

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญภาพ	ฑ
อักษรย่อ	ถ
สัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	6
1.4 ขอบเขต และวิธีการวิจัย	6
บทที่ 2 หลักการ ทฤษฎี และทบทวนเอกสารวิชาการ	9
2.1 โฟมแก้วหรือเซลลูลาร์กลาส	9
2.2 การเกิดโฟม	10
2.3 สารก่อฟอง	13
2.4 ฉนวนความร้อนของโฟม	13
2.5 ชนิดและสมบัติของโฟมทั่วไป	14
2.6 แก้วโซดา-ไลม์	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7	ตะกรันจากการหลอมเหล็ก	15
2.8	ทบทวนเอกสารวิชาการ	15
บทที่ 3	วิธีการทดลอง	20
3.1	3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	20
3.2	3.2 วัสดุและสารเคมี	20
3.3	3.3 วิธีการทดลอง	23
	3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	23
	3.3.1.1 วัตถุดิบ	23
	3.3.1.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงกระจกและผงตะกรัน	23
	1. การหาความหนาแน่นรวม	23
	2. การหาขนาดอนุภาค	24
	3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	24
	4. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่	24
	5. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน	24
	3.3.2 การเตรียมโฟมแก้ว	24
	3.3.2.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผงกระจกและผงตะกรันต่อน้ำที่ใช้ในการเตรียมสลิป	24
	1. การหาความหนาแน่น	26
	2. การหาร้อยละการดูดซึมของน้ำ	26
	3. การหาความทนทานต่อการกดอัด	27
	4. การหาค่าการนำความร้อน	27
	3.3.2.2 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบโฟมแก้ว	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

1. การหาความหนาแน่น	27
2. การหาลักษณะการดูดซึมของน้ำ	27
3. การหาความทนทานต่อการกดอัด	27
4. การหาค่าการนำความร้อน	27
3.3.2.3 การศึกษาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม	27
1. การหาความหนาแน่น	27
2. การหาลักษณะการดูดซึมของน้ำ	27
3. การหาความทนทานต่อการกดอัด	27
4. การหาค่าการนำความร้อน	27
3.3.2.4 การศึกษาอัตราการเผาที่เหมาะสมของโฟมแก้ว	27
1. การหาความหนาแน่น	27
2. การหาลักษณะการดูดซึมของน้ำ	27
3. การหาความทนทานต่อการกดอัด	27
4. การหาค่าการนำความร้อน	27
3.3.2.5 การศึกษาเวลาในการเผาแห้งไฟที่เหมาะสม	28
1. การหาความหนาแน่น	28
2. การหาลักษณะการดูดซึมของน้ำ	28
3. การหาความทนทานต่อการกดอัด	28
4. การหาค่าการนำความร้อน	28
3.3.3 การปรับขนาดและการปรับปรุงโฟมแก้ว	28
3.3.3.1 การศึกษาอุณหภูมิเผาที่เหมาะสมหลังปรับขนาด	28
1. การหาความหนาแน่น	28
2. การหาลักษณะการดูดซึมของน้ำ	28
3. การหาความทนทานต่อการกดอัด	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. การหาค่าการนำความร้อน	28
3.3.3.2 การศึกษาปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสม	28
1. สัณฐานวิทยาของโฟมแก้ว	28
2. การหาความหนาแน่น	28
3. การหาร้อยละการดูดซึมน้ำ	28
4. การหาความทนทานต่อการกดอัด	28
5. การหาค่าการนำความร้อน	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง	29
4.1 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดโฟมแก้ว	29
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของผงกระจกและผงตะกรัน	29
1. ผลการหาความหนาแน่น	29
2. ผลการหาขนาดอนุภาค	29
3. ผลการหาองค์ประกอบทางเคมี	30
4. ผลการหาองค์ประกอบทางแร่	30
5. ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน	30
4.1.2 ผลการศึกษ้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผงกระจกและผงตะกรันต่อน้ำที่ใช้ในการเตรียมสลิป	32
1. ผลการหาความหนาแน่น	40
2. ผลการหาร้อยละการดูดซึมน้ำ	41
3. ผลการหาความทนทานต่อการกดอัด	42
4. ผลการหาค่าการนำความร้อน	43
4.1.3 ผลการศึกษารูปร่างที่เหมาะสมในการอบโฟมแก้ว	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.4 ผลการศึกษาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม	45
1. ผลการหาความหนาแน่น	59
2. ผลการหาร้อยละการดูดซึมของน้ำ	50
3. ผลการหาความทนทานต่อการกดอัด	51
4. ผลการหาค่าการนำความร้อน	52
4.1.5 ผลการศึกษาอัตราการเผาที่เหมาะสม	52
1. ผลการหาความหนาแน่น	55
2. ผลการหาร้อยละการดูดซึมของน้ำ	56
3. ผลการหาความทนทานต่อการกดอัด	57
4. ผลการหาค่าการนำความร้อน	58
4.1.6 ผลการศึกษาเวลาในการเผาเชื้อไฟที่เหมาะสม	59
1. ผลการหาความหนาแน่น	63
2. ผลการหาร้อยละการดูดซึมของน้ำ	64
3. ผลการหาความทนทานต่อการกดอัด	65
4. ผลการหาค่าการนำความร้อน	66
4.2 ผลการปรับขนาดและปรับปรุงโฟมแก้ว	67
4.2.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิเผาที่เหมาะสมหลังปรับขนาด	69
1. ผลการหาความหนาแน่น	70
2. ผลการหาร้อยละการดูดซึมของน้ำ	70
3. ผลการหาความทนทานต่อการกดอัด	71
4. ผลการหาค่าการนำความร้อน	71
4.2.2 ผลการศึกษาปริมาณโซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสม	72
1. การหาความหนาแน่น	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2. การหาร้อยละการดูดซึมของน้ำ	73
3. การหาความทนทานต่อการกดอัด	74
4. การหาค่าการนำความร้อน	74
4.3 ตัวอย่างบอร์ดโฟมแก้วฉนวนความร้อน	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	76
บรรณานุกรม	78
รายการสิ่งพิมพ์เผยแพร่	81
ภาคผนวก	87
ประวัติผู้เขียน	94

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดและสมบัติของโพลิเมอร์ทั่วไป	15
ตารางที่ 3.1 ปริมาณผงกระจก และผงตะกั่วที่ใช้ในการเตรียมสลิป เมื่อปริมาณผงตะกั่วแตกต่างกัน	25
ตารางที่ 3.2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมสลิป	25
ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของผงกระจก และผงตะกั่ว	29
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคผงกระจก และผงตะกั่ว	29
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงกระจกและผงตะกั่ว โดยเทคนิค XRF	30

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1	แผนผังกระบวนการแปรรูปกระจกและการเกิดเศษกระจก
ภาพที่ 1.2	ลักษณะเศษกระจกที่ได้หลังจากการแปรรูป
ภาพที่ 1.3	กระบวนการหลอมเหล็ก
ภาพที่ 1.4	ลักษณะตะกรันที่ได้จากการหลอมเหล็ก
ภาพที่ 2.1	ลักษณะของโฟมโลหะอะลูมิเนียม
ภาพที่ 2.2	แผนผังการเกิดโฟมแก้วด้วยกระบวนการแบบแห้ง
ภาพที่ 2.3	ลักษณะการเกิดโฟมแก้วด้วยวิธีการแบบเปียก
ภาพที่ 2.4	แผนผังการเกิดโฟมแก้วด้วยกระบวนการแบบเปียก
ภาพที่ 4.1	องค์ประกอบทางแร่ของผงตะกรันหลอมเหล็ก D : Diopside ($\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$), A : Anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) และ H : Hematite (Fe_2O_3)
ภาพที่ 4.2	การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีเนื่องด้วยความร้อนของผงตะกรัน
ภาพที่ 4.3	ตัวอย่างหลังอบที่อัตราส่วนของน้ำ 1:0.67 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ภาพที่ 4.4	ตัวอย่างหลังอบที่อัตราส่วนของน้ำ 1:0.59 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ภาพที่ 4.5	ตัวอย่างหลังอบที่อัตราส่วนของน้ำ 1:0.5 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ภาพที่ 4.6	ชิ้นงานหลังอบที่แต่ละอัตราส่วนของของแข็งต่อน้ำ เมื่อให้ปริมาณผงตะกรันคงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
ภาพที่ 4.7	ภาพชิ้นงานหลังเผาด้วยอุณหภูมิ 800 °C ที่อัตราส่วนผงกระจกและผงตะกรันต่อน้ำ 1:0.67 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 50 เท่า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ภาพที่ 4.8	ภาพชิ้นงานหลังเผาด้วยอุณหภูมิ 800 °C ที่อัตราส่วนผงกระจกและผงตะกรันต่อน้ำ 1:0.59 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 50 เท่า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ภาพที่ 4.9	ภาพชิ้นงานหลังเผาด้วยอุณหภูมิ 800 °C ที่อัตราส่วนผงกระจกและผงตะกรันต่อน้ำ 1:0.5 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 50 เท่า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.10 ภาพชิ้นงานแต่ละอัตราส่วนของของแข็งต่อน้ำ เมื่อให้ปริมาณผงตะกรันคงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่า	39
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อัตราส่วนผงกระจกและผงตะกรันต่อน้ำ 1:0.67, 1:0.59 และ 1:0.5	40
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อัตราส่วนผงกระจกและผงตะกรันต่อน้ำ 1:0.67, 1:0.59 และ 1:0.5	41
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและความทนทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานหลังเผาที่อัตราส่วนผงกระจกและผงตะกรันต่อน้ำ 1:0.67, 1:0.59 และ 1:0.5	42
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและการนำความร้อนของชิ้นงานหลังเผาที่อัตราส่วนผงกระจกและผงตะกรันต่อน้ำ 1:0.67, 1:0.59 และ 1:0.5	43
ภาพที่ 4.15 ชิ้นงานหลังอบที่อุณหภูมิต่างๆ	44
ภาพที่ 4.16 ภาพชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	45
ภาพที่ 4.17 ภาพชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่า(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	46
ภาพที่ 4.18 ภาพชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 50 เท่า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	47
ภาพที่ 4.19 ภาพชิ้นงานหลังเผาแต่ละอุณหภูมิที่ปริมาณผงตะกรันร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 50 เท่า	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส	49
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส	50
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและความทนทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส	51
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและการนำความร้อนของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส	52
ภาพที่ 4.24 ภาพชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเผา 3 (ซ้ายมือ) และ 5 (ขวามือ) องศาเซลเซียสต่อนาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 50 เท่า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	53
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อัตราการเผา 3 และ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที	55
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อัตราการเผา 3 และ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที	56
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและความทนทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานหลังเผาที่อัตราการเผา 3 และ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที	57
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและการนำความร้อนของชิ้นงานหลังเผาที่อัตราการเผา 3 และ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที	58
ภาพที่ 4.29 ภาพชิ้นงานที่ไม่เต็มตะกรัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 50 เท่า	59
ภาพที่ 4.30 ภาพชิ้นงานที่เต็ม 10% ตะกรัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 50 เท่า	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.31 ภาพชิ้นงานที่เดิม 15%ตะกรัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 50 เท่า	61
ภาพที่ 4.32 ภาพชิ้นงานที่เดิม 20%ตะกรัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 50 เท่า	62
ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยไม่แช่ไฟ และแช่ไฟ 10, 20 และ 30 นาที	63
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยไม่แช่ไฟ และแช่ไฟ 10, 20 และ 30 นาที	64
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและความทนทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยไม่แช่ไฟ และแช่ไฟ 10, 20 และ 30 นาที	65
ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของผงตะกรันและการนำความร้อนของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยไม่แช่ไฟ และแช่ไฟ 10, 20 และ 30 นาที	66
ภาพที่ 4.37 ขั้นตอนการปั้นตีฟองสบู่	67
ภาพที่ 4.38 ขั้นตอนการปั้นผสมผงกระจกและผงตะกรัน	67
ภาพที่ 4.39 ขั้นตอนการเทสลีปโฟมแก้วลงแบบพิมพ์	68
ภาพที่ 4.40 ลักษณะของสลีปโฟมแก้วที่ได้จากการปั้นผสมผงกระจกและผงตะกรัน	68
ภาพที่ 4.41 ลักษณะโฟมแก้วที่เตรียมได้	68
ภาพที่ 4.42 การติดตั้งบอร์ดโฟมแก้วฉนวนความร้อน	69
ภาพที่ 4.43 ภาพลักษณะรูพรุนของชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (องศาเซลเซียส)	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Na_2SiO_3 และความหนาแน่นโฟมแก้วที่เผาที่อุณหภูมิ 700 และ 725 °C	70
ภาพที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Na_2SiO_3 และร้อยละการดูดซึมน้ำของโฟมแก้วที่เผาที่อุณหภูมิ 700 และ 725 °C	70
ภาพที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Na_2SiO_3 และค่าความทนต่อแรงกดอัดของโฟมแก้ว ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 และ 725 °C	71
ภาพที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Na_2SiO_3 และค่าการนำความร้อนของโฟมแก้วที่เผาที่อุณหภูมิ 700 และ 725 °C	71
ภาพที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Na_2SiO_3 และความหนาแน่นของโฟมแก้ว	73
ภาพที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Na_2SiO_3 และร้อยละการดูดซึมน้ำของโฟมแก้ว	73
ภาพที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Na_2SiO_3 และค่าความทนต่อการกดอัดของโฟมแก้ว	74
ภาพที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Na_2SiO_3 และค่าการนำความร้อนของโฟมแก้ว	74
ภาพที่ 4.52 ลักษณะของบอร์ดโฟมแก้วที่เตรียมได้จากกระบวนการแบบเปียก	75

รายการอักษรย่อ

CMC	Carboxy Methyl Cellulose คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
CTE	Coefficient of Thermal Expansion สัมประสิทธิ์การขยายตัวเพราะความร้อน
XRD	X-ray Diffraction การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางแร่
XRF	X-ray Fluorescence การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมี
DTA/TGA	Differential Thermal Analysis/Thermogravimetric Analysis การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีเนื่องด้วยความร้อน
g/cm^3	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
kg/m^3	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
MPa	เมกะพาสกาล
$\text{W/m}\cdot\text{K}$	วัตต์ต่อเมตร•เคลวิน
K	เคลวิน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายการสัญลักษณ์

α	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเพราะความร้อน
#	เมช
k	ค่าการนำความร้อน
ρ	ความหนาแน่นรวม



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved