

ผลของการเติมแอลคาไลซิลิเกตที่มีต่อการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวของเซรามิกอะลูมินาที่ขึ้นรูป  
ด้วยวิธีการอัดรีด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ALKALI SILICATE ADDITIONS ON LIQUID PHASE SINTERING OF ALUMINA  
CERAMIC FORMED BY EXTRUSION METHOD



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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

น.ส.กัญญภัค ศิริไพศาลทวี

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

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

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กัญญภัค ศิริไพศาลทวี : ผลของการเติมแอลคาไลซิลิเกตที่มีต่อการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวของเซรามิกอะลูมินาที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด. ( EFFECTS OF ALKALI SILICATE ADDITIONS ON LIQUID PHASE SINTERING OF ALUMINA CERAMIC FORMED BY EXTRUSION METHOD) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของการเติมแอลคาไลซิลิเกตที่มีต่อการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวของเซรามิกอะลูมินาเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์อะลูมินาที่มีประสิทธิภาพสูง แอลคาไลซิลิเกตที่ละลายน้ำได้ถูกนำมาใช้ในการขึ้นรูปแบบพลาสติกของชิ้นงานอะลูมินา และเกิดการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อะลูมินาที่ผ่านการเผาแล้วที่มีความแข็งแรงสูง ปริมาณอะลูมินาสูง และการดูดซึมน้ำต่ำ วิธีการศึกษาประกอบด้วยการผสมสารละลายตัวเชื่อมประสานเข้ากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกตปริมาณ 0-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้เป็นสารตัวเติมในการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว แมกนีเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 0-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ใช้เป็นสารยับยั้งการเติบโตของเกรนเติมเข้าไปในส่วนผสมของเหลวและตามด้วยผงอะลูมินา นวดส่วนผสมเข้าด้วยกันจนสม่ำเสมอจนได้เป็นเนื้อดินปั้น ชิ้นงานอะลูมินาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ได้จากการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด จากนั้นจึงอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาผนึกที่ 1600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารตัวเติมในการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวได้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึก ในขณะที่การดูดซึมน้ำมีค่าลดลง ผลิตภัณฑ์อะลูมินาที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำถึง 0.19 เปอร์เซ็นต์ สามารถเตรียมได้มาจากเทคนิคการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดด้วยการเติมแมกนีเซียมคาร์บอเนต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ โซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6072191723 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD:

Kanyapak Siriphaisarntavee : EFFECTS OF ALKALI SILICATE ADDITIONS ON LIQUID PHASE SINTERING OF ALUMINA CERAMIC FORMED BY EXTRUSION METHOD. Advisor: Asst. Prof. Dr. THANAKORN WASANAPIARNPONG

This research focused on the study of effects of alkali silicate additions on liquid phase sintering of alumina ceramic in order to produce high-performance alumina products. Liquid soluble alkali silicates were used in plastic forming of alumina and formed liquid phase sintering to attain fired alumina products with high strength, high alumina content and low water absorption. The methodology consisted of mixing binder solution with 0 – 20 wt% of sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and potassium silicate ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) solution, used as liquid phase sintering additives, of 0 – 20 wt%. Magnesium carbonate ( $\text{MgCO}_3$ ) with amount of 0 – 1 wt%, used as grain growth inhibitor, was added into liquid mixture and followed by alumina powders. The mixtures were kneaded thoroughly to form a dough. Alumina bodies with the diameter size of 10 mm were prepared from extrusion techniques. After that, drying process was carried out at 110 °C for 24 h and accompanied by sintering process at 1600 °C for 2 h. The results showed that the addition of liquid phase sintering additives led to an increase in bulk density, while water absorption of sintered products decreased. Alumina products with water absorption as low as 0.19 % can be achieved by extrusion technique with the addition of 0.5 wt% of  $\text{MgCO}_3$  and 10 wt% of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีจากบุคคลผู้ให้ความสนับสนุนและความช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้าน ข้าพเจ้า นางสาวกัญญภัค ศิริไพศาลทวี ผู้ดำเนินงานวิจัยตลอดจนการเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอขอบพระคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำช่วยเหลือ และแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการทำวิจัย

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่ได้ประสาทความรู้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่อยู่ในบ้านสี่เทาหลังนี้

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ที่รับฟังและแบ่งปันสิ่งต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นข่าวสารหรือเรื่องวิชาการก็ดี

สุดท้ายนี้ ขอใช้พื้นที่นี้กราบขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าศึกษาที่ในรั้วจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กัญญภัค ศิริไพศาลทวี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 อะลูมินา.....	3
2.2 ตัวเชื่อมประสาน .....	5
2.3 แอลคาไลซิลิเกต .....	6
2.3.1 โซเดียมซิลิเกต .....	6
2.3.2 โพแทสเซียมซิลิเกต .....	8
2.4 การขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิก.....	8
2.5 การอัดรีด.....	10

2.6 พฤติกรรมการไหลตัวของเนื้อดินปั้น.....	13
2.7 การเผาผนึก.....	15
2.8 การเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว.....	16
2.9 ตำหนิที่เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์หลังเผา.....	19
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	26
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง .....	26
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	29
3.2 การเตรียมเนื้อดินปั้นอะลูมินา.....	30
3.3 การขึ้นรูป .....	35
3.3.1 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว.....	35
3.3.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด .....	35
3.4 การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน .....	36
3.4.1 การหดตัวของชิ้นงานหลังเผา (Firing shrinkage).....	36
3.4.2 การดูดซึมน้ำ (Water absorption) .....	37
3.4.3 ความพรุนตัว (Apparent porosity).....	37
3.4.4 ความหนาแน่น (Bulk density).....	38
3.4.5 ความแข็งแรง (Flexural strength) .....	38
3.4.6 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure).....	39
3.4.7 องค์ประกอบเฟส (Phase composition).....	39
3.5 แผนผังการทดลอง.....	40
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย .....	41
4.1 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบทิศทางเดียว.....	41



4.1.1 การหดตัวหลังเผา .....	41
4.1.2 การดูดซึมน้ำ.....	46
4.1.3 ความพรุนตัว.....	50
4.1.4 ความหนาแน่น.....	54
4.2 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด .....	58
4.2.1 การหดตัวหลังเผา .....	58
4.2.2 การดูดซึมน้ำ.....	59
4.2.3 ความพรุนตัว.....	59
4.2.4 ความหนาแน่น.....	60
4.2.5 ความแข็งแรง.....	61
4.2.6 โครงสร้างจุลภาค.....	62
4.2.7 องค์ประกอบเฟส.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	66
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	66
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติม.....	67
บรรณานุกรม.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	73

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 เซรามิกอะลูมินาที่ใช้ในงานทางวิศวกรรมที่มีปริมาณอะลูมินามากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์และการนำไปใช้งาน .....	4
ตารางที่ 2.2 เซรามิกอะลูมินาที่ใช้ในงานทางวิศวกรรมที่มีปริมาณอะลูมินาต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์และการนำไปใช้งาน .....	5
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสูตรส่วนผสมที่ใช้สำหรับการอัดรีด .....	12
ตารางที่ 2.4 ความหนืดของตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ .....	13
ตารางที่ 2.5 สมบัติของเซรามิกอะลูมินาที่มีความพรุนตัวสูงหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส .....	22
ตารางที่ 3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง .....	27
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของสารละลายโซเดียมซิลิเกต .....	27
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของสารละลายโพแทสเซียมซิลิเกต .....	28
ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบของผงแมกนีเซียมคาร์บอเนต .....	28
ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบและหน้าที่ของสารละลายตัวเชื่อมประสาน .....	29
ตารางที่ 3.6 ลำดับการเติมสารสำหรับการเตรียมเนื้อดินปั้น .....	32
ตารางที่ 3.7 สูตรของสารละลายตัวเชื่อมประสานที่ใช้กับเนื้อดินปั้นกลุ่ม A และ B .....	32
ตารางที่ 3.8 สูตรของสารละลายตัวเชื่อมประสานที่ปรับตามปริมาณสารละลายแอลคาไลซิลิเกตที่ใช้กับเนื้อดินปั้นกลุ่ม C และ D .....	33
ตารางที่ 3.9 สูตรของเนื้อดินปั้น .....	34

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal closed pack .....	4
รูปที่ 2.2 วิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกตามปริมาณของความชื้นของวัตถุดิบและความดันที่ใช้ .....	8
รูปที่ 2.3 การขึ้นรูปด้วยวิธีการจิกเกอร์ริง .....	9
รูปที่ 2.4 การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแบบกึ่งแห้ง .....	10
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) .....	14
รูปที่ 2.6 แรงขับที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาผนึก .....	15
รูปที่ 2.7 ชนิดของการเผาผนึก .....	16
รูปที่ 2.8 กระบวนการที่เกิดขึ้นในการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว .....	18
รูปที่ 2.9 ปริมาณในการเกิดแต่ละกระบวนการที่เกิดขึ้นในการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว .....	18
รูปที่ 2.10 ตำหนิที่เกิดขึ้นจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อดินหลังการอัดรีด .....	19
รูปที่ 2.11 ตำหนิที่เกิดบนผิวของชิ้นงาน .....	19
รูปที่ 0.1 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร B1 – B4 ที่มีการเติมแมกนีเซียม 0 – 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก .....	20
รูปที่ 2.13 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร B1 – B4 ที่อุณหภูมิ 1200 – 1600 องศาเซลเซียส .....	21
รูปที่ 2.14 ความพรุนตัวของชิ้นงานสูตร B1 – B4 ที่มีการเติมแมกนีเซียม 0 – 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก .....	21
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฉลี่ยและความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร A AM AY และ AZ เมื่อทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิในช่วง 1450 – 1500 องศาเซลเซียส .....	23
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาผนึกชิ้นงานอะลูมินา .....	24

รูปที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงานอะลูมินาหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ a) 5 นาที b) 20 นาที c) 100 นาที และ d) 1440 นาที .....	24
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรูพรุนในชิ้นงานอะลูมินาและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาผนึก.	25
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาผนึก เมื่อใช้แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตปริมาณ (a) 10 และ (b) 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร .....	25
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการอัดแบบทิศทางเดียว .....	35
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด .....	36
รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลอง .....	40
รูปที่ 4.1 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	43
รูปที่ 4.2 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	43
รูปที่ 4.3 ค่าการหดตัวของชิ้นงานชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	44
รูปที่ 4.4 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	44
รูปที่ 4.5 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	45
รูปที่ 4.6 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	45
รูปที่ 4.7 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	47
รูปที่ 4.8 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	47

รูปที่ 4.9 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	48
รูปที่ 4.10 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	48
รูปที่ 4.11 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	49
รูปที่ 4.12 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	49
รูปที่ 4.13 ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	51
รูปที่ 4.14 ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	51
รูปที่ 4.15 ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด แบบทิศทางเดียว .....	52
รูปที่ 4.16 ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	52
รูปที่ 4.17 ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	53
รูปที่ 4.18 ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	53
รูปที่ 4.19 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ ทิศทางเดียว .....	55
รูปที่ 4.20 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด แบบทิศทางเดียว .....	55

รูปที่ 4.21 ค่าความความหนาแน่นของชิ้นงานชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	56
รูปที่ 4.22 ค่าความความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	56
รูปที่ 4.23 ค่าความความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	57
รูปที่ 4.24 ค่าความความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว .....	57
รูปที่ 4.25 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด .....	58
รูปที่ 4.26 ค่าการดูดซึมน้ำชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด .....	59
รูปที่ 4.27 ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด .....	60
รูปที่ 4.28 ค่าความความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด .....	61
รูปที่ 4.29 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด .....	62
รูปที่ 4.30 ปริมาณรูพรุนของ (a) ชิ้นงานกลุ่ม C สูตร $Mg_{0.5}Na_{10}$ (b) ชิ้นงานกลุ่ม C สูตร $Mg_1Na_{10}$ (c) ชิ้นงานกลุ่ม D สูตร $Mg_{0.5}Na_{10}$ และ (d) ชิ้นงานกลุ่ม D สูตร $Mg_1Na_{10}$ .....	64
รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคของ (a) ชิ้นงานกลุ่ม C สูตร $Mg_{0.5}Na_{10}$ (b) ชิ้นงานกลุ่ม C สูตร $Mg_1Na_{10}$ (c) ชิ้นงานกลุ่ม D สูตร $Mg_{0.5}Na_{10}$ และ (d) ชิ้นงานกลุ่ม D สูตร $Mg_1Na_{10}$ .....	64
รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน สูตร $Mg_{0.5}Na_{10}$ และ $Mg_1Na_1$ .....	65

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อะลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารประกอบเคมีตั้งต้นที่ถูกนำไปใช้ในการผลิตแร่ อะลูมิเนียม ที่สำคัญยิ่งไปกว่านั้นอะลูมินายังเป็นวัสดุเซรามิกวิศวกรรมที่เป็นที่รู้จักและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางชนิดหนึ่งเนื่องจากสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่โดดเด่นหลายประการ เช่น การเป็นฉนวนไฟฟ้า การทนต่อการกัดกร่อน การทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นอะลูมินาจึงนิยมถูกใช้งานในด้านการเป็นวัสดุทนไฟ วัสดุขัด วัสดุตัด หรือวัสดุกลึง เป็นต้น

เนื่องจากอะลูมินามีจุดหลอมเหลวสูงถึง 2000 – 2100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้จำเป็นต้องเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงเช่นเดียวกัน ทำให้การผลิตชิ้นงานอะลูมินาให้มีค่าใช้จ่ายที่สูง หากต้องการที่จะปรับลดอุณหภูมิการเผาผนึกลงจะต้องมีการเติมสารตัวเติม โดยทั่วไปการเติมสารตัวเติมที่เป็นของแข็งในรูปแบบผงให้กระจายตัวได้ดีและมีความสม่ำเสมอจำเป็นจะต้องใช้เทคนิคในการผสม เช่น การบดผสมแบบเปียกด้วยหม้อบด ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ระยะเวลาในการผสมนาน อีกทั้งยังต้องมีการกำจัดน้ำหรือสารละลายออกก่อนด้วย

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้สารตัวเติมที่มีสถานะเป็นของเหลวหรือสารละลายของเหลว เพื่อให้สามารถผสมเนื้อดินปั้นได้ง่ายและมีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้น โดยเลือกใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต และโพแทสเซียมซิลิเกตซึ่งจะหลอมตัวเป็นเฟสของเหลวช่วยเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาแล้วเติมสารพอลิเมอร์เป็นสารละลายตัวเชื่อมประสานจากนั้นทำการขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียวด้วยการอัดรีด ตามด้วยการอบให้แห้งก่อนนำไปเผาเพื่อศึกษาการเตรียมเซรามิกอะลูมินาที่อุณหภูมิต่ำลงด้วยการเติมสารช่วยเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวที่จะมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของเซรามิกอะลูมินา นอกจากนี้จะทำการศึกษาถึงองค์ประกอบของสารละลายตัวเชื่อมประสาน เพื่อปรับสมบัติของเนื้อดินปั้นให้มีความเหนียวที่เหมาะสมต่อการนำขึ้นรูปด้วยการอัดรีดต่อไป

ในการพัฒนาสูตรส่วนผสมสำหรับการผลิตอะลูมินาที่อุณหภูมิต่ำลงเพื่อให้มีสมบัติความแข็งแรงสูงและการดูดซึมน้ำต่ำ งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณ ของสารช่วยเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว ซึ่งผลกระทบที่จะทำการศึกษาหลังการเผา ได้แก่ การหดตัว การดูด

ซึมน้ำ ความหนาแน่น ความแข็งแรง โครงสร้างทางจุลภาค และเฟสองค์ประกอบที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาสูตรส่วนผสมและศึกษาผลของการเติมแอลคาไลซิลิเกตที่มีต่อการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว ตามด้วยการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดแล้วนำไปเผาเพื่อให้ได้ชิ้นงานเซรามิกอะลูมินาที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำและความแข็งแรงสูง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาผลของการเติมสารช่วยเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวที่ปริมาณต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติหลังเผาของชิ้นงาน
- 2) ศึกษาผลของการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ สำหรับการใช้เป็นสารช่วยยับยั้งการโตของเกรน
- 3) ศึกษาปริมาณองค์ประกอบของสารละลายประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด
- 4) ขึ้นรูปชิ้นงานอะลูมินาด้วยการอัดรีดให้มีลักษณะผิวเรียบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันตลอดความยาวของชิ้นงาน
- 5) ศึกษาลักษณะสมบัติต่าง ๆ หลังการเผา ได้แก่ การหดตัว การดูดซึมน้ำ ความพรุนตัว ความหนาแน่น ความแข็งแรง โครงสร้างทางจุลภาค และเฟสองค์ประกอบที่เกิดขึ้น เป็นต้น

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สูตรส่วนผสมที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดเพื่อให้ได้ชิ้นงานอะลูมินาที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำและมีความแข็งแรงสูง



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อะลูมินา

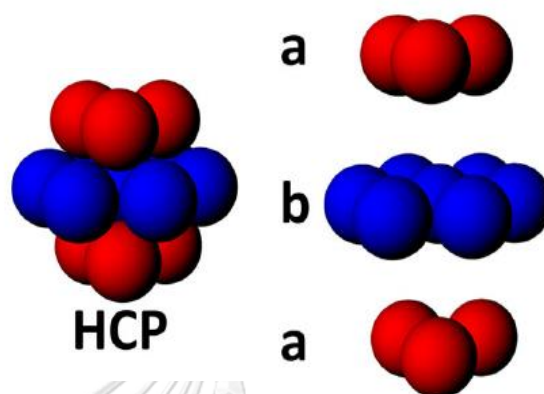
อะลูมินามีชื่อทางเคมีว่าอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) และมีสูตรทางเคมี คือ  $Al_2O_3$  เป็นสารประกอบออกไซด์ที่สามารถพบได้มากบนผิวโลกที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่โดดเด่นหลายประการ เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง การเป็นฉนวนไฟฟ้า การทนต่อการกัดสี การทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้อะลูมินาทำให้ออกไซด์ถูกนำไปใช้งานหลากหลายวัตถุประสงค์ไม่ว่าจะเป็น วัสดุฉนวนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุทนไฟ วัสดุขัดสี ลูกบิดและผนังกรุหม้ออบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก ชิ้นส่วนทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี และชิ้นส่วนที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น

อะลูมินาสามารถพบได้ในหลายเฟสเช่น แอลฟา ( $\alpha$ ) บีตา ( $\beta$ ) และแกมมา ( $\gamma$ ) แต่เฟสที่เสถียรและถูกนำไปใช้งานมากที่สุด คือ อะลูมินาที่อยู่ในเฟสแอลฟาที่มีการจัดเรียงตัวไอออนของออกซิเจนในระดับโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Hexagonal closed pack ที่ประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในการทำลายพันธะนี้ต้องใช้พลังงานสูงมาก สูตรทางเคมีของอะลูมินาจึงไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีหลากหลายสูตรเมื่อเทียบกับสารประกอบออกไซด์อื่น ๆ เช่น ไอร์รอนออกไซด์ที่มีสูตรทางเคมีมากมายได้แก่  $FeO$   $Fe_2O$   $Fe_2O_3$   $Fe_3O_4$   $Fe_4O_5$  และ  $Fe_5O_7$  เป็นต้น แต่เมื่อมีสิ่งเจือปนหรือธาตุอัลลอยแค่เพียงเล็กน้อยเกิดขึ้นในโครงสร้างของอะลูมินาเป็นเฟสทุติยภูมิที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำกว่าของอะลูมินาจะสามารถส่งผลให้จุดหลอมเหลวของอะลูมินาลดลง [1, 2]

คุณภาพหรือเกรดของผลิตภัณฑ์อะลูมินาที่ใช้ทางวิศวกรรมมักได้จากการเผาผนึกผงอะลูมินาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300 องศาเซลเซียส สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่หนึ่ง คือ กลุ่มที่มีปริมาณอะลูมินามากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่สอง คือ กลุ่มที่มีปริมาณอะลูมินาต่ำกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นเกรดย่อยได้อีกตามปริมาณของสิ่งเจือปนและสารอัลลอย เช่น สารช่วยในการเผาผนึก สามารถสังเกตได้ว่าคุณภาพของอะลูมินามีผลโดยตรงต่อสมบัติและการใช้งานผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 [3]

โดยผลิตภัณฑ์อะลูมินาที่ใช้ทางวิศวกรรมกลุ่มแรก คือ อะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีความหนาแน่นสูง (มากกว่า 3.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และต้องใช้อุณหภูมิในการเผาผนึกที่สูง

(ในช่วง 1500 - 1900 องศาเซลเซียส) ส่วนผลิตภัณฑ์อะลูมินากลุ่มที่สอง คือ อะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์ต่ำลงเนื่องจากมีสิ่งเจือปนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาพูนีกลดลง ที่สำคัญยังมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่ากลุ่มแรก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal closed pack [4]

ตารางที่ 2.1 เซรามิกอะลูมินาที่ใช้ในงานทางวิศวกรรมที่มีปริมาณอะลูมินามากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และการนำไปใช้งาน [3]

Grade	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> min%	Type	Porosity %	Density g/cm <sup>3</sup>	Applications
A1	99.6	electrical & engineering	0.2 - 3	3.75 - 3.95	structural
A2	99.8	translucent	< 1	3.97 - 3.99	Na lamps
A3	99.5	hot-pressed	< 1	3.90 - 3.99	machine tools
A4	99.6	sintered recrystallised	3 - 6	3.75 - 3.85	refractory
A5	99.0	low dielectric loss	1 - 5	3.76 - 3.94	microwave

ตารางที่ 2.2 เซรามิกอะลูมินาที่ใช้ในงานทางวิศวกรรมที่มีปริมาณอะลูมินาต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และการนำไปใช้งาน [3]

Grade	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Type	Porosity %	Density g/mm <sup>3</sup>	Applications
A6	96.5-99.0	electrical & engineering	1 - 5	3.71 - 3.92	mechanical & electrical
A7	94.5-96.5	electrical & engineering	2 - 5	3.60 - 3.90	insulators, wear parts
A8	86.0-94.5	electrical & engineering	2 - 5	3.40 - 3.90	insulators, wear parts, refractory
A9	80.0-86.0	electrical & engineering	3 - 6	3.30 - 3.60	insulators, wear parts, refractory

ขั้นตอนการผลิตเป็นสาเหตุหลักของการเกิดตำหนิในชิ้นงาน เนื่องจากการเผาผนึกชิ้นงานขนาดใหญ่ให้ความหนาแน่นเท่ากับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กเป็นเรื่องยาก และชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าความเค้นตกค้าง (Residual stress) สูงกว่า ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานการแตกหักของชิ้นงาน (Fracture toughness) ที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานอะลูมินาต่ำลง เนื่องจากความแข็งแรงเป็นสมบัติของวัสดุที่ขึ้นกับขนาดของชิ้นงาน

## 2.2 ตัวเชื่อมประสาน

ตัวเชื่อมประสาน คือ วัสดุหรือสารใดก็ตามที่มีความสามารถในการยึดจับวัสดุอื่นเข้าด้วยกันทั้งทางกลและทางเคมี โดยทั่วไปตัวเชื่อมประสานสามารถแบ่งได้เป็นสามชนิด ได้แก่

- 1) ตัวเชื่อมประสานเมทริกซ์ (Matrix binder) มีลักษณะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็งเช่น ซีเมนต์ และ ปอร์ทแลนด์ซีเมนต์ ทำงานโดยการยึดจับเนื้อสารที่เป็นก้อนให้อยู่ในตัวเชื่อมประสานได้
- 2) ตัวเชื่อมประสานฟิล์ม (Film binder) มีลักษณะเป็นกาวที่ได้จากการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลายอื่นๆ
- 3) ตัวเชื่อมประสานเคมี (Chemical binder) เป็นตัวเชื่อมประสานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารที่จับตัวกัน [5]

### 2.3 แอลคาไลซิลิเกต

แอลคาไลซิลิเกต (Alkali silicate) มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยแอลคาไลออกไซด์ ( $M_2O$ ) ( $M = \text{Alkali metal}$ ) และ ซิลิกา ( $SiO_2$ ) มีความสามารถในการละลายในน้ำได้จึงรู้จักทั่วไปในชื่อ Soluble glass มีสถานะเป็นได้ทั้งของเหลวและของแข็งที่อุณหภูมิห้อง แอลคาไลซิลิเกตสามารถเตรียมได้จากการผสมซิลิกาเข้ากับแอลคาไลคาร์บอเนต (Alkali carbonate,  $M_2CO_3$ ) จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 1100 – 1200 องศาเซลเซียส ตามสมการที่ 2.1



แอลคาไลซิลิเกตเหลวมีลักษณะเป็นของเหลวสีที่มีความหนืด ยังสามารถเตรียมได้จากการละลายซิลิกาด้วยสารละลายแอลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide, MOH) ภายใต้แรงดัน ตามสมการที่ 2.2



ปริมาณของแอลคาไลออกไซด์และซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบส่งผลต่อความหนืดของสารละลาย แอลคาไลซิลิเกต โดยทั่วไปโซเดียมซิลิเกตทางการค้ามีอัตราส่วนของซิลิกาต่อโซเดียมออกไซด์มีค่าในช่วง 1.6 – 3.2

แอลคาไลซิลิเกตสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้แตกต่างกันสี่ชนิด คือ

- 1) การเกิดเจล (Gelation) เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของซิลิเกตเป็นเจลซิลิกาที่มีลักษณะไม่ชอบน้ำ
- 2) การตกตะกอน (Precipitation) ซิลิเกตเหลวจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของโลหะที่มีหลายเวเลนซ์เพื่อให้เกิดพันธะเคมีต่อกัน
- 3) การกำจัดน้ำ (Dehydration) ปริมาณน้ำที่ถูกกำจัดส่งผลต่อความหนืดของฟิล์มเชื่อมประสานที่เกิดขึ้น
- 4) การปรับปรุงประจุที่ผิว (Surface charge modification) สามารถทำให้อนุภาคยึดเกาะหรือกระจายตัวจากกันได้ [5, 6]

#### 2.3.1 โซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) มีสูตรทางเคมี คือ  $Na_2SiO_3$  ถูกใช้เพื่อเป็นสารช่วยในการจับตัว (Flocculant) ในแหล่งบำบัดน้ำเสีย และที่สำคัญเป็นแหล่งของโซเดียมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นตัวเชื่อมประสานในอุตสาหกรรมกระดาษ ไม้ โลหะ แก้ว ผนัง หรือแม้แต่ สิ่งทอ

