

ผลการทดลองหลังติดตั้งกับปล่องควันของเตาเผาเซรามิกพบว่าสามารถอุ่นอากาศจากอุณหภูมิ 49 เป็น 394 องศาเซลเซียส สามารถประหยัดก๊าซ LPG ลง 23% ต่อการเผา 1 ครั้ง คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ประมาณ 14,553 บาท/ปี ระยะเวลาในการคืนทุน 2 ปี 2 เดือน อัตราผลตอบแทนการลงทุน 49.5 % ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเซรามิกเท่ากับ 2.3% ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเตาเผาเซรามิกขนาดอื่นๆ Recuperator มีประสิทธิภาพผล 47% และความดันสูญเสียในระบบ 124 Pa

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

###4270427121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : CERAMIC KILN / RECUPERATOR / HEAT EXCHANGER DESIGN

PIYAPAT COOMPREEDEE : STUDY AND DEVELOPMENT OF RECUPERATOR
FOR CERAMIC KILN. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. MINGSAK
TUNGTAKUN, 287 PP. ISBN 974-03-1014-9

The aim of this research is to study on the application of energy conservation in ceramic kiln. This involve the design construction and testing of a recuperator which has been used to reclaim heat from the exhaust of ceramic kiln.

The result of energy audit performed on the ceramic kiln size 0.5 m^3 showed that the combustion flue gas released to the atmosphere has a relatively high temperature that is around $800 \text{ }^\circ\text{C}$ or 59.5 % of energy input . The fuel (LPG) consumption are 13.7 kg / batch

The recuperator was design by logarithmic mean temperature difference method (LMTD) and the recuperator constructed was of cross-flow four-pass heat exchanger type, and made of 22 stainless steel tubes by the flue gas flow in tubes and preheat air flow in shells.

The result of testing after recuperator was install at the chimney of the kiln, the recuperator can be preheat the combustion air from 49 to $394 \text{ }^\circ\text{C}$, the usage of LPG is reduced by 23 % of the overall amount. This amount of saving was found to be equivalent to 14,533 Bath per year, with the payback period 2.2 years, or give an internal rate of return 49.5 %. The kiln after install recuperator had efficiency being 2.3 %. The effectiveness of the recuperator is about 47 % . The pressure drop is 124 Pa.

Department.....Mechanical Engineering..... Student 's signature..... *Piyapat Coompreedee*
Field of study.....Mechanical Engineering..... Advisor 's signature..... *M. Mingsak Tungtakun*
Academic Year...2001..... Co- advisor 's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดต่างๆที่มีคุณค่ายิ่งมาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย จนการวิจัยนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการรองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ และรองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ และชี้แนะแนวทางในการดำเนินการวิจัยมาโดยตลอด จนทำให้การวิจัยสามารถลุล่วงไปได้ด้วยดี และมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณ จรัล อินทร์ซี่ และ บริษัท อินเทอร์เน็ต จำกัด ที่เอื้อเฟื้อเตาเผาเซรามิคสำหรับการวิจัยนี้ ตลอดจน คุณ ทงธรรม อินทร์ซี่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ณัฐเดช เพ็ญวงวงศ์ และ คุณ ประพันธ์ พิกุลทอง ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ขอคุณ พี่ อัมพา ตลอดจนสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงาน ที่คอยดูแล และให้กำลังใจในระหว่างการทำงานวิจัยนี้

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.6 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	8
2. อุตสาหกรรมเซรามิคและเตาเผาเซรามิค.....	13
2.1 อุตสาหกรรมเซรามิค.....	13
2.2 เตาเผาเซรามิค.....	22
3. ทฤษฎีประกอบการวิเคราะห์การใช้พลังงานในเตาเผาเซรามิค.....	24
3.1 ความหมายของการอนุรักษ์พลังงาน.....	24
3.2 ประเภทของมาตรการการประหยัดพลังงาน.....	25
3.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์พลังงานประสิทธิภาพเตาเผาเซรามิค.....	26
3.4 วิธีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	34
4. การวิเคราะห์พลังงานสำหรับเตาเผาเซรามิค.....	36
4.1 การตรวจวัดประสิทธิภาพและจัดเก็บข้อมูล.....	36
4.2 ผลการตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเซรามิค.....	42
4.3 การคำนวณหาประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิค.....	46

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. ทฤษฎีการนำความร้อนที่กลับมาใช้ประโยชน์.....	75
5.1 การนำความร้อนที่กลับมาใช้ประโยชน์.....	75
5.2 ประเภทเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	77
5.3 ประเภทของเครื่องอุณหอากาศ.....	92
5.4 การพิจารณาเลือก Recuperator ที่เหมาะสมกับเตาเผาเซรามิค.....	98
6. การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	102
6.1 ทฤษฎีการคำนวณของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	102
6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	113
6.3 ค่าความดันสูญเสีย.....	117
6.4 ขั้นตอนการออกแบบและการคำนวณ.....	122
6.5 การคำนวณหาขนาด Recuperator.....	124
6.6 การหาค่าความดันสูญเสียในท่ออากาศเข้าเตา.....	140
6.7 Blower ที่ใช้กับระบบแลกเปลี่ยนความร้อน.....	145
7. การสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	146
7.1 ขั้นตอนการจัดสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	146
7.2 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเข้ากับเตาเผาเซรามิค.....	149
7.3 สถานที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	152
7.4 การทดลองหลังจากติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	153
8. ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์.....	154
8.1 วิธีการทดลอง.....	154
8.2 ผลการทดลอง.....	156
8.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	171
8.4 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเตาเผาเซรามิคที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนในการเผาเคลือบ.....	177
8.5 ผลการการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	198

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
9. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	200
9.1 สรุปผลการวิจัย.....	200
9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม.....	201
รายการอ้างอิง.....	203
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลเตาเผาเซรามิกก่อนติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	207
ภาคผนวก ข ข้อมูลการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	228
ภาคผนวก ค ข้อมูลเตาเผาเซรามิกก่อนติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	239
ภาคผนวก ง การหาค่า F สำหรับออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนร้อน.....	281
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	287



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
4.1	รายการข้อมูลที่ดำเนินการตรวจวัด.....	36
4.2	ตารางสรุปผลการทดลองเผาติดทั้ง 5 ครั้ง.....	43
4.3	ตารางสรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในการเผาติดทั้ง 5 ครั้ง ในจุดต่างๆ ของ การทดลองทุก60นาที.....	43
4.4	ตารางสรุปผลการทดลองเผาเคลือบทั้ง 5 ครั้ง.....	44
4.5	สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในการเผาเคลือบทั้ง 5 ครั้ง ในจุดต่างๆ ของการทดลองทุก 60 นาที.....	45
4.6	แสดงสัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียในการเผาติด.....	49
4.7	แสดงสัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียในการเผาเคลือบ...	61
4.8	สมดุลมวลในการเผาติด Biscuit ต่อ 1 รอบการเผา.....	69
4.9	สมดุลมวลในการเผาเคลือบต่อ 1 รอบการเผา.....	70
4.10	สมดุลพลังงานในการเผาติด Biscuit ต่อ 1 รอบการเผา.....	71
4.11	สมดุลพลังงานในการเผาเคลือบต่อ 1 รอบการเผา.....	72
5.1	ตารางความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวใช้งานกับอุณหภูมิ.....	90
5.2	การเปรียบเทียบสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ....	91
5.3	ตารางเปรียบเทียบ Metallic Recuperator กับ Ceramic Recuperator...	99
5.4	ประเภทของ Recuperator กับอุณหภูมิของอากาศที่อุ่น.....	99
5.5	ความสัมพันธ์ของ Recuperator กับประสิทธิภาพของการเก็บความร้อน...	99
5.6	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	100
5.7	ความเหมาะสมในการเลือกชนิดของ Metallic Recuperator.....	101
6.1	การคำนวณค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ...	111
6.2	ค่าความต้านทานที่เกิดจากความสกปรก (Fouling Resistance).....	115
6.3	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ.....	116
6.4	ค่าคงที่การไหลที่ไหลผ่านท่อ 10 แถวหรือมากกว่า.....	123
6.5	อัตราส่วนของ h_c ของท่อที่มี N แถวกับ h_c ของท่อที่มี 10 แถว.....	124

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
7.1	ค่าคงที่สำหรับคำนวณการขยายตัวของโลหะเมื่อถูกความร้อน.....	159
8.1	สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในจุดต่างๆ ของการทดลองเผาติดกับอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน.....	171
8.2	สรุปผลข้อมูลการทดลองเผาติดกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน.....	174
8.3	สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในจุดต่างๆ ของการทดลองเผาเคลือบกับ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน.....	175
8.4	สรุปผลข้อมูลการทดลองเผาเคลือบกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน.....	175
8.5	สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในจุดต่างๆ ของการทดลองเผาติดกับอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน.....	178
8.6	สรุปผลข้อมูลการทดลองเผาติดกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน.....	181
8.7	สรุปผลอุณหภูมิเฉลี่ยในจุดต่างๆ ของการทดลองเผาติดกับอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน.....	182
8.8	สรุปผลข้อมูลการทดลองเผาเคลือบกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวน.....	182
8.9	สัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียในการเผาเคลือบ กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่หุ้มฉนวน.....	186
8.10	สมมูลมวลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่หุ้มฉนวน.....	187
8.11	สัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบของไอเสียในการเผาเคลือบกับ อุปกรณ์ความร้อนที่หุ้มฉนวน.....	191
8.12	สมมูลมวลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน.....	192
8.13	สมมูลพลังงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่หุ้มฉนวน.....	195
8.14	สมมูลพลังงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวน.....	196
8.15	สมมูลมวลเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและ ไม่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบ 1 รอบการเผา.....	215

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
8.16	สมดุลมวลเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและ ห้ามฉนวนในการเผาเคลือบ 1 รอบการเผา.....	216
8.17	สมดุลพลังงานเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและ ไม่ห้ามฉนวนในการเผาเคลือบ 1 รอบการเผา.....	217
8.18	สมดุลพลังงานเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและ ห้ามฉนวนในการเผาเคลือบ 1 รอบการเผา.....	218



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
1.1	กราฟแสดงค่าการประหยัดพลังงานจากการอุ่นอากาศ.....	2
1.2	กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเตาและอุณหภูมิก๊าซเสียระหว่างการเผาติด...	3
1.3	กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเตาและอุณหภูมิก๊าซเสียระหว่างการเผาเคลือบ	4
1.4	รูปแสดงโครงสร้างเตาเผาเซรามิคไฟเบอร์.....	5
1.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า G_e กับ d	12
1.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า T_a กับ $T^{1/3}$	12
2.1	ขั้นตอนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิคในเตาเผาอุณหภูมิสูง.....	16
2.2	กรรมวิธีผลิตถ้วยจานเซรามิค.....	21
2.3	รายละเอียดและส่วนประกอบของเตาเผาเซรามิคที่ใช้ในการวิจัย.....	23
2.4	รายละเอียดและส่วนประกอบของหัวฉีดที่ใช้ในเตาเผาเซรามิค.....	23
3.1	การสมดุลมวลในระบบเตาเผาเซรามิค.....	26
3.2	การสมดุลพลังงานในระบบเตาเผาเซรามิค.....	27
4.1	รูป Datalogger รุ่น HR-1300.....	39
4.2	รูป Fuel gas analysis ยี่ห้อ Testo 320.....	40
4.3	รูป ก Thermometer แบบปรอท.....	40
	รูป ข Thermometer แบบมีหัววัดค่า.....	41
4.4	Clamp On P.H. Hitester.....	41
4.5	Velocity Meter.....	42
4.6	แสดงมวลเข้าสู่ระบบและมวลออกจากกระบบในการเผาติด.....	46
4.7	แสดงพลังงานเข้าสู่ระบบและออกจากกระบบในการเผาติด.....	51
4.8	แสดงมวลเข้าสู่ระบบและออกจากกระบบในการเผาเคลือบ.....	58
4.9	แสดงพลังงานเข้าสู่ระบบและออกจากกระบบในการเผาเคลือบ.....	62
4.10	แสดง Sankey diagram ของพลังงานในการเผาติด.....	73
4.11	แสดง Sankey diagram ของพลังงานในการเผาเคลือบ.....	74
5.1	การนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียกลับมาใช้ประโยชน์.....	76
5.2	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไส้ไก่.....	78
5.3	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปิด.....	79

สารบัญญภาพ(ต่อ)

บทที่		หน้า
5.4	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสอง.....	79
5.5	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ.....	80
5.6	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบดาบปลายปืน.....	81
5.7	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ.....	83
5.8	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดกันหอย.....	83
5.9	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกหุ้ม.....	84
5.10	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	85
5.11	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหอยโข่ง.....	86
5.12	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบบล็อค.....	87
5.13	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด.....	88
5.14	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไอบี.....	89
5.15	โครงสร้างของความร้อนแบบฮีทไอบี.....	89
5.16	การแยกประเภทของ Air Preheater โดยทั่วไป.....	92
5.17	Metallic Recuperator.....	93
5.18	Stack type Recuperator.....	94
5.19	Cage type Recuperator.....	95
5.20	Channel type Recuperator แบบต่อทางท่อควัน.....	96
5.21	แสดงการติดตั้ง Channel type Recuperator	97
5.22	Flue tube type Recuperator.....	97
5.23	Air preheater.....	98
6.1	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อ.....	103
6.2	การกระจายอุณหภูมิของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	103
6.3	การกระจายอุณหภูมิของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบไหลสวนทาง.....	106
6.4	กราฟแสดงค่า F ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	108
6.5	กราฟแสดงประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ.....	112
6.6	ทิศทางการไหลของความร้อนในผังรูปต่างๆ.....	114

สารบัญญภาพ(ต่อ)

บทที่		หน้า
6.7	กราฟสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มในท่อ.....	120
6.8	ลักษณะการจัดท่อที่จะใช้ร่วมกับตาราง 6.3.....	123
6.9	ค่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายในท่อ.....	130
6.10	ค่า Friction Factor และค่าปรับแก้สำหรับกลุ่มท่อที่จัดเรียงเป็นแถวตรง....	131
6.11	ค่า Friction Factor และค่าปรับแก้สำหรับกลุ่มท่อที่จัดเรียงเป็นแถวทะแยง	131
6.12	อุณหภูมิของของไหลที่ไหลผ่าน Recuperator.....	137
6.13	อุณหภูมิการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	148
6.14	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำการออกแบบ.....	150
6.15	รูปแสดงลักษณะของท่ออากาศแบบ Rectangular duct.....	151
6.16	Moody Chart แสดงค่า Friction Factor ในท่อ.....	151
6.17	ค่าความดันสูญเสียในข้ออ.....	152
6.18	Blower ที่ใช้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาเซรามิค.....	155
7.1	ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน Recuperator.....	158
7.2	การประกอบแผ่นยึดท่อเข้ากับตัวเซลล์.....	158
7.3	Recuperator เมื่อประกอบแล้ว.....	159
7.4	ข้อต่อยึดใช้ป้องกันการขยายหรือหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง.....	160
7.5	Pack less expansion joint.....	161
7.6	Affect expansion joint.....	161
7.7	Ball joint.....	161
7.8	แสดงการใช้ Roller บานปลายท่อ.....	162
7.9	เตาเผาเซรามิคก่อนการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	163
7.10	ปล่องควันของเตาเผาเซรามิค.....	164
7.11	ปล่องควันของเตาเผาเซรามิคที่ถูกรื้อออก.....	164
7.12	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว.....	164
7.13	ท่อส่งอากาศเข้าหัวฉีด.....	165
7.14	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทาสีกันสนิม.....	165
7.15	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลังหุ้มฉนวน.....	165

สารบัญภาพ(ต่อ)

บทที่	หน้า
8.13	กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาติดครั้งที่ 4..... 180
8.14	กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 1..... 183
8.15	กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 2..... 183
8.16	กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 3..... 184
8.17	กราฟแสดงอุณหภูมิในจุดที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาเซรามิกที่ติดตั้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนในการเผาเคลือบครั้งที่ 4..... 184
8.18	แสดง Sankey diagram พลังงานของ Recuperator ไม่หุ้มฉนวน..... 197
8.19	แสดง Sankey diagram พลังงานของ Recuperator ที่หุ้มฉนวน..... 198
8.20	แสดงมวลเข้าออกระบบในการเผาเคลือบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่ไม่หุ้มฉนวน..... 199
8.21	แสดงพลังงานเข้าออกระบบในการเผาเคลือบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่ไม่หุ้มฉนวน..... 200
8.22	แสดงมวลเข้าออกระบบในการเผาเคลือบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่หุ้มฉนวน..... 207
8.23	แสดงพลังงานเข้าออกระบบในการเผาเคลือบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนที่หุ้มฉนวน..... 208
8.24	แสดง Sankey diagram พลังงานของเตาเผากรณีไม่หุ้มฉนวน..... 219
8.25	แสดง Sankey diagram พลังงานของเตาเผากรณีหุ้มฉนวน..... 220

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
W_{11}	น้ำหนักของไฟเบอร์	kg
W_{21}	น้ำหนักอิฐพื้นเตา	kg
W_{22}	น้ำหนักของโครงรถเตา	kg
W_3	น้ำหนักเฟอร์นิเจอร์	kg
m_p	น้ำหนักผลิตภัณฑ์	kg
cp_1	ค่าความร้อนจำเพาะของไฟเบอร์	kJ/kg
cp_2	ค่าความร้อนจำเพาะของอิฐพื้นเตา	kJ/kg
cp_3	ค่าความร้อนจำเพาะของเฟอร์นิเจอร์	kJ/kg
cp_4	ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์	kJ/kg
cp_5	ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก	kJ/kg
T_{max}	อุณหภูมิสูงสุด(สุดท้าย)ของการเผา	$^{\circ}C$
T_{s1}	อุณหภูมิผิวนอกของเปลือกเตา(อาจใช้ค่าเฉลี่ยจาก 5 จุด) สูงสุดในการเผา	$^{\circ}C$
T_{s2}	อุณหภูมิผิวใต้พื้นเตา(ผิวใต้ท้องรถ)สูงสุดในการเผา	$^{\circ}C$
T_a	อุณหภูมิของบรรยากาศ	$^{\circ}C$
T_{ave1}	อุณหภูมิเฉลี่ยของเปลือกเตา	$^{\circ}C$
T_{ave2}	อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นเตา	$^{\circ}C$
$T_{s(ave)1}$	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างผิวเปลือกเตากับบรรยากาศ	$^{\circ}C$
$T_{s(ave)2}$	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างผิวใต้พื้นเตากับบรรยากาศ	$^{\circ}C$
Dt_{11}	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของเปลือกเตากับอุณหภูมิ ของบรรยากาศ	$^{\circ}C$
Dt_{12}	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวเปลือกเตาสูงสุดในการ เผากับอุณหภูมิของบรรยากาศ	$^{\circ}C$
Dt_{21}	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นเตากับอุณหภูมิของ บรรยากาศ	$^{\circ}C$
Dt_{22}	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิผิวใต้พื้นเตาสูงสุดในการเผากับ อุณหภูมิของบรรยากาศ	$^{\circ}C$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
Dt_3, Dt_4	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดในเตากับอุณหภูมิมบรยากาศ	$^{\circ}C$
A_1	พื้นที่เปลือกเตา	m^2
A_2	พื้นที่ใต้พื้นเตา	m^2
e_1	ค่า Emissivity ของอะลูมิเนียม, Oxidized (ใช้ค่า 0.40)	
e_2	ค่า Emissivity ของเหล็ก, Oxidized (ใช้ค่า 0.85)	
hr	จำนวนชั่วโมงที่เผา	
hc_1	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผิวเตา	
hc_2	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผิวใต้พื้นเตา	
L	ความยาวของเตา	m
T_1	อุณหภูมิที่เปลือกเตาด้านขวา	$^{\circ}C$
T_2	อุณหภูมิที่เปลือกเตาด้านซ้าย	$^{\circ}C$
T_3	อุณหภูมิที่เปลือกเตาด้านบน	$^{\circ}C$
T_4	อุณหภูมิที่พื้นเตาเตาด้านล่าง	$^{\circ}C$
T_5	อุณหภูมิที่เปลือกเตาด้านหลัง	$^{\circ}C$
T_6	อุณหภูมิที่ปล่อยทางปล่อง	$^{\circ}C$
T_7	อุณหภูมิที่ประตูเตาด้านหน้า	$^{\circ}C$
N_r	จำนวนแถวของท่อถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล	(-)
(S.G.)	ความถ่วงจำเพาะของของไหล (S.G. ของน้ำเท่ากับ 1)	
G_b	ความเร็วเชิงมวลในทิศขนานกับมัดท่อ	$(kg/m^2 \cdot sec)$
G_c	ความเร็วเชิงมวลในทิศตั้งฉากกับมัดท่อ	$(kg/m^2 \cdot sec)$
Z	ความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล	(cP)
P	พิทช์ (Pitch) หรือระยะห่างระหว่างแกนกลางของท่อถ่ายเทความร้อน	(m)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
d_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อถ่ายเทความร้อน	(m)
μ	ความหนืดของของไหล	(kg/m.sec)
ΔP_i	ค่าความดันสูญเสียรวมในท่อ	(Pa)
ΔP_f	ค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลในท่อ	(Pa)
ΔP_r	ค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางการไหล	(Pa)
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของแฟนนิง(Fanning's Friction Factor)	(-)
G_i	ความเร็วเชิงมวล	(kg/m ² .sec)
L	ความยาวของท่อ	(m)
N_i	จำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในท่อ	(-)
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ	(m)
S	ความถ่วงจำเพาะของของไหล	.
V	ความเร็วของการไหล	(m/sec)
g	อัตราความเร่งภายใต้แรงดึงดูดของโลก	
ΔP_i	ค่าความดันสูญเสียรวมในท่อ	(Pa)
N_1	จำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในท่อ	(-)
N_2	จำนวนท่อถ่ายเทความร้อนที่ใช้	(-)
α	พื้นที่หน้าตัดของท่อถ่ายเทความร้อน 1 ท่อ	
L	ความยาวของท่อถ่ายเทความร้อน	(m)
G_i	ความเร็วเชิงมวลต่อ 1 เที่ยว	
ρ	ความหนาแน่นของของไหล	(kg/m ³)
Z	ความหนืดที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล	(cP)
Z_w	ความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิของผนังท่อ	(cP)
f_i	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	
d_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อถ่ายเทความร้อน	(mm)