



## โครงการ

# การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ** การเตรียมเซรามิกคอร์เดียไรต์พอร์นโดยใช้แมกนีเซียมออกซิซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน  
(Preparation of Porous Cordierite Ceramics Using Magnesium Oxysulfate Cement as a Binder)

**ชื่อนิสิต** นายธนภุต สุขนวกุล เลขประจำตัว 6033235323  
นางสาวนฤมล ปะวะซัง เลขประจำตัว 6033241023

**ภาควิชา** วัสดุศาสตร์  
**ปีการศึกษา** 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

การเตรียมเซรามิกคอร์เดียไรต์พอร์นโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

1. นายธนกฤต สุขนวกุล เลขประจำตัว 6033235323
2. นางสาวนฤมล ปะวะขัง เลขประจำตัว 6033241023

อนุมัติโดย



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2563

<b>หัวข้องานวิจัย</b>	การเตรียมเซรามิกคอร์เดียไรต์พูนโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน
<b>โดย</b>	นายธนภุต สุขนวกุล นางสาวนฤมล ปะวะซัง
<b>สาขาวิชา</b>	เซรามิกและวัสดุศาสตร์
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์
<b>ปีการศึกษา</b>	2563

---

### บทคัดย่อ

คอร์เดียไรต์พูนเป็นวัสดุเซรามิกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปให้มีรูพรุนสูง โดยมีคอร์เดียไรต์เป็นตัวเนื้อของวัสดุ มีความทนไฟ สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมคอร์เดียไรต์พูนด้วยกระบวนการ Direct foaming โดยการนำสารก่อโฟมผสมเข้ากับน้ำสลิบโดยตรง แล้วอาศัยตัวเชื่อมประสานได้แก่ แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ เพื่อให้ชิ้นงานแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์จะสลายตัวและทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ ในการทดลองนี้ศึกษาผลของปริมาณร้อยละของแข็งของน้ำสลิบที่มีค่าเท่ากับ 66.67, 64.00, 61.54 และ 59.26 และมีการใส่และไม่ใส่สารก่อโฟมต่อความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมได้ จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงเมื่อเตรียมจากน้ำสลิบที่มีร้อยละปริมาณของแข็งลดลง ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิบที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64.00 มีความหนาแน่นที่ต่ำที่สุด และชิ้นงานมีสภาพสมบูรณ์จึงได้นำร้อยละปริมาณของแข็งนี้ไปทำการทดลองต่อ โดยทำการปรับปริมาณอัตราส่วนสารก่อโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:450, 1:225, 1:150 และ 1:112.5 พบว่า ความหนาแน่นของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการใช้อัตราส่วนสารก่อโฟมต่อน้ำไม่เหมาะสม ทำให้เกิดปริมาณฟองโฟมน้อยเกินไป จึงทำการปรับกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิบเท่ากับ 67.91, 66.72, 65.57 และ 65.01 และใช้อัตราส่วนของสารก่อโฟมต่อน้ำคงที่เท่ากับ 1:20 ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงอย่างเห็นได้ชัด และได้ชิ้นงานที่มีลักษณะสมบูรณ์ที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุดเท่ากับ  $1.04 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งเตรียมจากน้ำสลิบที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.72

<b>Title</b>	Preparation of Porous Cordierite Ceramics Using Magnesium Oxysulfate Cement as a Binder
<b>Authors</b>	Mr. Thanakrit Suknavakun Miss Naruemon Pavakang
<b>Department</b>	Materials Science
<b>Advisor</b>	Assistant Professor Dr. Karn Serivalsatit
<b>Academic Year</b>	2020

---

### Abstract

Porous cordierite is a high porosity ceramic material made with cordierite as the body. It can be used at high temperatures and has high thermal shock resistance. The purpose of this research was to study the direct foaming process for preparing porous cordierite ceramics by directly mixing a foaming agent with slip and using magnesium oxysulfate cement as a binder to allow a specimen to harden at room temperature. When fired at high temperatures, magnesium oxysulfate cement decomposed and reacted with alumina and silica in the mixture to form the cordierite phase. This work investigated the effect of solid loading percentage of slip with values of 66.67, 64.00, 61.54 and 59.26 with and without the foaming agent on the density of the prepared specimens. It was found that the density of the specimen decreased when prepared from the slip with a decrease in the percentage of solid content. The specimens prepared with the solid content percentage of 64.00 had the lowest density and the specimens were in perfect shape. As a result, this percentage of solid content was then used for further experiment by varying the foam-to-water ratios of 1:450, 1:225, 1:150, and 1:112.5. It was found that the density of the specimen slightly changed. This could be due to improper use of the foaming agent-to-water ratio, resulting in insufficient foam. Therefore, the fabrication process was modified to use a percentage of solid content of slip equal to 67.91, 66.72, 65.57 and 65.01 and a constant foaming agent-to-water ratio of 1:20. This resulted in a significant decrease in the density of the specimen. The specimen with the lowest density of  $1.04 \text{ g/cm}^3$  was prepared from the slip with a solid content of 66.72 percent.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจาก ผู้วิจัยได้รับกำลังใจและความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณทุกท่านดังต่อไปนี้

- 1) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ที่ให้คำปรึกษาและคอยแนะนำในสิ่งที่เกี่ยวข้องกับผู้วิจัย
- 2) คณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย
- 3) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยสนับสนุนเงินทุนในงานวิจัย
- 4) ทำนี่ยังขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นที่ไม่ได้เอ่ยนาม เช่น พี่นิตติปริญญาโทที่ให้การช่วยเหลือในด้านการใช้เครื่องมือการทดลอง รวมถึงกลุ่มคนที่คอยดูแลให้กำลังใจในการทำงานจนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ธนภุต สุขนวกุล

นฤมล ปะวะซัง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตดำเนินโครงการงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 คอर्डเตียไรต์.....	3
2.2 เซรามิกพอร์น.....	4
2.3 การเตรียมคอर्डเตียไรต์พอร์น.....	6
2.3.1 การเตรียมคอर्डเตียไรต์พอร์นด้วยวิธีการเทอร์โมโฟมมิ่ง (Thermo-foaming).....	6
2.3.2 การเตรียมคอर्डเตียไรต์พอร์นด้วยวิธีการใช้ฟองน้ำโพลียูรีเทนเป็นเทมเพลต (Polyurethane sponge as porous template).....	7
2.3.3 การเตรียมคอर्डเตียไรต์พอร์นด้วยวิธีการสร้างฟองและการหล่อเจลโดยตรง (Direct foaming and gel casting method).....	8
2.4 ตัวเชื่อมประสาน.....	9

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ (Magnesium Oxysulfate Cements).....	10
2.5.1 องค์ประกอบเฟส (Phase composition).....	10
2.5.2 การใช้แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ในปัจจุบัน.....	12
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>13</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	13
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	13
3.2.1 การเตรียมคอร์เดี่ยวไรต์พูนโดยใช้แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตเป็นตัวเชื่อมประสาน.....	13
3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติชิ้นงาน.....	16
3.2.2.1 ทดสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	16
3.2.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส.....	17
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>18</b>
4.1 ลักษณะทางการภาพของชิ้นงานหลังอบ.....	18
4.1.1 ผลของร้อยละปริมาณของแข็งต่อลักษณะทางการภาพของชิ้นงานที่ไม่เติมสารก่อโฟม.....	18
4.1.2 ผลของร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปต่อลักษณะทางการภาพของชิ้นงานที่เติมสารก่อโฟม 20 มิลลิลิตร.....	20
4.1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำต่อลักษณะทางการภาพของชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64.....	22
4.1.4 ผลของร้อยละปริมาณของแข็งต่อลักษณะทางการภาพของชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:20.....	24
4.2 สมบัติของชิ้นงานคอร์เดี่ยวไรต์หลังเผา.....	26
4.2.1 สมบัติของชิ้นงานคอร์เดี่ยวไรต์ที่เตรียมจากร้อยละปริมาณของแข็ง 66.67 และ 64 โดยเติมสารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร.....	26
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเทคนิค X-ray diffraction(XRD).....	27

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>29</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	29
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	30
<b>เอกสารอ้างอิง</b> .....	<b>31</b>
<b>ภาคผนวก</b> .....	<b>33</b>
ภาคผนวก ก ขนาด, น้ำหนัก และความหนาแน่นของชิ้นงานที่ไม่เติมสารก่อโฟม.....	33
ภาคผนวก ข ขนาด, น้ำหนัก และความหนาแน่นของชิ้นงานที่เติมสารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร .....	35
ภาคผนวก ค ขนาด, น้ำหนัก และความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีปริมาณของแข็งเท่ากับ ที่ร้อยละ 64.....	36
ภาคผนวก ง ขนาด, น้ำหนัก และความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมต่อน้ำ เท่ากับ 1:20.....	38



## สารบัญตาราง

### หน้า

ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบเฟสของแมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์.....	11
ตารางที่ 3.1	ปริมาณส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานคอร์เดียไรต์พูน.....	13
ตารางที่ 3.2	ส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละปริมาณของแข็ง.....	14
ตารางที่ 3.3	ส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารก่อโฟมต่อน้ำ.....	15
ตารางที่ 3.4	ส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละปริมาณของแข็ง.....	16
ตารางที่ 4.1	ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ไม่ใส่สารก่อโฟมที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆ .....	19
ตารางที่ 4.2	ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆและใส่สารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร.....	21
ตารางที่ 4.3	ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64 โดยมีอัตราส่วน ระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำต่างๆ.....	23
ตารางที่ 4.4	แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:20 ณ ร้อยละปริมาณของแข็ง 67.91, 66.72, 65.57 และ 65.01.....	25

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คอเรียไรต์.....	3
รูปที่ 2.2 เซรามิกพูน.....	4
รูปที่ 2.3 ภาพถ่าย SEM รูปพูนแบบเปิดในอะลูมินาเซรามิก.....	5
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเตรียมคอเรียไรต์พูนด้วยวิธีการเทอร์โมโพรมมิ่ง.....	6
รูปที่ 2.5 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการยีนอุณหภูมิ.....	7
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพูนด้วยวิธีการสร้างฟองและการหล่อเจลโดยตรง.....	8
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพูนด้วยวิธีการสร้างฟองและการหล่อเจลโดยตรงที่ขึ้นรูปโดยการหล่อ ลงในแม่แบบปูนปลาสเตอร์.....	9
รูปที่ 2.8 สมดุลเฟสในระบบ MgO–MgSO <sub>4</sub> –H <sub>2</sub> O.....	11
รูปที่ 3.1 เครื่อง X-Ray diffractometer.....	17
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ไม่เติมสารก่อโฟมที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆ.....	19
รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆที่ไม่ใส่สารก่อโฟม 20	
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆและใส่สารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร.....	21
รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆ ที่ใส่สารก่อโฟม เจือจาง 20 มิลลิลิตร.....	22
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายคอเรียไรต์ที่ร้อยละปริมาณของแข็ง 64.....	23
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64 โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำต่างๆ.....	24
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายคอเรียไรต์ที่อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำ 1:20.....	25
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำ เท่ากับ 1:20 โดยน้ำสลิปมีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆ.....	26
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆและใส่สารก่อโฟม เจือจาง 20 มิลลิลิตร.....	27
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบเฟสของชิ้นงานหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค XRD.....	28

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เซรามิกพอร์ซเลนเป็นวัสดุที่มีการใช้งานอุตสาหกรรมหลากหลาย โดยการใช้งานของเซรามิกพอร์ซเลนนั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของรูพอร์ซเลน 2 ประเภทได้แก่ รูพอร์ซเลนเปิด และ รูพอร์ซเลนปิด เซรามิกพอร์ซเลนที่มีรูพอร์ซเลนปิดจะใช้งานทางด้านวัสดุทนไฟ, ฉนวนความร้อน, แผ่นรองเผาเซรามิกและวัสดุที่มีโครงสร้างน้ำหนักเบา ส่วนเซรามิกที่มีรูพอร์ซเลนเปิดจะใช้เป็นตัวกรองโลหะที่หลอมเหลว เป็นตัวกรองลมที่มีความร้อน หรือเป็นฐานรองคะตะลิสต์ (catalyst supports) ในการเลือกใช้งานเซรามิกพอร์ซเลนนั้นไม่ได้พิจารณาเพียงประเภทรูพอร์ซเลนที่เป็นปัจจัยเท่านั้น แต่ยังรวมถึงประเภทของวัสดุที่นำมาใช้ทำตัวเซรามิกพอร์ซเลนอีกด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า คอร์ดีไรต์ (Cordierite,  $2\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ) เป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติเด่นหลายด้านเช่น มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (thermal shock resistance) ได้ดี, มีจุดหลอมเหลวสูง และมีความหนาแน่นและการนำไฟฟ้าต่ำ เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิสูง

คอร์ดีไรต์เป็นแร่ที่พบได้ยากในธรรมชาติ เนื่องจากคอร์ดีไรต์มีช่วงอุณหภูมิในการเกิดที่แคบมาก ดังนั้นคอร์ดีไรต์ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันจึงได้จากการสังเคราะห์โดยใช้วัตถุดิบที่มีแมกนีเซียม ( $\text{MgO}$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบแล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดเฟสคอร์ดีไรต์

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการเตรียมคอร์ดีไรต์พอร์ซเลนสามารถเตรียมได้หลายวิธีเช่น การนำฟองน้ำมาชุบด้วยน้ำสลิบของวัตถุดิบส่วนผสมคอร์ดีไรต์แล้วนำไปเผาไหม้ฟองน้ำออกไป<sup>[11]</sup>, ใส่เม็ดแป้งเข้าไปในส่วนผสมซึ่งเมื่อนำเข้าเผา แป้งจะสลายตัวเกิดเป็นรูพอร์ซเลน และการใช้น้ำตาลซูโครสเพื่อให้น้ำตาลเดือดขณะเผาเกิดเป็นฟองขึ้น<sup>[10]</sup> เป็นต้น

การเตรียมคอร์ดีไรต์พอร์ซเลนโดยการเตรียมส่วนผสมเป็นน้ำสลิบแล้วเติมสารก่อโฟมร่วมกับการเติมตัวเชื่อมประสานที่ทำให้เกิดการแข็งตัวของส่วนผสมเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกพอร์ซเลน อย่างไรก็ตามตัวเชื่อมประสานที่นิยมใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งแคลเซียมออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ลดจุดหลอมเหลวในระบบที่มี อะลูมินา และซิลิกาเป็นองค์ประกอบ รวมถึงอาจเกิดเฟสอะนอไท์ (Anorthite,  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงกว่าคอร์ดีไรต์ ทำให้ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันลดลง

แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ และสามารถเกิดการแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงแมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์จะสลายตัวเหลือเพียงแมกนีเซียมเพียงเฟสเดียว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการเตรียมคอร์ดีไรต์พอร์ซเลนโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อให้เกิดการแข็งตัวที่

อุณหภูมิห้อง และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์จะสลายตัวเหลือเพียงแมกนีเซียมเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมเกิดเป็นเฟสคอร์เตียไรต์ได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์โดยใช้อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 21:1 นั้นเป็นอัตราส่วนที่สามารถเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ที่มีความแข็งแรงมากที่สุด<sup>[2]</sup> ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้อัตราส่วนนี้ในการเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เพื่อใช้เป็นตัวเชื่อมประสาน และทำการเติมแคลไซต์อะลูมินาและทรายบดเพื่อให้ส่วนผสมมีองค์ประกอบทางเคมีเท่ากับองค์ประกอบทางเคมีของคอร์เตียไรต์ และเติมสารก่อโฟมเพื่อให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาร้อยละปริมาณของแข็งและปริมาณสารก่อโฟมต่อการเตรียมเซรามิกคอร์เตียไรต์พรุนโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาร้อยละปริมาณของแข็งและปริมาณสารก่อโฟมต่อการเตรียมเซรามิกคอร์เตียไรต์พรุนโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

## 1.3 ขอบเขตดำเนินโครงการงานวิจัย

ศึกษาผลของร้อยละปริมาณของแข็งและปริมาณสารก่อโฟมต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้คอร์เตียไรต์พรุนที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คอร์ดเียวไรต์

คอร์ดเียวไรต์ สูตรทางเคมีคือ  $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$  ประกอบไปด้วย MgO 13.7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  34.9%  $\text{SiO}_2$  51.4% เป็นชื่อของนักธรณีวิทยาชาวฝรั่งเศส Pierre Louis. A. Cordier (ผู้ค้นพบแร่ชนิดนี้) มีความแข็งอยู่ที่ประมาณ 7 ตามค่า Mole scale ความถ่วงจำเพาะ 2.6 – 2.66 ระบบโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Orthorhombic ความเงางามเหมือนแก้ว และค้นพบได้หลากหลายสี เช่น เทา, ฟ้ำ, เขียว, เหลืองน้ำตาล เป็นต้น<sup>[3-5]</sup>



รูปที่ 2.1 คอร์ดเียวไรต์<sup>[5]</sup>

คอร์ดเียวไรต์ในธรรมชาติปกติมักจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงภายในของหิน Pelitic แต่ก็ไม่สามารถพบได้บ่อยๆ เพราะแร่คอร์ดเียวไรต์เป็นแร่ที่หายากมาก เนื่องจากอุณหภูมิในการเกิดคอร์ดเียวไรต์นั้นแคบมาก ดังนั้นคอร์ดเียวไรต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นจะถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากวัตถุดิบต่างๆ เช่น ดินดำ, ดินขาว, กร็อก (Grog), โมโลไคต์ (Molochite), ทัลคัม (Talcum), แมกนีไซต์ (Magnesite) เป็นต้น จึงทำให้ส่วนมากผงคอร์ดเียวไรต์ที่นำมาใช้ในการทำงานด้านอุตสาหกรรมจึงจะเป็นผงคอร์ดเียวไรต์สังเคราะห์ทั้งสิ้น ไม่ได้มาจากแหล่งธรรมชาติหรือเหมืองแร่โดยตรง

คุณสมบัติที่สำคัญของคอร์ดเียวไรต์คือมีความแข็งแรงและมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (COE) ต่ำมาก มีค่าประมาณ  $1.5-2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  จึงเหมาะอย่างยิ่งในการใช้เป็นวัสดุสำหรับความทนไฟ และการรองรับวัตถุที่มีน้ำหนักมาก ตัวอย่างเช่น แผ่นรองเผาสำหรับเซรามิก เนื่องจากต้องมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการเผาและรับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีความหนักจำนวนมาก โดยคอร์ดเียวไรต์จะมีจุดหลอมตัวที่  $1460 \text{ } ^\circ\text{C}$  ความถ่วงจำเพาะ 2.6 g/cc

## 2.2 เซรามิกพอร์ซัน

เซรามิกพอร์ซัน คือ วัสดุที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาจากวัตถุดิบประเภทเซรามิก โดยการทำให้มีปริมาณรูพรุนสูง ส่งผลให้ชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมได้มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเซรามิกพอร์ซันมีสมบัติเด่นหลายด้าน เช่น สามารถออกแบบโครงสร้างรูพรุนสามมิติได้หลากหลายรูปแบบ มีความเสถียรทางเคมีที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนทานต่อการขัดถู ความแข็งแรงเชิงกลสูง และมีการนำความร้อนต่ำเป็นต้น จากสมบัติของเซรามิกพอร์ซันที่กล่าวมาส่งผลให้เซรามิกพอร์ซันนั้นสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ในการกรองของเหลวหรือก๊าซ ใช้เป็นตัวกลางดูดซับ ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ และการใช้งานอื่นๆทางด้านอุตสาหกรรมเป็นต้น<sup>[6-7]</sup>

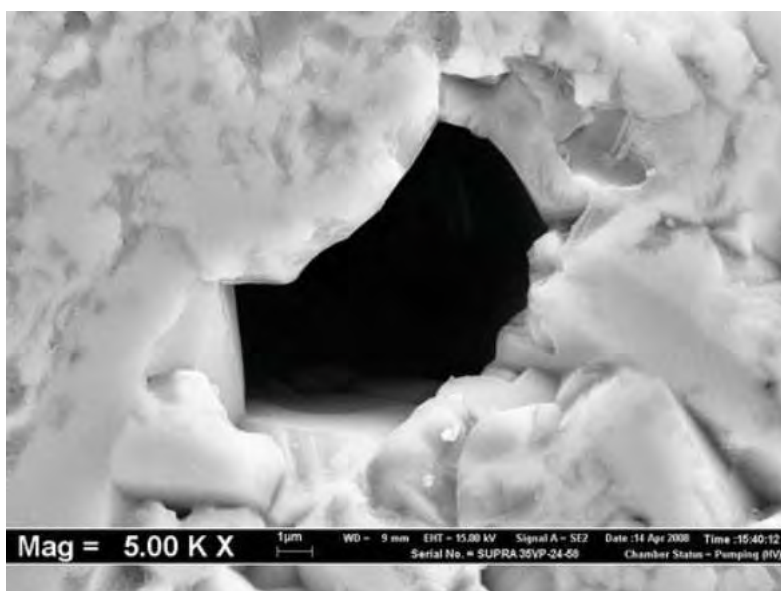


รูปที่ 2.2 เซรามิกพอร์ซัน<sup>[1]</sup>

การพัฒนาเซรามิกพอร์ซันเพื่อใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีความสำคัญมาก เนื่องจากมีการนำเซรามิกพอร์ซันไปใช้งานอย่างหลากหลาย การพัฒนากระบวนการการขึ้นรูปเซรามิกพอร์ซันเพื่อให้มีรูปร่างและคุณสมบัติตามความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานจึงมีความสำคัญอย่างมาก เช่น การปรับให้เซรามิกพอร์ซันนั้นมีอัตราการซึมผ่านของของเหลวและแก๊สสูง, ขนาดของรูพรุนและการกระจายขนาดอนุภาคที่พอดีเพื่อความดันในการกรองสารที่เหมาะสม เป็นต้น

ตัวอย่างการนำเซรามิกพอร์ซันไปใช้งานจริง เช่น ตัวกรองสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากโครงสร้างที่มีรูพรุนเหล่านี้สามารถใช้ในการกรองก๊าซแรงดันสูงที่อุณหภูมิสูงได้ ใช้เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการกรองปิโตรเลียม ใช้ในการแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำมันดิบ และเป็นฉนวนความร้อนในตัวกรองเพื่อแยกสิ่งสกปรกออกจากโลหะหลอมเหลว เช่น เหล็กและอลูมิเนียม เป็นต้น รวมทั้งในด้านการแพทย์ก็นำเซรามิกพอร์ซันไปใช้ประโยชน์ด้วยเช่นกัน เช่น วัสดุเคลือบเซรามิกฟอสเฟตที่มีรูพรุนสามารถนำมาใช้เพื่อจำลองโครงสร้างกระดูกและการเข้าถึงการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อ osseous บนวัสดุเคลือบเซรามิกฟอสเฟตพอร์ซัน อีกทั้งไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีรูพรุนสามารถนำมาใช้ทดแทนกระดูกและเป็นระบบนำส่งยาได้อีกด้วย<sup>[6]</sup>

เซรามิกพอร์ซันจัดเป็นเซรามิกที่มีรูพรุนในระดับสูงระหว่าง 20% ถึง 95% ของความหนาแน่นทั้งหมด สามารถแบ่งประเภทของรูพรุนตามลักษณะของรูพรุนได้ 2 ประเภทได้แก่ รูพรุนเปิด และรูพรุนปิด ในกรณีที่ เป็นรูพรุนเปิดจะสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีกได้แก่ รูพรุนแบบเปิดปลายปิดและรูพรุนเปิดปลายเปิด โดยที่รูพรุนแต่ละประเภทยานั้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติของเซรามิกพอร์ซันต่างกัน เช่น รูพรุนเปิดจะให้ความสามารถในการ ถ่ายเทได้ดีกว่ารูพรุนปิด เป็นต้น ซึ่งผลรวมของรูพรุนเปิดและปิดจะเรียกว่า ความพรุนสุทธิ (Total porosity) การกระจายขนาดรูพรุนเปิดสามารถทดสอบได้โดยเทคนิค Mercury intrusion porosimetry<sup>[8]</sup> ส่วนการกระจายขนาดรูพรุนปิดไม่สามารถระบุได้โดยใช้เทคนิคนี้ แต่อาจตรวจสอบได้จากภาพถ่ายของชิ้นงานตัดขวาง หรือ วัดในรูปแบบของความพรุนสุทธิที่รวมทั้งรูพรุนเปิดและรูพรุนปิดแล้วนำมาลบกับผลของความพรุนตัวแบบเปิด<sup>[7]</sup>



รูปที่ 2.3 ภาพถ่าย SEM รูพรุนแบบเปิดในอะลูมินาเซรามิก<sup>[7]</sup>

นอกจากเซรามิกพอร์ซันสามารถจำแนกตามลักษณะของรูพรุนแล้ว ยังสามารถจำแนกตามขนาดของรูพรุนได้อีกด้วย โดยแบ่งออกเป็น microporous คือรูพรุนที่มีความยาวรัศมีน้อยกว่า 2 นาโนเมตร mesoporous คือรูพรุนที่มีความยาวรัศมีระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร และ macroporous คือรูพรุนที่มีความยาวรัศมีมากกว่า 50 นาโนเมตร โดยขนาดของรูพรุนนั้นวัดได้จากวิธี Image analysis<sup>[7,9]</sup> ซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การใช้กล้องจุลทรรศน์จะทำให้ได้ภาพรูปร่างลักษณะ ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุน แล้วนำมาวิเคราะห์ในเชิงปริมาณต่อด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องเป็นภาพที่เห็นและแยกความแตกต่างของข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์ได้อย่างชัดเจนเพื่อช่วยในการแปรข้อมูลในการคำนวณของโปรแกรม

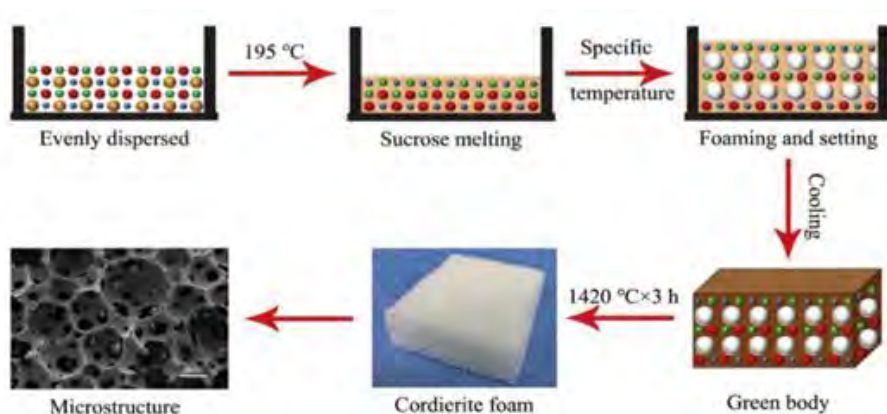
## 2.3 การเตรียมคอร์เดียไรต์พอร์น

ในปัจจุบันมีวิธีการเตรียมคอร์เดียไรต์พอร์นอยู่มากมายหลายวิธี ซึ่งในแต่ละวิธีจะได้คอร์เดียไรต์พอร์นที่มีลักษณะความพอร์นตัวแตกต่างกันและมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันซึ่งสามารถเลือกเตรียมคอร์เดียไรต์พอร์นด้วยวิธีการต่างๆตามความเหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานตรงตามลักษณะที่ต้องการ

### 2.3.1 การเตรียมคอร์เดียไรต์พอร์นด้วยวิธีการเทอร์โมโฟมมิ่ง (Thermo-foaming)<sup>[10]</sup>

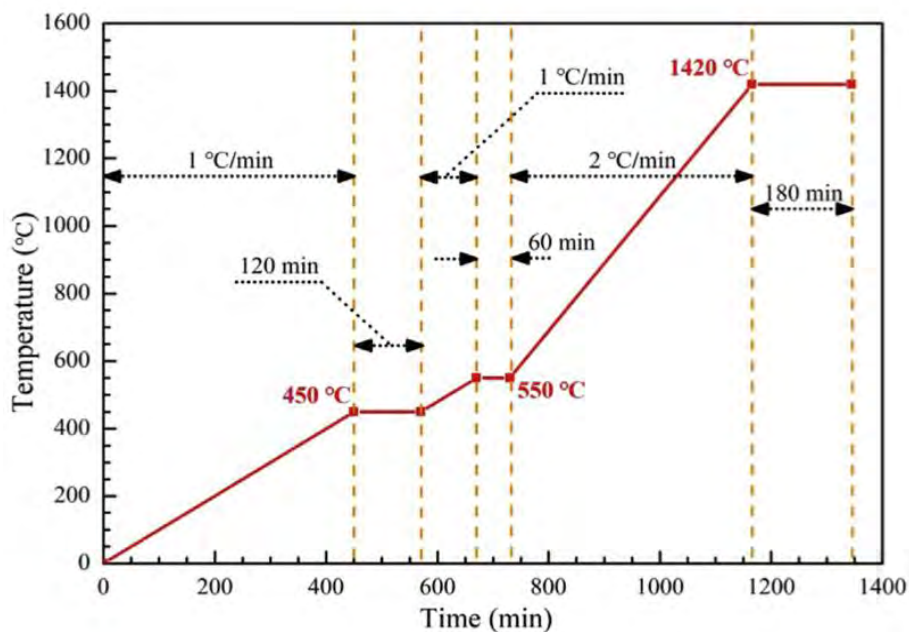
เป็นวิธีการเตรียมคอร์เดียไรต์พอร์นหรือคอร์เดียไรต์โฟมด้วยการใช้ซูโครสเป็นตัวสร้างรูพอร์นโดยอาศัยอนุภาคของซูโครสเข้าไปแทรกกระจายอยู่ระหว่างอนุภาคของคอร์เดียไรต์แล้วให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สามารถทำให้ซูโครสหลอมเหลวได้ตั้งนั้นเราจะได้ชิ้นงานที่แข็งตัวพร้อมกับรูพอร์นที่เกิดขึ้น

แผนภาพการทดลองการเตรียมคอร์เดียไรต์พอร์นด้วยวิธีการเทอร์โมโฟมมิ่ง (Thermo-foaming) แสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนผสมของคอร์เดียไรต์กับซูโครสถูกทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยการหมุนขวดโพลียูรีเทนที่บรรจุลูกบด  $ZrO_2$  หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแม่แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและให้ความร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส หลังจากซูโครสหลอมเหลวหมด ปลอ่ยให้ชิ้นงานเซ็ตตัวในเตาอบที่อุณหภูมิเฉพาะในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากเซ็ตตัวแล้วนำชิ้นงานดิบออกจากแม่แบบหลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทำการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1420 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการยีนอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 2.4 และเพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกควรปลอ่ยชิ้นงานทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อลดอัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์และฉนวนความร้อนไว้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้แน่ใจว่าสารอินทรีย์ถูกเผาไหม้จนหมดและไม่ส่งผลต่อการสังเคราะห์คอร์เดียไรต์



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเตรียมคอร์เดียไรต์พอร์นด้วยวิธีการเทอร์โมโฟมมิ่ง<sup>[10]</sup>





รูปที่ 2.5 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการเย็นอุณหภูมิ<sup>[10]</sup>

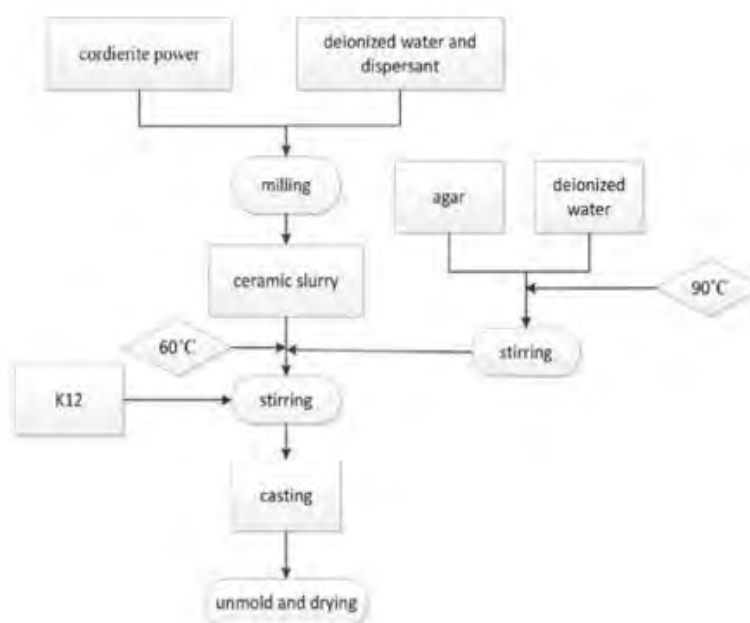
### 2.3.2 การเตรียมคอร์เดียไรต์ฟรอนด้วยวิธีการใช้ฟองน้ำโพลียูรีเทนเป็นเทมเพลต (Polyurethane sponge as porous template) <sup>[11]</sup>

ฟองน้ำโพลียูรีเทนมีขนาดเซลล์ประมาณ 20 ppi (pores per inch) ถูกใช้เป็นเทมเพลตที่มีรูพรุนและต้องทำการวิเคราะห์หาพฤติกรรมทางความร้อนของฟองน้ำโพลียูรีเทนโดยใช้ DTA และ TGA ดำเนินการที่ heating rate 10 °C/min เพื่อใช้หาอุณหภูมิในการสลายตัวของฟองน้ำโพลียูรีเทน

การเตรียมคอร์เดียไรต์ฟรอนด้วยวิธีการใช้ฟองน้ำโพลียูรีเทนที่มีขนาดเซลล์ประมาณ 20 ppi (pores per inch) เป็นเทมเพลต โดยการขึ้นส่วนฟองน้ำโพลียูรีเทนแช่ลงในสารแขวนลอยคอร์เดียไรต์จากนั้นนำขึ้นส่วนฟองน้ำที่ผ่านการแช่แล้วส่งผ่านไปยัง rotating rollers เพื่อกำจัดสารแขวนลอยส่วนเกินออกซึ่งช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งที่ตั้งไว้คือ 20% ของความหนาของฟองน้ำ ปล่อยฟองน้ำที่ถูกเคลือบแล้วให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเผาซินเทอร์ขึ้นงานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิ 1 °C/min เพื่อเผาไหม้ฟองน้ำตามผลของการวิเคราะห์ DTA-TGA ของฟองน้ำโพลียูรีเทน ต่อจากนั้นนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดเฟสคอร์เดียไรต์ได้อย่างสมบูรณ์

### 2.3.3 การเตรียมคอร์เตียไรต์พูนด้วยวิธีการสร้างฟองและการหล่อเจลโดยตรง (Direct foaming and gel casting method) <sup>[12]</sup>

การเตรียมคอร์เตียไรต์พูนด้วยวิธีการสร้างฟองและการหล่อเจลโดยตรงสามารถทำได้โดย เตรียมน้ำสลิกคอร์เตียไรต์ที่มีปริมาณของแข็ง 40 wt.% และใช้กัมอราบิกเป็นสารช่วยในการกระจายตัวใส่ บดด้วยเครื่องบดบอลมิล (ball mill) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หมุนด้วยความเร็ว 180 rpm จากนั้นนำน้ำสลิกที่ได้ใส่ลงในบีกเกอร์และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสด้วยอ่างน้ำร้อนในขณะเดียวกันให้นำผงวุ้นอะการ์ 0.5wt.% ไปละลายในน้ำอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำน้ำสลิก, ผงวุ้นที่ละลายแล้ว และโดดีซิลโซเดียมซัลเฟตหรือ K12 ซึ่งเป็นสารสร้างฟอง ไปปั่นผสมเข้าด้วยกันด้วยความเร็ว 1500 rpm เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ น้ำสลิกเกิดฟอง หลังจากนั้นนำน้ำสลิกที่ได้ใส่ลงในแม่แบบซิลิโคนแล้วปล่อยให้แข็งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนนำออกจากแม่แบบ ซึ่งการแข็งตัวเกิดจากการแข็งตัวของผงวุ้นอะการ์ที่ใส่ลงไป ปล่อยให้ชิ้นงานดิบแห้งที่อุณหภูมิห้องอีก 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นงานดิบไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อชิ้นงานดิบแห้งแล้วนำไปทำการเผาซินเทอร์ริงที่อุณหภูมิระหว่าง 1200 และ 1300 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง แผนภาพการเตรียมชิ้นงานพูนดิบแสดงในรูปที่ 2.5

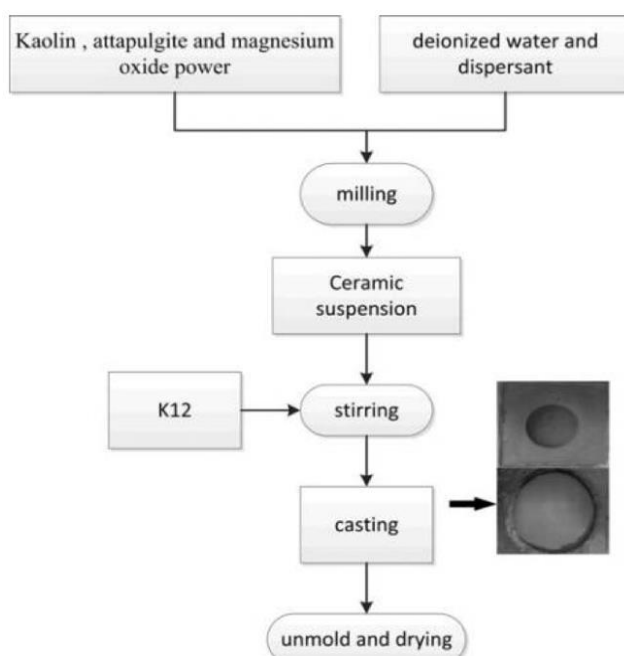


รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพูนดิบด้วยวิธีการสร้างฟองและการหล่อเจลโดยตรง<sup>[12]</sup>

นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมคอร์เตียไรต์พูนได้จากน้ำสลิกข้างต้นที่ไม่มีการเติมผงวุ้นอะการ์อีกด้วย <sup>[12]</sup> ซึ่งสามารถทำให้น้ำสลิกก่อตัวเป็นชิ้นงานได้โดยการหล่อลงในแม่แบบปูนปลาสเตอร์ การเตรียมคอร์เตียไรต์ด้วยวิธีนี้อาจทำให้ชิ้นงานแห้งไม่เท่ากันทั่วทั้งชิ้นงานหรือแห้งตรงขอบชิ้นงานแต่ตรงกลางของ

ชิ้นงานไม่แห้งและอาจเกิดการหดตัวของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอได้ดังนั้นวิธีนี้จึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีความหนาไม่มากจนเกินไป

โดยวิธีการนี้จะทำได้โดยเตรียมน้ำสลิบที่ปั่นผสมระหว่างผงคอร์เดียไรต์, กัมอราบิก และโดดีซิลโซเดียมซัลเฟต เป็นเวลา 3 นาทีจนเกิดฟองขึ้นแล้ว นำน้ำสลิบที่ได้หล่อลงในแม่แบบปูนพลาสติกและปล่อยให้แห้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมงก่อนนำชิ้นงานออกจากแม่แบบ การหดตัวที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานแห้งจะช่วยให้การนำชิ้นงานออกจากแม่แบบเป็นไปได้ง่ายขึ้น เมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่แบบแล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องอีกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทำกาเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพุนดิบสรุปดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานพุนดิบด้วยวิธีการสร้างฟองและการหล่อเจลโดยตรงที่ขึ้นรูปโดยการหล่อลงในแม่แบบปูนพลาสติก<sup>[13]</sup>

## 2.4 ตัวเชื่อมประสาน

ตัวเชื่อมประสาน (Binder) ในทางวัสดุทนไฟนั้นคือ สารที่ช่วยยึดส่วนผสมต่างๆของชิ้นงานเข้าด้วยกัน ทำให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวสามารถแกะออกจากแม่แบบได้ โดยทั่วไปแคลเซียมอลูมิเนตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทนวัสดุทนไฟเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ CaO จะทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ลดจุดหลอมเหลวในระบบที่มีอะลูมินาและซิลิกาเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ CaO

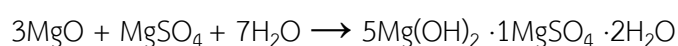
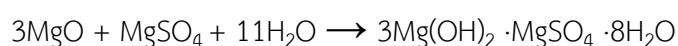
จะไปทำปฏิกิริยากับบอรัลไมนาและซิลิกาทำให้เกิดเฟสอะนอไทต์เกิดขึ้น ซึ่งเฟสอะนอไทต์จะทำให้ชิ้นงานมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง ทำให้ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจใช้ตัวเชื่อมประสานเป็นแมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์แทนเพราะ MgO ภายในตัวซีเมนต์นั้น สามารถทำปฏิกิริยากับบอรัลไมนาและซิลิกาเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ขึ้น ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่า<sup>[15]</sup>

## 2.5 แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ (Magnesium Oxysulfate Cements)

แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์เป็นซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต และสามารถเกิดการแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์จะสลายตัวเหลือเพียงแมกนีเซียมเพียงเฟสเดียว

### 2.5.1 องค์ประกอบเฟส (Phase composition)<sup>[15]</sup>

แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ (Magnesium oxysulfate (MOS) cement) มีลักษณะและสูตรเคมีคล้ายกับกับแมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ (Magnesium oxychloride (MOC) cement) ต่างกันที่แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์จะใช้แมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) แทนที่แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) และมีระบบการตั้งชื่อเฟสที่เหมือนคือ  $xMg(OH)_2 \cdot yMgSO_4 \cdot zH_2O$  ซึ่งแมกนีเซียมออกซีสัลเฟตสามารถเกิดขึ้นได้หลายเฟสขึ้นกับปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (x) ปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟต (y) และปริมาณน้ำ (z) โดยทั่วไปจะมีรูปแบบการทำปฏิกิริยาดังสมการเคมีดังต่อไปนี้