โซเดียมซิลิเกตจัดเป็นสารประกอบซิลิเกตละลายในน้ำได้ที่มีความสำคัญที่สุด การผลิตโซเดียมซิลิเกตเริ่มตั้งแต่ศตวรรษที่ 19 โดยการย่างแร่จากโซดาแอส (Soda ash) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) และทรายซิลิกา (Silica sand,  $\text{SiO}_2$ ) ที่อุณหภูมิระหว่าง 1000 – 1400 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแก้วที่เป็นสารประกอบระหว่างโซเดียมออกไซด์และซิลิกา ตามสมการที่ 2.3



การใช้งานแก้วดังกล่าวสามารถบดเป็นผงหรือทำให้อยู่ในรูปของเหลวได้ละลายในน้ำ ร้อน โดยอาศัยเตาปฏิกรณ์ชนิด pressurized reactor นอกจากนั้นสารละลายโซเดียมซิลิเกตยังสามารถเตรียมได้จากการละลายซิลิกาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ภายใต้แรงดัน ตามสมการที่ 2.4 ที่มีน้ำหนักโดยโมลของซิลิกาและโซเดียมออกไซด์ มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 60 และ 62 ตามลำดับ ส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลซิลิกาต่อโซเดียมออกไซด์มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย



โซเดียมสามารถถูกแทนที่ด้วยแอลคาไลออนตัวอื่นเช่น ลิเทียม หรือ โพแทสเซียม ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกันแต่อาจเหมาะกับวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกันออกไป การใช้งานโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวเชื่อมประสานสามารถแบ่งได้ดังนี้

- 1) การใช้งานเป็นตัวเชื่อมประสานเมทริกซ์ (Matrix binder) โซเดียมซิลิเกตจะทำหน้าที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเผาโดยเป็น cement accelerator พัฒนาความแข็งแรงของวัสดุได้เร็วขึ้น ลดความหนืดและ thickening time
- 2) การใช้งานเป็นตัวเชื่อมประสานแบบฟิล์ม ทางการค้ามีปริมาณน้ำประกอบ 45 – 65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 3) การใช้งานเป็นตัวเชื่อมประสานเคมี โซเดียมซิลิเกตจะเข้าไปทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่นที่ใช้เป็นสารช่วยในการแข็งตัว (Setting agent) เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น [5-7]

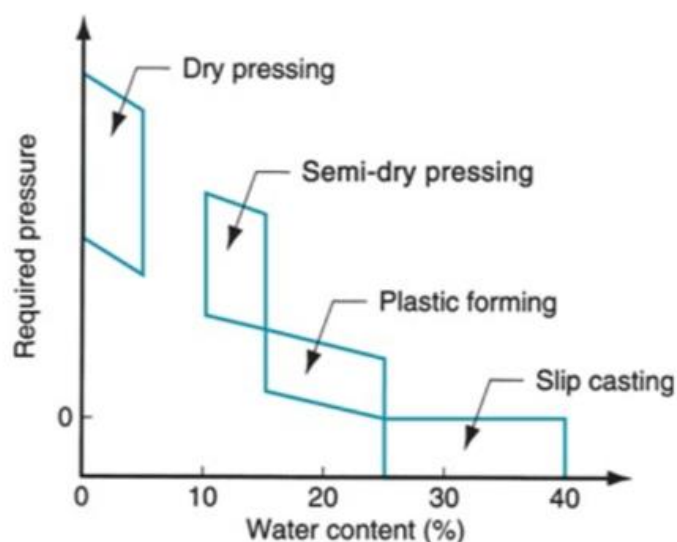
### 2.3.2 โพลแทสเซียมซิลิเกต

โพลแทสเซียมซิลิเกต (Potassium silicate) มีสูตรทางเคมี คือ  $K_2SiO_3$  มีน้ำหนักโดยโมลของซิลิกาและโพลแทสเซียมออกไซด์ใกล้เคียงกัน คือ 60 และ 94 ตามลำดับ ส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลซิลิกาต่อโพลแทสเซียมออกไซด์มีค่าแตกต่างกันมาก

โพลแทสเซียมซิลิเกตมีสมบัติคล้ายคลึงกับโซเดียมซิลิเกตที่อัตราส่วนโมลซิลิกาต่อแอลคาไลเท่ากัน โพลแทสเซียมซิลิเกตจะไหลตัวได้ดีที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าโซเดียมซิลิเกต จึงเหมาะสำหรับการทำงานเป็นตัวเชื่อมประสานที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้โพลแทสเซียมซิลิเกตยังมักถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการความสวยงามของชิ้นงานเช่น เคลือบตกแต่ง เนื่องจากมีโอกาสน้อยที่จะเกิดฟิล์มคาร์บอนेटหรือซีเกลือปูน (Efflorescence) และที่สำคัญยังเป็นแหล่งของโพแทสเซียมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกด้วย [5]

### 2.4 การขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิก

การขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกมีหลายวิธีที่แตกต่างกันขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ การเตรียมเนื้อดินปั้น เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูป ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยทั่วไปสามารถแบ่งวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกตามปริมาณของความชื้นของวัตถุดิบได้เป็นสี่กลุ่มหลัก แสดงในรูปที่ 2.2 ได้ดังนี้



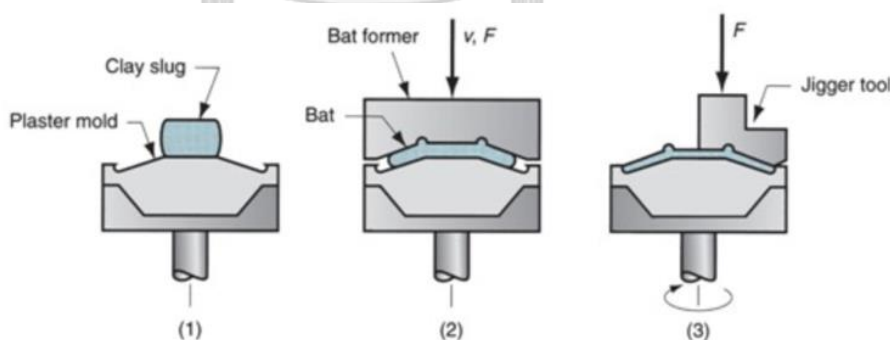
รูปที่ 2.2 วิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกตามปริมาณของความชื้นของวัตถุดิบและความดันที่ใช้ [8]

- 1) การเทแบบ (Casting) วิธีนี้จะเตรียมวัตถุดิบให้อยู่ในรูปน้ำดินชั้นหรือน้ำสลิป (Slip) ที่มีปริมาณน้ำ 25 – 40 เปอร์เซ็นต์ น้ำสลิปต้องมีลักษณะการไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงเทลง

ในแม่แบบปูนปลาสเตอร์ที่มีรูปทรงสูง ปูนจะคูดน้ำและทำให้เนื้อดินเกาะติดกับผนังแม่แบบได้เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ วิธีการเทแบบสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ แต่มีการหดตัวหลังการอบสูงเนื่องจากต้องใช้น้ำในการขึ้นรูปมากทำให้อาจเกิดการแตกหักหรือบิดเบี้ยวของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ได้แก่ เช่น สุขภัณฑ์ แจกัน ของที่ระลึกประเภทต่าง ๆ เป็นต้น

2) การขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียว (Plastic forming) การเตรียมเนื้อดินปั้นโดยการผสมวัตถุดิบเข้ากับของเหลวหรือสารตัวเติมอื่น ๆ โดยเนื้อดินปั้นควรมีปริมาณน้ำ 15 – 25 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าด้วยกันแล้วจึงนำไปขึ้นรูปต่อได้อีกหลายวิธี เช่น [9]

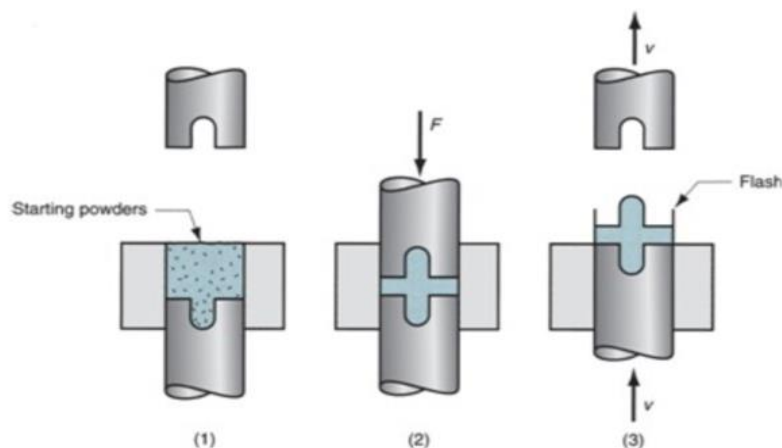
- การปั้นด้วยมือ (Hand modelling) เป็นวิธีขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างที่ต้องการด้วยมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ มีขนาดของผลิตภัณฑ์ไม่แน่นอน เช่น การขึ้นรูปด้วยปั้นหมุน (Throwing)
- การจิกเกอร์ริง (Jiggering) เป็นวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องมือที่ได้รับความนิยมในการใช้ในอุตสาหกรรม โดยการนำเนื้อดินปั้นมาวางบนแบบปูนปลาสเตอร์แล้วใช้ใบมีดกดรีดให้เนื้อดินปั้นได้รูปร่างตามต้องการ มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีสมมาตรเป็นรูปกลมและแบน เช่น จาน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การขึ้นรูปด้วยวิธีการจิกเกอร์ริง [8]

- การอัดรีด (Extrusion) เป็นวิธีการขึ้นรูปเนื้อดินปั้นด้วยเครื่องอัดรีดเพื่อให้ได้ชิ้นงานลักษณะเป็นแท่งยาวและมีหน้าตัดตามต้องการ มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะหน้าตัดสม่ำเสมอ เช่น ท่อ หรือ อิฐ เป็นต้น

- การอัดแบบกึ่งแห้ง (Semi-dry pressing) เป็นวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยการเติมผงวัสดุที่มีความชื้นแล้วกดอัดด้วยแม่แบบอีกฝั่ง มีปริมาณน้ำ 10 – 15 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแบบกึ่งแห้ง [8]

- การอัดแห้ง (Dry pressing) เป็นวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยการอัดผงวัสดุ ลักษณะกลมที่ไหลตัวได้ดีและมีปริมาณน้ำไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องอัดแรงดันสูงเพื่อให้ผงอัดแน่นและเกาะติดกัน เป็นวิธีที่มีการหดตัวของผลิตภัณฑ์หลังการอบที่น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ แต่รูปร่างของชิ้นงานที่สามารถขึ้นรูปได้มีข้อจำกัดมากกว่า ได้แก่ กระเบื้อง เป็นต้น [8, 10]

## 2.5 การอัดรีด

การอัดรีด (Extrusion) เป็นหนึ่งในวิธีการขึ้นรูปที่อาศัยความเหนียวที่มีการค้นพบว่าถูกใช้งานในช่วงเริ่มศตวรรษที่ 17 หรือก่อนหน้านั้น โดยการนำเนื้อดินปั้นมาผ่านเข้าเครื่องอัดรีดให้ออกมาเป็นแท่งยาวซึ่งมีรูปร่างหน้าตัดตามที่ต้องการแล้วจึงตัดให้มีความยาวตามต้องการ การอัดรีดมีประโยชน์อย่างมากในการใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ลักษณะยาวที่มีรูปร่างหน้าตัดไม่ซับซ้อน ได้แก่ ท่อกลวง ท่อตัน หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการปริมาณการผลิตจำนวนมาก ได้แก่ อิฐ เป็นต้น การอัดรีดเป็นวิธีที่ถูกใช้มากในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปพลาสติก สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกจำเป็นต้องมีการเลือกใช้ส่วนผสมของหัวแม่แบบ (Die) ที่มีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม



ขนาดและรูปร่างของอนุภาคมีความสำคัญอย่างมากในการอัดรีด เนื้อดินปั้นที่มีขนาดอนุภาคภายในเล็กกว่า 1 ไมครอน จะสามารถทำให้การอัดรีดเกิดขึ้นได้ง่ายที่สุด อีกทั้งอนุภาคทั้งหมดต้องถูกเคลือบด้วยสารละลายตัวเชื่อมประสานในขั้นตอนการผสมให้ได้เนื้อดินปั้นที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถทำได้ยากเนื่องจากเนื้อดินปั้นจะมีความแน่นเสมือนกับการผสมแป้งให้เข้ากับน้ำผึ้ง ทำให้วัตถุดิบไม่เป็นเนื้อเดียวกันเกิดเป็นตำหนิในผลิตภัณฑ์หลังเผา จำเป็นต้องใช้เทคนิคการผสมเนื้อดินปั้น ได้แก่

- 1) เทคนิคบรูทฟอร์ซ (Brute force technique) ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของสูตรส่วนผสมสุดท้ายและผสมเข้ากันโดยใช้เครื่องผสมแรงสูง (High-shear mixer) เช่น pug mill
- 2) เทคนิคการเติมของเหลวส่วนเกิน เพื่อให้เนื้อดินปั้นผสมเข้ากันได้ดี จากนั้นทำการอบเพื่อกำจัดของเหลวส่วนเกินออกเพื่อให้ได้ความเหนียวแน่นที่ต้องการก่อนนำไปอัดรีด
- 3) เทคนิคการผสมผงของแข็งกับน้ำเพื่อให้ได้ของผสมที่มีความหนืดต่ำ จากนั้นเติมตัวเชื่อมประสานที่ละนิดจนได้ความหนืดที่สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยการอัดรีดได้

นอกจากนั้นเนื้อดินปั้นที่มีความเหมาะสมที่จะใช้สำหรับขึ้นรูปด้วยการอัดรีดควรมีลักษณะดังนี้

- 1) เนื้อดินปั้นจำเป็นต้องไหลตัวแบบพลาสติกเพื่อให้ได้รูปร่างของหน้าตัดผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ เนื้อดินปั้นยังต้องมีลักษณะการไหลตัวที่เหมาะสมเมื่อได้รับแรงดันเช่นเดียวกัน
- 2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องมีความแข็งแรงมากพอในการต้านทานการเสียรูป (Deformation) ภายใต้แรงโน้มถ่วงหรือความเค้นที่จะได้รับในขั้นตอนการเคลื่อนย้าย
- 3) เนื้อดินปั้นต้องไม่ติดกับเครื่องมือและมีผิวผลิตภัณฑ์ที่เรียบหลังการอัดรีดแล้ว
- 4) ของเหลวต้องไม่แยกออกจากเนื้อดินปั้นเมื่อได้รับความดันระหว่างอัดรีด [10]

ความเหนียวหรือสมบัติพลาสติกภายในเนื้อดินเกิดจากสองปัจจัย ได้แก่ พันธะระหว่างอนุภาคที่เกิดจากพื้นผิวของอนุภาคที่มีประจุและผลจากแรงตึงผิวเมื่อมีน้ำในระบบ ซึ่งมีผลมากในระบบที่มีอนุภาคขนาดเล็กและละเอียด ส่วนระบบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่สามารถพัฒนาให้เกิดความเหนียวได้โดยการเติมอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ในเซรามิกดั้งเดิมอาศัยเพียงดินและน้ำเพื่อให้เกิดความเหนียวของเนื้อดินปั้น เนื่องจากโครงสร้างของดินสามารถกักเก็บน้ำไว้ระหว่างชั้นได้ ในการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดผลิตภัณฑ์ เช่น อะลูมินา ที่ไม่ต้องการเติมดินจำเป็นต้องเติมสารละลายตัวเชื่อมประสานแทนการใช้น้ำอย่างเดียว เพื่อให้เคลือบแต่ละอนุภาคของแข็งเพื่อให้สามารถไหลตัวได้ขณะอัดรีด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และความหนืดของตัวเชื่อมประสานขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและความแข็งแรงของพันธะ

เคมี สารที่ถูกนำมาใช้มักมีความหนืดปานกลางไปจนถึงสูง เช่น เมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose, CMC) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) ดังแสดงในตารางที่ 2.4 [11]

เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดใช้ปริมาณของตัวเชื่อมประสานมากกว่าวิธีอื่นซึ่งต้องถูกกำจัดก่อนขั้นตอนการเพิ่มความหนาแน่นของการเผาผนึก ตัวเชื่อมประสานส่วนใหญ่จะหายไประหว่างเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidizing atmosphere) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเขม่าดำบนชิ้นงานที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ [12] ขั้นตอนนี้ควรเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300 - 1000 องศาเซลเซียส เพื่อให้ก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ออกจากตัวชิ้นงานอย่างแน่นอน ไม่เหลือตกค้างเป็นรูพรุนในผลิตภัณฑ์หลังการเผา



ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสูตรส่วนผสมที่ใช้สำหรับการอัดรีด [11]

Whiteware		Alumina	
Material	Concentration (vol %)	Material	Concentration (vol %)
Kaolin	16	Alumina	45–50
Ball clay	16	Water	40–45
Quartz	16	Ammonium polyacrylate (dispersant)	1–2
Feldspar	16	Methyl cellulose (binder)	5
Water	36	Glycerin (plasticizer)	1
CaCl <sub>2</sub> (flocculant)	<1	Ammonium stearate (lubricant)	1

ตารางที่ 2.4 ความหนืดของตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ [13]

Binders	Viscosity grade				
	Very low	Low	Medium	High	Very high
Gum arabic	•				
Lignosulfonates	•				
Lignin liquor	•				
Molasses	•				
Dextrins	•—•				
Poly(vinylpyrrolidone)	•—•				
Poly(vinyl alcohol)	•—•				
Polyethylene oxide		•—•			
Starch		•—•			
Acrylics		•—•			
Polyethylenimine PEI		•—•			
Methylcellulose		•—•			
Sodium carboxymethylcellulose			•—•		
Hydroxypropylmethylcellulose			•—•		
Hydroxyethylcellulose			•—•		
Sodium alginate				•—•	
Ammonium alginate				•—•	
Polyacrylamide				•—•	
Scleroglucan					•
Irish moss					•
Xanthan gum					•
Cationic galactomanan					•
Gum tragacanth					•
Locust bean gum					•
Gum karaya					•
Guar gum					•—•

## 2.6 พฤติกรรมการไหลตัวของเนื้อดินปั้น

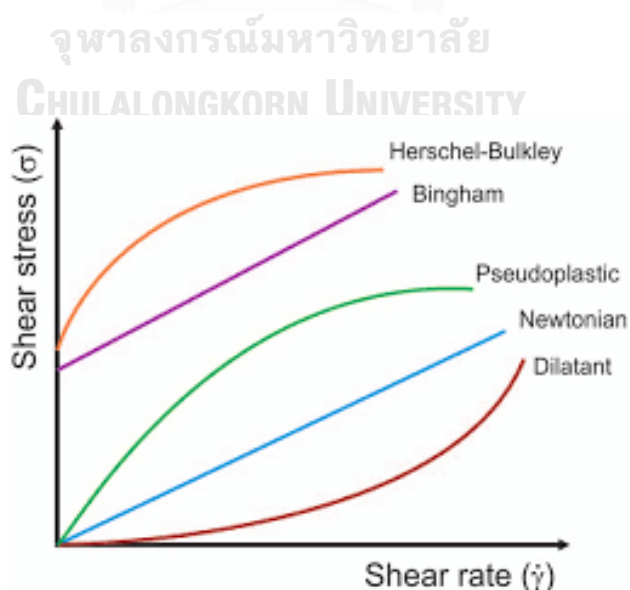
ของไหลสามารถแบ่งตามพฤติกรรมการไหลได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ คือ

- 1) ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) มีพฤติกรรมการไหลตามกฎของนิวตัน โดยความหนืดจะขึ้นกับปัจจัยอย่างเดียว คือ อุณหภูมิ เมื่อได้รับแรงเค้นเฉือนจะส่งผลให้อัตราเฉือนจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ได้แก่ น้ำ และ น้ำมัน เป็นต้น
- 2) ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-newtonian fluid) มีพฤติกรรมการไหลตามกฎของนิวตันโดยความหนืดจะไม่ได้ขึ้นกับปัจจัยอย่างเดียว คือ อุณหภูมิ อีกต่อไป เมื่อ

ได้รับแรงเค้นเฉือนจะส่งผลให้อัตราเฉือนจะเพิ่มแบบเส้นโค้ง สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

- ของไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) จะมีอัตราเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงเค้นเฉือน หรือมีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการกวน เรียกว่าสมบัติ shear-thinning เช่น สีลาเท็กซ์ เป็นต้น
- ของไหลแบบไดลาแทนต์ (Dilatant) จะมีอัตราเฉือนลดลงเมื่อเพิ่มแรงเค้นเฉือน หรือมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการกวน เรียกว่าสมบัติ shear-thickening เช่น น้ำผสมแป้งข้าวโพด เป็นต้น
- ของไหลแบบพลาสติก (Plastic fluid) ที่ความเค้นเฉือนต่ำจะไม่เกิดการไหลตัว จนกระทั่งมีแรงกระทำที่มากกว่าค่าความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) ของไหลจะไหลแบบซูโดพลาสติกในที่สุด เช่น ซอสมะเขือเทศ เป็นต้น
- ของไหลชนิดบิงแฮม (Bingham fluid) ที่ความเค้นเฉือนต่ำจะไม่เกิดการไหลตัว จนกระทั่งมีแรงกระทำที่มากกว่าค่าความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) ของไหลจะไหลแบบนิวโตเนียนในที่สุด โดยจะเริ่มมีการไหลตัวด้วยความหนืดที่คงที่ เช่น ยาสีฟัน เป็นต้น [14-16]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) แสดงดังรูปที่ 2.5



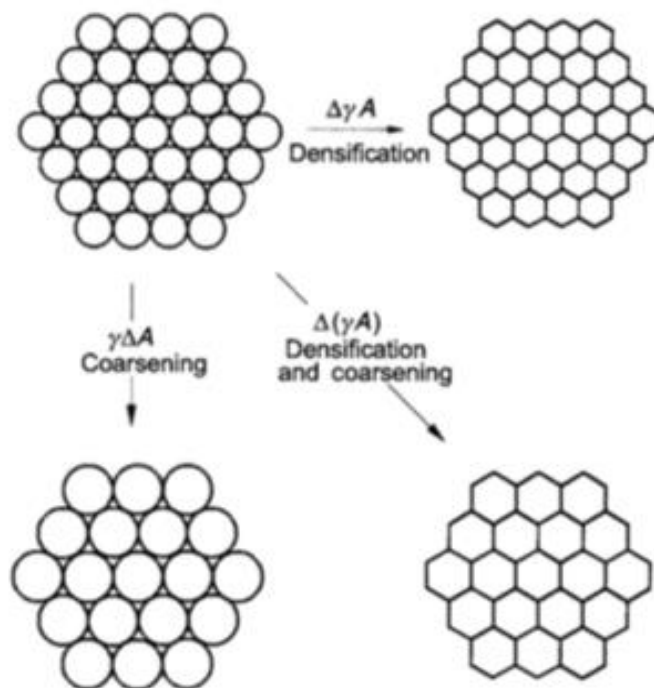
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) [17]

## 2.7 การเผาผนึก

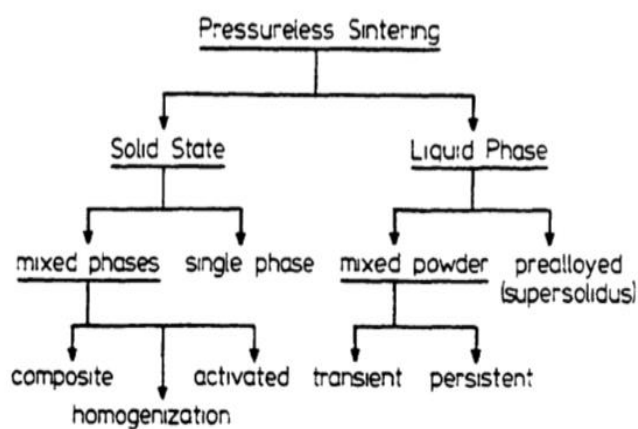
การเผาผนึก (Sintering) เป็นการเกิดการยึดติดกันของอนุภาคหลังผ่านการขึ้นรูปเป็นมวลของแข็งของวัสดุโดยอาศัยความร้อนหรือแรงดันที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ในการเผาผนึกทุกรูปแบบมีแรงขับที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6

- 1) การลดพื้นที่ผิวอนุภาคโดยการเกิดพันธะระหว่างอนุภาคที่สัมผัสกัน ส่งผลให้อนุภาคหลังการเผาผนึกมีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่า การเพิ่มขนาด (Coarsening)
- 2) การลดพลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็ง-ไอที่มีค่าสูง โดยการแทนที่ด้วยพื้นผิวระหว่างของแข็ง-ของแข็งที่มีพลังงานต่ำ ส่งผลให้เกิดขอบเกรน เรียกว่า การเพิ่มความหนาแน่น (Densification)

แรงดันภายนอกถูกใช้เพื่อพิจารณาการแบ่งเทคนิคการเผาผนึกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่ การเผาผนึกแบบปราศจากแรงดัน (Pressureless sintering) ที่มักใช้ในงานทั่วไป และการเผาผนึกแบบใช้แรงดัน (Pressure sintering) ที่ใช้กับชิ้นงานที่ต้องการความหนาแน่นสูงมากเป็นพิเศษ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [18, 19]



รูปที่ 2.6 แรงขับที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาผนึก [19]



รูปที่ 2.7 ชนิดของการเผาผนึก [20]

## 2.8 การเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว

การเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว (Liquid phase sintering) เป็นเทคนิคการเผาผนึกที่มีของเหลวเกิดขึ้นร่วมกับอนุภาคของแข็งในระบบที่อุณหภูมิเผาผนึก โดยของเหลวที่เกิดขึ้นช่วยในเพิ่มอัตราการเกิดพันธะระหว่างอนุภาค เนื่องจากพันธะระหว่างอนุภาคมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุนและสมบัติของชิ้นงาน ได้แก่ ความแข็งแรง ความเหนียว และความทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น เทคนิคนี้มักถูกใช้กับชิ้นงานที่เผาผนึกได้ยากด้วยวิธีอื่น เทคนิคนี้ยังมีความพิเศษคือการเพิ่มความหนาแน่น (Densification) เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วโดยปราศจากการใช้แรงดันจากภายนอกเนื่องจากมีแรงคาปิลลารีช่วยให้ของเหลวเคลือบเกรนของแข็ง การเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวเป็นเทคนิคที่ใช้ระยะเวลาในการเผาผนึกน้อยกว่าการเผาผนึกแบบมีเฟสของแข็ง (Solid-state sintering) เนื่องจากการแพร่ผ่านเฟสแก้วที่อยู่บริเวณขอบเกรนเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการแพร่ผ่านขอบเกรน [21, 22]

แนวทางที่ทำให้เกิดของเหลวในการเผาผนึก คือ การผสมผงวัสดุที่มีองค์ประกอบเคมีแตกต่างกันเข้าด้วยกันจะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างผงวัสดุที่ต่างกันเกิดเป็นของเหลวขึ้นในระบบระหว่างเผาผนึก ของเหลวที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากแค่องค์ประกอบเดียวหรือเกิดการรวมตัวเป็นของเหลวยูเทคติกก็ได้ ยิ่งไปกว่านั้นของเหลวที่เกิดขึ้นยังแบ่งได้เป็น

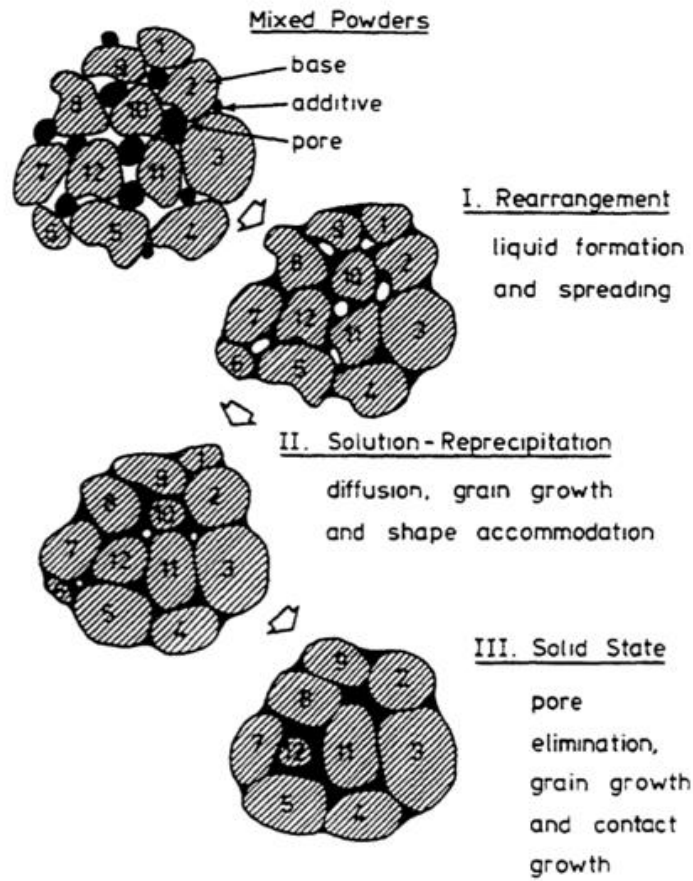
- 1) ของเหลวที่เกิดขึ้นถาวร (Persistent liquid) เป็นของเหลวที่เกิดขึ้นตลอดการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว และเมื่อเย็นตัวลงมักจะเกิดเป็นเฟสของแก้วบริเวณขอบเกรน

- 2) ของเหลวที่เกิดขึ้นชั่วคราว (Transient liquid) เป็นของเหลวที่เกิดขึ้นในการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวแล้วหายไปก่อนจบขั้นตอนการเผาผนึก

ปัจจัยที่ต้องคำนึงในการเลือกใช้เทคนิคการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว ได้แก่ ความสามารถในการละลายของวัสดุดิบในของเหลว การแทรกของของเหลวเข้าไประหว่างเกรนของแข็ง พลังงานพื้นผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลวที่ส่งผลต่อการเคลื่อนของของเหลวบนผิวของอนุภาค ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ยังขึ้นกับ ระยะเวลา อุณหภูมิ และบรรยากาศในการเผาผนึกอีกด้วย [20, 23]

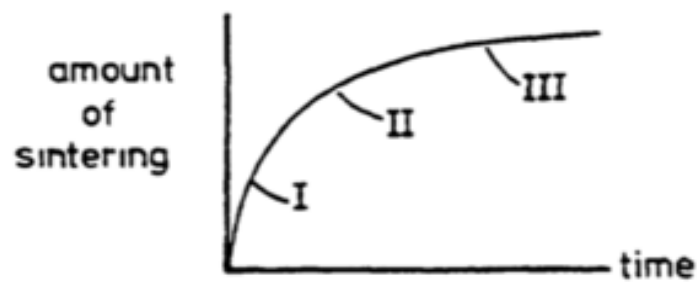
กระบวนการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวประกอบด้วยสามขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 ได้แก่

- 1) การจัดเรียงตัวของอนุภาค (Rearrangement) ของเหลวที่เกิดขึ้นภายในระบบจะถูกแรงคาปิลลารีดึงเข้าไปแทนที่รูพรุนของชิ้นงานและทำให้เกรนเกิดการจัดเรียงตัวได้ใกล้กันยิ่งขึ้น ของแข็งที่จะเกิดเป็นเฟสหลักจะละลายในเฟสของเหลวเพียงเล็กน้อย และสารตัวเติมควรที่จะหลอมเหลวก่อนถึงอุณหภูมิเผาผนึกเพื่อให้เกิดการจัดเรียงอนุภาคได้ ขั้นตอนนี้เกิด densification ได้รวดเร็วที่สุด
- 2) การละลายและตกตะกอน (Solution-Precipitation) อะตอมในบริเวณที่มีค่าศักย์เคมีสูง เช่น บริเวณผิวโค้ง หรือบริเวณที่มีแรงดันคาปิลลารีสูงเนื่องจากอนุภาคอยู่ใกล้กันมาก จะละลายเข้าไปในของเหลวและตกผลึกที่บริเวณที่มีค่าศักย์เคมีต่ำกว่า เช่น บริเวณที่มีพื้นผิวเรียบหรือบริเวณที่อะตอมอยู่ไกลหรือไม่มีการสัมผัสกันเรียกว่า "Contact flattening" เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนที่เป็นผลจากขั้นตอนการละลายและตกตะกอน ซึ่งคล้ายกับ grain boundary diffusion ในเทคนิคการเผาผนึกแบบมีเฟสของแข็ง (Solid - state sintering) แรงคาปิลลารีที่สูงขึ้นในบริเวณที่เกรนเข้าใกล้กันทำให้ของเหลวสามารถแผ่ไปตามขอบเกรนมากขึ้น
- 3) การเพิ่มความหนาแน่นขั้นสุดท้าย (Final Densification) ของเหลวจะเคลื่อนไปแทนที่รูพรุน ทำให้รูพรุนถูกกำจัดออกจากชิ้นงาน เกรนในชิ้นงานที่ได้ภายหลังการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวมักมีลักษณะเป็นเกรนที่มีขอบมนและเชื่อมติดกัน [19, 24]



รูปที่ 2.8 กระบวนการที่เกิดขึ้นในการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว [20]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

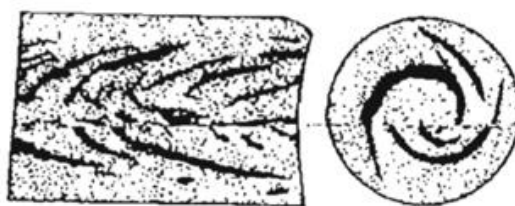


รูปที่ 2.9 ปริมาณในการเกิดแต่ละกระบวนการที่เกิดขึ้นในการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว [20]



## 2.9 ตำหนิที่เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์หลังเผา

- 1) การโค้งงอหรือบิดเบี้ยว (Warpage or distortion) เกิดขึ้นในขั้นตอนการอบและเผาชิ้นงาน หรือเกิดจากการออกแบบหัวแม่แบบที่ไม่สมดุลหรือความหนาแน่นของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างอัดรีด
- 2) การแยกชั้น (Lamination) เกิดจากการผสมเนื้อดินปั้นที่ไม่สม่ำเสมอจึงมีลักษณะของตำหนิ ดังรูปที่ 2.10
- 3) การเกิดรอยแตกที่ผิวชิ้นงาน (Tearing) จากการเสียดสีระหว่างเนื้อดินปั้นและหัวแม่แบบขณะออกจากเครื่องอัดรีด เกิดจากเนื้อดินปั้นที่แห้งเกินไป ดังรูปที่ 2.11
- 4) การแยกตัวระหว่างของเหลวและของแข็ง (Segregation) สามารถทำให้เกิดรอยแตกหรือการบิดเบี้ยวของชิ้นงานระหว่างการอัดรีดหรือการอบหรือเผา [11, 25]



รูปที่ 2.10 ตำหนิที่เกิดขึ้นจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อดินหลังผ่านการอัดรีด [25]

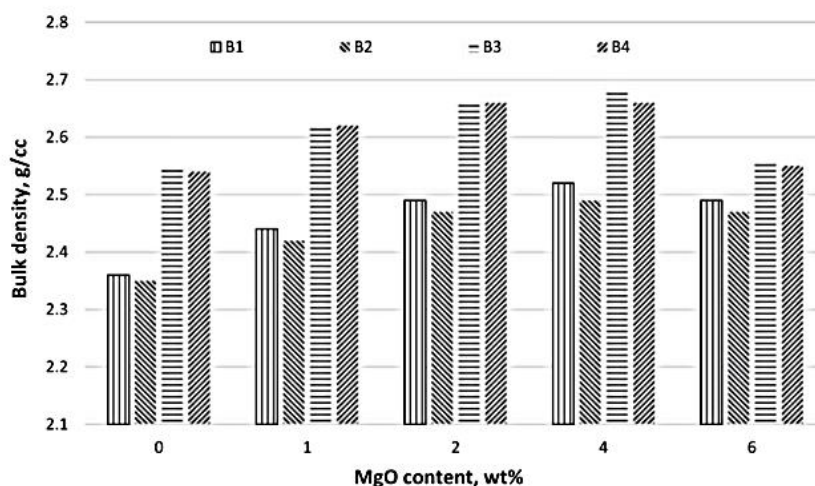


รูปที่ 2.11 ตำหนิที่เกิดบนผิวของชิ้นงาน [25]

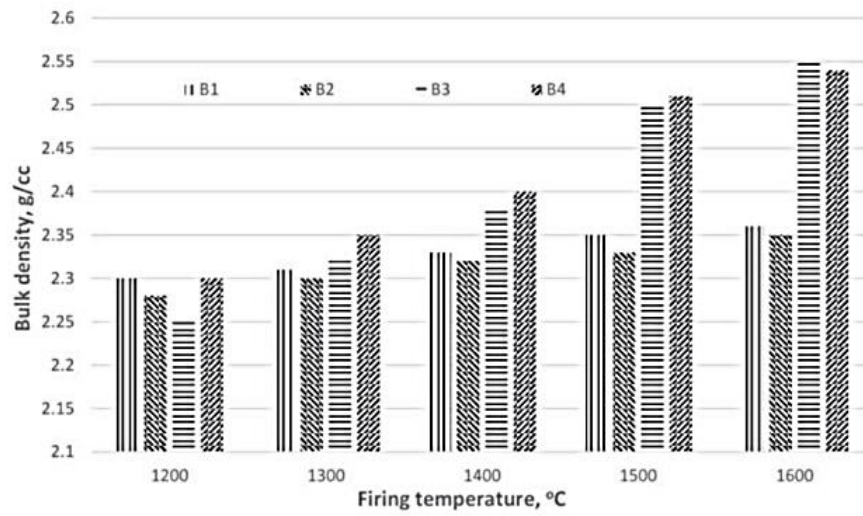
## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R. Sarkar และ M. Mallick [26] ได้ศึกษาผลของการเติมแมกนีเซียม 1 – 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสูตรส่วนผสมของมุลไลต์ (Mullite) ทั้งหมด 4 สูตร ได้แก่ สูตร B1 เป็นการผสมอะลูมินาชนิด white tabular กับซิลิกา สูตร B2 เป็นการผสมอะลูมินาชนิด technical กับซิลิกา สูตร B3 เป็นการผสมอะลูมินาชนิด technical กับควอตซ์ (Quartz) และสูตร B4 เป็นการผสมอะลูมินาชนิด white tabular กับควอตซ์ แล้วทำการเผาในช่วงอุณหภูมิ 1200 – 1600 องศาเซลเซียส พบการเกิดของเฟสมุลไลต์ในปริมาณน้อยได้ในทุกสูตรเมื่อเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 1600 องศาเซลเซียสจะพบเฟสมุลไลต์เป็นเฟสหลัก แม้ว่าจะยังไม่เกิดสมบูรณ์ทั้งหมดก็ตาม แสดงให้เห็นว่าการเติมแมกนีเซียมสามารถช่วยเร่งให้เกิดเฟสมุลไลต์ได้ดีกว่าสูตรที่ไม่เติมแมกนีเซียม

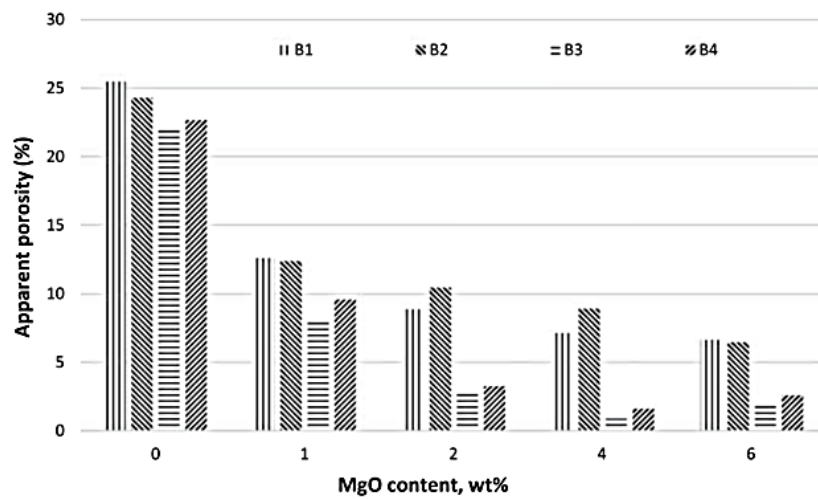
ในงานวิจัยยังพบอีกว่าความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการเผา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาชิ้นงานสูตร B3 และ B4 ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1500 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในผงควอตซ์ได้แก่ เหล็กออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และ โพแทสเซียมออกไซด์ เกิดเป็นการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวขึ้นซึ่งมีผลในการช่วยเพิ่มความหนาแน่น และการเติมแมกนีเซียมยังช่วยให้ความหนาแน่นของทุกสูตรสูงขึ้นได้อีกสัมพันธ์กับความพรุนตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.13 – 2.15



รูปที่ 2.12 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร B1 – B4 ที่มีการเติมแมกนีเซียม 0 – 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [26]



รูปที่ 2.13 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร B1 – B4 ที่อุณหภูมิ 1200 – 1600 องศาเซลเซียส [26]



รูปที่ 2.14 ความพรุนตัวของชิ้นงานสูตร B1 – B4 ที่มีการเติมแมกนีเซีย 0 – 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

[26]

T. Wasanapiarnpong และคณะ [27] ได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติของเซรามิกอะลูมินาที่มีความพรุนตัวสูงด้วยวิธีการอัดรีด โดยการผสมผงอะลูมินาและไททาเนีย 0 – 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เข้ากับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxy methyl cellulose, CMC) พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) น้ำมันกลีเซอริน (Glycerin oil) ปริมาณ 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามด้วยสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) ที่ได้จากการผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในน้ำกลั่น 23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ขนาดผสมสูตรส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกันจนได้เนื้อดินปั้นที่เป็นเนื้อเดียวกัน ตามด้วยการนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร แล้วผึ่งแห้งที่อุณหภูมิห้อง อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาขึ้นไฟ 1 ชั่วโมง

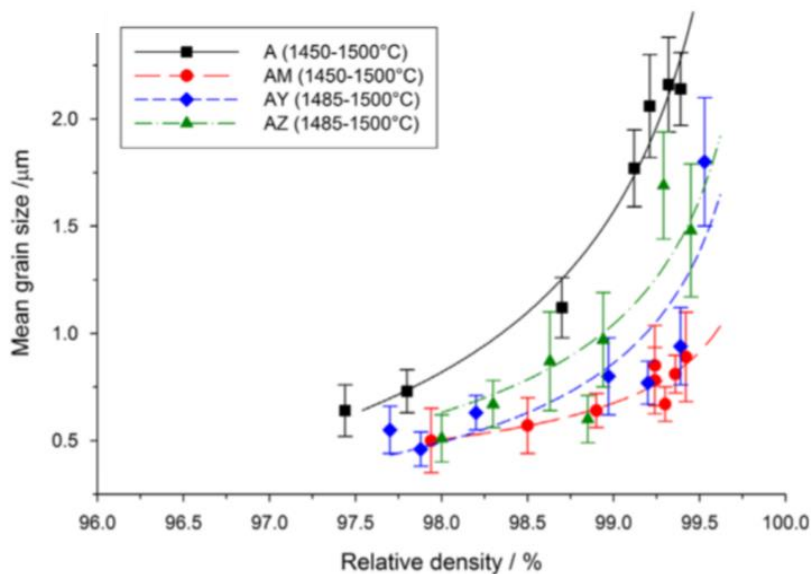
ชิ้นงานสูตร A<sub>2</sub> - A<sub>5</sub> ที่มีการเติมไททาเนียตั้งแต่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ มีค่าความแข็งแรงของชิ้นงานโดยรวมสูงกว่า 18 เมกะพาสคาล เทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีเติมการไททาเนียซึ่งมีค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเพียง 4.45 เมกะพาสคาลเท่านั้น เนื่องจากไททาเนียเป็นสารช่วยในการเผาผนึกที่ช่วยให้ความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้น และลดปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับการดูดซึมน้ำที่ลดลงและค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติของเซรามิกอะลูมินาที่มีความพรุนตัวสูงหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส [27]

Sample	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Linear shrinkage (%)	Water absorption (%)	Open porosity (%)	Three-point bending strength	
					(MPa)	SD.
A <sub>1</sub>	1.98	-	24.51	48.63	4.45	3.72
A <sub>2</sub>	2.16	2.85	20.71	44.83	23.22	2.46
A <sub>3</sub>	2.25	3.86	18.93	42.57	18.11	2.54
A <sub>4</sub>	2.28	4.88	18.24	41.56	20.04	3.79
A <sub>5</sub>	2.32	5.67	17.19	39.94	23.73	3.49

K. Bodišová และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของสารยับยั้งการเติบโตของเกรน (Grain growth inhibitor) ได้แก่ แมกนีเซีย เซอร์โคเนีย และอิทเทรีย ในชิ้นงานอะลูมินา โดยเตรียมสูตรส่วนผสมได้แก่ สูตร A ประกอบด้วยอะลูมินาเพียงอย่างเดียว สูตร AM ประกอบด้วยอะลูมินาและแมกนีเซีย สูตร AY ประกอบด้วยอะลูมินาและอิทเทรีย และสูตร AZ ประกอบด้วยอะลูมินา

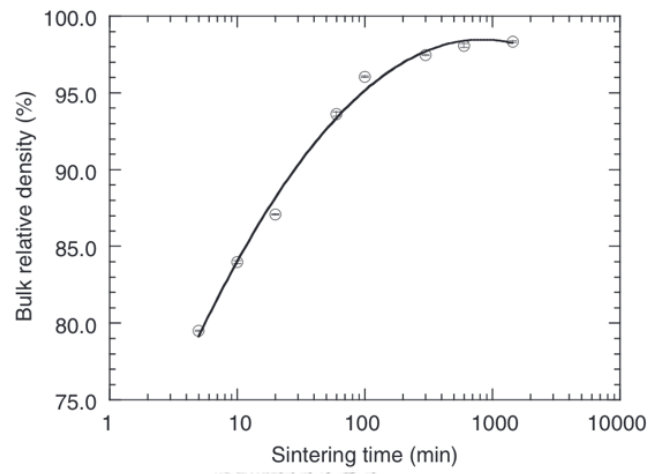
และเซอร์โคเนีย จากนั้นขึ้นรูปด้วยการอัดแบบทิศทางเดียวแล้วจึงเผาที่อุณหภูมิ 1300 – 1500 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยพบว่าแมกนีเซียเป็นสารยับยั้งการเติบโตของเกรนที่มีประสิทธิภาพที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่สนใจ โดยมีขนาดเกรนอยู่ในช่วง 0.7 – 0.9 ไมครอน ในขณะที่ความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่า 99.3 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฉลี่ยและความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร A AM AY และ AZ เมื่อทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิในช่วง 1450 – 1500 องศาเซลเซียส [28]

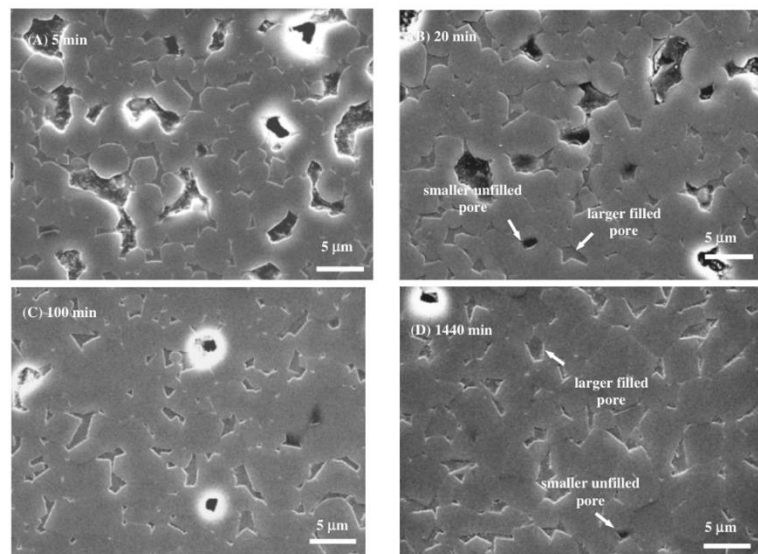
W. Dong และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาผลของการเผาผนึกชิ้นงานอะลูมินาที่มีการเติมแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยทำการขึ้นรูปด้วยการอัดผงวัตถุดิบด้วยแรงดัน 85 เมกะพาสคาล ได้เป็นชิ้นงานรูปทรงคล้ายเหรียญก่อนที่จะนำไปอัดรอบทิศทางด้วยแรงดัน 350 เมกะพาสคาล ตามด้วยการเผาไล่สารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเผาผนึกที่ 1600 องศาเซลเซียส

ผลงานวิจัยพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการเผาผนึก 5 20 100 และ 1440 นาทีตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยที่เกรนในชิ้นงานค่อย ๆ ขยับเข้ามาชิดกันมากยิ่งขึ้น จำนวนรูพรุนจะลดลงเรื่อย ๆ จนเหลือเพียงรูพรุนขนาดเล็กไว้ ดังรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20 ขนาดของเกรนโตน้อยกว่า 16 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าแมกนีเซียเป็นสารยับยั้งการโตของเกรนที่ได้ผลสำหรับการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวของอะลูมินา ซึ่งงานวิจัยของ J. G. J Peelen [30] พบว่าเมื่อเติมแมกนีเซียในอะลูมินาในช่วง 300-3000 ppm และเผาผนึกเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1630 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นของชิ้นงานใกล้เคียงกันอย่างมาก



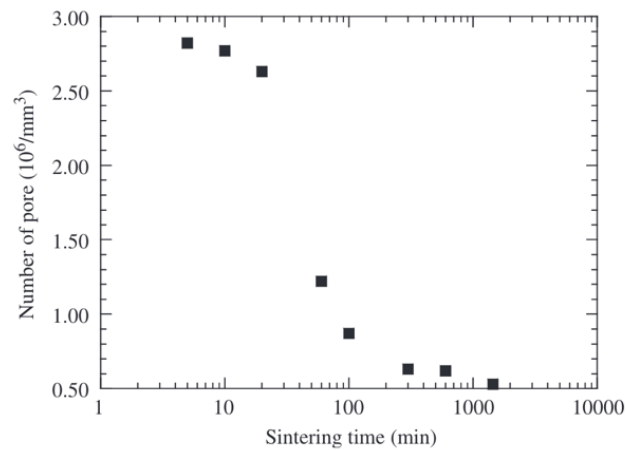
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาผนึกชิ้นงานอะลูมินา

[29]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงานอะลูมินาหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ a) 5 นาที b) 20 นาที c)

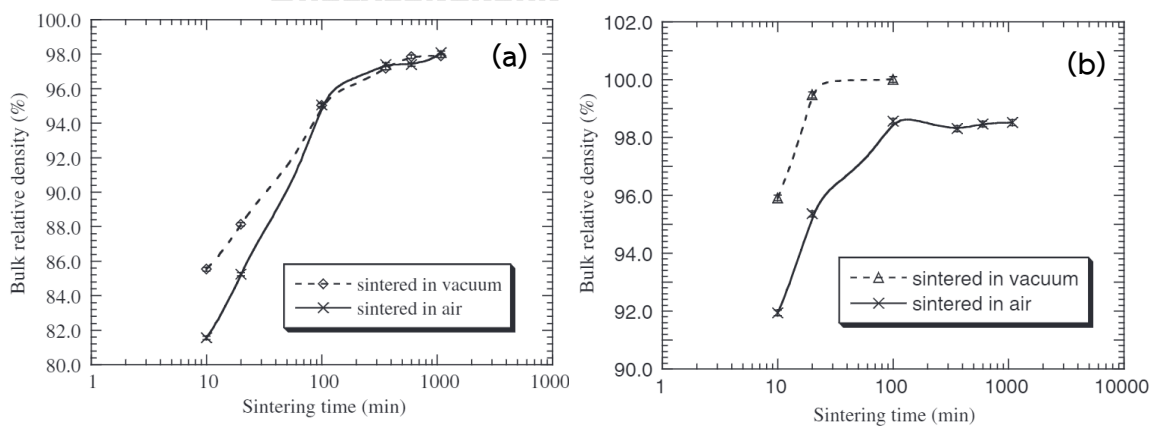
100 นาที และ d) 1440 นาที [29]



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรูพรุนในชิ้นงานอะลูมินาและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาผนึก

งานวิจัยของ W. Dong และคณะ [31] ยังพบว่าเมื่อเติมแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตด้วยปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานสูงขึ้นจาก 97.5 เป็น 98.5 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ดังในแสดงในรูปที่ 2.19 เนื่องจากแอลคาไลออกไซด์ปฏิบัติตัวเป็น Network modifier ในการช่วยลดความหนืดของเฟสแก้วที่เกิดขึ้นโดยการทำลายโครงสร้างของซิลิกา [32]

ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะใช้แอลคาไลซิลิเกต 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกตเป็นสารตัวเติมในอะลูมินาเกิดเป็นเฟสของเหลวระหว่างการเผาผนึก และเติมแมกนีเซียมคาร์บอเนตเพื่อช่วยในการยับยั้งการโตของเกรน เพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผา โดยทำการศึกษาและปรับปรุงสูตรส่วนผสมให้มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการอัดรีด



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาผนึก เมื่อใช้แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตปริมาณ (a) 10 และ (b) 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร [31]



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมต่อสมบัติต่างๆ ของเซรามิกอะลูมินาโดยทำการขึ้นรูปเซรามิกอะลูมินาด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว (Uniaxial pressing) และวิธีการอัดรีด (Extrusion) โดยเตรียมเนื้อดินปั้นด้วยผงอะลูมินา สารละลายตัวเชื่อมประสาน และแอลคาไลซิลิเกตซึ่งใช้เป็นสารตัวเติมในการช่วยเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว

#### 3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมเนื้อดินปั้นของอะลูมินาเซรามิกแสดงดังตารางที่ 3.1 ได้แก่ ผงอะลูมินาขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.5 ไมครอน (Alteo Co., Ltd., France) สารละลายแอลคาไลซิลิเกตใช้เป็นสารช่วยในการเกิดของเหลวระหว่างการเผาผนึก ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (C.Thai Chemicals Co., Ltd., Thailand) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติกายภาพ แสดงดังตารางที่ 3.2 และสารละลายโพแทสเซียมซิลิเกต (C.Thai Chemicals Co., Ltd., Thailand) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติกายภาพ แสดงดังตารางที่ 3.3 ผงแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Ajax Finechem Pty Ltd, Australia) ใช้เป็นสารยับยั้งการเติบโตของเกรนมีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติกายภาพ แสดงดังตารางที่ 3.4 และสารละลายตัวเชื่อมประสานในการให้ความเหนียวแก่เนื้อดินปั้นเพื่อให้มีความเหนียวที่เหมาะสมต่อการนำไปขึ้นรูป



ตารางที่ 3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	คุณภาพ	บริษัทผู้จัดจำหน่าย
อะลูมินา	2.5 ไมครอน	Alteo Co., Ltd., France
โซเดียมซิลิเกต	-	C.Thai Chemicals Co., Ltd., Thailand
โพแทสเซียมซิลิเกต	-	C.Thai Chemicals Co., Ltd., Thailand
แมกนีเซียมคาร์บอเนต	-	Ajax Finechem Pty Ltd, Australia
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)	-	Krungthepchemi Co., Ltd., Thailand
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	น้ำหนักโมเลกุล 400-600	Wako Pure Chemicals Co., Ltd., Japan
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)	น้ำหนักโมเลกุล 1500	Wako Pure Chemicals Co., Ltd., Japan
น้ำมันกลีเซอริน	ความหนาแน่น 1.2570 g/mL	Ajax Finechem Pty Ltd, Australia

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (C.Thai Chemicals Co., Ltd., Thailand)

องค์ประกอบของสารละลายโซเดียมซิลิเกต	องค์ประกอบทางเคมี (%)
Na <sub>2</sub> O	10.10
SiO <sub>2</sub>	31.12
H <sub>2</sub> O	58.78

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของสารละลายโพแทสเซียมซิลิเกต (C.Thai Chemicals Co., Ltd., Thailand)

องค์ประกอบของสารละลายโพแทสเซียมซิลิเกต	องค์ประกอบทางเคมี (%)
K <sub>2</sub> O	12.98
SiO <sub>2</sub>	27.03
H <sub>2</sub> O	59.99

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบของผงแมกนีเซียมคาร์บอเนต (UNILAB®, Ajax Finechem Pty Ltd, Australia)

องค์ประกอบของผงแมกนีเซียมคาร์บอเนต	องค์ประกอบทางเคมี (%)
MgO	40-45
Insol. (in CH <sub>3</sub> COOH)	0.05
Sol (in H <sub>2</sub> O)	1.0
Cl	0.07
SO <sub>4</sub>	0.3
As	0.0002
Ca	0.750
Fe	0.040
Pb	0.002

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบและหน้าที่ของสารละลายตัวเชื่อมประสาน [33]

องค์ประกอบของสารละลาย ตัวเชื่อมประสาน	หน้าที่
CMC	Binder
PVA	Co-binder
PEG	Plasticizer
Glycerin oil	Lubricant
Water	Medium

### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ซ้อนตักสาร
- 2) ปีกเกอร์
- 3) ชามผสม
- 4) เครื่องปั่นผสม
- 5) ถาดสแตนเลส
- 6) เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง
- 7) ถังมือยาง
- 8) เครื่องอัดไฮดรอลิกแบบทิศทางเดียว ยี่ห้อ NPA รุ่น NT-100H
- 9) ตู้อบ
- 10) เต้าเผาไฟฟ้า

### 3.2 การเตรียมเนื้อดินปั้นอะลูมินา

สูตรและการลำดับสารที่เติมส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3.6 โดยที่ปริมาณขององค์ประกอบในแต่ละสูตรของสารละลายตัวเชื่อมประสาน แสดงดังตารางที่ 3.7 และตารางที่ 3.8 และสูตรของเนื้อดินปั้น แสดงดังตารางที่ 3.9 สามารถทำการผสมเป็นเนื้อดินปั้นได้ตามขั้นตอนดังนี้

ชิ้นงานกลุ่ม A แสดงในตารางที่ 3.6 มีวิธีการผสมดังนี้

- 1) เติมสารละลายตัวเชื่อมประสานในตารางที่ 3.7 ลงในภาชนะ
- 2) เติมสารละลายแอลคาไลซิลิเกตแล้วคนผสมให้กระจายตัวในสารละลายตัวเชื่อมประสาน
- 3) เติมผงแมกนีเซียมคาร์บอเนตแล้วคนผสมเพื่อให้สามารถกระจายตัวเข้าไปในส่วนผสมข้างต้นได้ทั่วถึง
- 4) เติมผงอะลูมินาในส่วนผสมข้างต้นที่ละน้อยแล้วนวดผสมให้ได้เป็นเนื้อดินปั้นที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน

ชิ้นงานกลุ่ม B แสดงในตารางที่ 3.6 มีวิธีการผสมดังนี้

- 1) เติมสารละลายตัวเชื่อมประสานในตารางที่ 3.7 ลงในภาชนะ
- 2) เติมผงแมกนีเซียมคาร์บอเนตแล้วคนผสมเพื่อให้สามารถกระจายตัวเข้าไปในส่วนผสมข้างต้นได้ทั่วถึง
- 3) เติมสารละลายแอลคาไลซิลิเกตแล้วคนผสมให้กระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น
- 4) เติมผงอะลูมินาในส่วนผสมข้างต้นที่ละน้อยแล้วนวดผสมให้ได้เป็นเนื้อดินปั้นที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน

ชิ้นงานกลุ่ม C แสดงในตารางที่ 3.6 มีวิธีการผสมดังนี้

- 1) เติมสารละลายตัวเชื่อมประสานในตารางที่ 3.8 ลงในภาชนะ
- 2) เติมผงแมกนีเซียมคาร์บอเนตแล้วคนผสมเพื่อให้สามารถกระจายตัวเข้าไปในส่วนผสมข้างต้นได้ทั่วถึง
- 3) เติมสารละลายแอลคาไลซิลิเกตแล้วคนผสมให้กระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น
- 4) เติมผงอะลูมินาในส่วนผสมข้างต้นที่ละน้อยแล้วนวดผสมให้ได้เป็นเนื้อดินปั้นที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน

ชิ้นงานกลุ่ม D แสดงในตารางที่ 3.6 มีวิธีการผสมดังนี้

- 1) เติมสารละลายตัวเชื่อมประสาน ดังแสดงในตารางที่ 3.8 ที่นำไปให้ความร้อนต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนการผสมลงในภาชนะ
- 2) เติมผงแมกนีเซียมคาร์บอเนตแล้วคนผสมเพื่อให้สามารถกระจายตัวเข้าไปในส่วนผสมข้างต้นได้ทั่วถึง
- 3) เติมสารละลายแอลคาไลซิลิเกตแล้วคนผสมให้กระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น
- 4) เติมผงอะลูมินาในส่วนผสมข้างต้นที่ละน้อยแล้วนวดผสมให้ได้เป็นเนื้อดินปั้นที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน

โดยสามารถอธิบายถึงสาเหตุในการปรับปรุงสูตรส่วนผสมของเนื้อดินปั้นดังนี้

- 1) ชิ้นงานกลุ่ม A: เริ่มจากการเติมสารละลายตัวเชื่อมประสาน สารละลายแอลคาไลซิลิเกต ผงแมกนีเซียมคาร์บอเนต และอะลูมินา ตามลำดับ ซึ่งเกิดปัญหาขึ้น เนื่องจากการจับตัวกันระหว่างสารละลายตัวเชื่อมประสานและสารละลายแอลคาไลซิลิเกตเกิดเป็นเจล ทำให้ผงแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่ใส่ตามหลังในปริมาณน้อยมากไม่สามารถที่จะกระจายเข้าไปในเจลได้
- 2) ชิ้นงานกลุ่ม B: ได้ทำการปรับเปลี่ยนลำดับการเติมสารเริ่มจากการเติมสารละลายตัวเชื่อมประสาน ผงแมกนีเซียมคาร์บอเนต สารละลายแอลคาไลซิลิเกตและอะลูมินา ตามลำดับ เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดกับชิ้นงานกลุ่ม A ทำให้ผงแมกนีเซียมคาร์บอเนตสามารถกระจายเข้าไปในเจลดังกล่าวได้สม่ำเสมอยิ่งขึ้น แต่ในขั้นตอนการขึ้นรูปพบว่ามีของเหลวส่วนเกินถูกรีดออกจากชิ้นงาน
- 3) ชิ้นงานกลุ่ม C: ได้ทำการลดน้ำในสารละลายตัวเชื่อมประสานให้มีความเหมาะสมกับปริมาณของสารละลายแอลคาไลซิลิเกตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมในการช่วยเผาผลาญแบบมีเฟสของเหลวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารละลาย ดังนั้นปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นในแต่ละสูตรส่วนผสมจะส่งผลให้ปริมาณของเหลวในเนื้อดินปั้นเพิ่มมากขึ้น จำเป็นต้องมีการปรับลดน้ำในตัวเชื่อมประสานแทนโดยกำหนดให้มีปริมาณสารอินทรีย์ที่ให้ความเหนียวมีอัตราส่วนคงเดิม ความหนืดของสารละลายตัวเชื่อมประสานจึงเพิ่มมากขึ้นในสูตรที่มีแอลคาไลซิลิเกตเพิ่มขึ้น และมีความหนืดมากจนไม่สามารถที่จะเตรียมได้ในสูตรที่ใช้กับแอลคาไลซิลิเกต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

- 4) ชิ้นงานกลุ่ม D: ได้ทำการให้ความร้อนแก่สารละลายตัวเชื่อมประสานที่ใช้กับชิ้นงานกลุ่ม C ในขั้นตอนการผสม เพื่อทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่และทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับน้ำด้วยการละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ส่งผลให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายในน้ำได้ดียิ่งขึ้น [34] ความหนืดของสารละลายตัวเชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้นในสูตรที่มีแอลคาไลซิลิเกตเพิ่มขึ้น และมีความหนืดมากจนไม่สามารถที่จะเตรียมได้ในสูตรที่ใช้กับแอลคาไลซิลิเกต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับชิ้นงานกลุ่ม C

ตารางที่ 3.6 ลำดับการเติมสารสำหรับการเตรียมเนื้อดินปั้น

กลุ่ม	ลำดับการเติมสาร
A	(Binder solution + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ) + MgCO <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
B	(Binder solution + MgCO <sub>3</sub> ) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
C	(Adjusted binder solution + MgCO <sub>3</sub> ) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
D	(Heated adjusted binder solution + MgCO <sub>3</sub> ) + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

ตารางที่ 3.7 สูตรของสารละลายตัวเชื่อมประสานที่ใช้กับเนื้อดินปั้นกลุ่ม A และ B

Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , wt%	CMC, g	PVA, g	PEG, g	Glycerin oil, g	Water, g
0 5 10 15 และ 20	23.33	3.33	1.67	3.33	500.00

ตารางที่ 3.8 สูตรของสารละลายตัวเชื่อมประสานที่ปรับตามปริมาณสารละลายแอลคาไลซิลิเกตที่ใช้กับเนื้อดินปั้นกลุ่ม C และ D

Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , wt%	CMC, g	PVA, g	PEG, g	Glycerin oil, g	Water, g
0	23.33	3.33	1.67	3.33	500.00
5	23.33	3.33	1.67	3.33	500.00
10	29.64	4.23	2.12	4.23	500.00
15	40.61	5.80	2.90	5.80	500.00
20	80.18	11.45	5.73	11.45	500.00

ตารางที่ 3.9 สูตรของเนื้อดินปั้น

สูตร		MgCO <sub>3</sub> , wt%	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , wt%	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , g	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , g	MgCO <sub>3</sub> , g	Binder solution, g
Mg0	Na/K0	0	0	-	125	-	30
	Na/K5		5	6.25	118.75	-	30
	Na/K10		10	12.5	112.5	-	25
	Na/K15		15	18.75	106.25	-	20
	Na/K20		20	25	100	-	10
Mg0.5	Na/K0	0.5	0	-	125.00	0.63	30
	Na/K5		5	6.25	118.75	0.59	30
	Na/K10		10	12.50	112.50	0.56	25
	Na/K15		15	18.75	106.25	0.53	20
	Na/K20		20	25.00	100.00	0.50	10
Mg1	Na/K0	1	0	-	125.00	1.25	30
	Na/K5		5	6.25	118.75	1.19	30
	Na/K10		10	12.50	112.50	1.13	25
	Na/K15		15	18.75	106.25	1.06	20
	Na/K20		20	25.00	100.00	1.00	10



### 3.3 การขึ้นรูป

เนื่องจากการอัดรีดเป็นวิธีการขึ้นรูปที่จำเป็นต้องใช้ปริมาณเนื้อดินปั้นค่อนข้างมาก ในงานวิจัยนี้จึงทดลองปรับสูตรส่วนผสมของเนื้อดินปั้นให้มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปแบบใช้ความเหนียวโดยใช้การขึ้นรูปด้วยการอัดแบบทิศทางเดียวในขั้นต้น ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปที่สะดวก รวดเร็ว และใช้ปริมาณเนื้อดินปั้นน้อย เมื่อได้สูตรส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่เหมาะสมแล้วจึงนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เนื้อดินปั้นค่อนข้างมาก เหมาะแก่การผลิตชิ้นงานจำนวนมากในการทำงานหนึ่งครั้ง

#### 3.3.1 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว

นำเนื้อดินปั้นอะลูมินาที่เตรียมได้มาทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบทิศทางเดียวด้วยความดันประมาณ 5 เมกะพาสคาล ให้ได้ชิ้นงานที่เป็นรูปทรงคล้ายเหรียญที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการอัดแบบทิศทางเดียว

#### 3.3.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด

นำเนื้อดินปั้นอะลูมินาที่เตรียมได้มาทำการอัดรีดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Extrusion) ให้ได้ชิ้นงานที่เป็นแท่งทรงกระบอกตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรแล้วตัดเป็นท่อนให้มีความยาว 10 เซนติเมตร

จากนั้นนำแท่งชิ้นงานไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปอบต่อที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1600

องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และเผาเย็นไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ชิ้นงานหลังการเผาจะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ เพื่อหาสูตรส่วนผสมที่สามารถให้สมบัติของชิ้นงานสอดคล้องกับวัตถุประสงค์งานวิจัยได้



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด

### 3.4 การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

#### 3.4.1 การหดตัวของชิ้นงานหลังเผา (Firing shrinkage)

การหาค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาสามารถวิเคราะห์ได้โดยการวัดขนาดความยาวของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผา สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.1

$$\text{Total shrinkage (\%)} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100 \quad (3.1)$$

$L_1 =$  ความยาวของชิ้นงานก่อนเผา (เซนติเมตร)

$L_2 =$  ความยาวของชิ้นงานหลังเผา (เซนติเมตร)

### 3.4.2 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

ศึกษาการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีแทนที่น้ำหรือ Archimedes Method โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้ง ( $W_1$ ) แล้วนำชิ้นงานไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง จากนั้นแช่ชิ้นงานทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักในน้ำ ( $W_2$ ) แล้วใช้ฟองน้ำที่ชุ่มน้ำหมาด ๆ ซับน้ำบริเวณผิวชิ้นงานแล้วนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนัก อิ่มน้ำ ( $W_3$ ) โดยค่าการดูดซึมน้ำ สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 3.2

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.2)$$

$W_1 =$  น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (กรัม)

$W_2 =$  น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งในน้ำ (กรัม)

$W_3 =$  น้ำหนักของชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำและซับน้ำที่ผิวออกไป (กรัม)

### 3.4.3 ความพรุนตัว (Apparent porosity)

ศึกษาความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผาสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีแทนที่น้ำหรือ Archimedes Method เช่นเดียวกับการหาค่าดูดซึมน้ำ (ในหัวข้อ 3.4.2) จากนั้นคำนวณหาค่าความพรุนตัวได้ดังสมการที่ 3.3

$$\text{Apparent porosity (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (3.3)$$

$W_1 =$  น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (กรัม)

$W_2 =$  น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งในน้ำ (กรัม)

$$W_3 = \text{น้ำหนักของชิ้นงานที่อ้อมตัวด้วยน้ำและซับน้ำที่ผิวออกไป (กรัม)}$$

#### 3.4.4 ความหนาแน่น (Bulk density)

ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีแทนที่น้ำหรือ Archimedes Method เช่นเดียวกับการหาค่าดูดซึมน้ำ (ในหัวข้อ 3.4.2) โดยค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 3.4

$$\text{Bulk density (g/cm}^3\text{)} = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (3.4)$$

$$W_1 = \text{น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (กรัม)}$$

$$W_2 = \text{น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งในน้ำ (กรัม)}$$

$$W_3 = \text{น้ำหนักของชิ้นงานที่อ้อมตัวด้วยน้ำและซับน้ำที่ผิวออกไป (กรัม)}$$

#### 3.4.5 ความแข็งแรง (Flexural strength)

ทำการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานด้วยเทคนิค three-point bending หรือ Modulus of Rupture (MOR) ด้วยเครื่อง tensile / compression strength tester ยี่ห้อ Hung Ta รุ่น HT-8116 โดยให้ระยะห่างของลิ้ม ที่รองรับชิ้นงานมีขนาด 8 เซนติเมตร ให้แรงกดแก่ชิ้นงาน ทรงกระบอกตันจนแตกหัก จากนั้นทำการบันทึกค่าแรงกดที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานแตกหัก เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งชิ้นงาน และนำไปแทนค่าคำนวณหาความแข็งแรงของชิ้นงานได้ดังสมการที่ 3.5

$$\text{MOR (MPa)} = \frac{8PL}{\pi d^3} \times 0.098 \text{ (MPa)} \quad (3.5)$$

$$P = \text{ค่าน้ำหนักแรงกด (กิโลกรัม)}$$

$$L = \text{ระยะห่างของลิ้มที่รองรับแท่งทดสอบ (เซนติเมตร)}$$

$$d = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทดสอบ (เซนติเมตร)}$$

#### 3.4.6 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

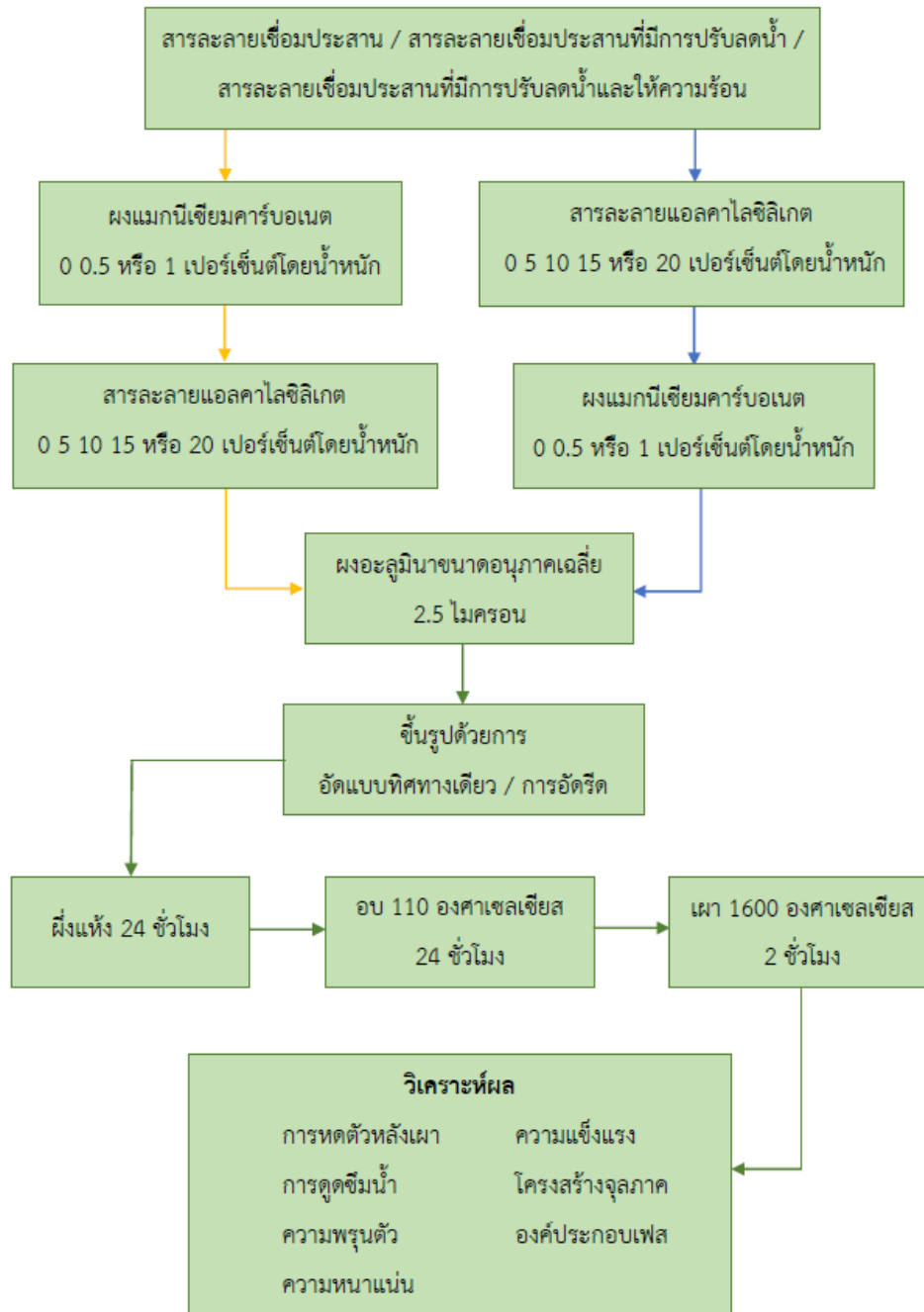
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6480LV เพื่อดูบริเวณพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากการหัก (fracture surface) และศึกษาลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาค และพื้นผิวที่ผ่านการขัดเรียบโดยการขัดด้วยกระดาษขัด 400 800 และ 1200 ตามลำดับ ตามด้วยผงเพชร 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่ในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid, HF) เป็นเวลา 1 นาที เพื่อละลายขอบเกรนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะและขนาดของเกรนและรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

#### 3.4.7 องค์ประกอบเฟส (Phase composition)

ศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานหลังเผาสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) โดยใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ ในงานวิจัยนี้ใช้ Cu-K $\alpha$  radiation ด้วยมุม  $2\theta$  ตั้งแต่ 5 ถึง 80 องศา



## 3.5 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

#### 4.1 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบทิศทางเดียว

เนื่องจากการอัดรีดเป็นวิธีการขึ้นรูปที่จำเป็นต้องใช้เนื้อดินปั้นในปริมาณมาก งานวิจัยนี้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการอัดเนื้อดินปั้นด้วยแรงทิศทางเดียวซึ่งอาศัยความเหนียวของเนื้อดินปั้นคล้ายคลึงกับการอัดรีดก่อนในขั้นต้นจนได้สูตรเนื้อดินปั้นที่ทำให้ชิ้นงานมีสมบัติตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ จากนั้นจึงนำสูตรเนื้อดินปั้นดังกล่าวไปขึ้นรูปด้วยการอัดรีดต่อเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานแบบแท่งกลมตันเพื่อศึกษาถึงความแข็งแรง ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.2

ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบทิศทางเดียวในงานวิจัยนี้แสดงผลที่ได้จากชิ้นงานกลุ่ม A B และ C แต่ไม่ปรากฏผลสำหรับชิ้นงานสำหรับกลุ่ม C สูตรที่มีแอลคาไลซิลิเกต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากไม่สามารถเตรียมสารละลายตัวเชื่อมประสานที่มีความหนืดมากเช่นนั้นได้ ดังที่กล่าวไปหัวข้อที่ 3.2

##### 4.1.1 การหดตัวหลังเผา

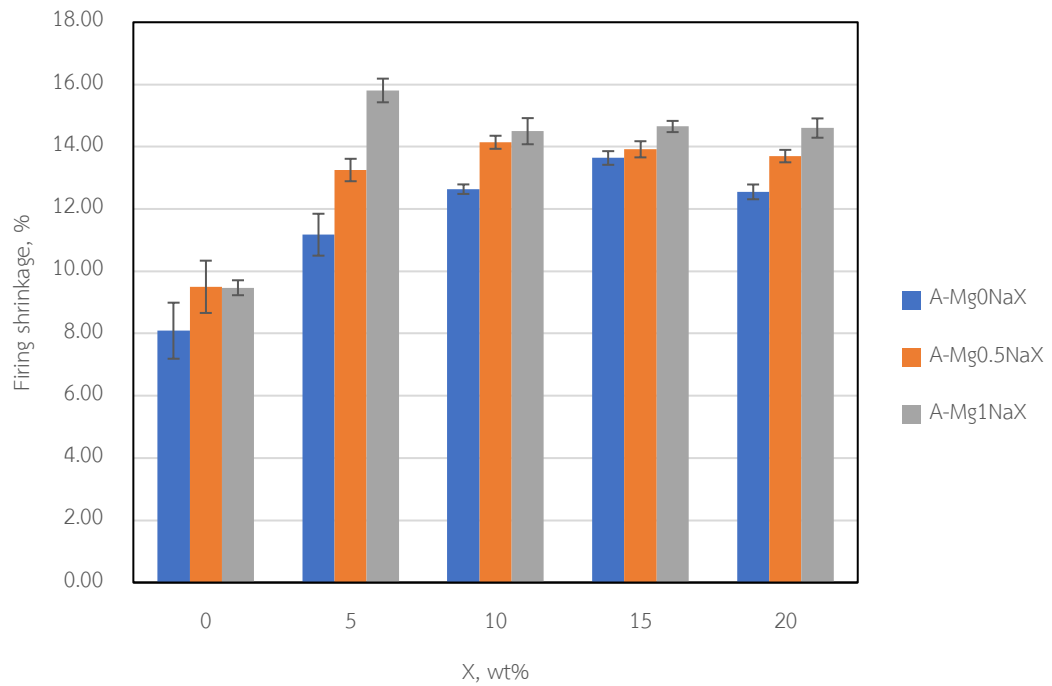
ผลของการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังการเผาพบว่าปริมาณของแอลคาไลซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานหดตัวระหว่างการเผาเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่เติมโซเดียมซิลิเกตมีการหดตัวโดยรวมมากกว่าชิ้นงานที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตทั้งในกลุ่ม A B และ C ( $X =$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแอลคาไลซิลิเกต) เนื่องจากของเหลวที่เกิดขึ้นจากการเติมแอลคาไลซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นส่งเสริมให้อนุภาคสามารถจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการหดตัวของชิ้นงาน

ชิ้นงานที่เติมโซเดียมซิลิเกตมีแนวโน้มที่จะหดตัวมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของโซเดียมซิลิเกต จนเมื่อถึงค่าหนึ่งจะเริ่มมีการหดตัวลดลง ดังแสดงในชิ้นงานกลุ่ม A ในรูปที่ 4.1 ชิ้นงานกลุ่ม B ในรูปที่ 4.3 และ ชิ้นงานกลุ่ม C ในรูปที่ 4.5 อีกทั้งปริมาณการของแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานหดตัวเพิ่มขึ้น ยกเว้นในชิ้นงานกลุ่ม B สูตร  $Mg_1NaX$  ที่มีค่าการหดตัวโดยรวมน้อยกว่าชิ้นงานกลุ่ม B สูตร  $Mg_{0.5}NaX$  เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานกลุ่ม A B และ C พบว่าชิ้นงานกลุ่ม B สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  เกิดการหดตัวมากที่สุด โดยมีค่าการหดตัวหลังเผาสูงสุดที่ 16.52 เปอร์เซ็นต์ ค่าการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้นตามปริมาณโซเดียมซิลิเกตจนถึงจุดหนึ่งที่มีค่าลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนตัวในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.17

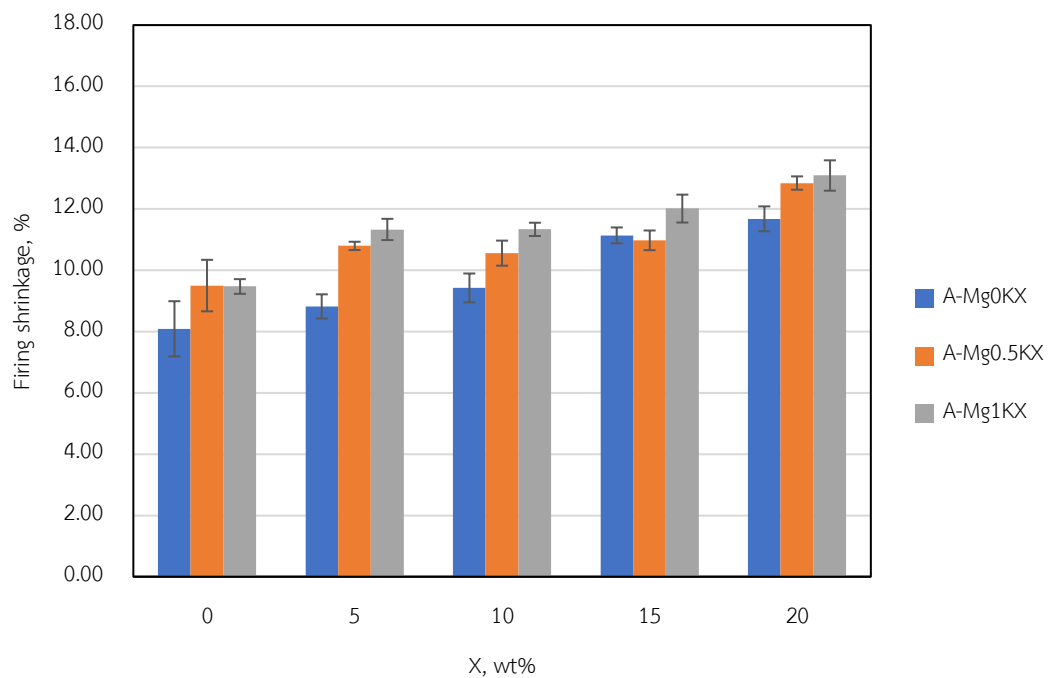
ชิ้นงานที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตมีแนวโน้มที่จะหดตัวมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมซิลิเกต ดังแสดงในชิ้นงานกลุ่ม A ในรูปที่ 4.2 ชิ้นงานกลุ่ม B ในรูปที่ 4.4 และ ชิ้นงานกลุ่ม C ในรูปที่ 4.6 อีกทั้งปริมาณการของแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานหดตัวเพิ่มขึ้นอีก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตร A B และ C พบว่าชิ้นงานกลุ่ม C สูตร Mg1K10 เกิดการหดตัวมากที่สุด โดยมีค่าการหดตัวหลังเผาสูงสุดที่ 13.90 เปอร์เซ็นต์

การหดตัวที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับชิ้นงานอะลูมินาของ T. Frueh และคณะ [35] เติมโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกา 29:103 ppm ที่มีซิลิกามากกว่าโซเดียมออกไซด์ประมาณ 3.6 เท่า จะพบว่ามีค่าการหดตัวหลังเผาประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1525 องศาเซลเซียส และสอดคล้องกับงานวิจัยของ D. Njaya และคณะ [36] ที่ได้ทำการศึกษาผลของสารตัวเติมในการช่วยเผาผนึกที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานโดยการเตรียมสูตรส่วนผสมระหว่างเฟลด์สปาร์ (Feldspar) กับดินขาว (Kaolinite clay) ที่บดแล้วร่อนด้วยตะแกรง 100 ไมครอน จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกแล้วเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส D. Njaya พบว่าเฟลด์สปาร์ทำหน้าที่เป็นสารช่วยลดอุณหภูมิในการเผาผนึก โดยจะเกิดเป็นของเหลวหรือเฟสแก้ว (Glassy phase) ที่อุณหภูมิเผา ส่งเสริมเกิดการจัดเรียงอนุภาค (Particle rearrangement) ในขั้นตอนการเผาผนึกในช่วงแรก ซึ่งปริมาณของเฟลด์สปาร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การจัดเรียงอนุภาคดียิ่งขึ้นสัมพันธ์กับค่าการหดตัวของชิ้นงานที่สามารถวัดได้หลังการเผาที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ในงานวิจัยของ D. Njaya มีค่าการหดตัวหลังเผาอยู่ในช่วง 2.7-5.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที เนื่องจากขนาดอนุภาคเริ่มต้นที่ใช้ค่อนข้างใหญ่กว่างานวิจัยนี้อย่างมากจึงเกิดการหดตัวได้น้อยกว่า

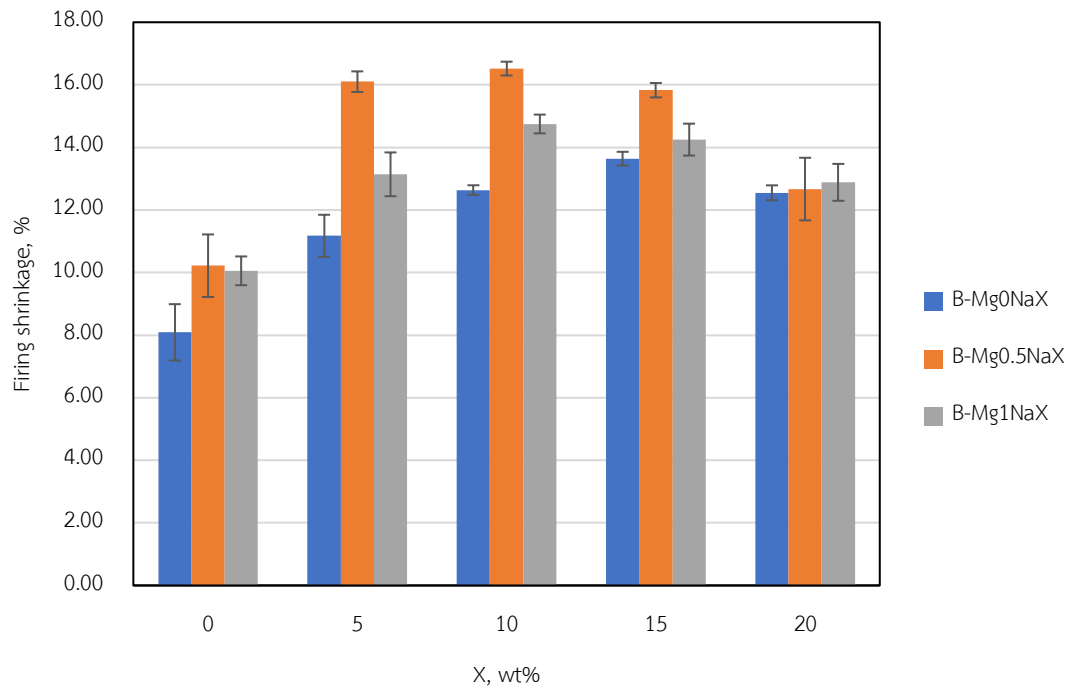




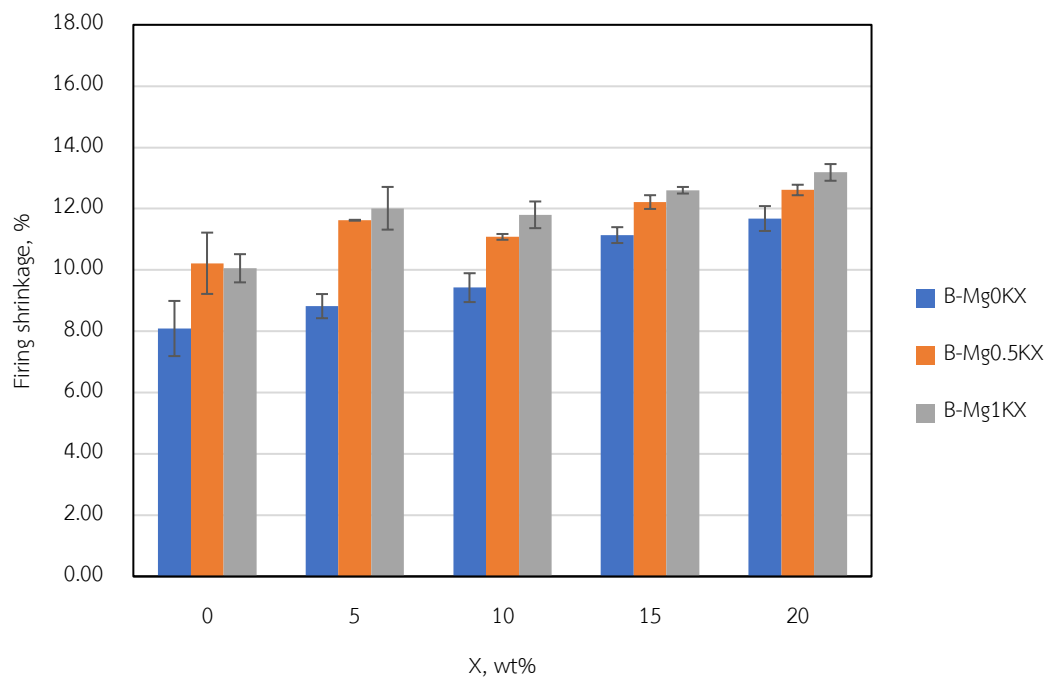
รูปที่ 4.1 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



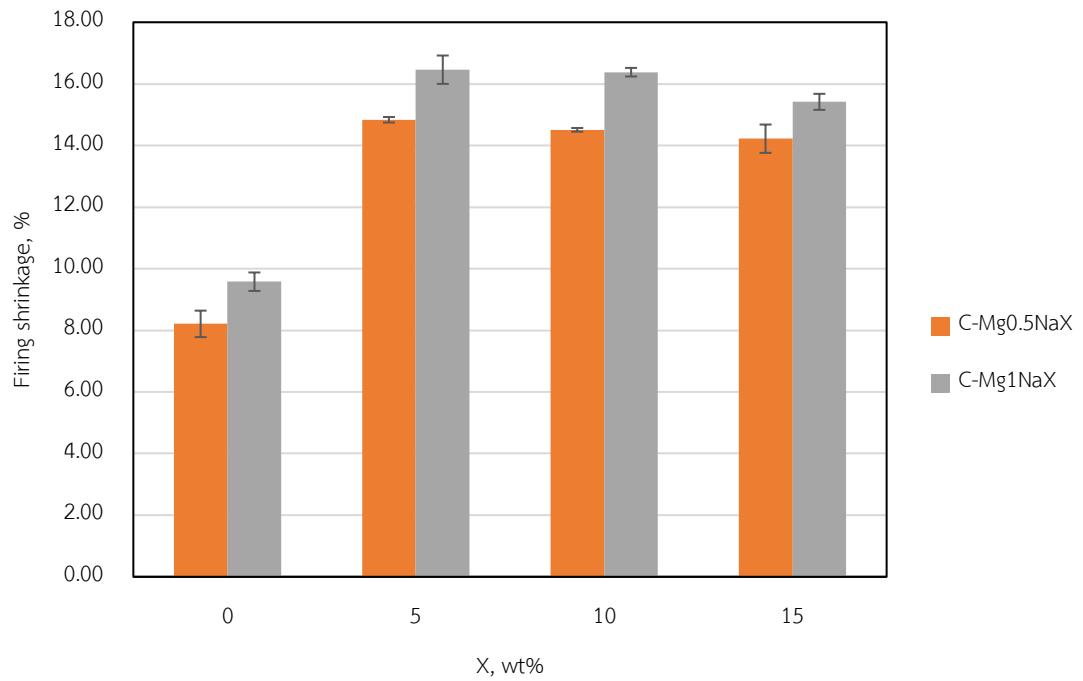
รูปที่ 4.2 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



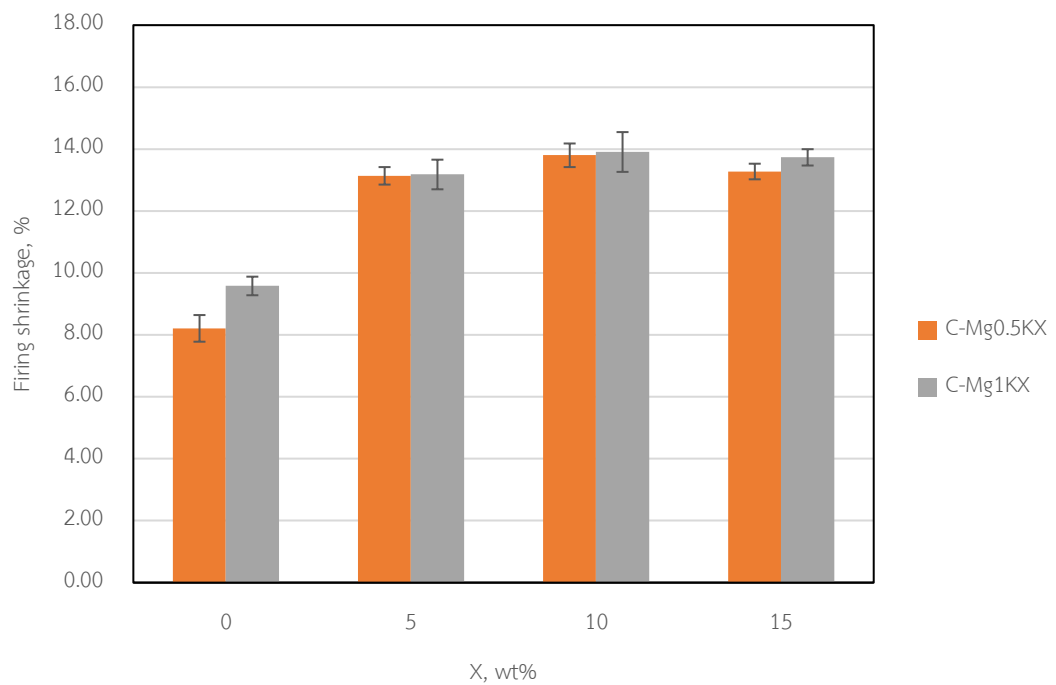
รูปที่ 4.3 ค่าการหดตัวของชิ้นงานชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ  
ทิศทางเดียว



รูปที่ 4.4 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ  
ทิศทางเดียว



รูปที่ 4.5 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



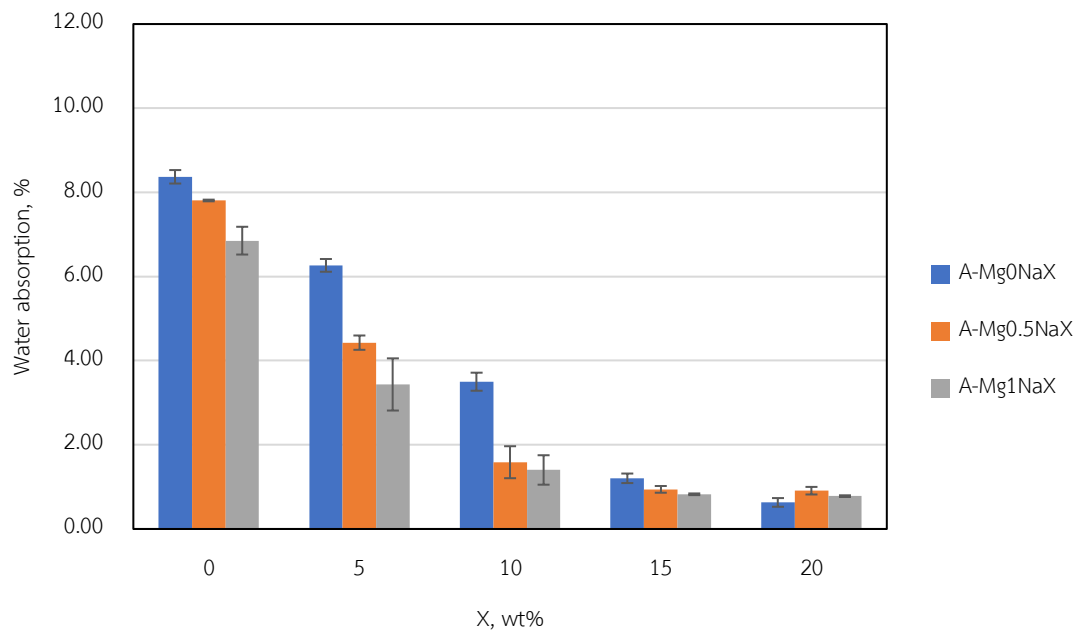
รูปที่ 4.6 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว

#### 4.1.2 การดูดซึมน้ำ

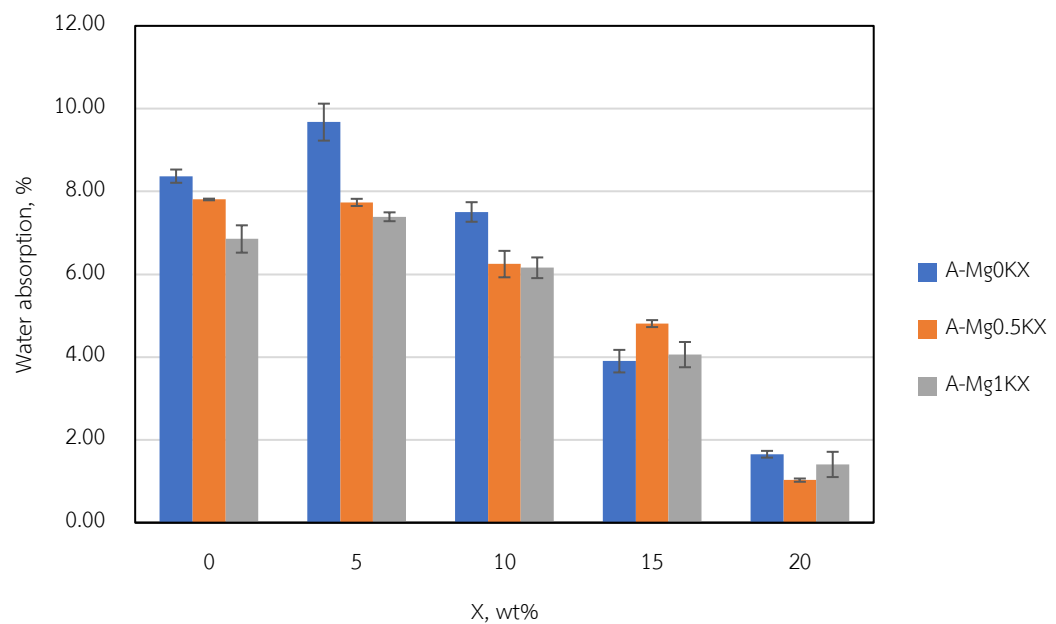
ผลของการวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานพบว่าปริมาณแอลคาไลซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำได้ลดลง โดยชิ้นงานที่เติมโซเดียมซิลิเกตเกิดการหดตัวมากกว่าชิ้นงานที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกต ทั้งในกลุ่ม A B และ C ( $X =$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแอลคาไลซิลิเกต)

ชิ้นงานที่เติมโซเดียมซิลิเกตมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณของโซเดียมซิลิเกตในช่วง 0-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่อย ๆ ลดลงหลังจากนั้น ดังแสดงในชิ้นงานกลุ่ม A ในรูปที่ 4.7 ชิ้นงานกลุ่ม B ในรูปที่ 4.9 และ ชิ้นงานกลุ่ม C ในรูปที่ 4.11 ยกเว้นในชิ้นงานกลุ่ม C สูตร  $MgXNa_{10}$  ที่มีค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าสูตร  $MgXNa_{15}$  อีกทั้งปริมาณการของแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำลดลงอีก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A B และ C พบว่าชิ้นงานกลุ่ม C สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  มีการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุด มีค่า 0.38 เปอร์เซ็นต์

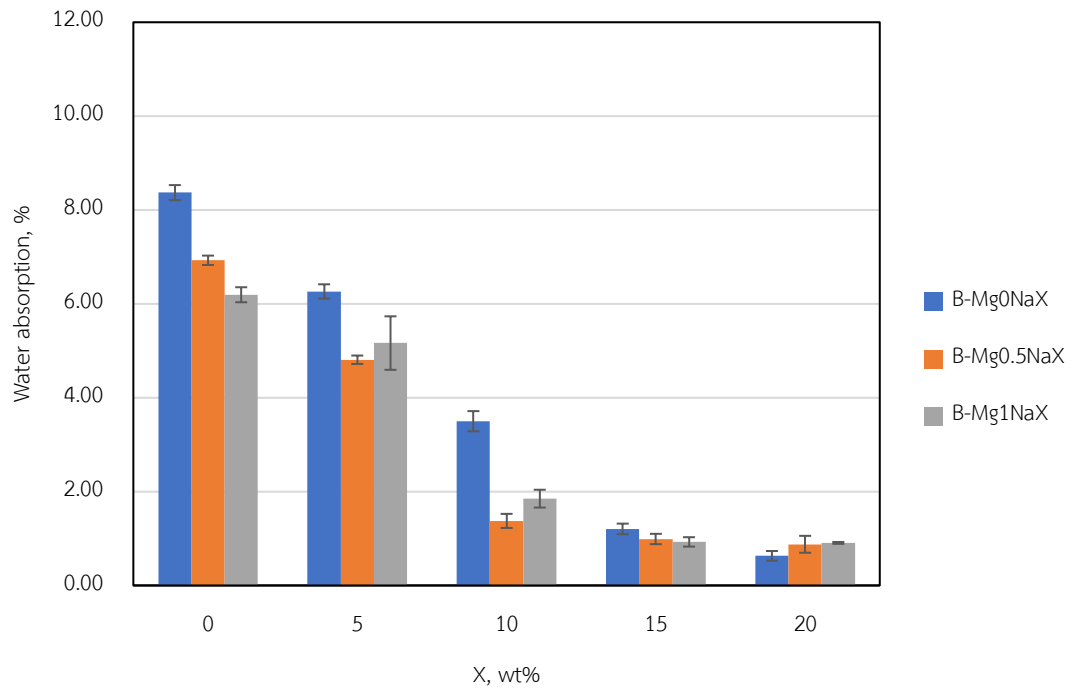
ชิ้นงานที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตมีแนวโน้มที่จะค่อย ๆ มีการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมซิลิเกต และสามารถลดได้ในอัตราที่ช้ากว่าการใช้โซเดียมซิลิเกต ดังแสดงในชิ้นงานกลุ่ม A ในรูปที่ 4.8 ชิ้นงานกลุ่ม B ในรูปที่ 4.10 และ ชิ้นงานกลุ่ม C ในรูปที่ 4.12 อีกทั้งปริมาณของแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติม และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A B และ C พบว่าชิ้นงานกลุ่ม A สูตร  $Mg_{0.5}K_{20}$  มีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด โดยมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดที่ 1.03 เปอร์เซ็นต์



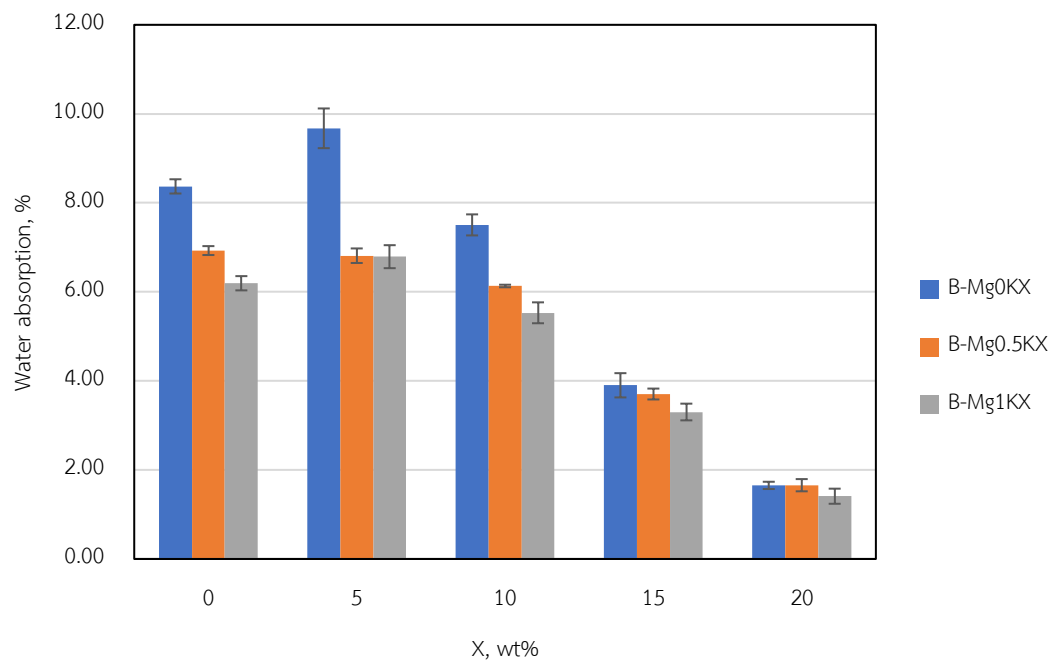
รูปที่ 4.7 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



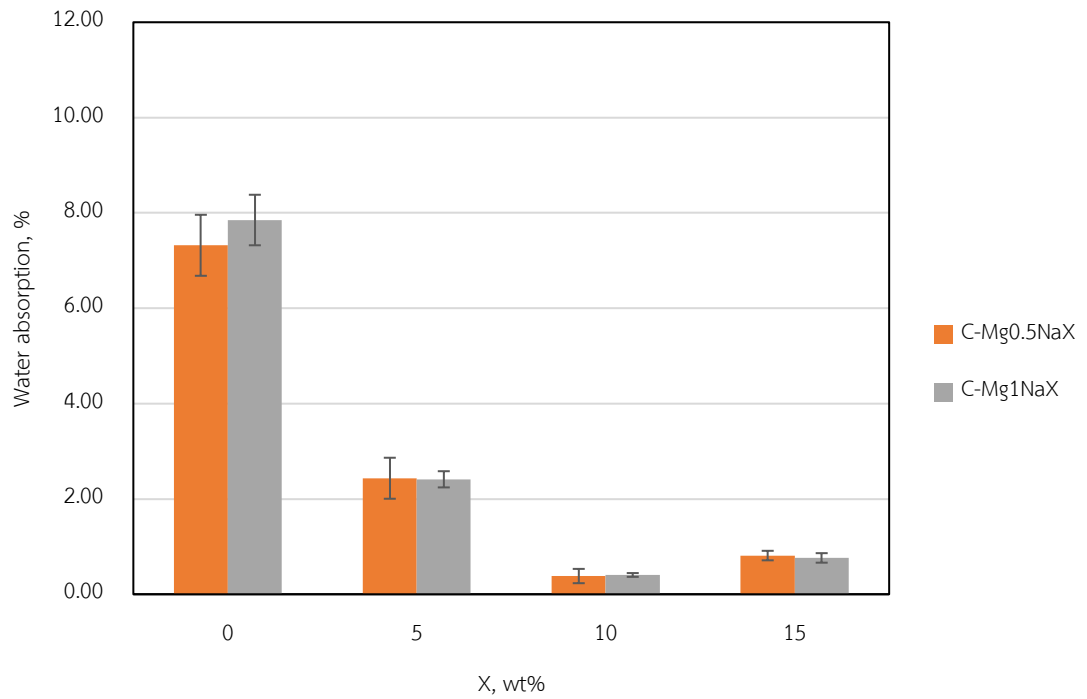
รูปที่ 4.8 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



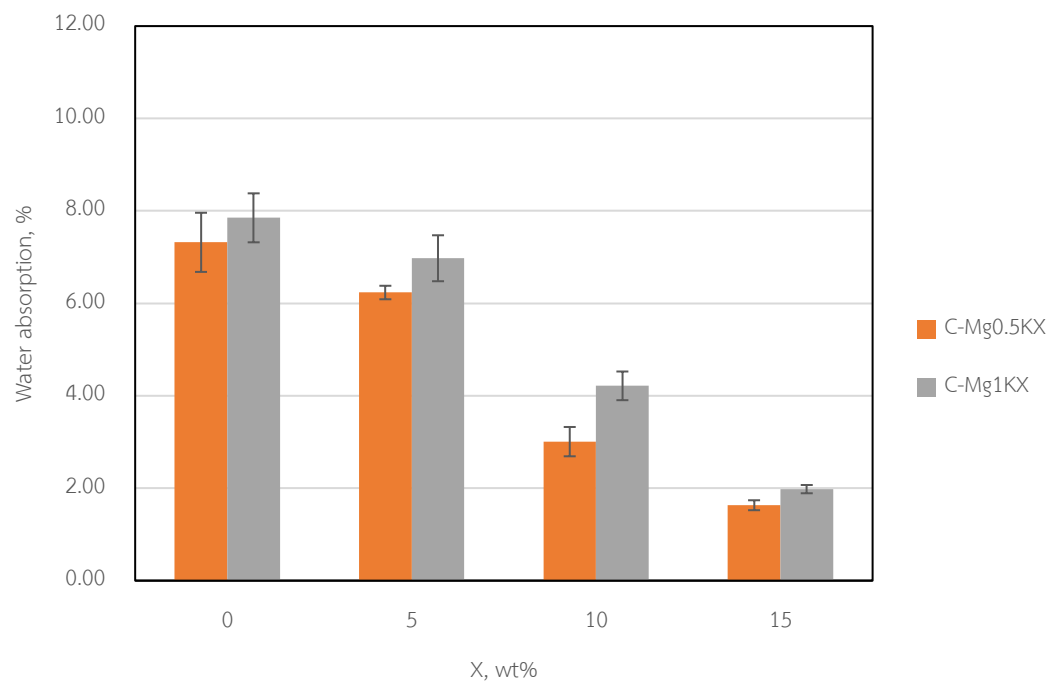
รูปที่ 4.9 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 4.10 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 4.11 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ  
ทิศทางเดียว



รูปที่ 4.12 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ  
ทิศทางเดียว

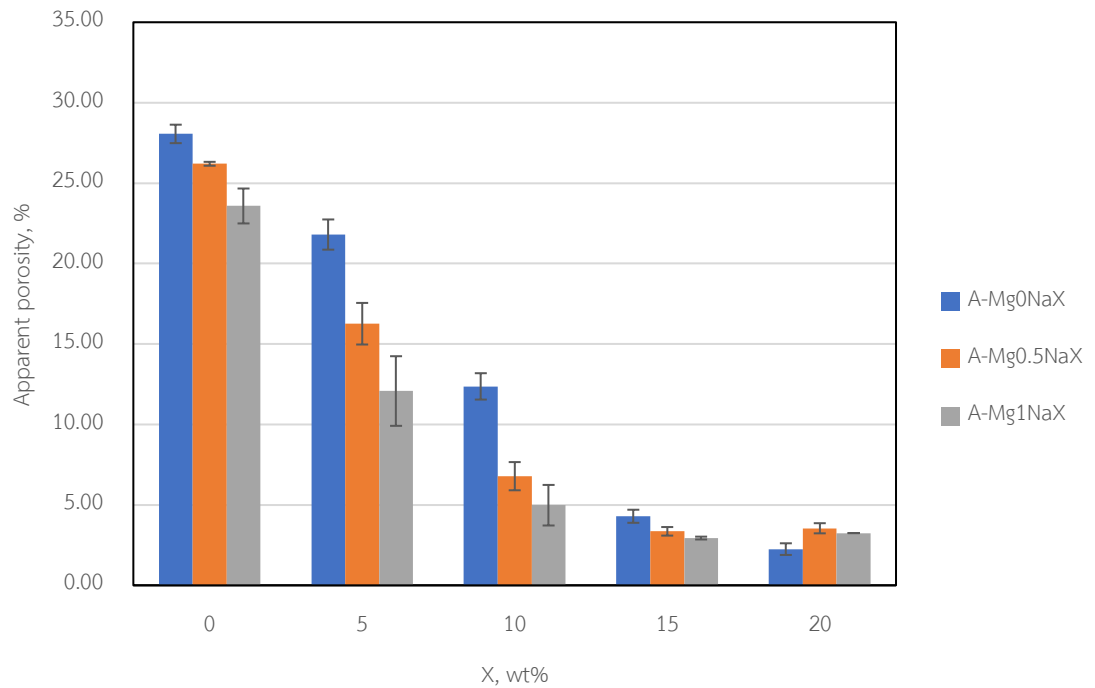
#### 4.1.3 ความพรุนตัว

ผลของการวิเคราะห์ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานพบว่าปริมาณแอลคาไลซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความพรุนตัวลดลง โดยชิ้นงานที่เติมโซเดียมซิลิเกตมีความพรุนตัวโดยรวมน้อยกว่าการเติมโพแทสเซียมซิลิเกต ทั้งในกลุ่ม A B และ C ( $X =$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแอลคาไลซิลิเกต)

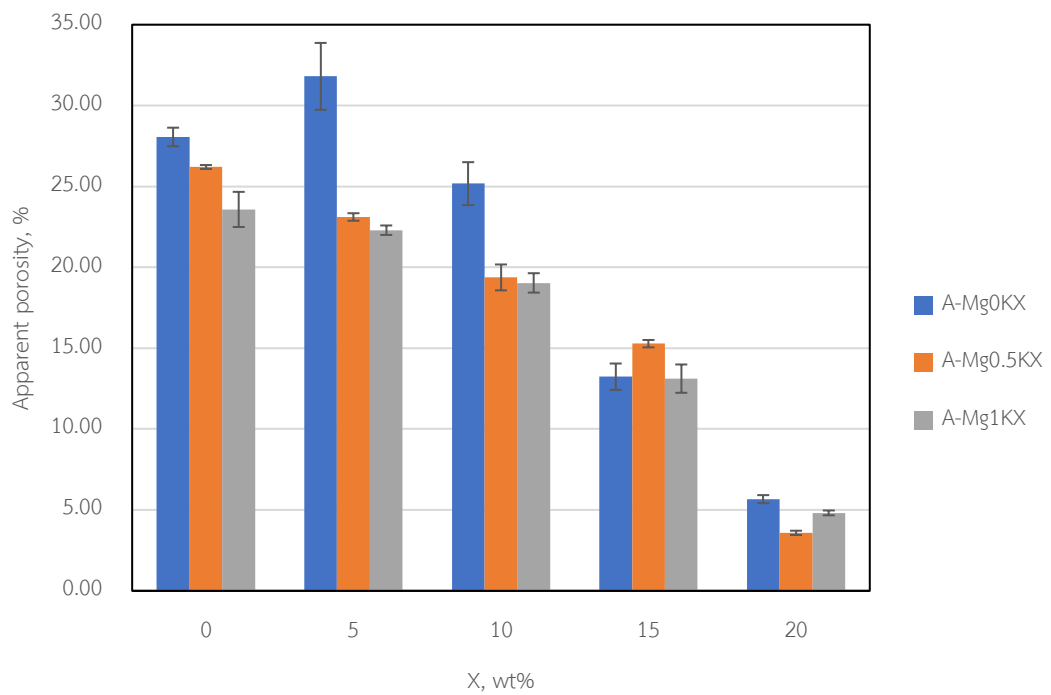
ชิ้นงานที่เติมโซเดียมซิลิเกตมีแนวโน้มที่จะลดความพรุนตัวให้เหลือน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณของโซเดียมซิลิเกต ช่วงแรกความพรุนตัวจะสามารถลดได้อย่างรวดเร็ว จนเมื่อถึงค่าหนึ่งจะลดได้ช้าลงหรือไม่สามารถที่จะลดความพรุนตัวได้ต่ำกว่าค่านั้นแล้ว ดังแสดงในชิ้นงานกลุ่ม A ในรูปที่ 4.13 ชิ้นงานกลุ่ม B ในรูปที่ 4.15 และ ชิ้นงานกลุ่ม C ในรูปที่ 4.17 อีกทั้งปริมาณของแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานสามารถลดความพรุนตัวให้น้อยลงได้อีก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A B และ C พบว่าชิ้นงานกลุ่ม C สูตร  $Mg_0.5Na_{10}$  มีความพรุนตัวของชิ้นงานต่ำสุดที่ 1.35 เปอร์เซ็นต์

ชิ้นงานที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตมีแนวโน้มที่จะลดความพรุนตัวให้เหลือน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมซิลิเกต และสามารถลดได้ในอัตราที่ช้ากว่าการใช้โซเดียมซิลิเกต ดังแสดงในชิ้นงานกลุ่ม A ในรูปที่ 4.14 ชิ้นงานกลุ่ม B ในรูปที่ 4.16 และ ชิ้นงานกลุ่ม C ในรูปที่ 4.18 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A B และ C พบว่าชิ้นงานกลุ่ม A สูตร  $Mg_0.5K_{20}$  มีความพรุนตัวของชิ้นงานต่ำสุดที่ 3.58 เปอร์เซ็นต์

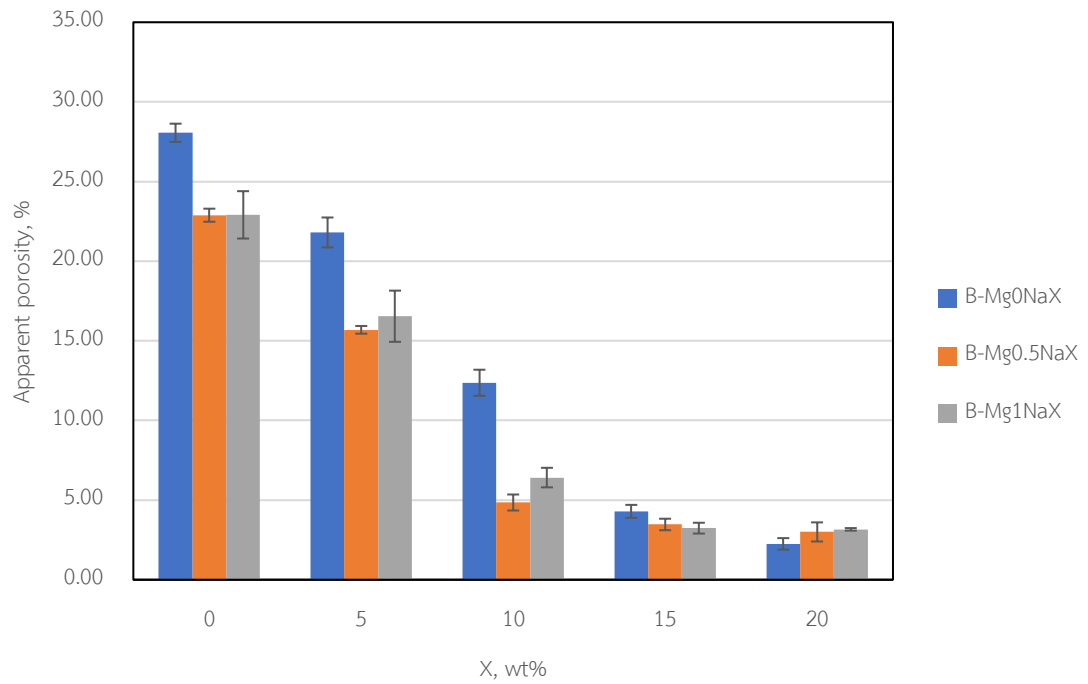




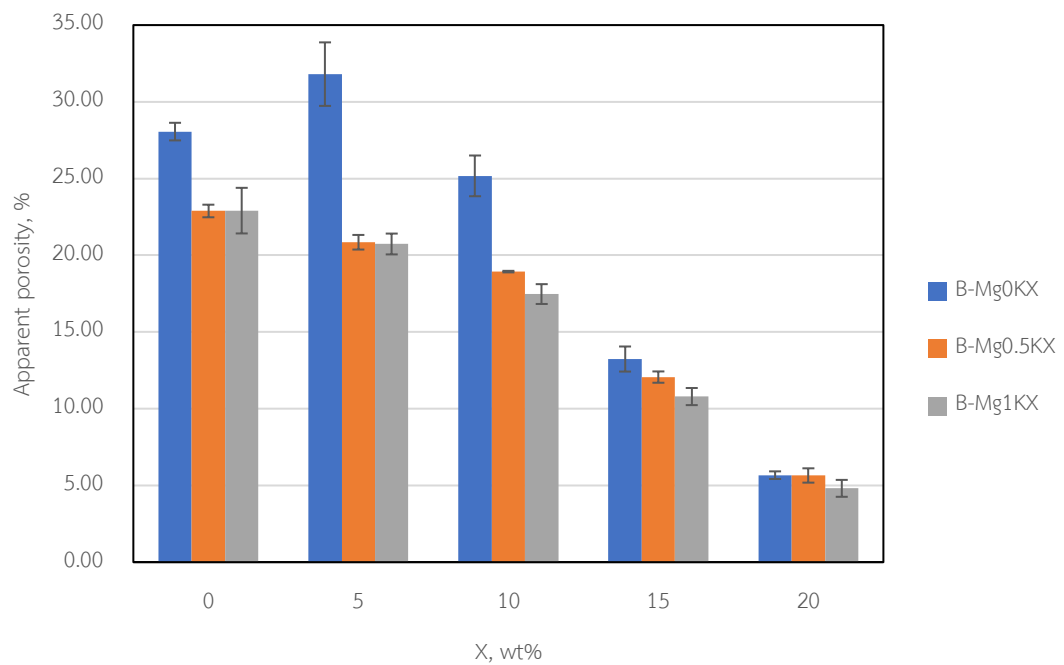
รูปที่ 4.13 ค่าความพรุนตัวขึ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



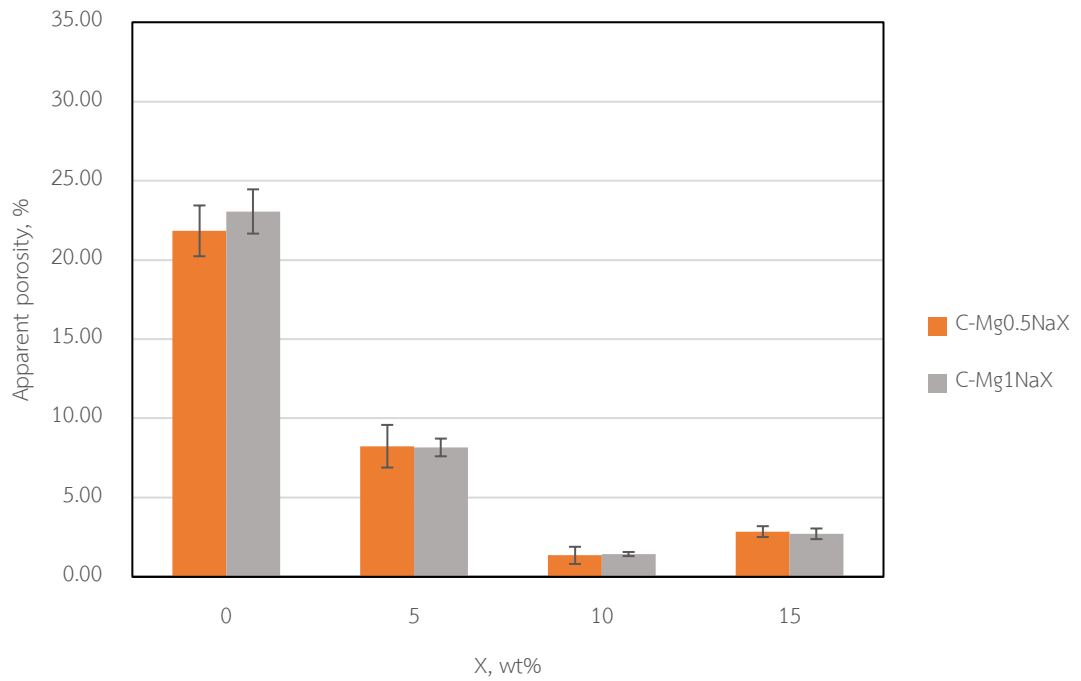
รูปที่ 4.14 ค่าความพรุนตัวขึ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



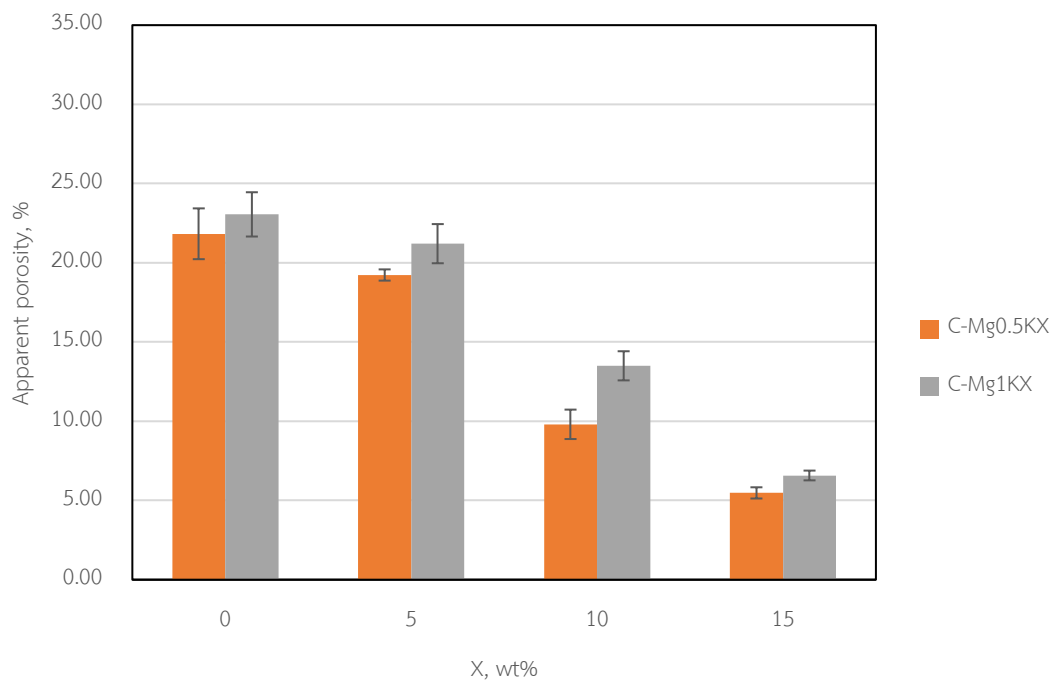
รูปที่ 4.15 ค่าความพรุนตัวขึ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 4.16 ค่าความพรุนตัวขึ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 4.17 ค่าความพรุนตัวขึ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



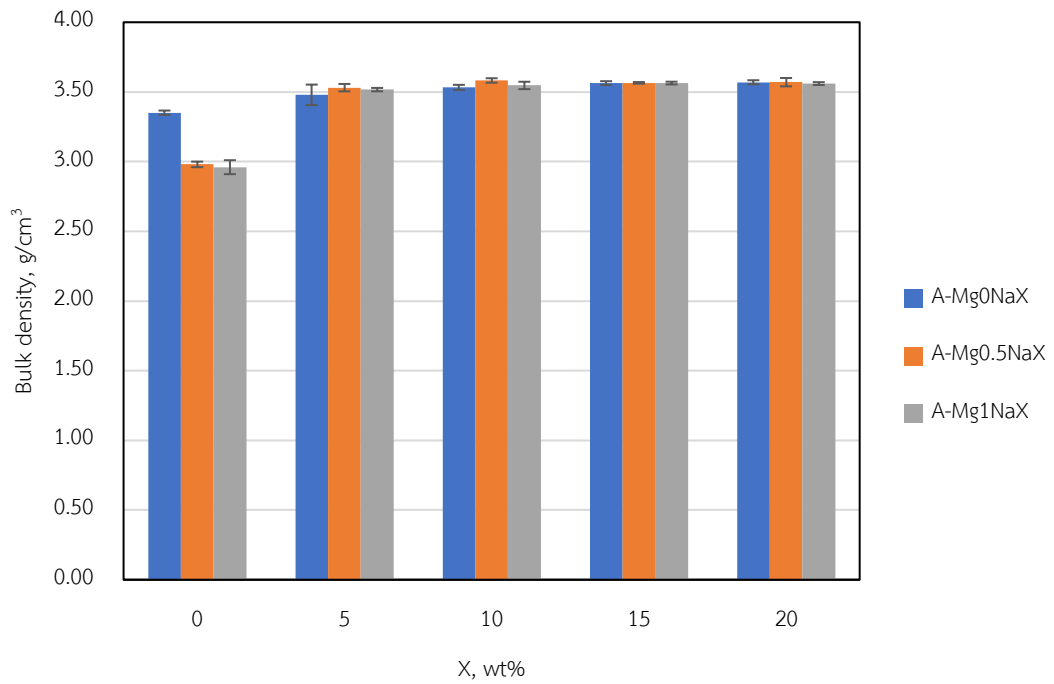
รูปที่ 4.18 ค่าความพรุนตัวขึ้นงานกลุ่ม C ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว

#### 4.1.4 ความหนาแน่น

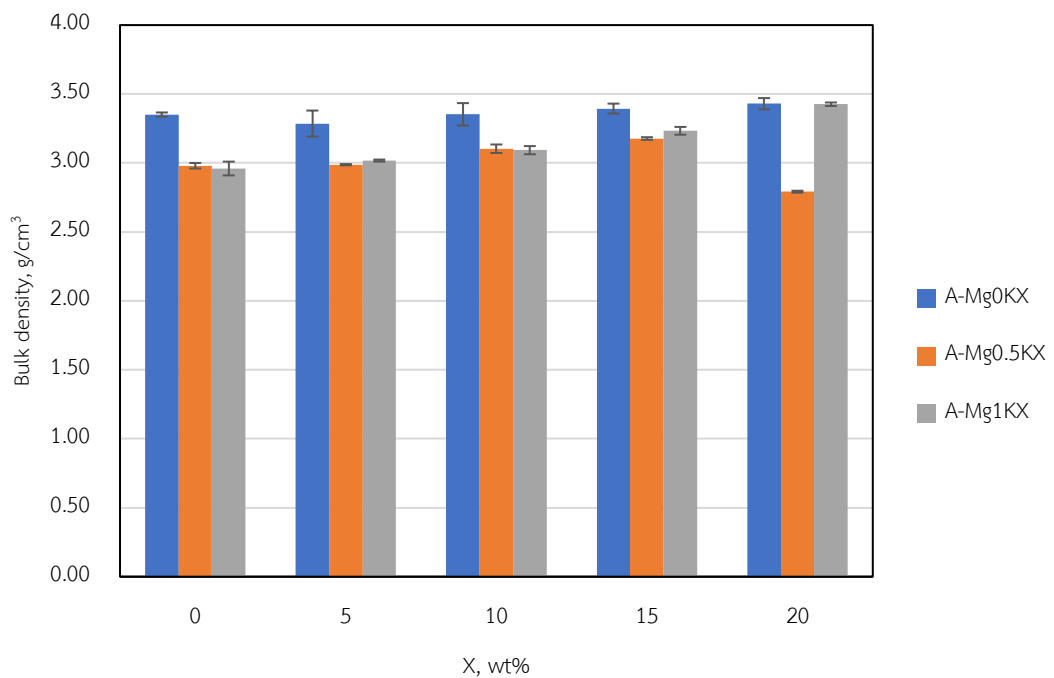
ผลของการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานพบว่าปริมาณแอลคาไลซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีแนวโน้มที่ความหนาแน่นสูงขึ้นเล็กน้อย โดยชิ้นงานที่เติมโซเดียมซิลิเกตมีความหนาแน่นโดยรวมมากกว่าชิ้นงานที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตทั้งในสูตร A B และ C ( $X =$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแอลคาไลซิลิเกต) เนื่องจากโซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์เป็น network modifier ที่สามารถช่วยลดความหนืดของเหลวจึงสามารถช่วยให้รูปทรงเคลื่อนที่ออกจากชิ้นงานง่ายขึ้น ชิ้นงานจึงมีความหนาแน่นหลังการเผาเพิ่มขึ้น มีความพรุนตัวลดลงในหัวข้อที่ 4.1.3 สอดคล้องกับการดูดซึมน้ำที่ลดลงในหัวข้อที่ 4.1.2 และยังทำให้ชิ้นงานหดตัวได้มากขึ้นสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.1.1

ชิ้นงานที่เติมโซเดียมซิลิเกตมีแนวโน้มที่จะหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของโซเดียมซิลิเกต ดังแสดงในชิ้นงานกลุ่ม A ในรูปที่ 4.19 ชิ้นงานกลุ่ม B ในรูปที่ 4.21 และ ชิ้นงานกลุ่ม C ในรูปที่ 4.23 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A B และ C พบว่าชิ้นงานกลุ่ม A สูตร  $MgO.5Na_{10}$  มีความหนาแน่นของชิ้นงานมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ 3.58 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

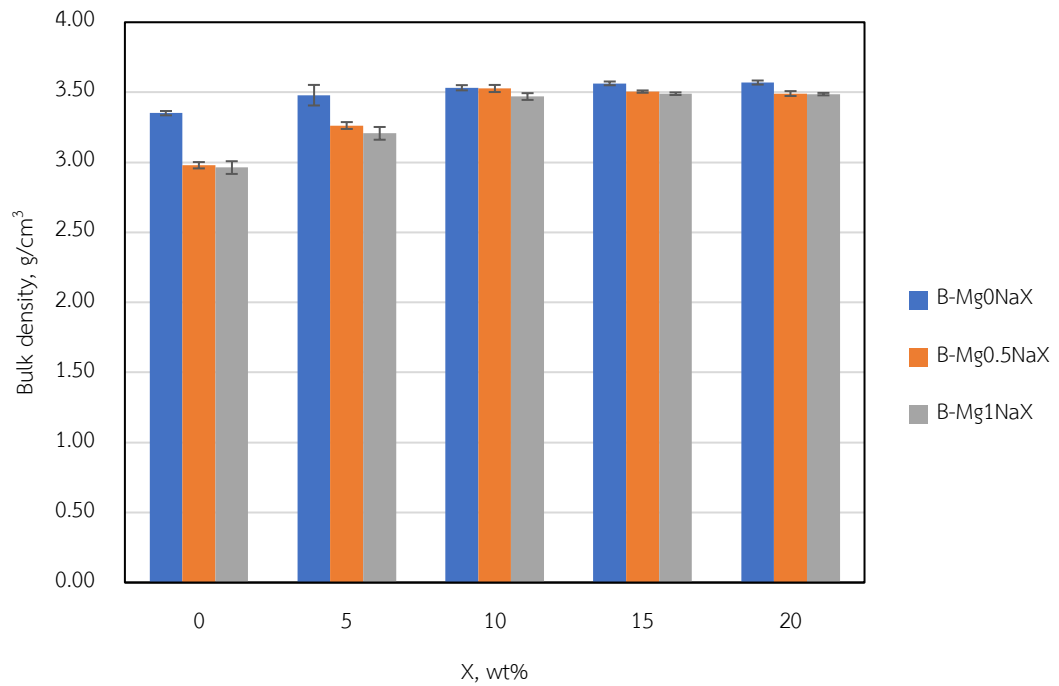
ชิ้นงานที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตมีแนวโน้มที่จะหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมซิลิเกต ดังแสดงในชิ้นงานกลุ่ม A ในรูปที่ 4.20 ชิ้นงานกลุ่ม B ในรูปที่ 4.22 และ ชิ้นงานกลุ่ม C ในรูปที่ 4.24 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A B และ C พบว่าชิ้นงานกลุ่ม A และ B สูตร  $MgOK_{20}$  มีความหนาแน่นสูงที่สุด มีค่า 3.43 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



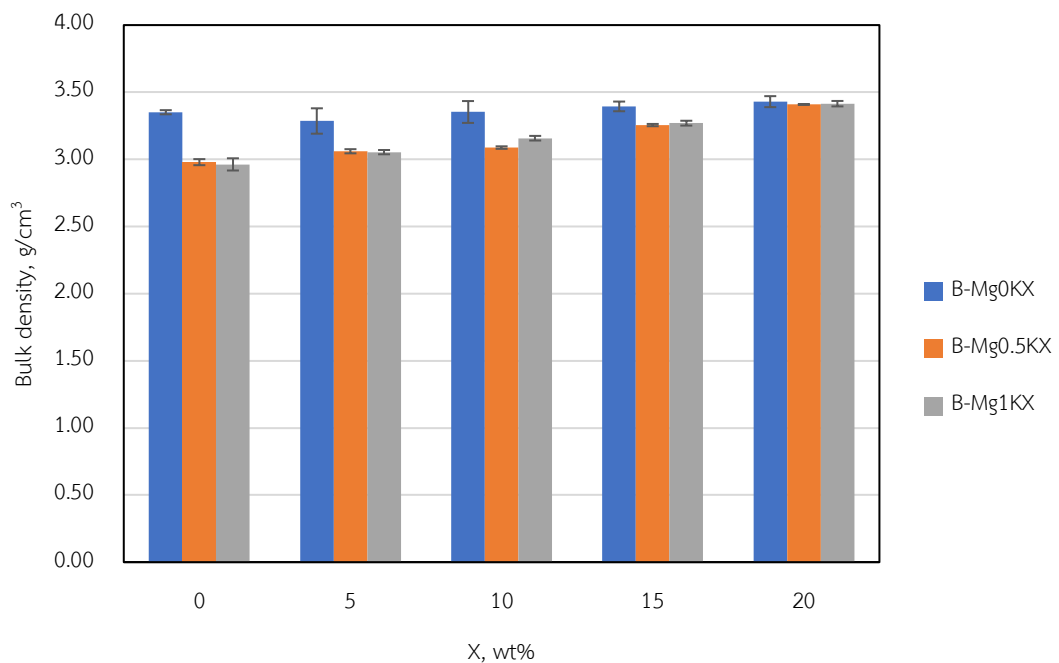
รูปที่ 4.19 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



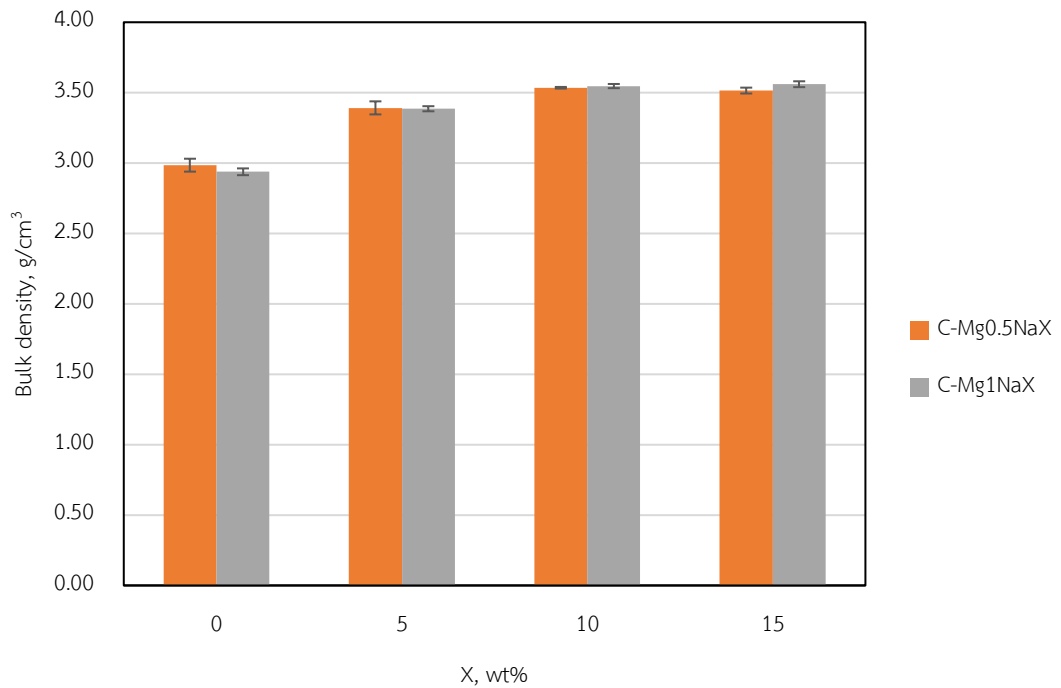
รูปที่ 4.20 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม A ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



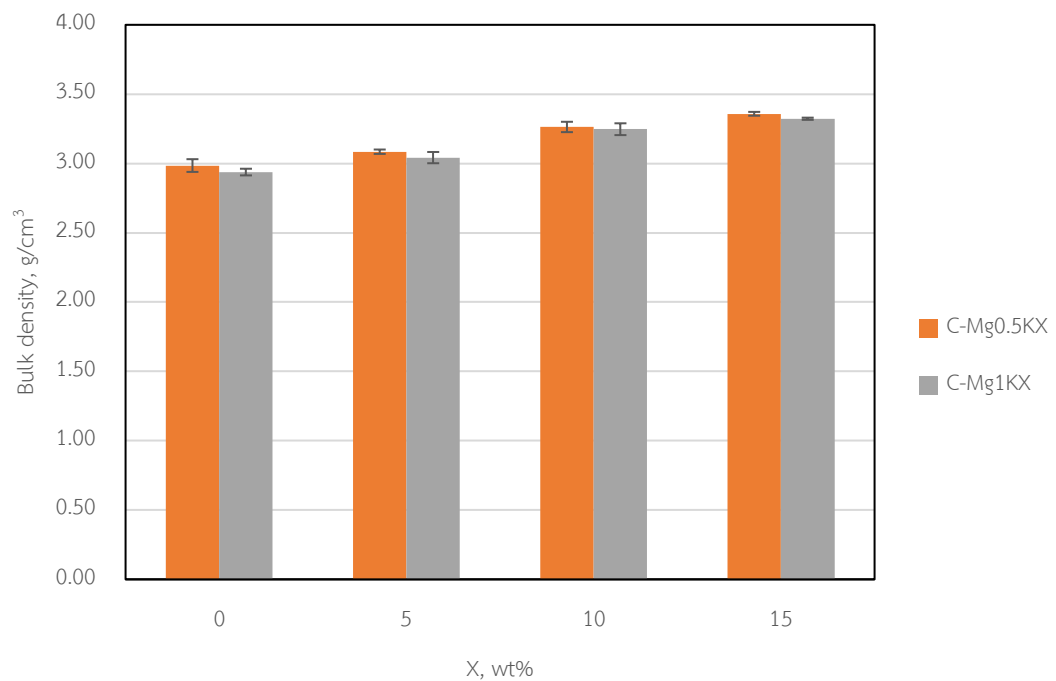
รูปที่ 4.21 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 4.22 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม B ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 4.23 ค่าความหนาแน่นของชั้นงานกลุ่ม C ที่เติมโซเดียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว



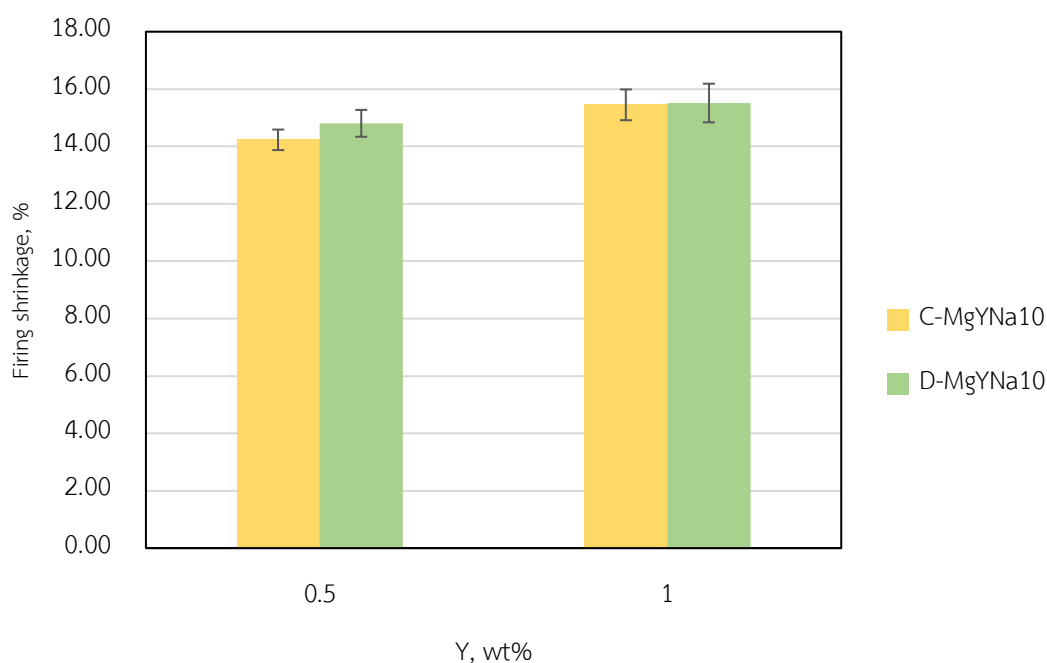
รูปที่ 4.24 ค่าความหนาแน่นของชั้นงานกลุ่ม C ที่เติมโพแทสเซียมซิลิเกตและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบทิศทางเดียว

## 4.2 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด

เนื้อดินปั้นที่ขึ้นรูปด้วยการอัดแบบทิศทางเดียว กลุ่ม C สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ  $Mg_1Na_{10}$  มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุด คือ 0.38 และ 0.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะนำสูตรดังกล่าวมาปรับใช้เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการอัดรีด เพื่อศึกษาถึงสมบัติอื่น ๆ นอกจากการหดตัวหลังเผา ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำ และ ความหนาแน่น เช่น ความแข็งแรง ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการนำไปใช้งาน เนื่องจากความแข็งแรงของชิ้นงานเป็นสมบัติที่ไม่ได้ขึ้นกับเพียงธรรมชาติของชิ้นงานเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับลักษณะชิ้นงาน ปริมาณรูพรุน และขนาดชิ้นงาน ผลจากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการอัดรีดแสดงในหัวข้อที่ 4.2.1-4.2.7 ดังนี้

### 4.2.1 การหดตัวหลังเผา

ผลของการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของชิ้นงานพบว่าชิ้นงานจากกลุ่ม C และ D สูตร  $Mg_1Na_{10}$  เกิดการหดตัวของชิ้นงานได้ดีกว่าชิ้นงานจากกลุ่ม C และ D สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  พบว่าชิ้นงานกลุ่ม D ที่มีการปรับปรุงการผสมสารละลายตัวเชื่อมประสานด้วยการให้ความร้อนมีค่าการหดตัวมากกว่าชิ้นงานกลุ่ม C โดยชิ้นงานกลุ่ม D สูตร  $Mg_1Na_{10}$  มีค่าการหดตัวหลังเผาสูงสุดที่ 15.51 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ( $Y =$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแมกนีเซียมคาร์บอเนต)

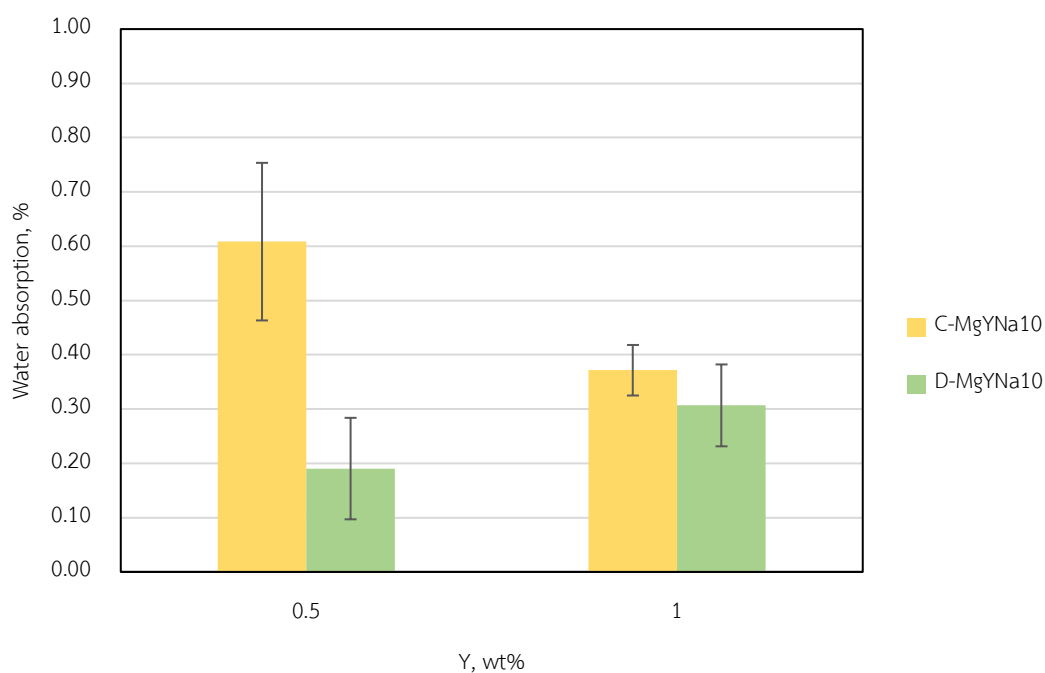


รูปที่ 4.25 ค่าการหดตัวของชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด



#### 4.2.2 การดูดซึมน้ำ

ผลของการวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกลุ่ม C สูตร Mg1Na10 มีการดูดซึมน้ำต่ำกว่าสูตร Mg0.5Na10 ในขณะที่กลุ่ม D ที่สูตร Mg1Na10 มีการดูดซึมน้ำสูงกว่าสูตร Mg0.5Na10 และพบว่าชิ้นงานกลุ่ม D ที่มีการปรับปรุงการผสมสารละลายตัวเชื่อมประสานด้วยการให้ความร้อนพบว่ามีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าชิ้นงานกลุ่ม C สูตร Mg0.5Na10 โดยมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดที่ 0.19 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ( $Y =$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแมกนีเซียมคาร์บอเนต)



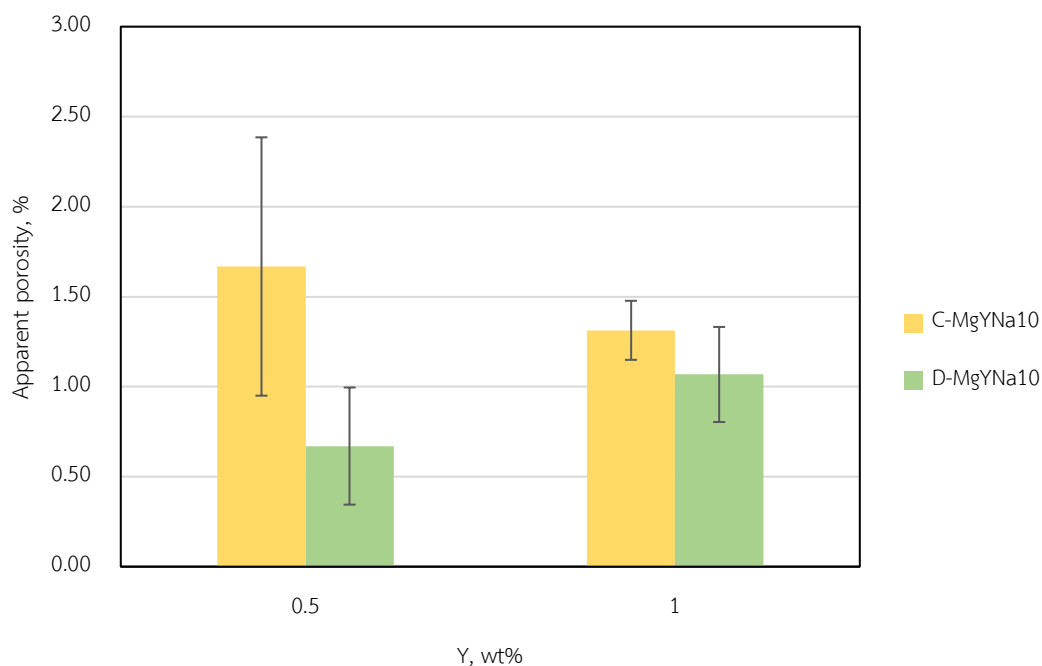
รูปที่ 4.26 ค่าการดูดซึมน้ำชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด

#### 4.2.3 ความพรุนตัว

ผลของการวิเคราะห์ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานกลุ่ม C สูตร Mg1Na10 มีความพรุนตัวต่ำกว่าสูตร Mg0.5Na10 ในขณะที่ชิ้นงานกลุ่ม D สูตร Mg1Na10 มีความพรุนตัวสูงกว่าสูตร Mg0.5Na10 และพบว่าชิ้นงานกลุ่ม D ที่มีการปรับปรุงการผสมสารละลายตัวเชื่อมประสานด้วยการให้ความร้อนมีค่าความพรุนตัวต่ำกว่าชิ้นงานกลุ่ม C สูตร Mg0.5Na10 โดยมีค่าความพรุนตัวต่ำสุดที่ 0.67 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ( $Y =$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแมกนีเซียมคาร์บอเนต)

ในงานวิจัยของ J. S. Magdeski [37] ที่ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานอะลูมินาที่มีความพรุนตัวสูง โดยการเติมสารพอลิเมอร์ที่เป็นตัวสร้างรูพรุนและใช้อัตราส่วนระหว่างอะลูมินาต่อน้ำ 10

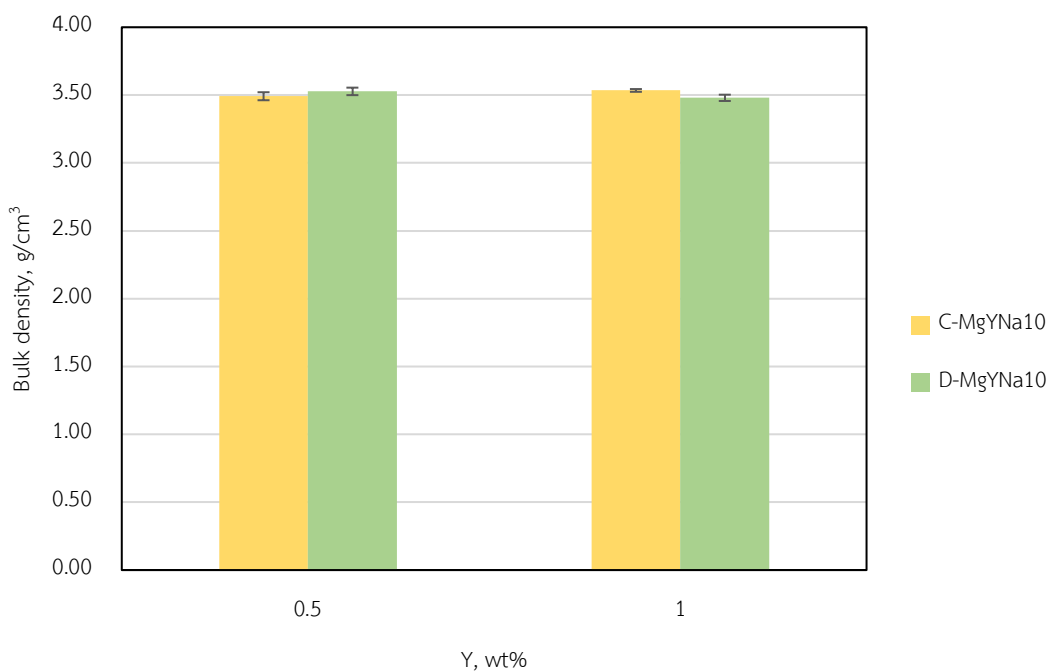
ต่อ 3 โดยทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1500 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรง 39 เมกะพาสคาล มีความพรุนตัว 0.57 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ



รูปที่ 4.27 ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด

#### 4.2.4 ความหนาแน่น

ผลของการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม C และ D สูตร Mg0.5Na10 และ Mg1Na10 มีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าความหนาแน่นในช่วง 3.48-3.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (Y= เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแมกนีเซียมคาร์บอเนต)

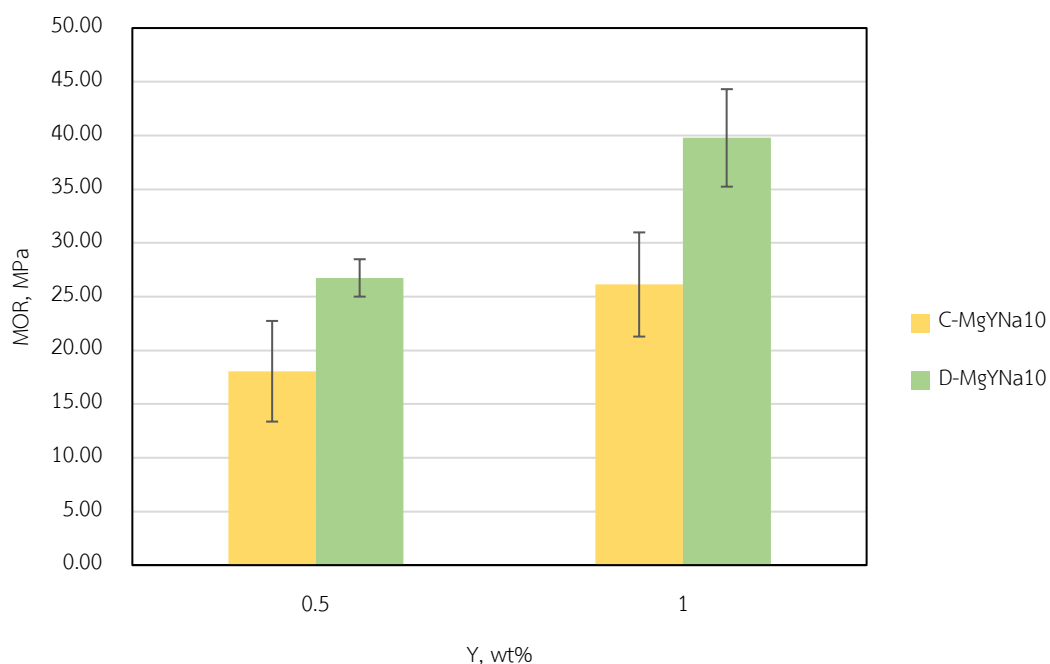


รูปที่ 4.28 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด

#### 4.2.5 ความแข็งแรง

ผลของการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานกลุ่ม C และ D สูตร  $Mg_1Na_{10}$  มีความแข็งแรงของชิ้นงานดีกว่าสูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  โดยพบว่าชิ้นงานกลุ่ม D ที่มีการปรับปรุงการผสมสารละลายตัวเชื่อมประสานด้วยการให้ความร้อนมีค่าความแข็งแรงมากกว่ากลุ่ม C สูตร  $Mg_1Na_{10}$  โดยมีค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ 39.77 เมกะพาสคาล ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (Y= เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแมกนีเซียมคาร์บอเนต)

โดยทั่วไปความแข็งแรงกับชิ้นงานมักถูกเข้าใจว่าเป็นสมบัติตามธรรมชาติของเนื้อวัสดุที่แปรผันตรงกับความหนาแน่นของชิ้นงานซึ่งเป็นจริงในชิ้นงานที่ปราศจากรูพรุน ซึ่งความแข็งแรงของชิ้นงานที่ปรากฏไม่สอดคล้องกับความหนาแน่นในหัวข้อที่ 4.2.4 เนื่องจากในงานวิจัยนี้ศึกษาความหนาแน่นที่รวมปริมาตรของรูพรุนในชิ้นงานไว้ด้วย (Bulk density) จึงไม่สามารถที่จะสรุปค่าความแข็งแรงของชิ้นงานได้จากความหนาแน่นเพียงปัจจัยเดียว ดังนั้นความแข็งแรงของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมแมกนีเซียมคาร์บอเนตอาจขึ้นกับขนาดของเกรนและรูพรุนในชิ้นงานอีกด้วย



รูปที่ 4.29 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานกลุ่ม C และ D ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด

#### 4.2.6 โครงสร้างจุลภาค

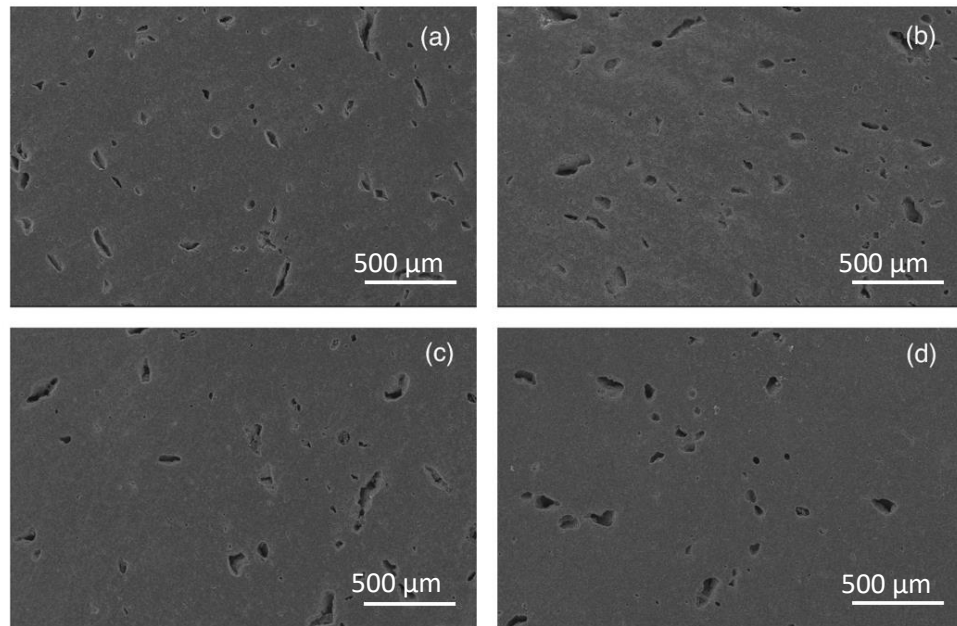
ชิ้นงานกลุ่ม C และ D สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ  $Mg_1Na_{10}$  ถูกเตรียมเพื่อนำไปศึกษาด้วยเครื่อง SEM โดยการขัดด้วยกระดาษขัดและให้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบ ผลการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนของชิ้นงานกลุ่ม C สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ  $Mg_1Na_{10}$  ในรูปที่ 4.30(a) และ 4.30(b) และชิ้นงานกลุ่ม D สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ  $Mg_1Na_{10}$  ในรูปที่ 4.30(c) และ 4.30(d) มีจำนวนและลักษณะของรูพรุนใกล้เคียงกัน โดยสันนิษฐานว่ารูพรุนเกิดจากขั้นตอนการขึ้นรูปของชิ้นงานด้วยการอัดรีด

โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานกลุ่ม C และ D สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ  $Mg_1Na_{10}$  ในรูปที่ 4.31(a-d) มีความคล้ายคลึงกันอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าหนาแน่นของชิ้นงานที่ไม่รวมปริมาตรของรูพรุนในหัวข้อที่ 4.2.3 ที่มีค่าใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังไม่พบขอบเกรนที่ชัดเจนเมื่อนำไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีการอธิบายไว้ว่าแมกนีเซียสามารถเพิ่มความสามารถในการละลายของซิลิกาในอะลูมินา ส่งผลให้ปริมาณซิลิกาที่บริเวณขอบเกรนลดลง [38, 39] ประกอบกับในงานวิจัยของ T.Frueh [35] ที่ได้อธิบายว่าซิลิกาที่มีในระบอบจะถูกใช้ไปกับการรวมตัวกับโซเดียมออกไซด์และอะลูมินาเกิดเป็นสารประกอบใหม่ เช่น คอร์เดียไรต์ (Cordierite) และปริมาณอะลูมินาที่เหลือจะตกผลึก

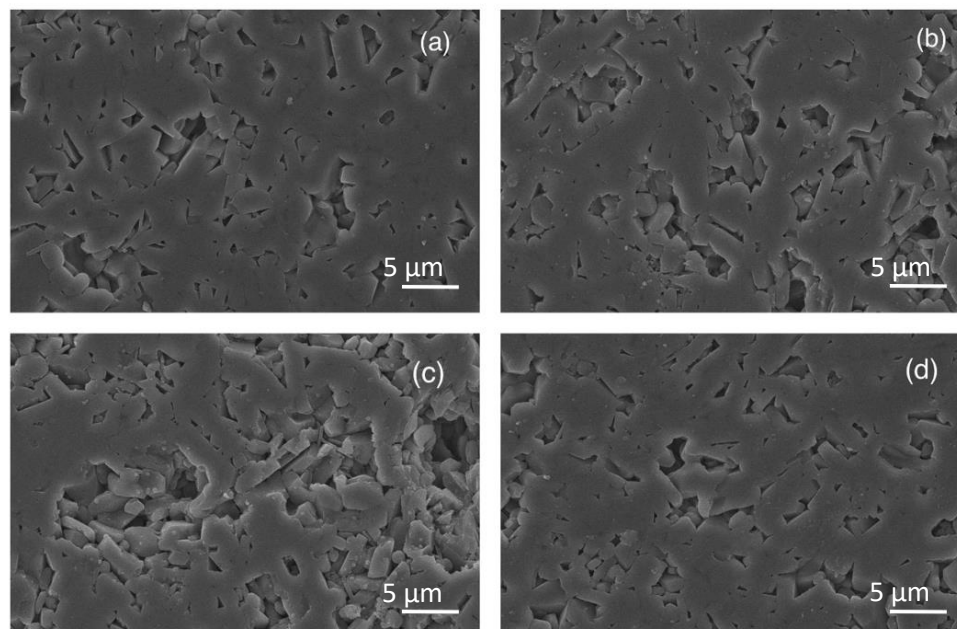
เป็นแก้วอยู่ที่บริเวณขอบเกรน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ที่ไม่พบขอบเกรนที่ชัดเจนเมื่อใช้กรดไฮโดรฟลูออริกกัดชิ้นงานมีความเป็นไปได้ว่าซิลิกาไม่ได้ไปตกผลึกบริเวณดังกล่าวมากพอ หรืออาจมีสาเหตุจากการที่เติมแมกนีเซียมคาร์บอเนตมากพอที่จะตรึงซิลิกาไว้ในเนื้อเกรนได้

เกรนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแท่งที่มีความยาวประมาณ 2-5 ไมครอน เท่านั้น ซึ่งเกรนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานมีขนาดเล็กมากเนื่องจากผงอะลูมินาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเฉลี่ยเพียง 2.5 ไมครอน ถือว่าเกรนมีขนาดหลังเผาเพิ่มขึ้นเพียงแค่น้อย เมื่อเทียบกับจากงานวิจัยของ W. Dong และคณะ [29] ที่เตรียมชิ้นงานคล้ายกับที่อ้างอิงในข้อ 4.1.4 แตกต่างเพียงการเผาผนึกในเตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) พบว่าเกรนที่เกิดขึ้นเมื่อเผาผนึกเป็นเวลา 100 นาที มีขนาดเฉลี่ย 5 ไมครอน โดยประมาณ และมีรูปร่างเกรนส่วนใหญ่มีขนาดในแต่ละแกนใกล้เคียงกัน [40]

เกรนที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาวขนาดเล็กในงานวิจัยนี้อาจมีสาเหตุจากปริมาณของโซเดียมซิลิเกตและแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เติม สามารถอธิบายได้โดยงานวิจัยของ C. W. Park และ D. Y. Yoon [41] กล่าวถึงผลของการเติมอะนอร์ไทต์ซึ่งเกิดเป็นของเหลวขึ้นระหว่างการเผาผนึกที่ 1600 องศาเซลเซียส เมื่อปริมาณอะนอร์ไทต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกรนในชิ้นงานมีขนาดเล็ก เนื่องจากเกรนรูปร่างแท่งแต่ละเกรนชนและขัดขวางการโตของกันและกัน สูตรที่มีการเติมแมกนีเซียมคาร์บอเนต 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีรูปร่างเกรนส่วนใหญ่เป็นแบบแท่งที่มีขนาดเล็กเมื่อเผาผนึก 1 ชั่วโมง และมีรูปร่างเกรนในแต่ละแกนใกล้เคียงกันมากขึ้น (Equiaxed grain) และขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเผาผนึก 12 ชั่วโมง เพราะปริมาณสารตัวเติมที่มากเกินไปเกินความสามารถในการละลายจะทำให้เกิดการตกผลึกของเฟสทุติยภูมิบริเวณขอบเกรนซึ่งยับยั้งการเคลื่อนที่ของขอบเกรนและการเติบโตของเกรนได้



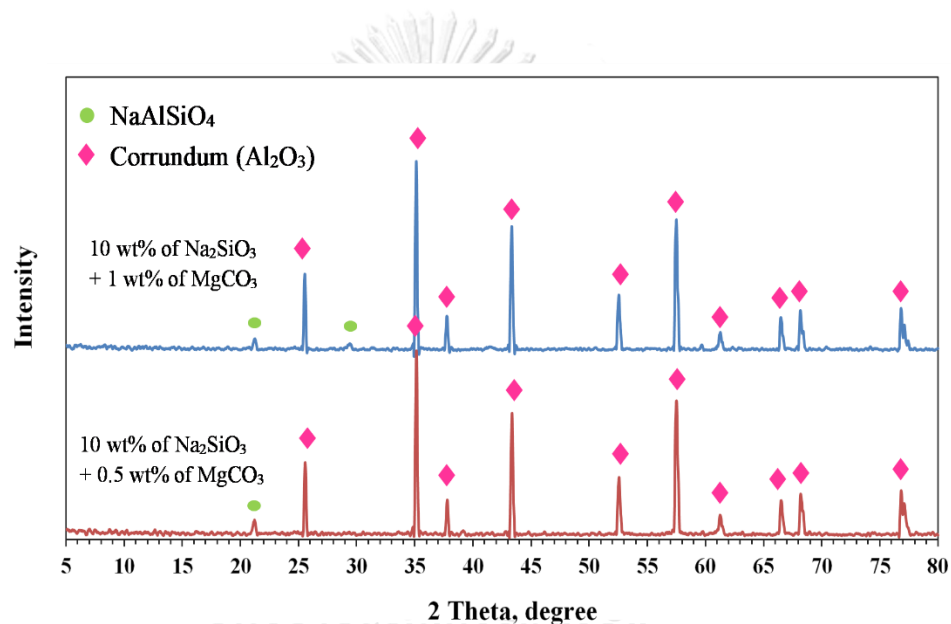
รูปที่ 4.30 ปริมาณรูพรุนของ (a) ชิ้นงานกลุ่ม C สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  (b) ชิ้นงานกลุ่ม C สูตร  $Mg_1Na_{10}$  (c) ชิ้นงานกลุ่ม D สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ (d) ชิ้นงานกลุ่ม D สูตร  $Mg_1Na_{10}$



รูปที่ 4.31 โครงสร้างจุลภาคของ (a) ชิ้นงานกลุ่ม C สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  (b) ชิ้นงานกลุ่ม C สูตร  $Mg_1Na_{10}$  (c) ชิ้นงานกลุ่ม D สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ (d) ชิ้นงานกลุ่ม D สูตร  $Mg_1Na_{10}$

#### 4.2.7 องค์ประกอบเฟส

ชิ้นงานกลุ่มสูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ  $Mg_1Na_{10}$  ถูกเตรียมเพื่อนำไปศึกษาด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) โดยใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานพบว่าเฟสหลักที่เกิดขึ้นคือ คอรันดัม ( $Al_2O_3$ ) ในขณะที่เฟสที่เกิดขึ้นจากการเกิดเฟสของเหลวระหว่างการเผาผนึกคือ โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต ( $NaAlSiO_4$ ) ซึ่งมีปริมาณเล็กน้อย แสดงในรูปที่ 4.32 ไม่พบเฟสที่มีองค์ประกอบของแมกนีเซียมเนื่องจากแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เพื่อยับยั้งการเติบโตของเกรนมีปริมาณน้อยมาก



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ  $Mg_1Na_{10}$

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเตรียมชิ้นงานเซรามิกอะลูมินาโดยการใช้เติมสารละลายแอลคาไลซิลิเกตเพื่อลดความซับซ้อนในการผสมวัตถุดิบ และเกิดเป็นของเหลวขึ้นในระบบระหว่างการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลว แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการใช้ความเหนียวและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ สามารถสรุปได้ว่า

- 1) ชิ้นงานกลุ่ม A B C ได้ถูกพัฒนาขึ้นตามลำดับให้มีความเหมาะสมกับการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการอัดรีด โดยชิ้นงานกลุ่ม D ถูกพัฒนาขึ้นหลังจากได้ทำการอัดรีดชิ้นงานกลุ่ม C สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ สูตร  $Mg_1Na_{10}$
- 2) พบว่าสารละลายตัวเชื่อมประสานที่ใช้มีความสำคัญต่อสมบัติหลังเผาของชิ้นงานเป็นอย่างมาก การลดน้ำและให้ความร้อนสารละลายตัวเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส สามารถช่วยทำให้ชิ้นงานมีค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนตัวต่ำลง และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
- 3) โซเดียมซิลิเกตมีความสามารถในการเป็นสารตัวเติมในการเผาผนึกแบบมีเฟสของเหลวที่มีประสิทธิภาพกว่าโพแทสเซียมซิลิเกตเมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส เนื่องจากโซเดียมไอออนมีความสามารถในการแพร่ที่สูงกว่าโพแทสเซียมไอออน [42]
- 4) ค่าการหดตัวที่มีค่าสูงสุดในงานวิจัยนี้ พบได้ในชิ้นงานกลุ่ม B สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมคาร์บอเนต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า 16.52 เปอร์เซ็นต์
- 5) ค่าการดูดซึมน้ำที่มีค่าต่ำสุดในงานวิจัยนี้ พบได้ในชิ้นงานกลุ่ม D สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมคาร์บอเนต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า 0.19 เปอร์เซ็นต์
- 6) ความพรุนตัวที่มีค่าต่ำสุดในงานวิจัยนี้ พบได้ในชิ้นงานกลุ่ม D สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมคาร์บอเนต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า 0.67 เปอร์เซ็นต์



- 7) ความหนาแน่นที่มีค่าสูงสุดในงานวิจัยนี้ พบได้ในชิ้นงานกลุ่ม A สูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมคาร์บอเนต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า 3.58 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- 8) ความแข็งแรงที่มีค่าสูงสุดในงานวิจัยนี้ พบได้ในชิ้นงานกลุ่ม D สูตร  $Mg_{1}Na_{10}$  ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมคาร์บอเนต 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า 39.77 เมกะพาสคาล
- 9) ชิ้นงานสูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมคาร์บอเนต 0.5 เปอร์เซ็นต์ แสดงสมบัติหลังการเผาที่ดีที่สุด
- 10) ปริมาณของแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการพัฒนาสมบัติข้างต้นเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติมแมกนีเซียมคาร์บอเนต แต่ปริมาณแมกนีเซียมคาร์บอเนต 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ ให้ผลต่อชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ที่ใกล้เคียงกันอย่างมาก
- 11) พบเฟสของโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตในชิ้นงานสูตร  $Mg_{0.5}Na_{10}$  และ  $Mg_{1}Na_{10}$  ที่เติมโซเดียมซิลิเกต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติม

- 1) ใช้เครื่องอัดรีดที่มีระบบสุญญากาศเพื่อลดปริมาณรูพรุนในชิ้นงานที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเตรียมเนื้อดินปั้น
- 2) ใช้แมกนีเซียที่มีความบริสุทธิ์สูงแทนการใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากแมกนีเซียมคาร์บอเนตได้มาจากแร่ในธรรมชาติที่พบสารอื่นเจือปนด้วยเสมอ

## บรรณานุกรม

- [1] D. L. Heiserman, **Exploring Chemical Elements and Their Compounds**, Blue Ridge Summit, PA : Tab Books, United States, (1992).
- [2] P. Auerkari, **Mechanical and Physical Properties of Engineering Alumina Ceramics**, Technical Research Centre of Finland, (1996).
- [3] R. Morrell, **Handbook of properties of technical and engineering ceramics / Part 2, Data reviews. Section 1, High-alumina ceramics**, H.M.S.O., London, United Kingdom, (1987).
- [4] K. Jeffery, J. Wilson, G. Casali, R. Hayman, **Neural encoding of large-scale three-dimensional space—properties and constraints**, (2015).
- [5] M. McDonald, J. Hamilton, **Recent developments in soluble silicate-based binders**, CSC Publishing, (2009).
- [6] S. Ebnesajjad, 8 - **Characteristics of Adhesive Materials**, William Andrew Publishing, Oxford, (2011).
- [7] **Chapter II - Drilling Fluids**, Gulf Professional Publishing, Boston, United States, (2015).
- [8] M. P. Groover, **Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems**, John Wiley, United States, (2007).
- [9] F. Singer, S. S. Singer, **Shaping**, Springer Netherlands, Netherlands, (1963).
- [10] R. A. Terpstra, P. Pex, A. de Vries, A. H. Vries, **Ceramic Processing**, Springer Netherlands, Netherlands, (1995).
- [11] M. N. Rahaman, **Ceramic Processing and Sintering**, Taylor & Francis, (2003).
- [12] C. Blais, 7 - **Atmosphere sintering**, Woodhead Publishing, Cambridge, United Kingdom, (2010).
- [13] G. Y. Onoda, L. L. Hench, **Ceramic processing before firing**, Wiley, New Jersey, United States, (1978).
- [14] M. A. A. Rao, **Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications**, Springer US, United States, (2010).
- [15] F. Irgens, **Rheology and Non-Newtonian Fluids**, Springer International

Publishing, (2013).

[16] S. Sahin, S. G. Sumnu, **Physical Properties of Foods**, Springer New York, United States, (2007).

[17] M. T. K. Kubo, M. L. Rojas, A. C. Miano, P. E. D. Augusto, **Chapter 1 Rheological Properties of Tomato Products**, The Royal Society of Chemistry, (2019).

[18] R. M. German, **Sintering Trajectories: Description on How Density, Surface Area, and Grain Size Change**, *the Journal of Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 68, pp. 878-884 (2016).

[19] S. J. L. Kang, **Sintering Densification, Grain Growth & Microstructure**, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom, (2005).

[20] R. M. German, **Liquid Phase Sintering**, Springer US, United States, (1985).

[21] **Sintering and Grain Growth**, Springer New York, New York, United States, (2007).

[22] O. H. Kwon, **Liquid Phase Sintering: Ceramics**, Elsevier, Oxford, (2001).

[23] **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**, Wiley, (2004).

[24] R. M. German, **Chapter Nine - Sintering With a Liquid Phase**, Butterworth-Heinemann, Boston, (2014).

[25] D. Richerson, D. W. Richerson, W. E. Lee, **Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design, Third Edition**, Taylor & Francis, (2005).

[26] R. Sarkar, M. Mallick, **Formation and densification of mullite through solid oxide reaction technique using commercial grade raw materials**, *Bulletin of Materials Science*, (2017).

[27] T. Wasanapiampong, Y. Ngoengam, C. Mongkolkachit, S. Wanakitti, **Preparation and properties of porous alumina ceramic produced by an extrusion process**, *Proceeding of Suranaree Journal of Science and Technology*, pp. 41-46 (2013).

[28] K. Bodišová, D. Galusek, P. Švančárek, V. Pouchlý, K. Maca, **Grain growth suppression in alumina via doping and two-step sintering**, *Ceramics International*, Vol. 41, pp. 11975-11983 (2015).

[29] W. Dong, H. Jain, M. P. Harmer, **Liquid Phase Sintering of Alumina, I. Microstructure Evolution and Densification**, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 88, pp. 1702-1707 (2005).

- [30] J. G. J. Peelen, **Alumina: Sintering and Optical Properties**, Technische Hogeschool Eindhoven, Eindhoven, (1977).
- [31] W. Dong, H. Jain, M. P. Harmer, **Liquid Phase Sintering of Alumina, III. Effect of Trapped Gases in Pores on Densification**, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 88, pp. 1714-1719 (2005).
- [32] S. Pollington, R. Noort, **An update of ceramics in dentistry**, *Perspectives on Clinical Dentistry*, Vol. 2, pp. 3-27 (2011).
- [33] C. Mongkolkachit, P. Aungkavattana, W. Gosuphan, T. Wasanapiarnpong, **Development of Cordierite Honeycomb Ceramics Using Cordierite Waste**, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (2011).
- [34] P. Bajpai, **Chapter 3 - Pulp and Paper Chemical**, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, (2015).
- [35] T. Frueh, C. Marker, E. R. Kupp, C. Compson, J. Atria, J. L. Gray, L. Zi-Kui, G. L. Messing, **Powder chemistry effects on the sintering of MgO-doped specialty Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 101, pp. 2739-2751 (2018).
- [36] D. Njoya, F. S. Tadjuidje, E. J. A. Ndzana, A. Pountouonchi, N. Tessier-Doyen, G. Lecomte-Nana, **Effect of flux content and heating rate on the microstructure and technological properties of Mayouom (Western-Cameroon) kaolinite clay based ceramics**, *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 5, pp. 422-426 (2017).
- [37] J. S. Magdeski, **The porosity dependence of mechanical properties of sintered alumina**, *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, Vol. 45, pp. 143-148 (2010).
- [38] C. A. Handwerker, P. A. Morris, R. L. Coble, **Effects of Chemical Inhomogeneities on Grain Growth and Microstructure in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 72, pp. 130-136 (1989).
- [39] W. E. Lee, M. Rainforth, **Ceramic Microstructures: Property control by processing**, Springer Netherlands, Netherlands, (1994).
- [40] Weimin Dong, Himanshu Jain, Martin Harmer, **Liquid Phase Sintering of Alumina, II. Penetration of Liquid Phase into Model Microstructures**, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 88, pp. 1708-1713 (2005).
- [41] C. W. Park, D. Y. Yoon, **Abnormal Grain Growth in Alumina with Anorthite**

**Liquid and the Effect of MgO Addition**, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 85, pp. 1585-1593 (2002).

[42] E. Subbarao, **Solid Electrolytes and Their Applications**, Springer US, United States, (2012).





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กัญญภัค ศิริไพศาลทวี
วัน เดือน ปี เกิด	27 กุมภาพันธ์ 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษา: โรงเรียนเซนต์ปอลคอนแวนต์ จังหวัดชลบุรี ปริญญาตรี: แขนงวิชาเซรามิกและวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปริญญาโท: สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	241/12 ถนนพืทยากลาง ตำบลหนองปรือ อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี 20150



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY