

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแจกแจงพลังงานในเตาเผาเซรามิก



นาย ธนวรรณ รัตนปริกณห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2648-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20832072

30 ๒๑ ๒๕๔๕

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR ENERGY DISTRIBUTION IN CERAMIC KILN

Mr. Tanawat Rattanaparikon

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 2002

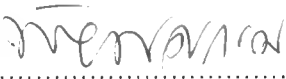
ISBN 974-17-2648-1

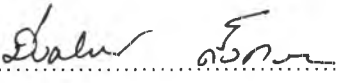
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแจกแจงพลังงานใน
เตาเผาเซรามิค
โดย นาย ธนวรรณ รัตนปริคณณ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์

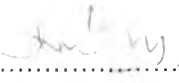
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต



..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)

นาย ธนวรรณ รัตนปริคณธ์: การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแจกแจงพลังงานในเตาเผาเซรามิก (DEVELOPMENT OF MATHERMATICAL MODEL FOR ENERGY DISTRIBUTIION IN CERAMIC KILN) อ.ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล
 อ.ที่ปรึกษาร่วม: อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ 146 หน้า ISBN: 974-17-2648-1

งานวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ การศึกษาหาพลังงานที่กระจายอยู่ในส่วนต่างๆของเตาเผาเซรามิก และพลังงานสูญเสียจากการเผาไหม้ ผลการศึกษาในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า พลังงานสะสมที่ผนังเตาเผาเซรามิกด้านข้างและด้านบนในการทดลองแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยคิดเป็น 7% ของพลังงานที่เข้าสู่เตาเผาเซรามิกทั้งหมด พลังงานที่ใช้ในการเผาเซรามิกจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่บรรจุภายในเตาเผาเซรามิก และพลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซเสียคิดเป็น 22-33% ของพลังงานที่เข้าสู่เตาเผาทั้งหมด ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการให้ความร้อน

การศึกษาในส่วนที่สอง คือ การศึกษาหาผลกระทบของผนังที่มีต่อการใช้พลังงานในเตาเผาเซรามิก ในการศึกษาส่วนนี้จะให้ความสำคัญเฉพาะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในผนังด้านข้างและด้านบนที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในแก้ปัญหา เมื่อมีการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำผนังด้านข้างและด้านบนโดยให้ผนังครึ่งหนึ่งด้านในของเตาเผาเซรามิกเป็นเซรามิกไฟเบอร์คิงเดิม ส่วนผนังอีกครึ่งหนึ่งด้านนอกเป็นวัสดุชนิดอื่น เช่น อิฐฉนวน IF135 และอิฐทนไฟ SK-30 ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการกำหนดให้เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นคงเดิม พบว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในผนังเตาเผาเซรามิกที่ใช้ฉนวนสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์แต่เพียงอย่างเดียว

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล
 ปีการศึกษา 2545

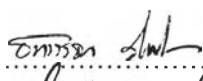
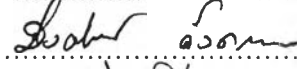
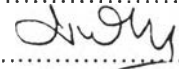
ลายมือชื่อนิสิต.....
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##4270347621 : MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : KILN / ENERGY / MATHEMATICAL MODEL / COMPOSITED WALL
TANAWAT RATTANAPARIKON : DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR
ENERGY DISTRIBUTION IN CERAMIC KILN., THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
MINGSAK TANGTRAKUL, THESIS COADVISOR : SOMPONG PUTIVISUTISUK, Ph.D.,
146 pp. ISBN 974-17-2648-1.

This study investigate the energy distribution in two section. The first section, study the energy distribution in ceramic kiln and energy loss from combustion process. The result shows that the cumulative energy in the top and side walls of ceramic kiln of each experiment is similar. And the range of cumulative energy is 7 % of total energy consumption. The useful energy consumption mainly depends on the mass of product . Energy loss by flue gas is about 22-33% of energy consumption that depends on type of heating process.