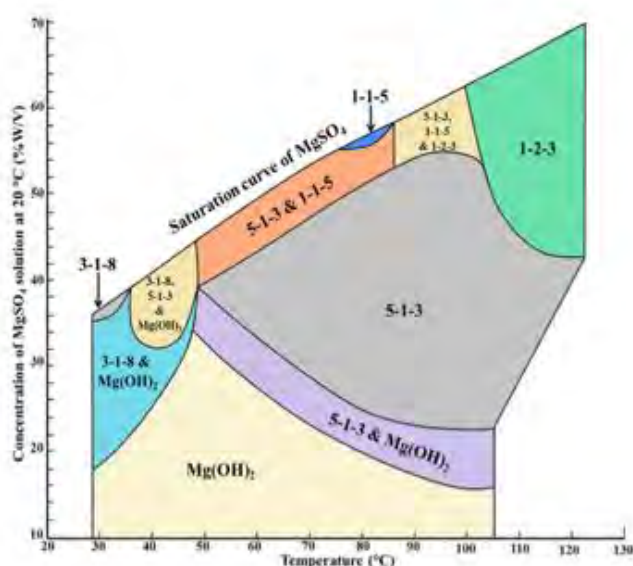
แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะดูความชื้นได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแมกนีเซียมคลอไรด์ และที่เหนือกว่านั้นคือสามารถต้านทานการผุกร่อนได้ดีมากอย่างไรก็ตามแมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์มีการใช้งานที่น้อยมาก ดังนั้นจึงมีงานวิจัยน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ อย่างไรก็ตามแมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์จะเกิดเฟสซีเมนต์ได้ยากกว่าด้วยความสามารถในการละลายที่จำกัดของแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่อุณหภูมิห้อง

ในปี ค.ศ. 1957 Demediuk และ Cole<sup>[15]</sup> ทำการศึกษาระบบของ  $MgO - MgSO_4 - H_2O$  โดยทำการวิเคราะห์การตกตะกอนจากสารละลายอิ่มตัวของแมกนีเซียมซัลเฟตโดยเพิ่มแมกนีเซียมลงไปด้วย ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 120 °C พบว่าเฟสของแมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์สามารถเกิดขึ้นได้ 4 เฟส คือ 3-1-8, 5-1-3, 1-1-5 และ 1-2-3 รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเฟสของแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์<sup>[15]</sup>

phase	composition	most detailed crystallographic characterization
3-1-8	$3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Dinnebier et al. <sup>386</sup>
5-1-3 (or 5-1-2)	$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [or $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ]	Demediuk and Cole <sup>387</sup>
1-1-5	$\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Demediuk and Cole <sup>387</sup>
1-2-3	$\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Demediuk and Cole <sup>387</sup>
5-1-7	$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Runčevski et al. <sup>388</sup>

การเกิดเฟสซีเมนต์เหล่านี้ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิเป็นอย่างมากเช่นเดียวกับความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตในสารละลายเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟส 1-1-5 และ 1-2-3 ซึ่งมีสัดส่วนของแมกนีเซียมซัลเฟตอยู่มาก แต่ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมซัลเฟตจะต่ำซึ่งจะเกิดเฟส 1-3-8 และ 5-1-3. และมีเพียงเฟส 1-3-8 และ 5-1-3 เท่านั้นที่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง เฟสไดอะแกรม แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 สมดุลเฟสในระบบ  $\text{MgO}-\text{MgSO}_4-\text{H}_2\text{O}$ <sup>[15]</sup>

จากงานวิจัยของ Dinnebier et al., Runčevski et al., และ Wu et al.<sup>[15-16]</sup> ได้ทำการศึกษาแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ ด้วยเทคนิคที่ทันสมัยขึ้น Dinnebier et al. ได้ทำการทดลองสมดุลในระบบแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ ซึ่งสรุปได้ว่าเฟส 3-1-8 ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้องโดยมีเฟส 5-1-3 เสถียรที่สุด เมื่อทำการสแกนไมโครอิเล็กทรอนิกส์ของผลึก 5-1-3 และ 3-1-8 แสดงให้เห็นว่าผลึกของเฟส 5-1-3 มีลักษณะเป็นเข็มยาวที่เชื่อมต่อกัน ในขณะที่เฟส 3-1-8 พอร์มตัวเป็นผลึกที่ไม่สม่ำเสมอ ด้วยโครงสร้างคล้ายเข็มที่เชื่อมต่อกันของเฟส 5-1-3 ทำให้เฟส 5-1-3 จึงเป็นที่ต้องการสำหรับการเพิ่มความแข็งแรงในงานอุตสาหกรรม

## 2.5.2 การใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ในปัจจุบัน

การใช้งานและการวิเคราะห์ของแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ใน 50 ปีที่ผ่านมาส่วนใหญ่ถูกจำกัดอยู่ที่การยื่นขอสิทธิบัตรโดยมีสิทธิบัตรมากมายที่อธิบายถึงการใช้ตัวเชื่อมประสาน ออกไซด์ซัลเฟต ในการผลิตแผงหรือแผ่นที่บ่มด้วยไอน้ำ ซึ่งการบ่มด้วยไอน้ำนี้ต้องการทำเพื่อลดความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมซัลเฟต โดยเพิ่มการเกิดของ MgO-rich hydrates และเพื่อเร่งการพัฒนาความแข็งแรงด้วยเช่นกัน งานชิ้นแรกสุดเกิดขึ้นโดย Biefeld ในปี 1955 ซึ่งเขาเป็นผู้จดสิทธิบัตรวิธีการผลิตแผ่นโครงสร้างแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ โดยให้ความร้อนถึง 77 °C เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่แข็งแรง สิทธิบัตรนี้ยังใช้ค่า pH ของแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพื่อสามารถใช้เสริมแรงใยแก้วได้ เช่นเดียวกับในระบบแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์และแรงดันไอน้ำที่อุณหภูมิสูงถึง 121 °C สามารถใช้ในการสร้างเฟส 5-1-3 ได้ด้วยการใช้เวลาบ่มน้อยกว่า 20 นาทีเพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ที่มีศักยภาพได้อย่างรวดเร็ว

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานในการเตรียมคอร์เดียไรต์พูน เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์มีส่วนประกอบของ MgO ซึ่ง MgO สามารถทำปฏิกิริยากับ  $Al_2O_3$  และ  $SiO_2$  ที่เป็นส่วนประกอบหลักของชิ้นงานแล้วเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ได้ทั้งหมด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเฟสอื่น ทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้

1. แมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $MgCO_3$ ) จากบริษัท อิตาเลียน-ไทย เซรามิก วัสดุทนไฟ จำกัด
2. แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) 99.5% จากบริษัทกรุงเทพเคมี จำกัด
3. แคลไซน์อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) P122SB จากบริษัท Alteo จำกัด
4. ซิลิกา ( $SiO_2$ ) หรือ ทรายบด 325# จากบริษัท ฮีโรไซน์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด
5. สารก่อโฟม (Foaming agent) ยี่ห้อ Tripple Trees จากบริษัท ช.จิตรพล จำกัด

#### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

##### 3.2.1 การเตรียมคอร์เดียไรต์พูนโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตเป็นตัวเชื่อมประสาน

1. เตรียมผงแมกนีเซียมโดยนำผงแมกนีเซียมคาร์บอเนตไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. เตรียมส่วนผสมดังตารางที่ 3.1 คิดเป็นปริมาณส่วนของแข็ง 100% โดยคำนวณมาจากการปริมาณของสารที่ต้องใช้เพื่อให้ได้องค์ประกอบทางเคมีเท่ากับคอร์เดียไรต์ตามปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเท่ากับ  $Al_2O_3$  34.9 wt.%  $SiO_2$  51.4 wt.%  $MgO$  13.7 wt.% และมีอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 21:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่สามารถเตรียมแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตให้มีความแข็งแรงสูงได้<sup>[2]</sup> และเพิ่มปริมาณของส่วนผสมเป็น 4 เท่าของน้ำหนักเดิมเพื่อให้ปริมาณของวัตถุดิบพอดีต่อการขึ้นรูปชิ้นงานในแม่แบบอคลิกขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จำนวน 2 ชิ้น

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานคอร์เดียไรต์พูน

Raw material	Weight(g)
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	3.82
Calcined $MgCO_3$	15.15
Calcined $Al_2O_3$	34.81
Mill sand	50.04
<b>Total</b>	<b>103.83</b>

**การทดลองชุดที่ 1** ศึกษาผลของร้อยละปริมาณของแข็งต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน เมื่อมีการเติมและไม่เติมสารก่อโฟม

1. ผสมวัตถุดิบทั้งหมดที่เตรียมได้ เติมน้ำปริมาณ 180 มิลลิลิตร และสารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร จากนั้นใช้เครื่องปั่นสารปั่นวัตถุดิบให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้น้ำสลিপสำหรับการหล่อแบบ (สารก่อโฟมเจือจาง คือ สารก่อโฟมที่นำไปผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:20)
2. นำน้ำสลิปที่ได้หล่อใส่แม่แบบออคิลิคขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จำนวน 2 ชิ้น จากนั้นปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง 48 ชั่วโมง
3. ถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ทดลองศึกษาปริมาณของเหลวภายในชิ้นงานต่อการขึ้นรูป โดยเปลี่ยนปริมาณน้ำเป็น 205, 230, 255 ml ตามลำดับ แต่ปริมาณสารก่อโฟมยังคงเดิม
5. ทำการขึ้นรูปคอร์เดียวไรต์ที่มีการเติมสารก่อโฟมและไม่เติมสารก่อโฟม ในร้อยละปริมาณของแข็งที่เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่มีการเติมสารก่อโฟมและไม่เติมสารก่อโฟม โดยการทำการทดลองซ้ำข้อ 3 แต่ไม่เติมสารก่อโฟมและปรับเปลี่ยนปริมาณของน้ำเป็น 200, 225, 250 และ 275 มิลลิลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละปริมาณของแข็ง

ร้อยละปริมาณของแข็ง (wt%)	ปริมาณของแข็ง (g)	ปริมาณน้ำ (ml)	สารก่อโฟมเจือจาง (ml)
66.67	415.32	200	0
		180	20
64		225	0
		205	20
61.54		250	0
		230	20
59.26		275	0
		255	20



## **การทดลองชุดที่ 2** ศึกษาผลของอัตราส่วนของสารก่อโฟมต่อน้ำต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน

1. ผสมวัตถุดิบทั้งหมดที่เตรียมได้ เติมน้ำปริมาณ 185 มิลลิลิตร และสารก่อโฟมเจือจางปริมาณ 40 มิลลิลิตรเพื่อให้ได้ร้อยละปริมาณของแข็งเท่ากับ 64 คิดเป็นอัตราส่วนสารก่อโฟมต่อน้ำ 1:112.5 จากนั้นใช้เครื่องปั่นสารปั่นวัตถุดิบให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้น้ำสลিপสำหรับการหล่อแบบ
2. นำน้ำสลิปที่ได้หล่อใส่แม่แบบอซิลิคขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จำนวน 2 ชิ้น จากนั้นปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง 48 ชั่วโมง
3. ถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ทดลองศึกษาปริมาณสารก่อโฟมภายในชิ้นงานต่อผลการขึ้นรูปเมื่อปริมาณร้อยละของแข็งของชิ้นงานมีค่า 64.00 คงที่ โดยมีส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารก่อโฟมต่อน้ำ

ร้อยละปริมาณของแข็ง (wt%)	ปริมาณของแข็ง (g)	ปริมาณน้ำ (ml)	สารก่อโฟมเจือจาง (ml)	อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมต่อน้ำ
64	415.32	215	10	1:450
64		205	20	1:225
64		195	30	1:150
64		185	40	1:112.5

## **การทดลองชุดที่ 3** ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงร้อยละปริมาณของแข็งต่อการขึ้นรูปชิ้นงานเมื่ออัตราส่วนสารก่อโฟมต่อน้ำคงที่เท่ากับ 1:20

1. ผสมวัตถุดิบทั้งหมดที่เตรียมได้ เติมน้ำปริมาณ 180 มิลลิลิตร และสารก่อโฟมอัตราส่วน 1:20 คิดเป็นปริมาณ 9 มิลลิลิตร จากนั้นใช้เครื่องปั่นสารปั่นวัตถุดิบให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้น้ำสลิปสำหรับการหล่อแบบ
2. นำน้ำสลิปที่ได้หล่อใส่แม่แบบอซิลิคขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จำนวน 2 ชิ้น จากนั้นปล่อยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง 48 ชั่วโมง
3. ถอดชิ้นงานออกจากแม่แบบแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ทดลองศึกษาปริมาณของเหลวภายในชิ้นงานต่อการขึ้นรูปเมื่ออัตราส่วนสารก่อโฟมคงที่ที่อัตราส่วน 1:20 โดยเปลี่ยนปริมาณน้ำเป็น 190, 200 และ 205 มิลลิลิตร ทำให้ต้องเติมปริมาณสารก่อโฟมเป็น 9, 9.5, 10 และ 10.25 มิลลิลิตรตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละปริมาณของแข็ง

ร้อยละปริมาณของแข็ง (wt%)	ปริมาณของแข็ง (g)	ปริมาณน้ำ (ml)	สารก่อโฟม (ml)	อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมต่อน้ำ
67.91	415.32	180	9	1:20
66.72		190	9.5	1:20
65.57		200	10	1:20
65.01		205	10.25	1:20

### 3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติชิ้นงาน

#### 3.2.2.1 ทดสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

การวัดความหนาแน่นของชิ้นงานทำได้โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปสำเร็จแล้วมาวัดความกว้าง ความยาว และความสูง จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน นำค่าที่ได้มาคำนวณด้วยสูตรคำนวณความหนาแน่น คือ

$$D = \frac{M}{V}$$

เมื่อ D = ความหนาแน่น(g/cm<sup>3</sup>)

M = มวลของชิ้นงาน(g) และ

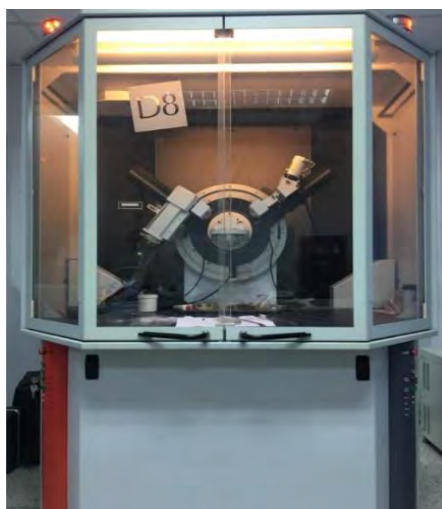
V = ปริมาตรของชิ้นงาน(cm<sup>3</sup>)

ซึ่งปริมาตรของชิ้นงานคือ

ความกว้าง(cm) x ความยาว(cm) x ความสูง(cm)

### 3.2.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส<sup>[17]</sup>

การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer Bruker D8 Advance ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้ความต่างศักย์ที่ 40 KV และกระแสที่ 40 mA ในการกระตุ้นรังสีเอ็กซ์จากโลหะ Cu เพื่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์จากหลอด Cu-  $K\alpha$  ที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ  $1.541 \text{ \AA}$  การวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบเริ่มจากอบชิ้นงานตัวอย่างให้แห้งแล้วบดชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการทดสอบให้เป็นผงละเอียดและนำไปใส่ในเครื่อง XRD ซึ่งจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative Scan) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของคอร์เดียไรต์พูนที่ทำการขึ้นรูปมาได้ มีวิธีการคือ ใช้การเปลี่ยนองศาทีละ  $0.02^\circ$  ใช้เวลา 1 นาทีในการเปลี่ยนมุม  $0.5^\circ$  ช่วง  $2\theta$  เท่ากับ  $5-80^\circ$



รูปที่ 3.1 เครื่อง X-Ray diffractometer<sup>[17]</sup>

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะทางการภาพของชิ้นงานหลังอบ

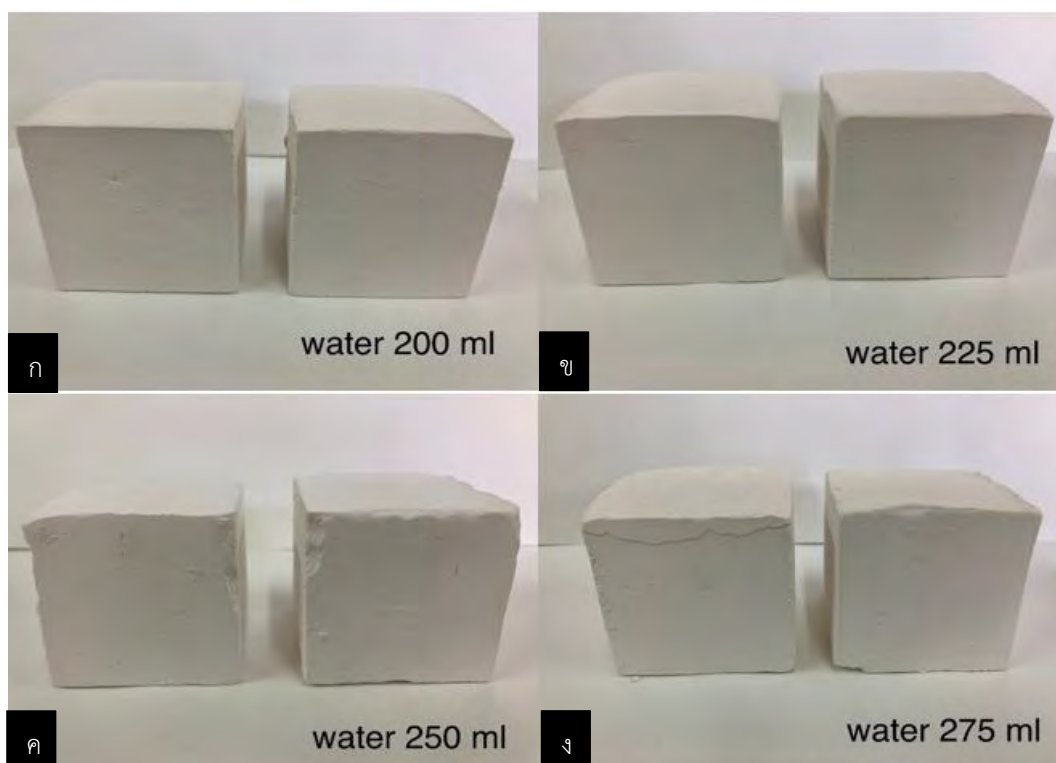
##### 4.1.1 ผลของร้อยละปริมาณของแข็งต่อลักษณะทางการภาพของชิ้นงานที่ไม่เติมสารก่อโฟม

ในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาผลของร้อยละปริมาณของแข็งต่อลักษณะทางการภาพของชิ้นงานที่ไม่เติมสารก่อโฟมเพื่อสังเกตการไหลตัวของน้ำสลิป ลักษณะชิ้นงานและความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอบ โดยนำน้ำสลิปที่เตรียมจากปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67, 64, 61.54 และ 59.26 มาหล่อขึ้นรูปและอบให้แห้ง

จากผลการทดลองพบว่าลักษณะของชิ้นงานที่ไม่เติมสารก่อโฟมหลังอบแสดงดังรูปที่ 4.1 ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67 ดังรูปที่ 4.1(ก) มีลักษณะสมบูรณ์ไม่มีรอยแตกร้าว น้ำสลิปมีการไหลตัวไม่ดี มีความหนืดสูงที่สุด งานที่เตรียมจากน้ำสลิปปริมาณของแข็งร้อยละ 64 ดังรูปที่ 4.1(ข) มีลักษณะสมบูรณ์ไม่มีรอยแตกร้าว น้ำสลิปไหลตัวดีขึ้น มีความหนืดต่ำลง ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปปริมาณของแข็งร้อยละ 61.54 ดังรูปที่ 4.1(ค) เริ่มมีรอยแตกร้าวเล็กน้อยตรงขอบมุม น้ำสลิปมีการไหลตัวดี และ ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปปริมาณของแข็งร้อยละ 59.26 รูปที่ 4.1(ง) มีลักษณะแตกร้าวด้านบนของชิ้นงาน น้ำสลิปมีการไหลตัวดีที่สุดและมีความหนืดต่ำที่สุด

จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่ำ จะเริ่มเกิดการแตกร้าวเนื่องมาจากการใช้ปริมาณน้ำที่มากจะทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวมากหลังอบ และสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณด้านบนชิ้นงาน คือการที่อนุภาคในสารแขวนลอยเริ่มตกตะกอนในขณะที่ปล่อยให้ชิ้นงานแห้ง ทำให้บริเวณด้านบนชิ้นงานมีปริมาณอนุภาคละเอียดสูง เมื่อชิ้นงานเริ่มแห้ง ทำให้การหดตัวบริเวณด้านบนชิ้นงานจะเกิดการหดตัวมากกว่าบริเวณด้านล่างทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณด้านบนชิ้นงานขึ้น

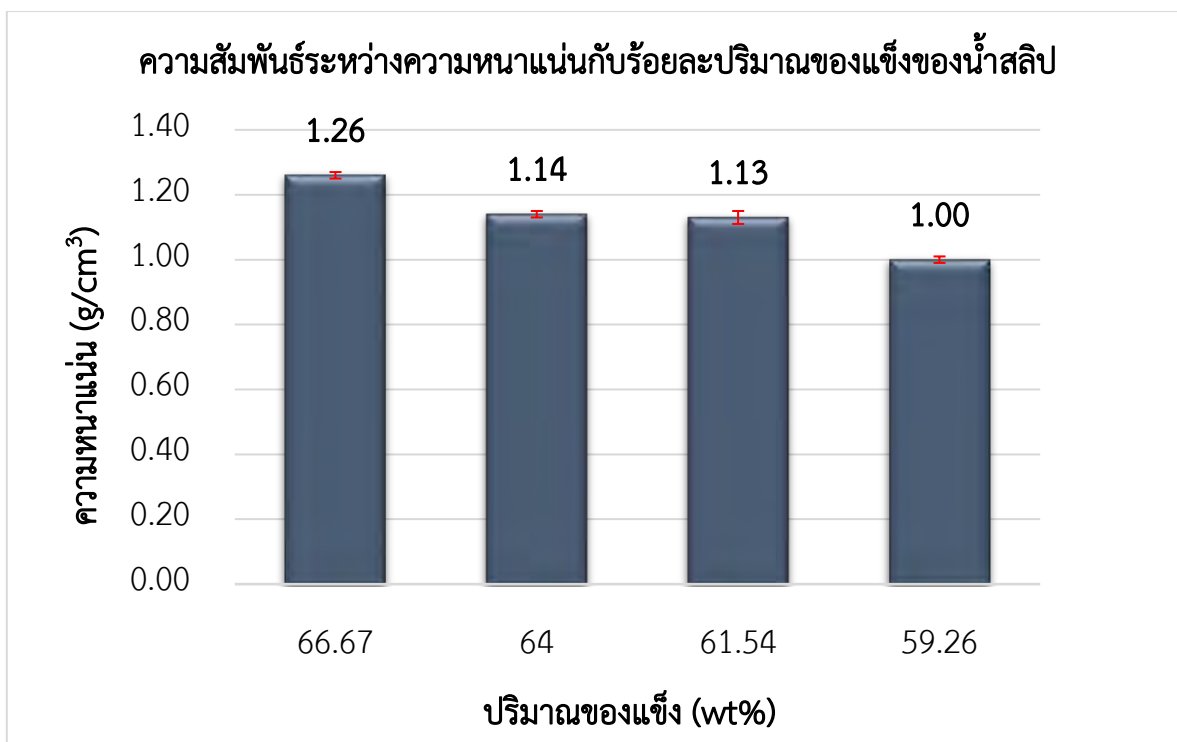
ความหนาแน่นที่ได้จากการเตรียมน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67, 64, 61.54 และ 59.26 แสดงดังตารางที่ 4.1 ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงสุดคือชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67 โดยมีความหนาแน่น  $1.26 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$  และความหนาแน่นของชิ้นงานจะลดลงเป็น  $1.14 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$  และ  $1.13 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$  เมื่อเตรียมชิ้นงานจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64 และ 61.54 ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 59.26 จะมีความหนาแน่นต่ำสุดอยู่ที่  $1.00 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$  ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปแสดงดังรูปที่ 4.2 สังเกตได้ว่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปลดลง



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ไม่เติมสารก่อโฟมที่เตรียมจากน้ำสลিপที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆ (ก) ปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67 (ข) ปริมาณของแข็งร้อยละ 64 (ค) ปริมาณของแข็งร้อยละ 61.54 (ง) ปริมาณของแข็งร้อยละ 59.26

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ไม่ใส่สารก่อโฟมที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆ

ปริมาณของแข็ง (wt%)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
66.67	1.26±0.01
64	1.14±0.01
61.54	1.13±0.02
59.26	1.00±0.01



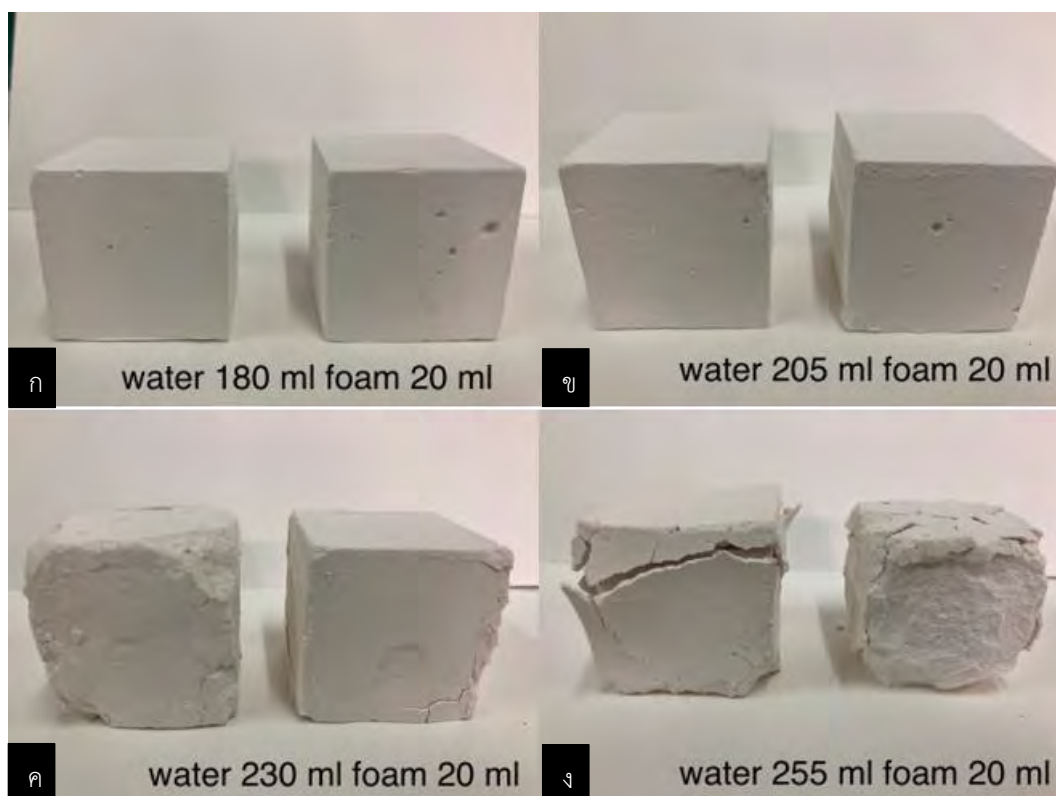
รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆที่ไม่ใส่สารก่อโฟม

#### 4.1.2 ผลของร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่เติมสารก่อโฟม 20 มิลลิลิตร

ทำการศึกษาผลของร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่เติมสารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร เพื่อเลือกร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปที่จะนำไปเตรียมเป็นชิ้นงานคอร์เดียไรต์ฟรูนต่อไป โดยดูจากลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67, 64, 61.54 และ 59.26 และเติมสารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร

จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะชิ้นงานที่เติมสารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก-ง) ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67 และ 64 มีลักษณะสมบูรณ์ไม่มีรอยแตกร้าว มีรูพรุนเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ น้ำสลิปมีการไหลตัวดี ในขณะที่ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 61.54 และ 59.26 มีลักษณะไม่สมบูรณ์ แตกร้าวมากดังรูปที่ 4.3 (ค) และ (ง) เนื่องจากมีการใช้น้ำสลิปร้อยละปริมาณของแข็งต่ำ และยังมีความพรุนตัวเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงลดลงเมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่แบบจึงเกิดการแตกขึ้น และการใช้น้ำในปริมาณมากทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวมากหลังอบจึงเกิดการแตกขึ้นเช่นกัน ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการเตรียมน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67, 64, 61.54 และ 59.26 โดยมีการเติมสารก่อโฟม 20 มิลลิลิตร แสดงดังตารางที่ 4.2 ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67 มีความหนาแน่นสูงสุดคือ  $1.18 \pm 0.00 \text{ g/cm}^3$

