

การเตรียมและการหาลักษณะสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟโดยใช้กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม
ถ้ำเกลบ และถ้ำลอย



นางสาว จิรประภา ขจรบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF INSULATING REFRACTORY BRICK
USING ALUMINIUM ANODING SLUDGE, RICE HUSK ASH AND FLY ASH

Miss Jiraprabha Khajornboon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมและการหาลักษณะสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟโดย

ใช้กากตะกอนขุบผิอะลูมิเนียม เถ้าแกลบ และเถ้าลอย

โดย

นางสาว จิรประภา ขจรบุญ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

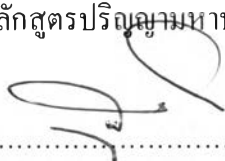
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

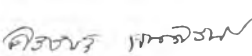
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

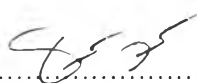
อาจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

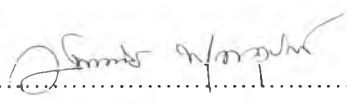

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

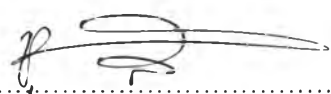
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชาน์ เจียมศิริเลิศ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชุมพล บุษบก)

จิรประภา ขจรบุญ : การเตรียมและการหาลักษณะสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟโดยใช้กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียมเถ้าแกลบและเถ้าลอย (PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF INSULATING REFRACTORY BRICK USING ALUMINIUM ANODIZING SLUDGE, RICE HUSK ASH AND FLY ASH)
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ธนากร วาสนาเพชรพงศ์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช, 125 หน้า.

อิฐฉนวนทนไฟเป็นวัสดุทนไฟที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงเพียงพอที่จะใช้ก่อในเตาเผาหรือบริเวณที่อุณหภูมิสูง มีความพรุนตัวสูง ความหนาแน่นต่ำ จึงมีความเป็นฉนวนความร้อน มีการนำความร้อนต่ำ วัสดุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐฉนวนทนไฟจึงต้องมีสมบัติที่เหมาะสมและสนับสนุนลักษณะดังกล่าว จึงสนใจศึกษาการนำของเสียจากอุตสาหกรรมได้แก่กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม เถ้าแกลบ และเถ้าลอยมาใช้ผลิตอิฐฉนวนทนไฟให้มีลักษณะและสมบัติใกล้เคียงกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า ซึ่งพบว่ากากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม เถ้าแกลบ และเถ้าลอย มีองค์ประกอบทางเคมีและแร่เป็นสารประกอบกลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกตซึ่งเหมาะกับการใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก ใช้แกลบดิบบดเป็นตัวสร้างรูพรุน ดินดำและปูนซีเมนต์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสาน โดยส่วนผสมที่เหมาะสมประกอบด้วย กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม : เถ้าแกลบ : เถ้าลอย : ดินดำ : แกลบดิบบด : ปูนซีเมนต์ขาว ในอัตราส่วน 60 : 17 : 10 : 10 : 15 : 11.2 โดยมวล ตามลำดับ ทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ด้วยแรงดัน 2.5 เมกะพาสคัล เผาไล่สารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเพิ่มอุณหภูมิเพื่อการเผาผนึกที่ 1325 องศาเซลเซียสขึ้นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าให้ค่าความหนาแน่น 0.81 ± 0.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีการดูดซึมน้ำ 86.16 ± 0.35 เปอร์เซ็นต์และมีความพรุนตัวปรากฏ 70.65 ± 0.37 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนช่วง 50-1000 องศาเซลเซียส 6.92×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าเล็กน้อย มีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลันที่ 1200 องศาเซลเซียสโดยทดสอบจำนวน 5 รอบ ชิ้นงานหลังการทดสอบมีความแข็งแรงลดลง 30.26 เปอร์เซ็นต์ใกล้เคียงกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า แต่ค่าความต้านแรงกดแตก 0.55 ± 0.01 เมกะพาสคัล ซึ่งน้อยกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าเนื่องจากพบเฟสคอร์รันดัมและอะเนอร์ไทต์เป็นหลัก แต่ไม่พบเฟสของมัลไลต์ซึ่งสนับสนุนความแข็งแรงดังที่พบในอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5272250023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : INSULATING REFRACTORY BRICK / ALUMINIUM ANODIZING
SLUDGE / RICE HUSK ASH / FLY ASH

JIRAPRABHA KHAJORNBOON : PREPARATION AND CHARACTERIZATION
OF ALUMINIUM ANODIZING SLUDGE, RICE HUSK ASH AND FLY ASH.

ADVISOR : ASST. PROF. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D.

CO-ADVISOR : SIRIPAN NILPAIRACH, Ph.D., 125 pp.

Insulating refractory brick is known as a ceramic refractory which can withstand to high temperature and apply in furnace or severe temperature area. Significant properties include high porosity, low density, heat resistance and low thermal conductivity. This study focused on the utilization of industrial wastes of aluminium anodizing sludge, rice husk ash and fly ash as raw materials of an insulating refractory brick. The chemical and phase composition of these raw materials are consisted of alumino-silicate compounds which could replace common natural raw materials in ceramic industry. Moreover, the ground rice husk can be used as a pore former. Ball clay and white cement are used as binders. The optimum composition of this insulating refractory brick is composed of aluminium anodizing sludge : rice husk ash : fly ash : ball clay : rice husk : white cement in the mass ratio of 60 : 17 : 10 : 15 : 11.2, respectively. The mixture was shaped by a hydraulic pressing machine with a pressure of 2.5 MPa. The pressed specimens were fired for the organic matter burnt out at 600°C for 2 hours. The temperature was then ramped to 1325 °C for sintering for 2 hours. The bulk density of samples was $0.81 \pm 0.00 \text{ g/cm}^3$, water absorption was $86.16 \pm 0.35\%$, and apparent porosity was $70.65 \pm 0.37\%$, closed to that of the commercial insulating refractory bricks values. The coefficient of thermal expansion from 50-1000 °C was $6.92 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ which is slightly higher than that of the commercials. The thermal shock resistance tested at 1200 °C for 5 cycles, showed that the strength was reduced by 30.26% which rather similar to commercial insulating bricks. However, compressive strength was less than that of the commercials as $0.55 \pm 0.01 \text{ MPa}$, owing to the lacking of mullite phase which support the strength of ceramic materials, as found in commercial insulating bricks. The main phases composition in specimen were corundum and anorthite.

Department : Materials Science

Student's Signature

Field of Study : Ceramic Technology

Advisor's Signature

Academic Year : 2010

Co-advisor's Signature

Jiraprabha K.

Thanakorn W.

Siripan Nilpairach

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ การสนับสนุนและความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากท่านทั้งหลายและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.สิริพรรณ นิลไพรัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและการแก้ไขปัญหาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่า มาให้ความรู้ คำชี้แนะเกี่ยวกับแนวทางในงานวิจัย และแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้การอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการทดสอบตลอดงานวิจัย

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษา งานวิจัย และการนำเสนอผลงาน

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้การอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการทดสอบตลอดงานวิจัย

ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการทดสอบ

เจ้าหน้าที่และเพื่อนๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวผู้วิจัย ที่คอยให้การสนับสนุน และกำลังใจในทุกๆ ความสำเร็จมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม.....	5
2.1 วัสดุฉนวนทนไฟ.....	6
2.2 อีฐฉนวนทนไฟ.....	8
2.3 การเลือกวัตถุดิบสำหรับอีฐฉนวนทนไฟ.....	10
2.3.1 วัตถุดิบหลักสำหรับอีฐฉนวนทนไฟ.....	10
2.3.2 สารตัวเติมสำหรับอีฐฉนวนทนไฟ.....	18
2.3.3 ตัวเชื่อมประสานสำหรับอีฐฉนวนทนไฟ.....	20
2.3.4 ตัวสร้างรูพรุนในเนื้อส่วนผสม.....	22
2.4 วัตถุดิบทางเลือกสำหรับอีฐฉนวนทนไฟ.....	26
2.4.1 กากตะกอนซุบผิอะลูมิเนียม.....	27
2.4.2 ใ้ถ้ำลอย.....	31
2.4.3 แกลบคิบ.....	34
2.4.4 ใ้ถ้ำแกลบ.....	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.1.1 วัตถุดิบหลักและตัวเติมสำหรับการผลิตอีฐฉนวนทนไฟ.....	40

