ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248029

# การวิเคราะห์พฤติกรรมการอบแห้งของกระเบื้องดินเผาและพอร์ซเลนเซรามิก

วราคม วงศ์ชัย

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
เมษายน 2554

b0025291n

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชา
248029

# การวิเคราะห์พฤติกรรมการอบแห้งของกระเบื้องดินเผาและพอร์ซเลนเซรามิก

วราคม วงศ์ชัย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
เมษายน 2554

# การวิเคราะห์พฤติกรรมการอบแห้งของกระเบื้องดินเผาและพอร์ซเลนเซรามิก

วราคม วงศ์ชัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

**คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์**

..... ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ อัจฉริยวิริยะ

..... กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา พรมวังขวา

..... กรรมการ
อาจารย์ ดร.ศักดิพล เทียนเสม

..... กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์**

.....
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา พรมวังขวา

26 เมษายน 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.อนุชา พรมวังขวา ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ความเข้าใจ คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ อัจฉริยวิริยะ อาจารย์ ดร.ศักดิพล เทียนเสม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่อำนวยความสะดวกให้ในการทดลองเพื่อจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆประจำห้องปฏิบัติการอบแห้งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเจ้าหน้าที่ประจำสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน นครพิงค์ ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณ โรงงานแสงชัยเซรามิก จำกัด จังหวัดลำปาง และโรงงานโอมเซรามิกรูฟ จำกัด จังหวัดเชียงใหม่ ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนการทดลองในระดับอุตสาหกรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานระหว่างที่ศึกษาอยู่ ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน นครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายโครงการวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ ครอบครัวของผมที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนจนสามารถทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

วราคม วงศ์ชัย

**ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์** การวิเคราะห์พฤติกรรมการอบแห้งของกระเบื้องดินเผาและพอร์ซเลนเซรามิก

**ผู้เขียน** นายวราคม วงศ์ชัย

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงาน)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** ผศ.ดร.อนุชา พรมวังขวา

248029

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกและกระเบื้องดินเผา ด้วยสมการ การอบแห้งทางทฤษฎี สมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี สมการอบแห้งแบบเอมไพริคัล และศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการอบแห้งที่มีต่ออัตราการอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ขนาด 70x70 $mm^2$ ที่ความหนา 2, 4 และ 6 mm อุณหภูมิอบแห้ง 40–80 $^{\circ}C$ ความเร็วลมร้อน 0.7–2.4 m/s และทำการทดลองอบแห้งถ้วยพอร์ซเลนเซรามิก และกระเบื้องดินเผาในระดับอุตสาหกรรม พร้อมทั้งประเมินการใช้พลังงานโดยทำการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อนขนาดความจุ 1 $m^3$ ขนาดฮีทเตอร์ 4,000 W ในช่วงอุณหภูมิ 50–70 $^{\circ}C$ และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมและค่าคงที่การอบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมร้อน แต่ที่ช่วงความเร็วลมร้อนสูงจะไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ การทำนายสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมพบว่า ที่ความเร็วลมร้อนต่ำรูปแบบสมการของ Arrhenius มีความเหมาะสมที่สุด ในส่วนของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่ความเร็วลมร้อนสูงและค่าคงที่การอบแห้งพบว่าสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดีที่สุด และรูปแบบสมการของ Hendersan&Pabis สามารถใช้ทำนายการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกได้ดีที่สุด ในส่วนของการอบแห้งถ้วยพอร์ซเลนเซรามิกจากความชื้นเริ่มต้น 23% dry-basis จนเหลือความชื้นสุดท้าย 1% dry-basis พบว่าระยะเวลาการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดคือ 6.2 ชั่วโมง มีการใช้พลังงาน 50.8 MJ คิดเป็น 1.40 $MJ/kg_{ceramic}$ หรือ 12.20 $MJ/kg_{water}$ และการอบแห้งกระเบื้องดินเผาจากความชื้นเริ่มต้น 16% dry-basis จนเหลือความชื้นสุดท้าย 3% dry-basis พบว่าระยะเวลาการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดคือ 44.9 ชั่วโมง มีการใช้พลังงาน 212.8 MJ คิดเป็น 0.89 $MJ/kg_{ceramic}$ หรือ 5.60 $MJ/kg_{water}$

| | |
|---|---|
| **Thesis Title** | Drying Behavior Analysis of Terra Cotta and Porcelain Ceramics |
| **Author** | Mr.Warakhom Wongchai |
| **Degree** | Master of Engineering (Energy Engineering) |
| **Thesis Advisor** | Asst.Prof.Dr.Anucha Promwungkwa |

248029

## ABSTRACT

The objective of this research is to study the drying behavior of porcelain ceramic and terra cotta and to evaluate energy efficiency in drying process. Three types of drying kinetic equations are employed: theoretical model, semi-theoretical model and empirical model. Sizes of porcelain ceramics are 70x70 $mm^2$ and thickness of 2, 4 and 6 mm. Drying conditions include drying air temperature of 40–80 $^{\circ}C$ with hot air velocity 0.7–2.4 m/s. Porcelain cups and terra cotta tiles are the sampling of this study. Dryer size is 1 $m^3$ having an electric heater of 4,000 W. The results show that the diffusion coefficient and drying constant are directly related to drying temperature and hot air velocity at low-speed hot air. However, high-speed hot air doesn't significant to diffusion coefficient and drying constant. Arrhenius equation was the best equation used to predict over all moisture diffusion coefficient at low-speed hot air. Relative prediction of the diffusion coefficient at high-speed hot air and drying constant found that quadratic polynomial is the best equation to describe the relationship. And Hendersan&Pabis is the best equation used to predict drying characteristic of porcelain ceramic. Drying time and energy consumption for porcelain ceramic cups drying from the initial moisture content of 23%dry-basis to final moisture content of 1% dry-basis are 6.2 hours and 50.8 MJ (1.40 $MJ/kg_{ceramic}$ or 12.20 $MJ/kg_{water}$), respectively. And drying time and energy consumption for terra cotta tiles drying from the initial moisture content of 16% dry-basis to final moisture content of 3% dry-basis are 44.9 hours and 212.8 MJ (0.89 $MJ/kg_{ceramic}$ or 5.60 $MJ/kg_{water}$), respectively.

# สารบาญ


| | หน้า |
|---|---|
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| สารบาญ | ฉ |
| สารบาญตาราง | ซ |
| สารบาญภาพ | ฎ |
| อักษรย่อและสัญลักษณ์ | ฒ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 สรุปสาระสำคัญจากอกสารที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 6 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 6 |
| 1.5 ขอบเขตโครงงานวิจัย | 6 |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี | 8 |
| 2.1 ความรู้พื้นฐานทางเซรามิก | 8 |
| 2.2 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง | 10 |
| 2.3 อัตราและขั้นตอนการอบแห้งเซรามิก | 11 |
| 2.4 สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้ง | 14 |
| 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง | 19 |
| 2.6 การประเมินอัตราการใช้และสมดุลพลังงาน | 20 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย | 23 |
| 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง | 23 |
| 3.2 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมของสมการการอบแห้งทางทฤษฎีค่าคงที่การอบแห้งของสมการ การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี และแบบเอมไพริคัล | 24 |

# สารบาญ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 3.3 การสร้างกราฟมาตรฐานการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก | 25 |
| 3.4 การสร้างกราฟมาตรฐานการอบแห้งกระเบื้องดินเผา | 26 |
| 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง | 28 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ | 31 |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม และค่าคงที่การอบแห้ง | 31 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์การสร้างกราฟมาตรฐานการอบแห้งสำหรับอุตสาหกรรม | 47 |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพการอบแห้ง | 55 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์และข้อเสนอแนะ | 58 |
| 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ | 58 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 60 |
| บรรณานุกรม | 61 |
| ภาคผนวก | 63 |
| ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 64 |
| ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม และค่าคงที่การอบแห้ง | 70 |
| ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง การหาอัตราและสร้างกราฟมาตรฐานการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก และกระเบื้องดินเผา | 98 |
| ภาคผนวก ง การวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด การวิเคราะห์ความแปรปรวน การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ | 108 |
| ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ | 114 |
| ประวัติผู้เขียน | 123 |

# สารบาญตาราง


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | แสดงปริมาณความชื้นในเนื้อเซรามิกดิบ ด้วยวิธีการขึ้นรูปต่างๆ | 9 |
| 4.1 | ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม ค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎี และค่าคงที่การอบแห้งเอมไพริคัล ของพอร์ซเลนเซรามิกที่ได้จากการทดลอง | 35 |
| 4.2 | สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม สำหรับการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก | 36 |
| 4.3 | สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าคงที่การอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี สำหรับการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก | 40 |
| 4.4 | สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าคงที่การอบแห้งแบบเอมไพริคัล สำหรับการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก | 43 |
| 4.5 | อุณหภูมิ ระยะเวลา จำนวนชิ้นงาน และพลังงานทั้งที่ใช้ในการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกในอุตสาหกรรม จากความชื้นเริ่มต้น 23% dry-basis จนเหลือความชื้นสุดท้าย 1% dry-basis | 48 |
| 4.6 | อุณหภูมิ ระยะเวลา จำนวนชิ้นงาน และพลังงานทั้งที่ใช้ในการอบแห้งกระเบื้องดินเผาในอุตสาหกรรม จากความชื้นเริ่มต้น 16% dry-basis จนเหลือความชื้นสุดท้าย 3% dry-basis | 51 |
| 4.7 | แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้ในระบบ พลังงานที่ใช้ประโยชน์ และพลังงานที่สูญเสียของการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก และกระเบื้องดินเผา ในอุตสาหกรรม | 55 |
| ข-1 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 40 °C และความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 71 |
| ข-2 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 72 |
| ข-3 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 80 °C และความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 73 |
| ข-4 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 40 °C และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s | 74 |
| ข-5 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s | 75 |

## สารบาญตาราง (ต่อ)


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| ข-6 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 80 °C และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s | 76 |
| ข-7 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 40 °C และความเร็วลมร้อน 2.4 m/s | 77 |
| ข-8 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลมร้อน 2.4 m/s | 78 |
| ข-9 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 2 mm ที่อุณหภูมิ 80 °C และความเร็วลมร้อน 2.4 m/s | 79 |
| ข-10 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 4 mm ที่อุณหภูมิ 40 °C และความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 80 |
| ข-11 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 4 mm ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 81 |
| ข-12 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 4 mm ที่อุณหภูมิ 80 °C และความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 82 |
| ข-13 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 4 mm ที่อุณหภูมิ 40 °C และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s | 83 |
| ข-14 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 4 mm ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s | 84 |
| ข-15 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 4 mm ที่อุณหภูมิ 80 °C และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s | 85 |
| ข-16 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 4 mm ที่อุณหภูมิ 40 °C และความเร็วลมร้อน 2.4 m/s | 86 |
| ข-17 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 4 mm ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลมร้อน 2.4 m/s | 87 |
| ข-18 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 4 mm ที่อุณหภูมิ 80 °C และความเร็วลมร้อน 2.4 m/s | 88 |

## สารบาญตาราง (ต่อ)


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| ข-19 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 6 mm ที่อุณหภูมิ 40 °C และความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 89 |
| ข-20 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 6 mm ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 90 |
| ข-21 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 6 mm ที่อุณหภูมิ 80 °C และความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 91 |
| ข-22 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 6 mm ที่อุณหภูมิ 40 °C และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s | 92 |
| ข-23 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 6 mm ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s | 93 |
| ข-24 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 6 mm ที่อุณหภูมิ 80 °C และความเร็วลมร้อน 1.4 m/s | 94 |
| ข-25 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 6 mm ที่อุณหภูมิ 40 °C และความเร็วลมร้อน 2.4 m/s | 95 |
| ข-26 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 6 mm ที่อุณหภูมิ 60 °C และความเร็วลมร้อน 2.4 m/s | 96 |
| ข-27 | ข้อมูลการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกขนาดความหนา 6 mm ที่อุณหภูมิ 80 °C และความเร็วลมร้อน 2.4 m/s | 97 |
| ค-1 | ข้อมูลการทดลองที่ 1 ของการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกในอุตสาหกรรม | 99 |
| ค-2 | ข้อมูลการทดลองที่ 2 ของการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกในอุตสาหกรรม | 100 |
| ค-3 | ข้อมูลการทดลองที่ 3 ของการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกในอุตสาหกรรม | 101 |
| ค-4 | ข้อมูลการทดลองที่ 4 ของการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกในอุตสาหกรรม | 102 |
| ค-5 | ข้อมูลการทดลองที่ 1 ของการอบแห้งกระเบื้องดินเผาในอุตสาหกรรม | 103 |
| ค-6 | ข้อมูลการทดลองที่ 2 ของการอบแห้งกระเบื้องดินเผาในอุตสาหกรรม | 104 |
| ค-7 | ข้อมูลการทดลองที่ 3 ของการอบแห้งกระเบื้องดินเผาในอุตสาหกรรม | 105 |
| ค-8 | ข้อมูลการทดลองที่ 4 ของการอบแห้งกระเบื้องดินเผาในอุตสาหกรรม | 106 |
| ค-9 | ข้อมูลการทดลองที่ 5 ของการอบแห้งกระเบื้องดินเผาในอุตสาหกรรม | 107 |

# สารบาญภาพ


| รูป | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | ขั้นตอนหลักในกระบวนการผลิตเซรามิก | 10 |
| 2.2 | การเปลี่ยนแปลงความชื้นในเนื้อเซรามิกระหว่างการอบแห้ง | 12 |
| 2.3 | อัตราการอบแห้งเซรามิกกับเวลา | 12 |
| 2.4 | แบบจำลองภาคตัดขวางของการอบเซรามิก | 13 |
| 3.1 | เครื่องอบแห้งชั้นบาง แบบใช้ลมร้อน | 23 |
| 3.2 | เครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อน 4,000 W ขนาดความจุ 1 $m^3$ | 24 |
| 3.3 | การวางชิ้นงานพอร์ซเลนเซรามิกในตู้อบแห้ง | 26 |
| 3.4 | การวางชิ้นงานกระเบื้องดินเผาในตู้อบแห้ง | 27 |
| 4.1 | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น อุณหภูมิอบแห้ง กับเวลา ที่ได้จากการทดลองอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก หนา 6 mm ที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 32 |
| 4.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง กับเวลา ที่ได้จากการทดลองอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก หนา 6 mm ที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 32 |
| 4.3 | ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมที่ความเร็วลมต่างๆ จากการทดลองการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ความหนา 6 mm | 34 |
| 4.4 | ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม จากการทดลองการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ที่ความหนาต่างๆ ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 34 |
| 4.5 | การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม จากการทดลองและแบบจำลองการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกความหนา 6 mm ที่แปรผันตามอุณหภูมิและความเร็วลม | 37 |
| 4.6 | การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม จากการทดลองและแบบจำลองการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกอุณหภูมิ 60 °C ที่แปรผันตามความหนาและความเร็วลม | 37 |
| 4.7 | ค่าคงที่ของสมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี แปรตามความเร็วลมร้อน จากการทดลองอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ที่ความหนา 6 mm | 39 |
| 4.8 | ค่าคงที่ของสมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี แปรผันตามความหนา จากการทดลองอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 39 |

## สารบาญภาพ (ต่อ)


| รูป | | หน้า |
|---|---|---|
| 4.9 | การเปรียบเทียบ ค่าคงที่ของสมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี จากการทดลองและแบบจำลองการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ความหนา 6 mm ที่แปรผันตามอุณหภูมิและความเร็วลม | 41 |
| 4.10 | การเปรียบเทียบ ค่าคงที่ของสมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี จากการทดลองและแบบจำลองการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก อุณหภูมิ 60 °C ที่แปรผันตามความหนาและความเร็วลม | 41 |
| 4.11 | ค่าคงที่ของสมการ การอบแห้งเอมไพริคัล ที่แปรตามความเร็วลม จากการทดลองอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ที่ความหนา 6 m | 42 |
| 4.12 | ค่าคงที่ของสมการ การอบแห้งเอมไพริคัล ที่แปรตามความหนา จากการทดลองอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ที่ความเร็วลมร้อน 0.7 m/s | 43 |
| 4.13 | การเปรียบเทียบ ค่าคงที่ของสมการการอบแห้งเอมไพริคัล จากการทดลองและแบบจำลองการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ความหนา 6 mm ที่แปรผันตามอุณหภูมิและความเร็วลม | 44 |
| 4.14 | การเปรียบเทียบ ค่าคงที่ของสมการการอบแห้งเอมไพริคัล จากการทดลองและแบบจำลองการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก อุณหภูมิ 60 °C ที่แปรผันตามความหนาและความเร็วลม | 45 |
| 4.15 | เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของพอร์ซเลนเซรามิกที่ได้จากการทดลอง กับสมการจลนศาสตร์การอบแห้งทางทฤษฎี (Model 4) กึ่งทฤษฎี (Model 8) และเอมไพริคัล (Model 12) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 °C ความเร็วลมร้อน 1.4 m/s และความหนาชิ้นงาน 6 m | 46 |
| 4.16 | เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของพอร์ซเลนเซรามิกที่ได้จากการทดลอง กับสมการจลนศาสตร์การอบแห้งทางทฤษฎี (Model 4) กึ่งทฤษฎี (Model 8) และเอมไพริคัล (Model 12) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C ความเร็วลมร้อน 1.4 m/s และความหนาชิ้นงาน 6 m | 46 |