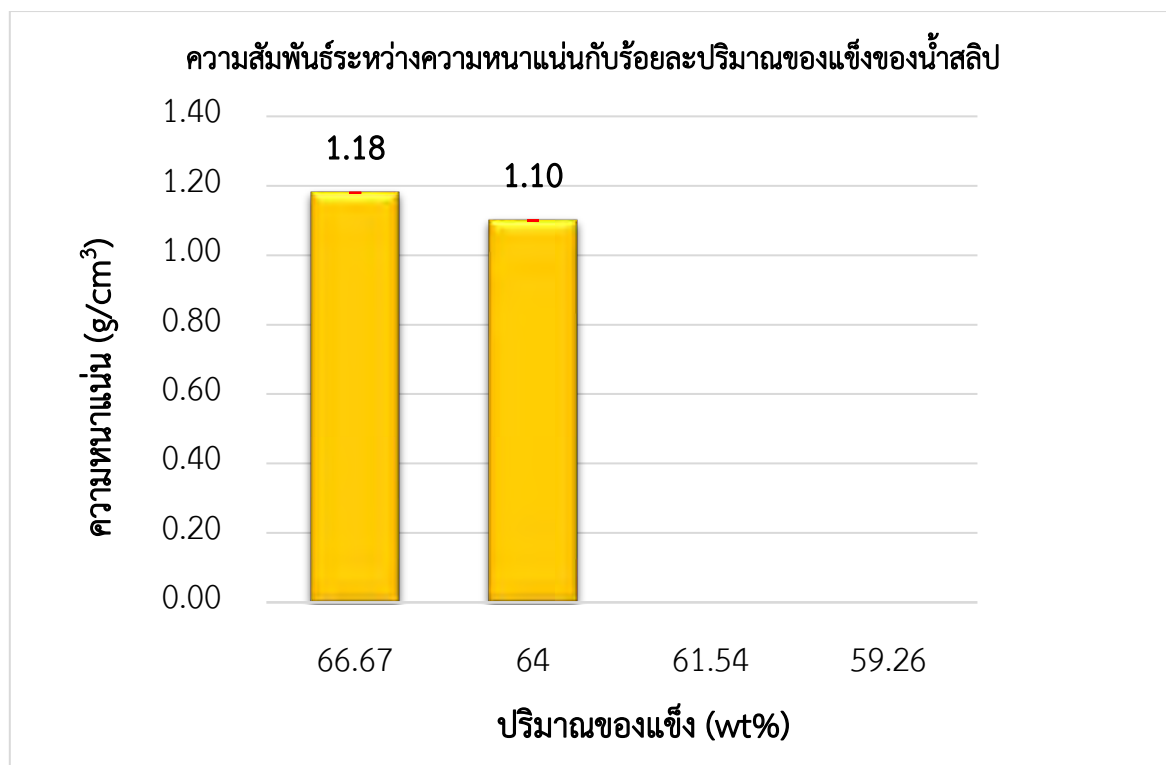
และชิ้นงานจะมีความหนาแน่นลดลงเป็น  $1.10 \pm 0.00 \text{ g/cm}^3$  เมื่อเตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64 ในขณะที่ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 61.54 และ 59.26 ไม่สามารถวัดค่าความหนาแน่นได้เนื่องจากชิ้นงานไม่แข็งแรง มีรอยแตกร้าว สภาพไม่สมบูรณ์ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงานกับร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปที่เติมสารก่อโฟมแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปลดลง และสังเกตได้ว่าที่ร้อยละปริมาณของแข็งเดียวกัน ชิ้นงานที่เตรียมโดยเติมสารก่อโฟมมีความหนาแน่นน้อยกว่าชิ้นงานที่เตรียมโดยไม่เติมสารก่อโฟม



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆและใส่สารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร (ก) ปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67 (ข) ปริมาณของแข็งร้อยละ 64 (ค) ปริมาณของแข็งร้อยละ 61.54 (ง) ปริมาณของแข็งร้อยละ 59.26

ตารางที่ 4.2 ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆและใส่สารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร

ปริมาณของแข็ง (wt%)	ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )
66.67	$1.18 \pm 0.00$
64	$1.10 \pm 0.00$
61.54	N/A
59.26	N/A



รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆ  
ที่ใส่สารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร

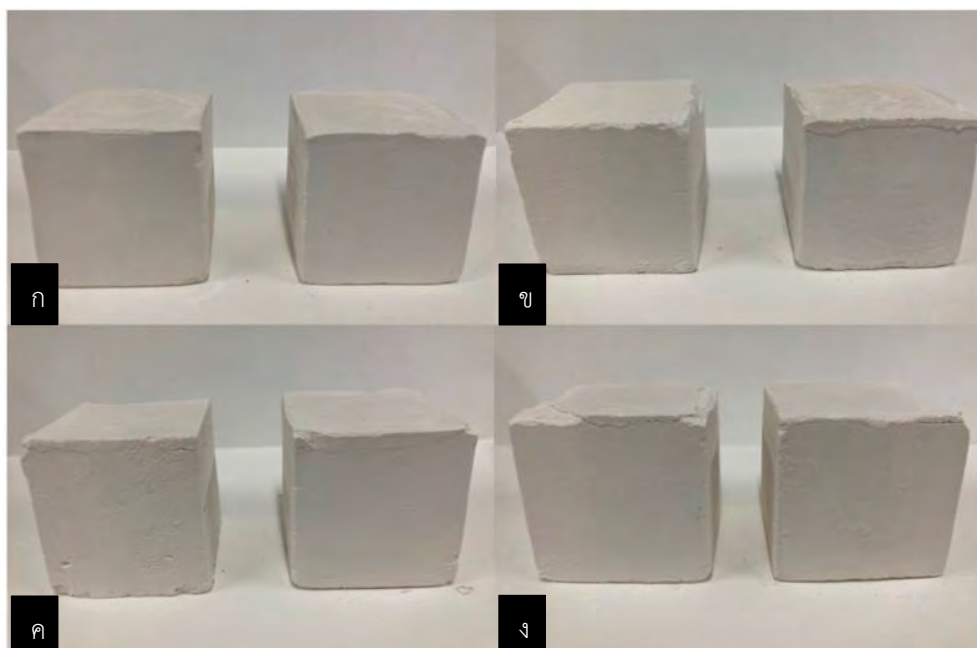
#### 4.1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64

ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64 ซึ่งเป็นปริมาณของแข็งที่ทดสอบจากหัวข้อ 4.1.2 แล้วพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ดีชิ้นงานมีสภาพสมบูรณ์ โดยเติมสารก่อโฟมในอัตราส่วนต่อน้ำ 1:450, 1:225, 1:150 และ 1:112.5

ผลการทดลองพบว่าลักษณะชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64 โดยเติมสารก่อโฟมในอัตราส่วนต่อน้ำต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.5 ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:450 มีสภาพสมบูรณ์ที่สุด ไม่มีรอยแตกร้าว และมีรูพรุนน้อย ดังรูปที่ 4.5 (ก) ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:225, 1:150 และ 1:112.5 มีรูพรุนน้อยมาก และมีรอยแตกร้าวบริเวณด้านบนชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.5 (ข-ง) ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคในน้ำสลิปเริ่มตกตะกอนในขณะที่ปล่อยให้ชิ้นงานแห้ง ทำให้บริเวณด้านบนชิ้นงานมีปริมาณอนุภาคละเอียดมาก เมื่อชิ้นงานเริ่มหดตัวบริเวณด้านบนชิ้นงานจะเกิดการหดตัวมากกว่าบริเวณด้านล่าง ทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณด้านบนชิ้นงานขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟม



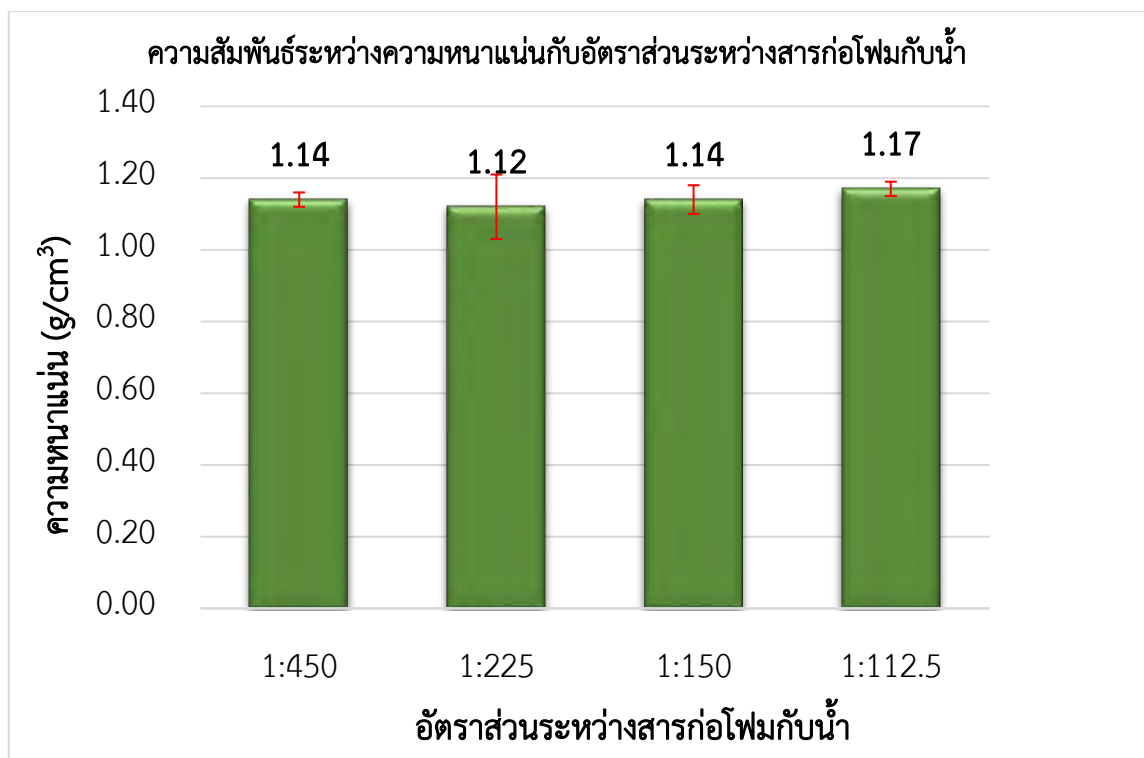
กับน้ำเท่ากับ 1:450, 1:225, 1:150 และ 1:112.5 แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:225 มีความหนาแน่นที่ต่ำที่สุดคือ  $1.12 \pm 0.09 \text{ g/cm}^3$  และชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:112.5 มีความหนาแน่นสูงที่สุดคือ  $1.17 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$  ในขณะที่ชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:450 และ 1:150 มีค่าความหนาแน่นคือ  $1.14 \pm 0.02$  และ  $1.14 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยความหนาแน่นของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเตรียมชิ้นงานโดยเติมน้ำในอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายคอร์เดียไรต์ที่ร้อยละปริมาณของแข็ง 64 (ก) อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำ 1:450 (ข) อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำ 1:225 (ค) อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำ 1:150 (ง) อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำ 1:112.5

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64 โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำต่างๆ

อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำ	ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )
1:450	$1.14 \pm 0.02$
1:225	$1.12 \pm 0.09$
1:150	$1.14 \pm 0.04$
1:112.5	$1.17 \pm 0.02$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลিপที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 64

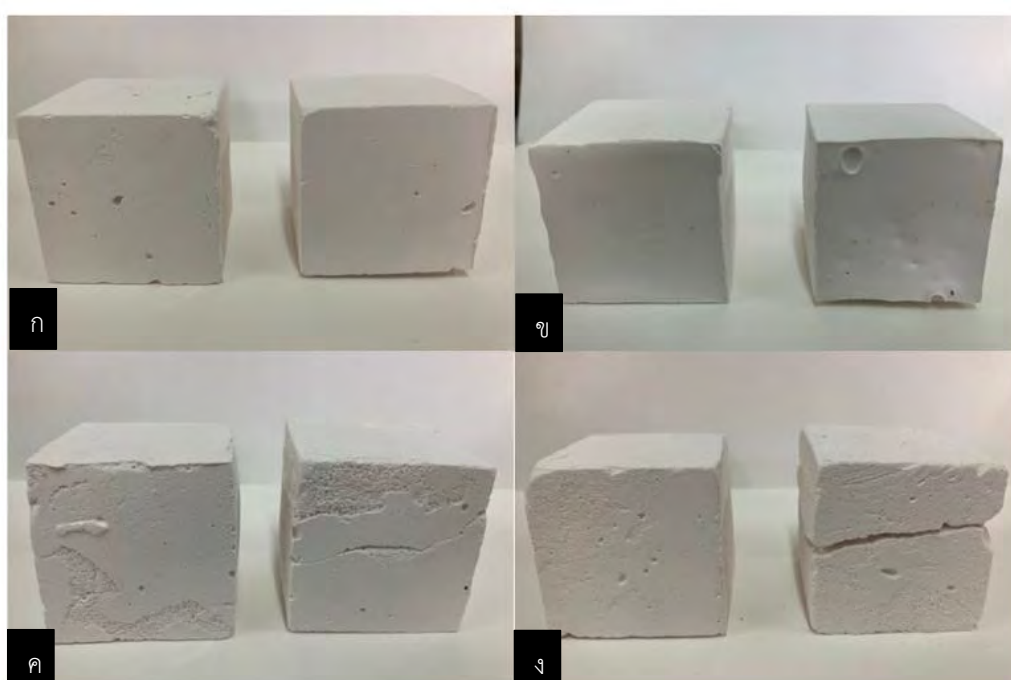
โดยมีอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำต่างๆ

#### 4.1.4 ผลของร้อยละปริมาณของแข็งต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:20

ทำการศึกษาผลของร้อยละปริมาณของแข็งต่อลักษณะทางกายภาพของคอร์เดี่ยวไรต์โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:20 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ผู้ผลิตสารก่อโฟมแนะนำว่าเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้เกิดฟองโฟม โดยเตรียมชิ้นงานจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 67.91, 66.72, 65.57 และ 65.01

จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้น้ำสลิปที่มีอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:20 แสดงดังรูปที่ 4.7(ก-ง) ชิ้นงานที่เตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 67.91 และ 66.72 มีสภาพสมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกร้าว มีรูพรุนจำนวนมาก ดังรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ การไหลตัวของน้ำสลิปมีความหนืดเล็กน้อย ชิ้นงานเตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 65.57 มีสภาพสมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกร้าวมองเห็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ดังรูปที่ 4.7 (ค) และน้ำสลิปมีการไหลตัวดี ชิ้นงานเตรียมด้วยน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 65.01 รูปที่ 4.7(ง) มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก น้ำสลิปมีการไหลตัวดี และการแตกร้าวเกิดขึ้นเนื่องมาจากน้ำสลิปมีร้อยละปริมาณของแข็งต่ำ มีการใช้ปริมาณน้ำที่มากทำให้เกิดการหดตัวหลังอบสูงพร้อมกับการเติมสารก่อโฟมด้วย ทำให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวสูงและมีความแข็งแรงต่ำ ชิ้นงานจึงง่ายต่อการแตก ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการเตรียมน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ

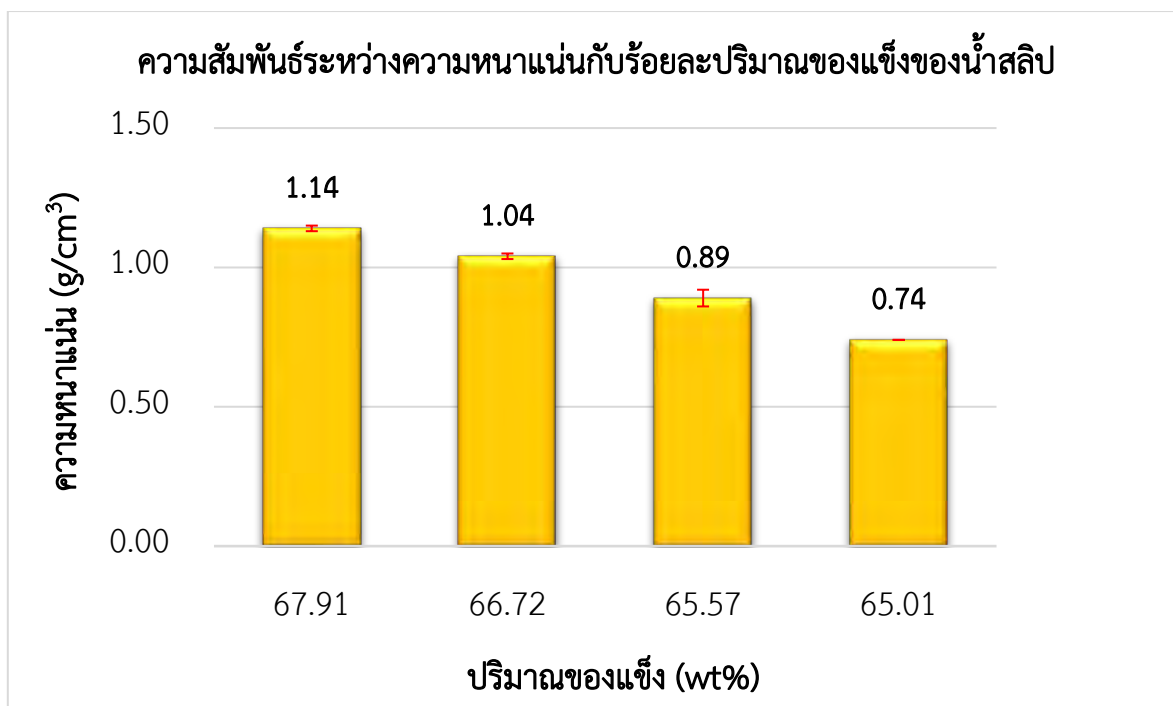
67.91, 66.72, 65.57 และ 65.01 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:20 แสดงดังตารางที่ 4.4 ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงสุดคือชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 67.91 โดยมีความหนาแน่น  $1.14 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$  และความหนาแน่นลดลงเป็น  $1.04 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$  และ  $0.89 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$  เมื่อเตรียมชิ้นงานจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.72 และ 65.57 ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 65.01 มีความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ  $0.74 \pm 0.00 \text{ g/cm}^3$  อย่างไรก็ตามชิ้นงานดังกล่าวมีรอยแตกร้าว ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์ได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงานกับร้อยละปริมาณของแข็งที่ใช้สารก่อโฟมในอัตราส่วน 1:20 แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปลดต่ำลง



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายคอร์เดียไรต์ที่อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำ 1:20 (ก) ร้อยละปริมาณของแข็ง 67.91 (ข) ร้อยละปริมาณของแข็ง 66.72 (ค) ร้อยละปริมาณของแข็ง 65.57 (ง) ร้อยละปริมาณของแข็ง 65.01

ตารางที่ 4.4 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำเท่ากับ 1:20 ณ ร้อยละปริมาณของแข็ง 67.91, 66.72, 65.57 และ 65.01

ปริมาณของแข็ง (%)	ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )
67.91	$1.14 \pm 0.01$
66.72	$1.04 \pm 0.01$
65.57	$0.89 \pm 0.03$
65.01	$0.74 \pm 0.00$



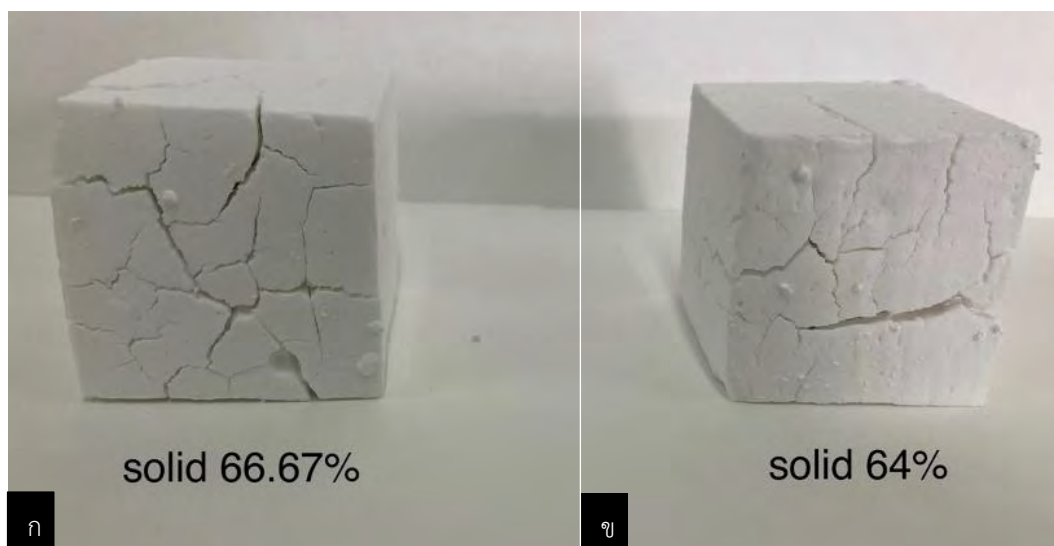
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมกับน้ำ เท่ากับ 1:20 โดยน้ำสลิปมีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆ

## 4.2 สมบัติของชิ้นงานคอร์เตียไรต์หลังเผา

### 4.2.1 สมบัติของชิ้นงานคอร์เตียไรต์ที่เตรียมจากร้อยละปริมาณของแข็ง 66.67 และ 64 โดยเติมสารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร

ทำการเผาชิ้นงานที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67 และ 64 โดยเติมสารก่อโฟม 20 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 1350 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

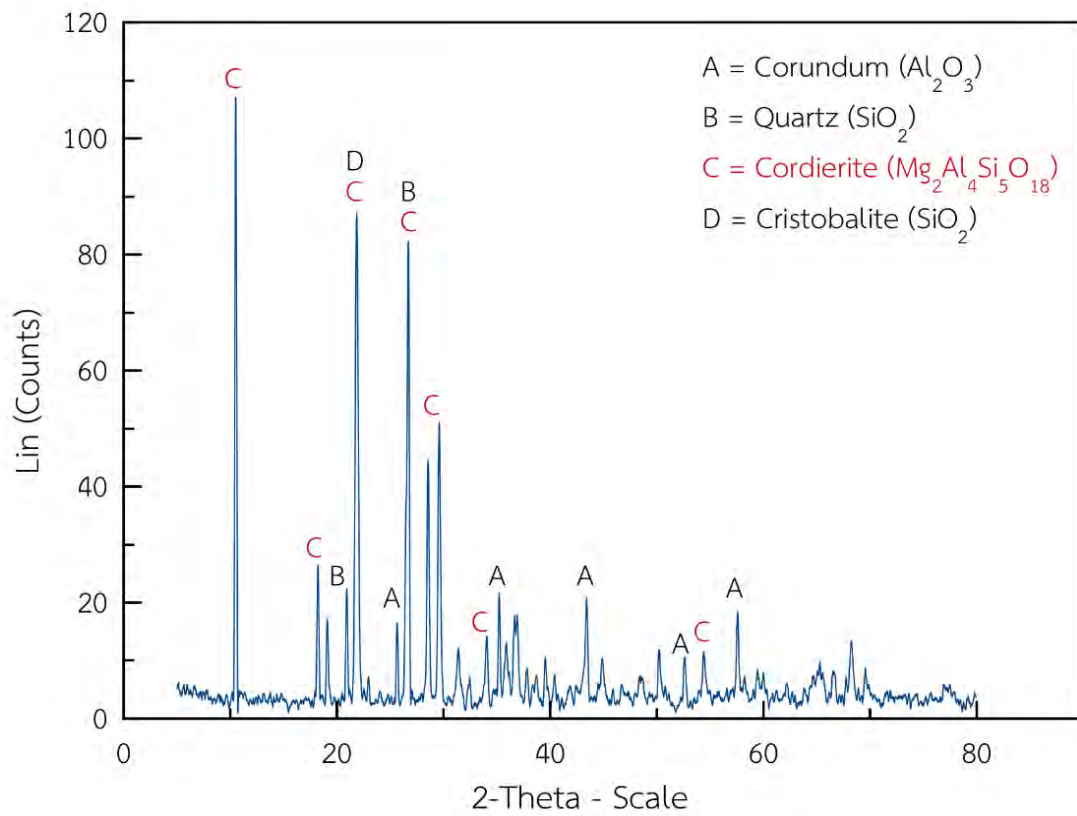
หลังเผาชิ้นงานพบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีสภาพไม่สมบูรณ์มีการแตกร้าวมาก แสดงดังรูปที่ 4.9 ไม่สามารถนำมาทดสอบสมบัติต่างๆได้เนื่องจากชิ้นงานหลังเผายังมีความหนาแน่นสูง อนุภาคมีการอัดตัวกันอย่างหนาแน่น ช่องว่างหรือพอร์มีปริมาณน้อย ส่งผลให้ระหว่างกระบวนการเผานี้ อนุภาคที่มีพื้นผิวสัมผัสมาก จึงเกิดการเผานี้ก ทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานระหว่างเผานี้กสูง ชิ้นงานจึงเกิดการแตกร้าวขึ้นหลังเผา



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีร้อยละปริมาณของแข็งต่างๆและใส่สารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร (ก) ปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67 (ข) ปริมาณของแข็งร้อยละ 64

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยเทคนิค X-ray diffraction(XRD)

เมื่อนำตัวอย่างชิ้นงานที่มีร้อยละปริมาณของแข็งเท่ากับ 66.67 และ 64.00 เติมสารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร ไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค XRD ผลวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์พบว่าชิ้นงานไม่ได้มีเพียงแค่เฟสคอร์เดียไรต์ (Cordierite;  $Mg_2Al_2Si_5O_{18}$ ) เพียงเฟสเดียวแต่มีเฟสคอร์รันดัม (Corundum;  $Al_2O_3$ ), ควอตซ์ (Quartz;  $SiO_2$ ) และคริสโตบาไลต์ (Cristobalite;  $SiO_2$ ) อีกด้วย เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างการเผาไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาชิ้นงานไม่เพียงพอที่จะเกิดคอร์เดียไรต์ได้ทั้งหมด



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบเฟสของชิ้นงานหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค XRD

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาร้อยละปริมาณของแข็งและปริมาณสารก่อโคมต่อการเตรียมเซรามิกคอร์เตียไรต์พูนโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน โดยเตรียมชิ้นงานจากน้ำสลิปที่ไม่มีการเติมสารก่อโคม และมีการเติมสารก่อโคมให้มีปริมาณของแข็งของน้ำสลิปร้อยละ 66.67, 64, 61.54, และ 59.26, เตรียมชิ้นงานโดยมีปริมาณของแข็งของน้ำสลิปร้อยละ 64 อัตราส่วนระหว่างสารก่อโคมกับน้ำเท่ากับ 1:450, 1:225, 1:150 และ 1:112.5 และเตรียมชิ้นงานโดยมีปริมาณของแข็งของน้ำสลิปร้อยละ 67.91, 66.72, 65.57 และ 65.01 อัตราส่วนระหว่างสารก่อโคมกับน้ำเท่ากับ 1:20 ภายใต้อุณหภูมิการอบและการเผาผนึกที่ 80 องศาเซลเซียส และ 1350 องศาเซลเซียสตามลำดับ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) ร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปส่งผลต่อการขึ้นรูปและลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานอย่างชัดเจนโดยร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปแปรผันตรงกับความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอบ
- 2) ณ ร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปเดียวกันชิ้นงานที่เติมสารก่อโคมมีความหนาแน่นน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมสารก่อโคม
- 3) ร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปและอัตราส่วนสารก่อโคมกับน้ำที่เหมาะสมในการเตรียมชิ้นงานคือ 66.72 wt% และ 1:20 ตามลำดับ ซึ่งหากมีร้อยละปริมาณของแข็งของน้ำสลิปสูงกว่านี้ อาจทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานหลังอบสูงส่งผลให้ชิ้นงานแตกร้าว
- 4) ชิ้นงานหลังการเผาที่มีสภาพไม่สมบูรณ์มีการแตกหัก เนื่องจากการหดตัวของชิ้นงานและปริมาณรูพรุนภายในชิ้นงานน้อยเกินไปทำให้อนุภาคภายในมีการอัดแน่นกันอย่างมาก ส่งผลให้ในกระบวนการอนุภาคมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง อัตราการชนกันของอนุภาคสูง จนเกิดการแตกหักของชิ้นงานมากขึ้น
- 5) ชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมจากน้ำสลิปที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 66.67 และ 64 และเติมสารก่อโคมเจือจาง 20 มิลลิลิตรมีสภาพไม่สมบูรณ์ แตกร้าวทั่วชิ้นงาน
- 6) การเผาผนึกชิ้นงานภายใต้อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ยังไม่เพียงพอต่อการเกิดเฟสคอร์เตียไรต์ได้อย่างสมบูรณ์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยและทดลองนี้สามารถปรับปรุงและพัฒนาขั้นต่อไปได้ดังนี้

- 1) ศึกษาสมบัติหลังเผาชิ้นงาน
- 2) ศึกษาอัตราส่วนของ  $\text{MgO}:\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ให้เหมาะสมกับการขึ้นรูป



## เอกสารอ้างอิง

- [1.] porous ceramic. (2564). สืบค้นเมื่อ 29 เมษายน 2563  
จาก <https://www.taiwantrade.com/product/non-toxic-eco-friendly-porous-zeolite-desiccant-rotor-to-reduce-the-humidity-in-the-air-1813611.html#>
- [2.] Ling Qin, Xiaojian Gao, Wengui Li, and Huan Ye, Modification of magnesium oxysulfate cement by incorporating weak acids, Journal of materials in civil Engineers, Volume 30, Issue 9, page 1-9 (2018).
- [3.] wikipedia. (2560). Cordierite. สืบค้นเมื่อ 29 เมษายน 2563,  
จาก <https://en.wikipedia.org/wiki/Cordierite>
- [4.] thaiceramicsociety. (2559). คอร์ดีเอไรต์. สืบค้นเมื่อ 29 เมษายน 2563  
จาก [http://www.thaiceramicsociety.com/pd\\_klin\\_cordierite.php](http://www.thaiceramicsociety.com/pd_klin_cordierite.php)
- [5.] mindot. (2560). Cordierite. สืบค้นเมื่อ 29 เมษายน 2563,  
จาก <https://www.mindat.org/min-1128.html>
- [6.] สิริพรรณ นิลไพรัช, ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, กฤษณา ศิริเลิศมุกด์, รัฐพล รังกุพันธ์, ศรีเฉล ขุนทนต์, ยุทธนา แก้วตาบุตร, ขนิษฐา หนูมัน และ อภิรัฐ อธิภาพวิเศษพงษ์, การพัฒนาเซรามิกพอร์นจากดินแดงท้องถิ่นและวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรม (วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 6 (2556).
- [7.] Uday M. Basheer Al-Naib, Introductory Chapter: A Brief Introduction to Porous Ceramic, Materials Engineering, Materials Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, page 1-5 (2017).
- [8.] ดร.ปาจริย์ ถาวรนิติ, Materials characterization, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, หน้า 25-32 (2545).
- [9.] William D. Martin, Using image analysis to measure the porosity distribution of a porous pavement, Construction and Building Materials, Volume 48, page 210-217 (2013).
- [10.] Xin Lia, Yuanbing Lia, Ruofei Xiang, Shujing Lia, Xuesong Lia, Qirun Zhoua. Effect of dispersion viscosity on microstructure of cordierite foam prepared by thermo-foaming, Ceramics International, Volume 45, Issue 18, Part A, page 24487-24492 (2019).
- [11.] S. Akpınar, I.M. Kuşoğlu, O. Ertugrul, K. Onel, Microwave assisted sintering of in-situ cordierite foam, Ceramics International 41, page 8605-8613 (2015).
- [12.] Ye Li, Wei Cao, Lunlun Gong, Ruifang Zhang, Xudong Cheng, Properties of highly porous cordierite ceramic obtained by direct foaming and gel casting method, Ceramics-Silikáty 60, page 91-98 (2016).

- [13.] Y. Li, W. Cao, J. Feng, L. Gong, X. Cheng, Fabrication of cordierite foam ceramics using direct foaming and slip casting method with plaster moulds, *Advances in Applied Ceramics*, page 465-470 (2015).
- [14.] R. Sarkar, Binders for Refractory Castables: An Overview, *Interceram - International Ceramic Review*, page 40-53 (2020).
- [15.] Sam A. Walling and John L. Provis, Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future?, *Chemical reviews*, page 4170-4195 (2016).
- [16.] Dinnebier, R. E.; Pannach, M.; Freyer, D.  $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ : A metastable phase in the system  $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ . *Z. Anorg. Allg. Chem*, page 1827–1833 (2013).
- [17.] นันทิวัดต์ ผิวแก้ว, การเตรียมเม็ดนำส่งยาปฏิชีวนะฐานไฮดรอกซีอะพาไทต์สำหรับการรักษากระดูกติดเชื่อมแบบเฉพาะจุดด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2561).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ขนาด, น้ำหนัก และความหนาแน่นของชิ้นงานที่ไม่เติมสารก่อโฟม

ภาคผนวก ก – 1 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 66.67

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	200	0	165.95	5.10	5.11	5.06	131.87	1.26
			165.94	5.11	5.09	5.08	132.13	1.26
			165.95	5.10	5.10	5.02	130.57	1.27
			165.95	5.10	5.10	5.05	131.52	1.26
2			164.01	5.11	5.11	4.96	129.52	1.27
			164.07	5.18	5.06	5.05	132.36	1.24
			164.01	5.14	5.1	5.02	131.59	1.25
			164.03	5.14	5.09	5.01	131.16	1.25
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>1.26</b>
							<b>SD</b>	<b>0.01</b>

ภาคผนวก ก – 2 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 64.00

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	225	0	148.71	5.16	5.13	4.96	131.30	1.13
			148.72	5.13	5.13	4.98	131.06	1.13
			148.72	5.1	5.14	5.02	131.59	1.13
			148.72	5.13	5.13	4.99	131.32	1.13
2			150.56	5.19	5.08	5	131.83	1.14
			150.61	5.17	5.07	4.99	130.80	1.15
			150.58	5.18	5.06	4.98	130.53	1.15
			150.58	5.18	5.07	4.99	131.05	1.15
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>1.14</b>
							<b>SD</b>	<b>0.01</b>

ภาคผนวก ก – 3 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 61.54

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	250	0	136.50	4.98	5.06	4.80	120.95	1.13
			136.51	5.01	5.08	4.82	122.67	1.11
			136.51	5.01	5.09	4.81	122.66	1.11
			136.51	5.00	5.08	4.81	122.10	1.12
2			140.11	4.98	5.07	4.87	122.96	1.14
			140.12	5.00	5.04	4.83	121.72	1.15
			140.11	5.01	5.03	4.80	120.96	1.16
			140.11	5.00	5.05	4.83	121.88	1.15
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>1.13</b>
							<b>SD</b>	<b>0.02</b>

ภาคผนวก ก – 4 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 59.26

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	275	0	130.92	4.97	5.32	4.91	129.82	1.01
			130.95	4.99	5.38	4.94	132.62	0.99
			130.91	5.03	5.30	5.02	133.83	0.98
			130.93	5.00	5.33	4.96	132.09	0.99
2			125.80	5.12	4.98	5.00	127.49	0.99
			125.78	5.15	4.89	4.94	124.41	1.01
			125.78	5.14	5.02	4.70	121.27	1.04
			125.79	5.14	4.96	4.88	124.39	1.01
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>1.00</b>
							<b>SD</b>	<b>0.01</b>

## ภาคผนวก ข

ขนาด, น้ำหนัก และความหนาแน่นของชิ้นงานที่เติมสารก่อโฟมเจือจาง 20 มิลลิลิตร

## ภาคผนวก ข - 1 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 66.67

ชิ้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	180	20	153.62	5.22	5.09	4.97	132.05	1.16
			153.62	5.21	5.11	4.89	130.19	1.18
			153.62	5.20	5.11	4.88	129.67	1.18
			153.62	5.21	5.10	4.91	130.64	1.18
2			157.02	5.14	5.13	5.03	132.63	1.18
			157.02	5.1	5.18	5.03	132.88	1.18
			157.02	5.13	5.2	5.01	133.65	1.17
			157.02	5.12	5.17	5.02	133.05	1.18
							เฉลี่ยรวม	1.18
							SD	0.00

## ภาคผนวก ข - 2 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 64.00

ชิ้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	205	20	138.32	5.12	4.94	4.98	125.96	1.10
			138.32	5.11	4.9	5	125.20	1.10
			138.32	5.1	4.95	4.98	125.72	1.10
			138.32	5.11	4.93	4.99	125.62	1.10
2			143.21	5.04	5.1	4.99	128.26	1.12
			143.21	5.05	5.15	5.07	131.86	1.09
			143.21	5	5.19	5.08	131.83	1.09
			143.21	5.03	5.15	5.05	130.65	1.10
							เฉลี่ยรวม	1.10
							SD	0.00

## ภาคผนวก ค

ขนาด, น้ำหนัก และความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีปริมาณของแข็งเท่ากับที่ร้อยละ 64

ภาคผนวก ค - 1 : อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:450

ชิ้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	215	10	142.52	4.97	4.98	5.08	125.73	1.13
			142.60	4.99	5.00	5.09	127.00	1.12
			142.61	5.02	4.98	5.06	126.50	1.13
			142.58	4.99	4.99	5.08	126.41	1.13
2			144.03	5.08	5.02	4.93	125.72	1.15
			144.03	5.02	5.05	4.93	124.98	1.15
			144.03	5.04	5.02	4.95	125.24	1.15
			144.03	5.05	5.03	4.94	125.31	1.15
							เฉลี่ยรวม	1.14
							SD	0.02

ภาคผนวก ค - 2 : อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:225

ชิ้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	205	20	131.23	4.89	4.82	4.74	111.72	1.17
			131.2	4.89	4.81	4.7	110.55	1.19
			131.23	4.89	4.83	4.7	111.01	1.18
			131.22	4.89	4.82	4.71	111.09	1.18
2			130.28	4.99	4.95	4.93	121.77	1.07
			130.29	4.97	4.96	4.94	121.78	1.07
			130.29	5.03	5.1	4.94	126.73	1.03
			130.28	4.99	5.00	4.94	123.43	1.06
							เฉลี่ยรวม	1.12
							SD	0.09

ภาคผนวก ค – 3 : อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:150

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	195	30	136.69	4.94	4.88	4.92	118.61	1.15
			136.69	4.93	4.88	4.84	116.44	1.17
			136.69	4.94	4.88	4.86	117.16	1.17
			136.69	4.94	4.88	4.87	117.40	1.16
2			130.49	4.91	4.90	4.91	118.13	1.10
			130.49	4.90	4.90	4.89	117.41	1.11
			130.48	4.90	4.90	4.90	117.65	1.11
			130.49	4.90	4.90	4.90	117.73	1.11
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>1.14</b>
							<b>SD</b>	<b>0.04</b>

ภาคผนวก ค – 4 : อัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:112.5

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	185	40	140.12	4.97	4.94	4.82	118.34	1.18
			140.14	4.94	4.99	4.80	118.32	1.18
			140.13	4.94	4.99	4.81	118.57	1.18
			140.13	4.95	4.97	4.81	118.41	1.18
2			138.64	4.97	4.98	4.88	120.78	1.15
			138.64	4.96	4.98	4.86	120.05	1.15
			138.63	4.98	4.99	4.85	120.52	1.15
			138.64	4.97	4.98	4.86	120.45	1.15
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>1.17</b>
							<b>SD</b>	<b>0.02</b>

## ภาคผนวก ง

ขนาด, น้ำหนัก และความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนระหว่างสารก่อโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:20

## ภาคผนวก ง – 1 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 67.91

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	180	9	130.98	4.98	4.91	4.91	119.94	1.09
			130.98	4.98	4.91	4.91	119.94	1.09
			130.99	4.98	4.91	4.91	119.94	1.09
			130.98	4.98	4.91	4.91	119.94	1.09
2			145.92	5.035	4.925	4.99	123.74	1.18
			145.92	5.03	4.925	4.99	123.62	1.18
			145.92	5.035	4.925	4.99	123.74	1.18
			145.92	5.03	4.93	4.99	123.70	1.18
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>1.14</b>
							<b>SD</b>	<b>0.06</b>

## ภาคผนวก ง – 2 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 66.72

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	190	9.5	117.48	4.86	4.835	4.77	112.09	1.05
			117.48	4.86	4.84	4.77	112.20	1.05
			117.49	4.86	4.84	4.77	112.20	1.05
			117.48	4.86	4.84	4.77	112.16	1.05
2			122.77	4.9	4.9	4.91	117.89	1.04
			122.77	4.9	4.91	4.91	118.13	1.04
			122.77	4.9	4.91	4.91	118.13	1.04
			122.77	4.9	4.91	4.91	118.05	1.04
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>1.04</b>
							<b>SD</b>	<b>0.01</b>



ภาคผนวก ง – 3 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 65.57

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	200	10	106.38	4.95	5.02	4.97	123.38	0.86
			106.38	4.94	5.02	4.97	123.00	0.86
			106.38	4.93	5.02	4.97	122.88	0.87
			106.38	4.94	5.02	4.97	123.09	0.86
2			107.50	4.85	4.89	4.99	118.23	0.91
			107.50	4.85	4.89	4.99	118.11	0.91
			107.49	4.85	4.89	4.99	118.23	0.91
			107.50	4.85	4.89	4.99	118.19	0.91
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>0.89</b>
							<b>SD</b>	<b>0.03</b>

ภาคผนวก ง – 4 : ร้อยละปริมาณของแข็ง 65.01

ชั้น ที่	น้ำ (ml)	Foam (ml)	น้ำหนักหลังอบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	สูง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	205	10.25	93.48	5.00	5.00	5.03	125.63	0.74
			93.47	5.00	5.01	5.03	125.75	0.74
			93.47	4.99	5.01	5.02	125.37	0.75
			93.47	5.00	5.00	5.02	125.58	0.74
2			93.47	5.00	5.00	5.02	125.50	0.74
			93.47	4.99	5.00	5.02	125.25	0.75
			93.47	5.00	5.01	5.01	125.50	0.74
			93.47	5.00	5.00	5.02	125.42	0.75
							<b>เฉลี่ยรวม</b>	<b>0.74</b>
							<b>SD</b>	<b>0.00</b>