ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248641
กลิน

ผลของการเติมเถ้าหนักและเถ้าลอยที่มีต่อคุณภาพของกระเบื้องเซรามิก

ธุทารัตน์ วงค์ชัยชิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

b00255012

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248641

ผลของการเติมเถ้าหนักและเถ้าลอยที่มีต่อคุณภาพของกระเบื้องเซรามิก

จุฑารัตน์ วงค์ขัติยะ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คณิตศาสตร์บูรณาการ

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

ผลของการเติมเถ้าหนักและเถ้าลอยที่มีต่อคุณภาพของกระเบื้องเซรามิก

จุฑารัตน์ วงค์ขัติยะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คณิตศาสตร์บูรณาการ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกศรินทร์ พิมรักษา

.....กรรมการ
อาจารย์ ดร. วรพงษ์ เทียมสอน

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกศรินทร์ พิมรักษา

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ ชัยพานิช

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐพงศ์ เศรษฐบุปผา

6 ตุลาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้เนื่องด้วยความกรุณา และการสนับสนุนจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกศรินทร์ พิมรักษา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ ชัยพานิช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐพงศ์ เศรษฐบุปผา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม วิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาช่วยเหลือให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ทางผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ และอาจารย์ ดร. วรพงษ์ เทียมสอน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจแก้ข้อผิดพลาด ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอกราบขอบพระคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่ให้ทุนการศึกษาในระดับปริญญาโท สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนการทำงานวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิชาการระดับบัณฑิตศึกษา และขอขอบคุณ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง พร้อมทั้งโรงงานกระเบื้องเคลือบเวียงพิงค์ จังหวัดเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบและข้อมูลสำหรับใช้ในงานวิจัย ตลอดจนคณะวิจิตรศิลป์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย และความช่วยเหลือในระหว่างการดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คณิตศาสตร์บูรณาการ และภาควิชาเคมีอุตสาหกรรมทุกท่านที่ได้กรุณาให้ความรู้ และคำปรึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คณิตศาสตร์บูรณาการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงาน

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คณิตศาสตร์บูรณาการ และน้องๆ ในห้องศูนย์วิจัยวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม ที่ช่วยเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกคน ที่ให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จ

ท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบุคลากร และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนทำให้งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาและเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจศึกษาในเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จุฑารัตน์ วงค์ขัติยะ

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ ผลของการเติมเถ้าหนักและเถ้าลอยที่มีต่อคุณภาพของกระเบื้องเซรามิก

ผู้เขียน นางสาวจุฑารัตน์ วงค์ขัติยะ

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์คณิตศาสตร์บูรณาการ)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ผศ. ดร. เกศรินทร์ พิมรักษา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
ผศ. ดร. อานนท์ ชัยพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ผศ. ดร. เศรษฐพงศ์ เศรษฐบุปผา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

248641

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลของกระเบื้องเซรามิก ที่ทำจากดินผสมกับเถ้าหนักและเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ แม่เมาะ ในอัตราส่วนเถ้าหนักร้อยละ 10 – 30 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอยร้อยละ 20 – 40 โดยน้ำหนัก มาผสมกับดิน ขึ้นรูปโดยการอัดแบบกึ่งเปียกกับน้ำร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ให้ได้กระเบื้องขนาดกว้าง 5 ซม. ยาว 10 ซม. และหนา 1 ซม. เผาที่อุณหภูมิ 850, 900 และ 950 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเผาปกติแบบโรงงาน (2 องศาต่อนาที) เผาเร็ว (3 องศาต่อนาที) เผาเร็วมาก (5 องศาต่อนาที) และได้ศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดัด การดูดซึมน้ำ ความพรุน ความหนาแน่น การหดตัว ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางแร่ของกระเบื้องเซรามิกหลังเผา

ผลการศึกษาสรุปได้ว่า เถ้าหนัก เถ้าลอย และดิน มีองค์ประกอบหลักคล้ายกัน คือ ประกอบด้วย ซิลิกา อะลูมินา มากกว่าร้อยละ 60 นอกจากนี้ยังมี แคลเซียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ โดยพบว่าก่อนเผากระเบื้องที่ผสมเถ้าหนักหรือเถ้าลอยจะมีปฏิกิริยาพอซโซลานิกเกิดขึ้น เซรามิกที่ผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยเพิ่มขึ้นหลังจากการเผาพบว่าส่วนใหญ่ ความต้านทานแรงดัดลดลง การดูดซึมน้ำ และความพรุนเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวลดลง แต่ไม่ส่งผลใดๆ ต่อความหนาแน่น โดย