## สารบาญภาพ (ต่อ)


| รูป | | หน้า |
|---|---|---|
| 4.17 | เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของพอร์ซเลนเซรามิกที่ได้จากการทดลอง กับสมการจลนศาสตร์การอบแห้งทางทฤษฎี (Model 4) กึ่งทฤษฎี (Model 8) และเอมไพริคัล (Model 12) ที่อุณหภูมิอบแห้ง 80 °C ความเร็วลมร้อน 1.4 m/s และความหนาชิ้นงาน 6 m | 47 |
| 4.18 | เปรียบเทียบการลดลงของความชื้นในการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก ด้วยอุณหภูมิแบบลำดับขั้น | 48 |
| 4.19 | ปริมาณพลังงานสะสมที่ใช้ในการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก จากผลการทดลองอบแห้งด้วยอุณหภูมิแบบลำดับขั้น | 49 |
| 4.20 | การลดลงของความชื้นและปริมาณการใช้พลังงานในการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกสำหรับการทดลองครั้งที่ 3 (Test No.3) | 49 |
| 4.21 | การเปรียนเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด พลังงานจำเพาะ และระยะเวลาในการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก | 50 |
| 4.22 | เส้นกราฟมาตรฐาน สำหรับการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิก | 51 |
| 4.23 | เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของกระเบื้องดินเผา ที่ช่วงเวลาต่างๆ ในการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 5 (Test No.1 ถึง Test No.5) | 52 |
| 4.24 | ปริมาณพลังงานสะสมที่ใช้ในการอบแห้งกระเบื้องดินเผา | 53 |
| 4.25 | การลดลงของความชื้นและการใช้พลังงานในการอบแห้งกระเบื้องดินเผาสำหรับการทดลองครั้งที่ 3 (Test No.3) | 53 |
| 4.26 | การเปรียนเทียบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด พลังงานจำเพาะ และระยะเวลาในการอบแห้งกระเบื้องดินเผา | 54 |
| 4.27 | เส้นกราฟมาตรฐาน สำหรับการอบแห้งกระเบื้องดินเผา | 54 |
| 4.28 | การเปรียบเทียบสัดส่วนพลังงานที่ใช้ประโยชน์และพลังงานที่สูญเสีย ของการอบแห้งพอร์ซเลนเซรามิกและกระเบื้องดินเผา | 56 |

# สารบาญภาพ (ต่อ)


| รูป | | หน้า |
|---|---|---|
| ก-1 | เครื่องอบแห้งชั้นบาง แบบใช้ลมร้อน | 65 |
| ก-2 | เครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อน 4,000 W ขนาดความจุ 1 $m^3$ | 65 |
| ก-3 | ตู้อบลมร้อน สำหรับใช้หาความชื้นชิ้นทดสอบ | 66 |
| ก-4 | เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ Kane-May รุ่น KM330 (Type K) | 66 |
| ก-5 | เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด ±0.001 g ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP323S | 67 |
| ก-6 | เครื่องมือวัดความเร็วลม อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ Testo รุ่น 445 | 67 |
| ก-7 | เครื่องมือวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ Testo รุ่น 450 | 68 |
| ก-8 | เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด ±0.1 g ยี่ห้อ Zapper รุ่น EPS-3001 | 68 |
| ก-9 | kWh มิเตอร์ ยี่ห้อ FUJI ขนาด 30A | 69 |
| ก-10 | Data Logger ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DR 130 | 69 |

# อักษรย่อและสัญลักษณ์

| | |
|---|---|
| A | ค่าคงที่เอมไพริคัล |
| B | ค่าคงที่การอบแห้งเอมไพริคัล ($s^{-1}$) |
| $C_{p,ceramic}$ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเซรามิก (kJ/kg-°C) |
| $d$ | น้ำหนักแห้งของวัสดุ (kg) |
| $D_{eff}$ | สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม ($m^2/s$) |
| $h_{fg}$ | ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากเซรามิก (MJ/kg) |
| $HHV_{LPG}$ | ค่าความร้อนของก๊าซหุงต้ม (kJ/kg) |
| k | ค่าคงที่การอบแห้งกึ่งทฤษฎี ($s^{-1}$) |
| l | ความหนาของเซรามิก (m) |
| MR | อัตราส่วนความชื้น |
| $M_d$ | ความชื้นมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน) |
| $M_w$ | ความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน) |
| Q | พลังงานความร้อน (MJ) |
| RH | ความชื้นสัมพัทธ์ (%) |
| t | เวลา (h) |
| $T_{abs}$ | อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) |
| v | ความเร็วลมร้อน (m/s) |
| $w$ | น้ำหนักเปียกของวัสดุ (kg) |
| $\eta_{th}$ | ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%) |