3.1.2	วัตถุดิบสำหรับทำให้เกิดรูพรุน	40
3.1.3	วัตถุดิบสำหรับเป็นตัวเชื่อมประสาน	40
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	40
3.3	การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของวัตถุดิบ	41
3.3.1	การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟสของวัตถุดิบ	41
3.3.2	การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมี	41
3.3.3	การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค	42
3.4	การเตรียมตัวอย่างสำหรับการหล่อขึ้นรูป	42
3.4.1	การเตรียมผงส่วนผสมวัตถุดิบ	42
3.4.2	การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการหล่อแบบ	44
3.4.3	การเผาผนึก	44
3.4.4	เปรียบเทียบการล้าและไม่ล้าส่วนผสมก่อนการขึ้นรูป	45
3.5	การเตรียมตัวอย่างสำหรับการอัดขึ้นรูป	46
3.5.1	การเตรียมผงส่วนผสมวัตถุดิบ	46
3.5.2	เปรียบเทียบการล้าและไม่ล้าส่วนผสมก่อนการขึ้นรูป	46
3.5.3	การขึ้นรูปด้วยการอัดแห้ง	46
3.5.4	การเผาผนึก	47
3.6	การเตรียมตัวอย่างสำหรับการปรับปรุงความหนาแน่นของชิ้นงาน	47
3.6.1	การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมเกลบคิบเป็นตัวสร้างรูพรุน	47
3.6.2	การขึ้นรูปด้วยการอัดแห้ง	48
3.6.3	การเผาผนึก	48
3.7	การเตรียมตัวอย่างสำหรับการปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานหลังขึ้นรูป	48
3.7.1	การออกแบบส่วนผสม โดยการเติมตัวเชื่อมประสานปรับปรุงความแข็งแรง หลัง	48
3.7.2	การขึ้นรูปด้วยการอัดแห้งและเผาผนึก	48
3.8	ผลิตชิ้นงานให้มีขนาดใกล้เคียงกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า	48
3.9	การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของตัวอย่างชิ้นงานหลังเผาผนึกและอิฐฉนวนทนไฟ ทางการค้า	49

3.9.1 การวัดความหนาแน่นรวม ความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำของหินงาน	49
3.9.2 การวัดความต้านทานแรงกดแตก	50
3.9.3 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟส	51
3.9.4 การวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างจุลภาค	51
3.9.5 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	52
3.9.6 การวัดค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน	53
3.10 แผนผังการทดลอง	55
บทที่ 4 ผลการทดลอง	59
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของวัสดุดิบ	59
4.1.1 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟสของวัสดุดิบ	59
4.1.2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ	60
4.1.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค	61
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า	63
4.2.1 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟสของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า	63
4.2.2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า	64
4.2.3 การวิเคราะห์ความหนาแน่น ความพรุนตัวปรากฏ และการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์	65
4.2.4 การวิเคราะห์การต้านทานแรงกดและสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน	65
4.2.5 โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์	66
4.3 การเลือกวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสม	67
4.3.1 การขึ้นรูปแบบหล่อ	67
4.3.2 การขึ้นรูปแบบอัดแห้ง	67
4.3.3 การขึ้นรูปแบบอัดรีด	68
4.4 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบหล่อ	68
4.4.1 สูตรผสม C1-1, C1-2, C1-3 และ C1-4	68
4.4.2 สูตรผสม C2-1, C2-2, C2-3 และ C2-4	69
4.4.3 สูตรผสม C3-1, C3-2, C3-3 และ C3-4	71
4.4.4 สูตรผสม C4-1 ถึง C4-9	73

4.4.5	เปรียบเทียบการกรองส่วนผสมก่อนการขึ้นรูป.....	75
4.5	ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบอัด.....	78
4.5.1	เปรียบเทียบลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบอัดและแบบหล่อ.....	78
4.5.2	เปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสมก่อนขึ้นรูปแบบอัด.....	79
4.6	การเลือกอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม.....	81
4.6.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเฉลี่ยหลังเผาของส่วนผสมที่เลือก.....	81
4.6.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานแต่ละอุณหภูมิ.....	81
4.7	การปรับปรุงความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	82
4.7.1	การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมแคลบคิบเป็นตัวสร้างรูพรุน.....	82
4.7.2	การลดขนาดของแคลบคิบ.....	85
4.7.3	การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมแคลบคิบบดเป็นตัวสร้างรูพรุน.....	88
4.8	การปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป.....	97
4.8.1	การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมตัวเชื่อมประสาน.....	97
	หมายเหตุ : ใช้น้ำปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ทุกส่วนผสม.....	97
4.8.2	การเพิ่มอุณหภูมิการเผาชิ้นงาน.....	106
4.9	การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของส่วนผสมที่เลือกกับผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟทางการค้า.....	111
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....		114
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	114
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	115
รายการอ้างอิง.....		116
ภาคผนวก.....		121
ภาคผนวก ก.....		122
ภาคผนวก ข.....		123
ภาคผนวก ค.....		124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		125

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของวัสดุฉนวนทนไฟ	7
ตารางที่ 2.2 กระบวนการย่อยสลายสารประกอบไฮดรตอะลูมินาของแร่บอไซด์	15
ตารางที่ 2.3 สารประกอบกลุ่มสปีเนล	17
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสม C1	43
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสม C2	43
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสม C3	44
ตารางที่ 3.4 ส่วนผสม C4	44
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแต่ละวัตถุดิบ	60
ตารางที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ (เปอร์เซ็นต์สะสม)	62
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟทางการค้า	64
ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่น ความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า	65
ตารางที่ 4.5 ความต้านทานแรงกดแตกและสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า	66
ตารางที่ 4.6 ส่วนผสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปรหัส C1	68
ตารางที่ 4.7 ส่วนผสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปรหัส C2	70
ตารางที่ 4.8 ส่วนผสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปรหัส C3	71
ตารางที่ 4.9 ส่วนผสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปรหัส C4	73
ตารางที่ 4.10 ส่วนผสมที่ทำการเลือก	76
ตารางที่ 4.11 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเปรียบเทียบรูปแบบการขึ้นรูป	78
ตารางที่ 4.12 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสม	80
ตารางที่ 4.13 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผา	81
ตารางที่ 4.14 ส่วนผสมเมื่อทำการเดิมเกลบคิบ	82
ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติหลังเผา	83
ตารางที่ 4.16 การกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบแบบเปอร์เซ็นต์สะสม	86
ตารางที่ 4.17 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานก่อนและหลังบดเกลบคิบ	87
ตารางที่ 4.18 ส่วนผสมเมื่อทำการเดิมเกลบคิบบด	88
ตารางที่ 4.19 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานหลังเผา	89

	หน้า
ตารางที่ 4.20 ส่วนผสมเมื่อทำการเติมตัวเชื่อมประสาน	97
ตารางที่ 4.21 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเฉลี่ยหลังเผา	98
ตารางที่ 4.22 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	106
ตารางที่ 4.23 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของส่วนผสมที่เลือกกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า	111

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การออกแบบการใช้วัสดุคืบให้สอดคล้องกับการแบ่งประเภทวัสดุทนไฟ.....	8
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกา.....	11
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่ดิน	12
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงรูปผลึกของแร่เซอร์โคเนีย.....	14
รูปที่ 2.5 กระบวนการเบเยอร์ของสารประกอบไฮดรอกไซด์อะลูมินา.....	15
รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของแร่เวอร์มิคูไลต์ รูป a) แร่เวอร์มิคูไลต์คืบ b) เผา 300 องศาเซลเซียส c) เผา 600 องศาเซลเซียสและ d) เผา 900 องศาเซลเซียส.....	23
รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของแร่โคอะตอมไมต์ รูป a) กำลังขยาย 2000 เท่า b) กำลังขยาย 6500	23
รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาค รูป a) เมล็ดฝุ่นคืบ และ b) อะลูมินาเซรามิกผสมเมล็ดฝุ่นหลังเผา	24
รูปที่ 2.9 กระบวนการชุบผิวอย่างง่ายในโรงงานอุตสาหกรรม	28
รูปที่ 2.10 กากตะกอนชุบผิวอะลูมิเนียม a) แบบเปียก b) แบบแห้งหลังอบ	28
รูปที่ 2.11 สมการแสดงการสลายตัวของอะลูมิเนียมซัลเฟต	30
รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคแก้วลอยติกไนต์แม่เมาะ รูป a) แก้วลอยขนาดใหญ่ b) แก้วลอยขนาดเล็ก	32
รูปที่ 2.13 โครงสร้างจุลภาคแก้วลอยกลวง รูป a) ซิโนสเฟียร์ b) พลีโรสเฟียร์ขนาดเล็ก และ c) พลีโรสเฟียร์ขนาดใหญ่.....	32
รูปที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคของแคลบคืบ รูป a) กำลังขยาย x10 และ b) กำลังขยาย x50	35
รูปที่ 2.15 การกระจายของรูพรุน รูป a) ไม่เติมแคลบคืบเลย b) เติมแคลบคืบ 10 เปอร์เซ็นต์ c) เติมแคลบคืบ 15 เปอร์เซ็นต์ และ d) เติมแคลบคืบ 20 เปอร์เซ็นต์.....	36
รูปที่ 2.16 โครงสร้างจุลภาคของแก้วเคลือบที่อุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส	37
รูปที่ 3.1 เครื่อง X-Ray Diffractometer	41
รูปที่ 3.2 เครื่องร่อนตะแกรงพร้อมตะแกรงร่อน	42
รูปที่ 3.3 เตาเผาไฟฟ้า (Box furnace).....	45
รูปที่ 3.4 เครื่องกรองสุญญากาศ.....	46
รูปที่ 3.5 เครื่องอัดไฮดรอลิก	47
รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal testing machine	51
รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM).....	52

รูปที่ 3.8 เครื่อง Dilatometer.....	52
รูปที่ 3.9 เตาเผา Heraeus	53
รูปที่ 3.11 แผนผังการเตรียมชิ้นงานอิฐฉนวนทนไฟแบบหล่อขึ้นรูปและอัดขึ้นรูป	55
รูปที่ 3.12 แผนผังการปรับปรุงความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา.....	56
รูปที่ 3.13 แผนผังการปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงาน	57
รูปที่ 3.14 แผนผังการเปรียบเทียบสมบัติของส่วนผสมที่เลือกกับผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟทางการค้า.....	58
รูปที่ 4.1 XRD องค์ประกอบทางเฟสของวัตถุดิบ	59
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบเปอร์เซ็นต์สะสม	62
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางเฟสของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า.....	63
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟ รูป a) SRIC HI-26 และ b) Patra C-2... 66	
รูปที่ 4.5 ชิ้นงานหลังเผาสูตร C1-1, C1-2, C1-3, C1-4.....	69
รูปที่ 4.6 ชิ้นงานหลังเผาสูตร C2-1, C2-2, C2-3, C2-4.....	70
รูปที่ 4.7 ชิ้นงานหลังเผาสูตร C3-1, C3-2, C3-3, C3-4.....	72
รูปที่ 4.8 ชิ้นงานหลังเผาสูตร C4-1 ถึง C4-9	74
รูปที่ 4.9 ชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการล้าและไม่ล้าส่วนผสมก่อนการขึ้นรูป.....	76
รูปที่ 4.10 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานล้าและไม่ล้าส่วนผสม	77
รูปที่ 4.11 ชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการขึ้นรูป a) แบบหล่อและ b) แบบอัด	78
รูปที่ 4.12 ชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบ a) ไม่ล้าและ b) ล้าส่วนผสม	80
รูปที่ 4.13 องค์ประกอบทางเฟสแต่ละอุณหภูมิการเผา	81
รูปที่ 4.14 ชิ้นงานก่อนเผาเปรียบเทียบการเติมแคลเซียมตามที่ได้รับ รูป a) ไม่เติม b) เติม 12.5% และ c) เติม 25%.....	83
รูปที่ 4.15 ชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการเติมแคลเซียมตามที่ได้รับรูป a) ไม่เติม b) เติม 12.5% และ c) เติม 25%.....	84
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบเปอร์เซ็นต์สะสม	86
รูปที่ 4.17 ชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการเติมแคลเซียม รูป a) แคลเซียมตามที่ได้รับและ b) แคลเซียมขาด.....	87
รูปที่ 4.18 แนวโน้มความหนาแน่นรวมเปรียบเทียบกับปริมาณการเติมแคลเซียมและแรงอัดขึ้นรูป	90