248641

การผสมเถ้าลอยจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเถ้าหนักหากผสมในอัตราส่วนเท่ากัน เมื่อผสมเถ้าลอยเผาด้วยอัตราเร็วมาก และเถ้าหนักเผาด้วยอัตราปกติ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสให้สมบัติเชิงกลที่ดี โดยเฉพาะค่าความต้านทานแรงดัดมีค่าสูงสุด ด้านการหดตัวมีค่าน้อย โครงสร้างประกอบด้วยเฟสที่อยู่กันแบบต่อเนื่อง มีความแน่นตัวสูง องค์ประกอบทางแร่หลังเผาเมื่อผสมเถ้าหนักหรือเถ้าลอยจะเกิดสารประกอบใหม่ชนิดแอลไบต์ ($NaAlSi_3O_8$)

Thesis Title	Effects of Bottom Ash and Fly Ash Additions on Quality of Ceramic Tiles
Author	Miss Jutharat Wongkuttiya
Degree	Master of Science (Integrated Science-Mathematics)
Thesis Advisory Committee	Asst. Prof. Dr. Kedsarin Pimraksa — Advisor Asst. Prof. Dr. Arnon Chaipanich — Co-advisor Asst. Prof. Dr. Sethapong Sethabouppha — Co-advisor

ABSTRACT

248641

This work studied the mechanical properties of ceramic tiles made of clay mixed with either bottom ash or fly ash from Mae Moh lignite power plant. Bottom ash and fly ash were added into clay in ranges of 10-30 and 20-40 percent by weight, respectively as a comparison. The mixtures were mixed with 25 wt% of water to obtain plastic body and then formed by compression to obtain green tile with 5x10x1 cm^3. Tile samples after drying were fired at various temperatures (850, 900 and 950 $^{\circ}C$). Firing rates used were regular rate (the same rate as used in the factory: 2 $^{\circ}C$/min), fast rate (3 $^{\circ}C$/min) and very fast rate (5 $^{\circ}C$/min). The fired products were studied in terms of mechanical properties viz, bending strength, water absorption, porosity, density, shrinkage, microstructure and mineralogical compositions.

The results showed that bottom ash, fly ash and clay encompassed silica and alumina as a majority incorporating with minor calcium oxide and iron oxide. Clay-bottom ash or fly ash-water mixtures exhibited pozzolanic reaction befor firing thus resulted in the green strength

development. The additions of fly ash and bottom ash decreased the bending strength, increased water absorption and porosity and made no difference in bulk density. At the same content of addition, fly ash addition provided the better mechanical properties. It was found that fly ash added tiles had better bending strength and less shrinkage. Ceramic tiles modified with fly ash and fired with the fast heating rate at 900 $^{\circ}$C contained the highest bending strength and low shrinkage. Modified with bottom ash and fired with normal heating rate at 900 $^{\circ}$C ceramic tiles gave comparable mechanical properties to modified with fly ash. Their microstructures contained highly glassy phases that created more compacted solid. Tile samples incorporating with either bottom ash or fly ash consisted of albite ($NaAlSi_3O_8$) a new phase formed after firing.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพ	ฑ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เซรามิก	5
2.1.1 วัตถุดิบเซรามิก	7
2.1.2 วิธีการทำเซรามิก	11
2.2 เถ้าถ่านหิน	17
2.2.1 เถ้าหนัก	18
2.2.2 เถ้าลอย	20
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเถ้าหนักมาทำเซรามิก	22
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเถ้าลอยมาทำเซรามิก	24
บทที่ 3 เครื่องมือ อุปกรณ์ วัตถุดิบ สารเคมี และวิธีทดลอง	27
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	27
3.2 วัตถุดิบและสารเคมี	28

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง	29
3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	30
3.3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ	30
3.3.3 การทำกระเบื้องเซรามิก	31
3.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของกระเบื้องเซรามิก	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	36
4.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบที่นำไปใช้ในการทำกระเบื้องเซรามิก	36
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี	36
4.1.2 องค์ประกอบทางแร่	37
4.1.3 ขนาดอนุภาค	40
4.1.4 โครงสร้างอนุภาคของเถ้าหนักและเถ้าลอย	41
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของกระเบื้องเซรามิก	41
4.2.1 ความต้านทานแรงดัด	41
4.2.2 ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความพรุน	48
4.2.3 การหดตัว	57
4.2.4 องค์ประกอบทางแร่	64
4.2.5 โครงสร้างจุลภาค	70
4.2.6 พื้นผิวภายนอก	94
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	97
5.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ	97
5.2 ผลของการเติมเถ้าหนักและเถ้าลอยต่อโครงสร้างจุลภาคของกระเบื้องเซรามิก	98
5.3 ผลของการเติมเถ้าหนักและเถ้าลอยต่อสมบัติเชิงกลของกระเบื้องเซรามิก	98
5.4 ผลของอุณหภูมิและอัตราการเผาที่แตกต่างกันต่อสมบัติเชิงกลของกระเบื้องเซรามิก	98
5.5 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป	99

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง	104
ภาคผนวก ข การเข้าร่วมนำเสนอผลงานทางวิชาการ	132
ประวัติผู้เขียน	140

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบแต่ละชนิด	14
2.2 ผลิตภัณฑ์เซรามิกเมื่อถูกเผาในอุณหภูมิต่างๆ	16
2.3 องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าหนักตั้งแต่ มกราคมถึงเมษายน 2553	19
2.4 องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอยตั้งแต่ มกราคมถึงพฤษภาคม 2553	22
3.1 อัตราส่วนของวัตถุดิบโดยน้ำหนัก	32
3.2 อุณหภูมิและอัตราการเผา	32
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก เถ้าลอย และดิน	36
4.2 องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าหนัก เถ้าลอย และดิน	39
4.3 ขนาดอนุภาคของเถ้าหนัก เถ้าลอย และดิน	40
4.4 ความหนาแน่นของกระเบื้องเซรามิกหลังเผา	48
4.5 การหดตัวเมื่อแห้งของกระเบื้องเซรามิก	57
4.6 การหดตัวหลังเผาของกระเบื้องเซรามิก	58
4.7 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงหลังเผา	68
4.8 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว รูปที่ 4.31 (ข) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS	72
4.9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย 30% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว รูปที่ 4.31 (ค) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS	75
4.10 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย 40% เผา 900 °ซ. แบบปกติ รูปที่ 4.31 (ง) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS	77
4.11 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก 10% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก รูปที่ 4.40 (ก) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS	81
4.12 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก รูปที่ 4.40 (ข) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS	83
4.13 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนัก 20% เผา 950 °ซ. แบบเร็วมาก รูปที่ 4.40 (ค) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS	86

สารบาญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.14 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 10:40 เผา 900 °ซ. แบบปกติ รูปที่ 4.40 (ง) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS	88
4.15 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 10:40 เผา 950 °ซ. แบบปกติ รูปที่ 4.40 (จ) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS	91
4.16 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 15:35 เผา 950 °ซ. แบบปกติ รูปที่ 4.40 (ฉ) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS	93
ก1 ความต้านทานแรงดัดก่อนเผา	105
ก2 ความต้านทานแรงดัดหลังเผา	106
ก3 การดูดซึมน้ำของกระเบื้องเซรามิก	108
ก4 ความพรุนของกระเบื้องเซรามิก	110
ก5 ความหนาแน่นของกระเบื้องเซรามิก	113
ก6 การหดตัวของกระเบื้องเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 850 °ซ.	115
ก7 การหดตัวของกระเบื้องเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ.	121
ก8 การหดตัวของกระเบื้องเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 950 °ซ.	126

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน	4
2.1	เครื่องอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบอัดดินเหนียว	12
2.2	เตาเผาไฟฟ้า	14
2.3	โครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าหนัก	20
2.4	โครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย	21
3.1	เครื่องบดหยาบ	28
3.2	แผนภาพกระบวนการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้	29
3.3	แผนภาพขั้นตอนการทำกระเบื้องเซรามิก	31
3.4	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่ต่อเข้ากับกล้องถ่ายรูป	35
4.1	องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าหนัก	37
4.2	องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอย	38
4.3	องค์ประกอบทางแร่ของดิน	38
4.4	โครงสร้างจุลภาคของเถ้าถ่านหิน (ก) เถ้าหนัก (ข) เถ้าลอย	41
4.5	ความต้านทานแรงดัดก่อนเผาของกระเบื้องเซรามิกที่ผสมเถ้าหนักและเถ้าลอย	42
4.6	ความต้านทานแรงดัดของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 850 °ซ.	43
4.7	ความต้านทานแรงดัดของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ.	43
4.8	ความต้านทานแรงดัดของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 950 °ซ.	44
4.9	ความต้านทานแรงดัดของกระเบื้องเซรามิกผสมเถ้าหนักและเถ้าลอย เผาแบบปกติที่อุณหภูมิการเผาแบบต่างๆ	45
4.10	ความต้านทานแรงดัดของกระเบื้องเซรามิกกับปริมาณเถ้าหนักและเถ้าลอยเผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ. อัตราการเผาแบบปกติ	46
4.11	ความต้านทานแรงดัดของกระเบื้องเซรามิกที่ประกอบด้วยดินร้อยละ 50 กับปริมาณเถ้าหนักต่อเถ้าลอยเผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ. แบบปกติ	47
4.12	การดูดซึมน้ำของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 850 °ซ.	49
4.13	การดูดซึมน้ำของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ.	50

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.14 การดูดซึมน้ำของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 950 °ซ.	50
4.15 ความพรุนของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 850 °ซ.	51
4.16 ความพรุนของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ.	51
4.17 ความพรุนของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 950 °ซ.	52
4.18 การดูดซึมน้ำของกระเบื้องเซรามิกกับปริมาณเถ้าหนักและเถ้าลอยเผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ. อัตราการเผาแบบปกติ	53
4.19 การดูดซึมน้ำของกระเบื้องเซรามิกที่ประกอบด้วยดินร้อยละ 50 กับปริมาณเถ้าหนักต่อเถ้าลอยเผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ. แบบปกติ	54
4.20 ความพรุนของกระเบื้องเซรามิกกับปริมาณเถ้าหนักและเถ้าลอยเผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ. อัตราการเผาแบบปกติ	55
4.21 ความพรุนของกระเบื้องเซรามิกที่ประกอบด้วยดินร้อยละ 50 กับปริมาณเถ้าหนักต่อเถ้าลอยเผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ. แบบปกติ	56
4.22 การหดตัวของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 850 °ซ.	59
4.23 การหดตัวของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ.	60
4.24 การหดตัวของกระเบื้องเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 950 °ซ.	60
4.25 การหดตัวของกระเบื้องเซรามิกกับปริมาณเถ้าหนักและเถ้าลอยเผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ. อัตราการเผาแบบปกติ	61
4.26 การหดตัวรวมของกระเบื้องเซรามิกที่ประกอบด้วยดินร้อยละ 50 กับปริมาณเถ้าหนักต่อเถ้าลอยเผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ. อัตราการเผาแบบปกติ	62
4.27 องค์ประกอบทางแร่หลังเผาของกระเบื้องเซรามิกจากดินเผาที่อุณหภูมิ 950 °ซ. อัตราการเผาแบบเร็วมาก	64
4.28 องค์ประกอบทางแร่หลังเผาของกระเบื้องเซรามิกจากดินผสมเถ้าหนักในอัตราส่วน (ก) เถ้าหนัก 10% (ข) เถ้าหนัก 20% (ค) เถ้าหนัก 30% เผาที่อุณหภูมิ 950 °ซ. อัตราการเผาแบบเร็วมาก	65

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.29 องค์ประกอบทางแร่หลังเผาของกระเบื้องเซรามิกจากดินผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน (ก) เถ้าลอย 20% (ข) เถ้าลอย 30% (ค) เถ้าลอย 40% เผาที่อุณหภูมิ 950 °ซ. อัตราการเผาแบบเร็วมาก	66
4.30 องค์ประกอบทางแร่หลังเผาของกระเบื้องเซรามิกจากดิน ผสมเถ้าหนักและเถ้าลอย ในอัตราส่วน (ก) เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 15:35 (ข) เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 20:30 (ค) เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 25:25 (ง) เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 30:20 เผาที่อุณหภูมิ 950 °ซ. แบบเร็วมาก	67
4.31 โครงสร้างทางจุลภาคของดิน ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้ (ก) ดิน เผา 900 °ซ. แบบปกติ (ข) เถ้าลอย 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว (ค) เถ้าลอย 30% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว (ง) เถ้าหนัก 40% เผา 900 °ซ. แบบปกติ	70
4.32 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว ในตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 4.31 (ข)	71
4.33 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว ในตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 4.31 (ข)	71
4.34 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว ในตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 4.31 (ข)	72
4.35 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย 30% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว ในตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 4.31 (ค)	73
4.36 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย 30% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว ในตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 4.31 (ค)	74
4.37 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย 30% เผา 900 °ซ. แบบเร็ว ในตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 4.31 (ค)	74
4.38 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย 40% เผา 900 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 4.31 (ง)	76

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.39 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย 40% เผา 900 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 4.31 (ง)	76
4.40 โครงสร้างทางจุลภาคของดิน ผสมเถ้าหนักในอัตราส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้ (ก) เถ้าหนัก 10% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก (ข) เถ้าหนัก 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก (ค) เถ้าหนัก 20% เผา 950 °ซ. แบบเร็วมาก (ง) 10B:40F เผา 900 °ซ. แบบปกติ (จ) 10B:40F เผา 950 °ซ. แบบปกติ (ฉ) 15B:35F เผา 950 °ซ. แบบปกติ	78
4.41 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าหนัก 10% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก ในตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 4.40 (ก)	79
4.42 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าหนัก 10% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก ในตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 4.40 (ก)	80
4.43 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าหนัก 10% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก ในตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 4.40 (ก)	80
4.44 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าหนัก 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก ในตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 4.40 (ข)	83
4.45 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าหนัก 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก ในตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 4.40 (ข)	82
4.46 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าหนัก 20% เผา 900 °ซ. แบบเร็วมาก ในตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 4.40 (ข)	83
4.47 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าหนัก 20% เผา 950 °ซ. แบบเร็วมาก ในตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 4.40 (ค)	84
4.48 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าหนัก 20% เผา 950 °ซ. แบบเร็วมาก ในตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 4.40 (ค)	85
4.49 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของเถ้าหนัก 20% เผา 950 °ซ. แบบเร็วมาก ในตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 4.40 (ค)	85

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.50 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 10:40 เผา 900 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 4.40 (ง)	87
4.51 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 10:40 เผา 900 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 4.40 (ง)	87
4.52 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 10:40 เผา 900 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 4.40 (ง)	88
4.53 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 10:40 เผา 950 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 4.40 (จ)	89
4.54 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 10:40 เผา 950 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 4.40 (จ)	90
4.55 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 10:40 เผา 950 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 40 (จ)	90
4.56 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 15:35 เผา 950 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 1 ของรูปที่ 4.40 (ฉ)	92
4.57 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 15:35 เผา 950 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 4.40 (ฉ)	92
4.58 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย, 15:35 เผา 950 °ซ. แบบปกติ ในตำแหน่งที่ 3 ของรูปที่ 4.40 (ฉ)	93
4.59 พื้นผิวภายนอกของกระเบื้องเซรามิกจากดิน อัตราการเผาแบบเร็วมาก ที่อุณหภูมิกำลังขยาย 50 เท่า (ก) 850 °ซ. (ข) 950 °ซ.	94
4.60 พื้นผิวภายนอกของกระเบื้องเซรามิกจากดิน เถ้าหนักและเถ้าลอย อัตราการเผาแบบปกติ กำลังขยาย 50 เท่า (ก) เถ้าหนัก 20% เผา 850 °ซ. (ข) เถ้าลอย 20% เผา 850 °ซ. (ค) เถ้าหนัก 20% เผา 900 °ซ. (ง) เถ้าลอย 20% เผา 900 °ซ. (จ) เถ้าหนัก 20% เผา 950 °ซ. (ฉ) เถ้าลอย 20% เผา 950 °ซ.	95

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.61 พื้นผิวภายนอกของกระเบื้องเซรามิกจากดิน 50% ผสม เถ้าหนัก:เถ้าลอย ที่ 10:40 อัตราการเผาแบบเร็วมาก กำลังขยาย 50 เท่า ที่อุณหภูมิ (ก) 850 °ซ. (ข) 950 °ซ.	96

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
XRF	เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
XRD	เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
EDS	อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์
ซม.	เซนติเมตร
%	เปอร์เซ็นต์
°ซ.	องศาเซลเซียส
% โดยน.น.	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
กก./ตร.ซม.	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ปอนด์/ตร.น.	ปอนด์/ตารางนิ้ว
มม.	มิลลิเมตร
มล.	มิลลิลิตร
LOI	การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา
R	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์