And the last section,study the effect of composited wall to energy distribution in ceramic kiln.This section focus on temperature of the top and the side wall of ceramic kiln which mathematical model is solved by finite-volume method.The experiment change the material of the top and the side wall to insulating brick (IF-135) and fired clay brick but remain inner wall to be ceramic fiber (SK-30). By using the same boundary and initial conditions for mathematical model and result show that the cumulative energy in composited wall is nearly to the single ceramic fiber wall.

| | | |
|---|-----------------------------|---|
| Department of...Mechanical Engineering... | Student's signature..... |  |
| Field of study ...Mechanical Engineering... | Advisor's signature..... |  |
| Academic year 2002 | Co-advisor's signature..... |  |

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน โดยการศึกษาสำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลหลายท่านดังนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่เป็นผู้ชี้แนะหัวข้อและแนวทางทำวิจัย ที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์แก่ งานวิจัย พร้อมทั้งสนับสนุนเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญาภรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ ที่กรุณาให้คำแนะนำและถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์

ขอกราบพระคุณ คุณ สมศักดิ์ วงศ์วาลย์ ผู้จัดการโรงงานสมศักดิ์เซรามิค และพนักงานในแผนกเตาทุกคน ที่ให้การต้อนรับและอำนวยความสะดวกในการตรวจวัดระหว่าง การวิจัยอย่างเต็มที่

ขอขอบคุณ คุณสุธีร์ หลวงนา ที่ให้ความช่วยเหลือโดยไปร่วมทำการทดลองกับ ผู้วิจัยที่จังหวัดลำปาง

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุน การวิจัยทั้งในด้านค่าใช้จ่าย อำนวยความสะดวกและให้กำลังใจมาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธนวรรณ รัตนปริคณัน

ผู้วิจัย

สารบัญ

| | หน้า |
|-------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ญ |
| สัญลักษณ์..... | ท |

บทที่

1. บทนำ

| | |
|--|---|
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 3 |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 4 |

2. ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

| | |
|-------|---|
| | 5 |
|-------|---|

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

| | |
|--|----|
| 3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเตาเผาเซรามิค | 7 |
| 3.2 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิค | 15 |
| 3.3 สมการสมดุลมวล | 17 |
| 3.4 สมการสมดุลพลังงาน | 18 |
| 3.5 รูปแบบของพลังงาน..... | 20 |
| 3.6 กระบวนการเผาไหม้ในเตาเผาเซรามิค | 22 |
| 3.7 การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด | 23 |
| 3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 29 |

| | | |
|---|---|-----|
| 3.9 | ระเบียบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์..... | 36 |
| 3.10 | เอนทาลปีก้ำชชนิดต่างๆ..... | 45 |
| 4. วิธีดำเนินการวิจัย | | |
| 4.1 | การทดสอบและจัดเก็บข้อมูลของเตาเผาเซรามิคประสิทธิภาพสูง..... | 49 |
| 4.2 | การดำเนินการทดสอบและจัดเก็บข้อมูล..... | 52 |
| 4.3 | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 63 |
| 5. ผลการทดลอง | | |
| 5.1 | ผลการทดลองในการตรวจวัดข้อมูลต่างๆของเตาเผาเซรามิค..... | 67 |
| 5.2 | ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 90 |
| 6. สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ | | |
| 6.1 | สรุปผลการวิจัย..... | 100 |
| 6.2 | ข้อเสนอแนะ..... | 101 |
| รายการอ้างอิง..... | | 103 |
| ภาคผนวก | | |
| ภาคผนวก ก.โปรแกรมคอมพิวเตอร์..... | | 106 |
| ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณมวลและพลังงาน..... | | 141 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | | 146 |

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|---|------|
| ตาราง 1 รายการข้อมูลที่ดำเนินการตรวจวัด | 52 |
| ตาราง 2 ผลการทดลองครั้งที่ 7 | 71 |
| ตาราง 3 ผลการทดลองครั้งที่ 11 | 72 |
| ตาราง 4 ผลการทดลองครั้งที่ 13 | 74 |

สารบัญรูปภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1 เตาเผาเซรามิคประสิทธิภาพสูง | 2 |
| รูปที่ 2 รูปด้านหน้าของเตาเผาเซรามิคประสิทธิภาพสูงที่ใช้ทดลอง | 13 |
| รูปที่ 3 รูปด้านข้างของเตาเผาเซรามิคประสิทธิภาพสูง | 14 |
| รูปที่ 4 แบบเตาเผาเซรามิคประสิทธิภาพสูง | 14 |
| รูปที่ 5 กราฟอุณหภูมิภายในเตาเผาเครื่องเคลือบดินเผาในระหว่างการเผา และการเย็นตัวในกระบวนการเผาดิบ | 16 |
| รูปที่ 6 กราฟอุณหภูมิภายในเตาเผาเครื่องเคลือบดินเผาในระหว่างการเผา และการเย็นตัวในกระบวนการเผาเคลือบ | 17 |
| รูปที่ 7 สมดุลมวลในเตาเผาเซรามิค | 17 |
| รูปที่ 8 สมดุลพลังงานในเตาเผาเซรามิค | 18 |
| รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศที่ใช้ตามทฤษฎี กับเปอร์เซ็นต์ออกซิเจน | 23 |
| รูปที่ 10 การถดถอยแบบเชิงเส้นโดยการสร้างฟังก์ชันเส้นตรงจากชุดข้อมูลที่กำหนดให้มา | 24 |
| รูปที่ 11 การแปลงสมการกำลังไปสู่อสมการเชิงเส้นโดยลอการิทึมเพื่อใช้วิธีถดถอย แบบเชิงเส้น | 26 |
| รูปที่ 12 การแปลงสมการเอ็กโปเนนเชียลไปสู่อสมการเชิงเส้นโดยลอการิทึมเพื่อใช้ วิธีถดถอยแบบเชิงเส้น | 27 |
| รูปที่ 13 การแปลงสมการอัตรการเพิ่มสูงสุดอิมตัวไปสู่อสมการเชิงเส้นเพื่อใช้ วิธีถดถอยแบบเชิงเส้น | 27 |
| รูปที่ 14 สมการการถดถอยพหุนามโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามจากชุดข้อมูล ที่กำหนดมาให้ | 28 |
| รูปที่ 15 ลักษณะปริมาตรควบคุมของพลังงานในผนังด้านบนและด้านข้าง | 30 |
| รูปที่ 16 ปริมาตรควบคุมของพลังงานในผนังด้านบนและด้านข้างแบบ 3 มิติ | 31 |
| รูปที่ 17 ปริมาตรควบคุมของพลังงานในผนังด้านบนและด้านข้าง | 31 |
| รูปที่ 18 ลักษณะของปริมาตรควบคุมของพลังงานในผนังด้านหลัง(มุมมองด้านหลัง-บน) | 32 |
| รูปที่ 19 ลักษณะของปริมาตรควบคุมของพลังงานในผนังด้านหลัง(มุมมองด้านหน้า-บน) | 33 |
| รูปที่ 20 ปริมาตรควบคุมของพลังงานผนังด้านหลังแบบ 3 มิติ | 33 |
| รูปที่ 21 ปริมาตรควบคุมของพลังงานในผนังด้านหลังแบบแรก | 34 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 22 ปริมาตรควบคุมของพลังงานในผนังด้านหลังแบบที่สอง | 35 |
| รูปที่ 23 ปริมาตรควบคุมสำหรับการนำความร้อน 2 มิติสำหรับสภาวะไม่คงที่ | 36 |
| รูปที่ 24 สมมุติฐานอย่างง่าย 2 รูปแบบ | 38 |
| รูปที่ 25 อนุกรมของจุดในแนวนอน(แกน X) | 38 |
| รูปที่ 26 การใช้ระยะทางเข้าช่วยในการหาหน้าสัมผัส e | 43 |
| รูปที่ 27 ปริมาตรควบคุมของปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติในสภาวะไม่คงที่ เมื่อค่าการนำความร้อนไม่คงที่ | 44 |
| รูปที่ 28 กราฟค่าอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ | 45 |
| รูปที่ 29 กราฟค่าอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซไนโตรเจน | 46 |
| รูปที่ 30 กราฟค่าอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซออกซิเจน | 46 |
| รูปที่ 31 กราฟค่าอุณหภูมิกับเอนทาลปีของไอน้ำ | 47 |
| รูปที่ 32 กราฟค่าอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซโปรเพน | 47 |
| รูปที่ 33 กราฟค่าอุณหภูมิกับเอนทาลปีของก๊าซบิวเทน | 48 |
| รูปที่ 34 การจุดไฟเพียง 2 หัว | 50 |
| รูปที่ 35 การจุดไฟเพียง 4 หัว | 50 |
| รูปที่ 36 การเปิดแฉ้ม ที่ตำแหน่งประตูเปิดแฉ้มมากที่สุด | 51 |
| รูปที่ 37 การเปิดแฉ้ม ที่ตำแหน่งประตูเปิดแฉ้มน้อยที่สุดก่อนปิดสนิท | 51 |
| รูปที่ 38 Data logger | 53 |
| รูปที่ 39 Flue gas analyzer | 53 |
| รูปที่ 40 เทอร์โมคัปเปิล type K | 58 |
| รูปที่ 41 เทอร์โมคัปเปิล type K | 58 |
| รูปที่ 42 เทอร์โมคัปเปิล type N | 59 |
| รูปที่ 43 รูปเตาเผาเซรามิกก่อนติดตั้งเครื่องมือ | 59 |
| รูปที่ 44 บริเวณที่จะติดตั้งเครื่องมือ (ถ่ายจากด้านหลังเตา) | 60 |
| รูปที่ 45 บริเวณที่จะติดตั้งเครื่องมือ (ถ่ายจากด้านข้างเตา) | 61 |
| รูปที่ 46 บริเวณที่ติดตั้งเครื่องมือเรียบร้อยแล้ว (ถ่ายจากด้านหลังเตา) | 61 |
| รูปที่ 47 บริเวณที่ติดตั้งเครื่องมือเรียบร้อยแล้ว (ถ่ายจากด้านข้างเตา) | 62 |
| รูปที่ 48 บริเวณที่ติดตั้ง Flue gas analyzer และเทอร์โมคัปเปิล type K แบบหัวกะโหลก | 62 |

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 49 แบบ 3 มิติ ของรูปร่างและตำแหน่งจุดติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ของเตาเผาเซรามิคแบบ 3 มิติ | 68 |
| รูปที่ 50 แบบด้านข้างของรูปร่างและตำแหน่งจุดติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ของเตาเผาเซรามิค | 68 |
| รูปที่ 51 แบบด้านหน้าของรูปร่างและตำแหน่งจุดติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ของเตาเผาเซรามิค | 69 |
| รูปที่ 52 แบบด้านบนของรูปร่าง และตำแหน่งจุดติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ของเตาเผาเซรามิค | 69 |
| รูปที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซหุงต้มกับอุณหภูมิในเตาเผาเซรามิค และอุณหภูมิก๊าซเสียสำหรับการทดลองครั้งที่ 7 | 71 |
| รูปที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันก๊าซหุงต้ม และเวลากับเปอร์เซ็นต์ของก๊าซออกซิเจนสำหรับการทดลองครั้งที่ 7 | 72 |
| รูปที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซหุงต้มกับอุณหภูมิในเตาเผาเซรามิค และอุณหภูมิก๊าซเสียสำหรับการทดลองครั้งที่ 11 | 73 |
| รูปที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันก๊าซหุงต้ม และเวลากับเปอร์เซ็นต์ของก๊าซออกซิเจนสำหรับการทดลองครั้งที่ 11 | 73 |
| รูปที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันก๊าซหุงต้มกับอุณหภูมิในเตาเผาเซรามิค และอุณหภูมิก๊าซเสียสำหรับการทดลองครั้งที่ 13 | 75 |
| รูปที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันก๊าซหุงต้ม และเวลากับเปอร์เซ็นต์ของก๊าซออกซิเจนสำหรับการทดลองครั้งที่ 13 | 75 |
| รูปที่ 59 อุณหภูมิในผนังด้านบนที่ระยะต่างๆ จากผิวด้านบนของการทดลองครั้งที่ 7 | 80 |
| รูปที่ 60 อุณหภูมิในผนังด้านหลังที่ระยะต่างๆ จากผิวด้านหลังของการทดลองครั้งที่ 7 | 81 |
| รูปที่ 61 อุณหภูมิในผนังด้านข้างที่ระยะต่างๆ จากผิวด้านข้างของการทดลองครั้งที่ 7 | 82 |
| รูปที่ 62 อุณหภูมิในผนังด้านบนที่ระยะต่างๆ จากผิวด้านบนของการทดลองครั้งที่ 11 | 83 |
| รูปที่ 63 อุณหภูมิในผนังด้านหลังที่ระยะต่างๆ จากผิวด้านหลังของการทดลองครั้งที่ 11 | 84 |
| รูปที่ 64 อุณหภูมิในผนังด้านข้างที่ระยะต่างๆ จากผิวด้านข้างของการทดลองครั้งที่ 11 | 85 |
| รูปที่ 65 อุณหภูมิในผนังด้านบนที่ระยะต่างๆ จากผิวด้านบนของการทดลองครั้งที่ 11 | 86 |
| รูปที่ 66 อุณหภูมิในผนังด้านหลังที่ระยะต่างๆ จากผิวด้านหลังของการทดลองครั้งที่ 13 | 87 |
| รูปที่ 67 อุณหภูมิในผนังด้านข้างที่ระยะต่างๆ จากผิวด้านข้างของการทดลองครั้งที่ 13 | 88 |