รูปที่ 4.19 แนวโน้มการหดตัวรวมเปรียบเทียบกับ การเพิ่มปริมาณเกลบคิบและแรงอัดขึ้นรูป 90

รูปที่ 4.20 แนวโน้มความพรุนตัวปรากฏเปรียบเทียบกับ การเพิ่มปริมาณเกลบคิบและแรงอัดขึ้นรูป
..... 91

รูปที่ 4.21 แนวโน้มการคูดซึมน้ำเปรียบเทียบกับ การเพิ่มปริมาณเกลบคิบและแรงอัดขึ้นรูป 91

รูปที่ 4.22 แนวโน้มความต้านทานแรงกดแตกเปรียบเทียบกับ การเพิ่มเกลบคิบและแรงอัดขึ้นรูป 92

รูปที่ 4.23 องค์ประกอบทางเฟสชิ้นงานตามปริมาณเกลบคิบคที่เดิม 94

รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่เดิมเกลบคิบค 96

รูปที่ 4.25 ลักษณะของชิ้นงานหลังเผา 1300 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับ ชิ้นงานที่ไม่เดิมและชิ้นงาน
ที่เดิมตัวเชื่อมประสานแต่ละชนิด 98

รูปที่ 4.26 ความหนาแน่นรวมเปรียบเทียบกับ การเดิมและไม่เดิมตัวเชื่อมประสาน 99

รูปที่ 4.27 การหดตัวรวมเปรียบเทียบกับ การเดิมและไม่เดิมตัวเชื่อมประสาน 99

รูปที่ 4.28 ความพรุนตัวปรากฏเปรียบเทียบกับ การเดิมและไม่เดิมตัวเชื่อมประสาน 99

รูปที่ 4.29 การคูดซึมน้ำเปรียบเทียบกับ การเดิมและไม่เดิมตัวเชื่อมประสาน 100

รูปที่ 4.30 ความต้านทานแรงกดแตกเปรียบเทียบกับ การเดิมและไม่เดิมตัวเชื่อมประสาน 100

รูปที่ 4.31 โครงสร้างของกาวอินทรีย์โซเดียมคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC) 101

รูปที่ 4.32 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานตามชนิดของตัวเชื่อมประสาน 103

รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบกับ การเดิมและไม่เดิมตัวเชื่อมประสาน 105

รูปที่ 4.34 แนวโน้มความหนาแน่นรวมเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิการเผา 106

รูปที่ 4.35 แนวโน้มการหดตัวเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิการเผา 107

รูปที่ 4.36 แนวโน้มความพรุนตัวปรากฏเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิการเผา 107

รูปที่ 4.37 แนวโน้มการคูดซึมน้ำเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิการเผา 107

รูปที่ 4.38 แนวโน้มความต้านทานแรงกดแตกเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิการเผา 108

รูปที่ 4.39 แนวโน้มความต้านทานแรงกดแตกเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิการเผา 109

รูปที่ 4.40 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบกับ การเดิมและไม่เดิมตัวเชื่อมประสาน 110

รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบ โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่เลือกกับ อัจฉนวนทนไฟทางการค้า 112