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 68 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการวัดจริง สำหรับผนังด้านข้างของการทดลองที่ 11..... | 91 |
| รูปที่ 69 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการวัดจริง สำหรับผนังด้านบนของการทดลองที่ 11 | 92 |
| รูปที่ 70 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการวัดจริง สำหรับผนังด้านหลังของการทดลองที่ 11(สมมุติฐานแบบแรก)..... | 93 |
| รูปที่ 71 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการวัดจริง สำหรับผนังด้านหลังของการทดลองที่ 11(สมมุติฐานแบบที่สอง) | 94 |
| รูปที่ 72 มวลที่เข้าสู่เตาเผาเซรามิค..... | 96 |
| รูปที่ 73 มวลที่ออกจากเตาเผาเซรามิค..... | 96 |
| รูปที่ 74 พลังงานที่กระจายอยู่ในส่วนต่างๆของเตาเผาเซรามิคของการทดลองครั้งที่ 11 | 97 |
| รูปที่ 75 พลังงานที่กระจายอยู่ในส่วนต่างๆของเตาเผาเซรามิคของการทดลองครั้งที่ 13 | 97 |
| รูปที่ 76 พลังงานที่สะสมในวัสดุผนังชนิดต่างๆ ของการทดลองครั้งที่ 13..... | 98 |
| รูปที่ 77 ความร้อนสูญเสียของวัสดุผนังชนิดต่างๆ ของการทดลองครั้งที่ 13 | 99 |

สัญลักษณ์

| | |
|-----------------|--|
| A_s | พื้นที่ผิว, m^2 |
| c | ความร้อนจำเพาะ, $\frac{J}{kg \cdot K}$ |
| c_p | ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, $\frac{J}{kg \cdot K}$ |
| h_c | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| h_f | เอนทาลปี, $\frac{kJ}{kg}$ |
| h_r | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทรังสีความร้อน, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ |
| k | สภาพนำความร้อน, $\frac{W}{m \cdot K}$ |
| m | เป็นอัตราส่วนอากาศที่ใช้จริงต่ออากาศที่ใช้ตามทฤษฎี |
| \dot{m}_r | อัตราการไหลของมวลที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม, $\frac{kg}{s}$ |
| \dot{m}_p | อัตราการไหลของมวลที่ออกจากปริมาตรควบคุม, $\frac{kg}{s}$ |
| \dot{m}_{fg} | อัตราการไหลของมวลก๊าซเสีย, $\frac{kg}{s}$ |
| Δm_{CV} | ปริมาณมวลที่เปลี่ยนแปลงสุทธิ, kg |
| Q | อัตราการถ่ายเทความร้อน, W |
| T | อุณหภูมิ, $^{\circ}C$ |
| T_a | อุณหภูมิบรรยากาศ, $^{\circ}C$ |
| T_s | อุณหภูมิผิว, $^{\circ}C$ |
| T_{ref} | อุณหภูมิอ้างอิงที่ $25^{\circ}C$ |

| | |
|-----------|--|
| t | เวลา, วินาที |
| ρ | ความหนาแน่นมวล, $\frac{kg}{m^3}$ |
| x, y, z | แกนพิกัดฉาก |
| Subscript | |
| $conv$ | การพาความร้อน |
| E | อนุกรมของจุดทางทิศตะวันออกของอนุกรมจุดที่เลือก |
| e | หน้าสัมพัทธ์ทางทิศตะวันออกของอนุกรมจุดที่เลือก |
| i | ชนิดของวัสดุ; ชนิดของก๊าซเสีย |
| N | อนุกรมของจุดทางทิศเหนือของอนุกรมจุดที่เลือก |
| n | หน้าสัมพัทธ์ทางทิศเหนือของอนุกรมจุดที่เลือก |
| P | อนุกรมจุดที่เลือก |
| rad | การแผ่รังสีความร้อน |
| W | อนุกรมของจุดทางทิศตะวันตกของอนุกรมจุดที่เลือก |
| w | หน้าสัมพัทธ์ทางทิศตะวันตกของอนุกรมจุดที่เลือก |
| S | อนุกรมของจุดทางทิศใต้ของอนุกรมจุดที่เลือก |
| s | หน้าสัมพัทธ์ทางทิศใต้ของอนุกรมจุดที่เลือก |