

ผลของสารเติมแต่งและขนาดอนุภาคต่อเนื้ออะลูมินาพรุนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

นางสาวธณิกานต์ ธงชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2550

**EFFECTS OF ADDITIVES AND PARTICLE SIZES ON  
EXTRUDED POROUS ALUMINA BODY**

**Tanikan Thongchai**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Ceramic Engineering  
Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2007**

ผลของสารเติมแต่งและขนาดอนุภาคต่อเนื้ออะลูมินาพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร. วีระยุทธ ลอประยูร)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. สุธรรม ศรีหล่มสัก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร. จรัสศรี ลอประยูร)

กรรมการ

(รศ. ดร. สุทิน กุหาเรืองรอง)

กรรมการ

(ดร. ศิริพร ลาภเกียรติถาวร)

กรรมการ

(ศ. ดร. ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร. วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธนิกันต์ ชงชัย : ผลของสารเติมแต่งและขนาดอนุภาคต่อเนื้ออะลูมินาพรุนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด (EFFECTS OF ADDITIVES AND PARTICLE SIZES ON EXTRUDED POROUS ALUMINA BODY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก, 163 หน้า.

การศึกษาและวิจัยอิทธิพลของขนาดอนุภาคอะลูมินาและสารเติมแต่งของวัสดุพรุนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ตอนที่ 1 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7-60 ไมครอนและสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอล ปริมาณชนิดละร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา เพื่อหาสารเติมแต่งที่ปรับปรุงความเหนียวของเนื้อส่วนผสมอะลูมินาที่สามารถขึ้นรูปแบบท่อกวางได้โดยตรง คงรูปได้ดีและเพื่อหาขนาดอนุภาคอะลูมินาและสารเติมแต่ง ที่สามารถให้ขนาดรูพรุนในช่วง 0.1-10 ไมครอน มีปริมาณความพรุนตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 35-50 และมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง : ความทนต่อแรงดัดโค้ง (Bending Strength) มากกว่า 10 เมกะปาสคาล ตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุพรุนตัวแบบท่อกวาง ศึกษาอุณหภูมิในการเผา อัตราเร็วของการเผา และเวลาการเผาแห้งที่ให้วัสดุพรุนตัวแบบท่อกวางที่สามารถให้ขนาดรูพรุน ปริมาณความพรุนตัวและสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง : ความทนต่อแรงดัดโค้ง (Bending Strength) อยู่ในช่วงดังกล่าวในตอนต้น จากนั้นศึกษาคุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่านและการกักสาร เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุพรุนตัวที่ผลิตได้กับวัสดุพรุนตัวทางการค้า

ผลการทดลองตอนที่ 1 พบว่าสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้ลักษณะเนื้อส่วนผสมที่มีความเหนียวและให้ปริมาณความพรุนตัวสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผลิตจากโพลีเอทิลีนไกลคอลและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ในปริมาณสารเติมแต่งที่เท่ากัน อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน ให้ปริมาณรูพรุน ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและความทนต่อการดัดโค้งที่เหมาะสมที่สุด การทดลองตอนที่ 2 พบว่าปริมาณน้ำในส่วนผสมเป็นปัจจัยสำคัญในการขึ้นรูปแบบท่อกวางเครื่องขึ้นรูปแบบรีด โดยปริมาณน้ำที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 25-28 โดยน้ำหนักอะลูมินา และพบว่า ขนาดอนุภาคอะลูมินา มีผลต่อปริมาณความพรุนตัว ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและความทนต่อการดัดโค้ง การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเติมแต่งมีผลต่อปริมาณรูพรุนมาก แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนน้อย การเพิ่มอุณหภูมิในการเผานึ่งและเวลาการเผาแห้งจะส่งผลให้การกระจายตัวของขนาดรูพรุนและปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มลดลง วัสดุพรุนตัวแบบท่อกวางที่ผลิตจากอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณร้อยละ 50 สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาที่ 1,500°C จะมีปริมาณรูพรุน

ร้อยละ 41.46 ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน 0.39 ไมครอน นอกจากนี้ค่าความทนต่อการดัดโค้ง มีค่า 40.50 เมกะปาสคาล ค่าฟลักซ์ ที่ความดัน 1 บาร์มีค่า 2.69 เมตรต่อชั่วโมงและเมื่อนำไปกรองสำหรับจะ มีกาก (Rejection) ร้อยละ 89.70

สาขาวิชา วิศวกรรมเซรามิก

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

TANIKAN THONGCHAI : EFFECTS OF ADDITIVES AND PARTICLE  
SIZES ON EXTRUDED POROUS ALUMINA BODY. THESIS ADVISOR  
: ASST. PROF. SUTHAM SRILOMSAK, Ph.D., 163 PP.

ALUMINA/PARTICLE SIZES/ADDITIVES/ EXTRUSION POLYVINYL  
ALCOHOL/CARBOXYMETHYL CELLULOSE/POLYETHYLENE GLYCOL

The purpose of this investigation is to study effect of alumina particle sizes and additives of porous material fabricated by extrusion. The first part of the experiment was conducted to study effects of alumina particles ranging in size from 0.7-60  $\mu\text{m}$  and additives (Carboxymethyl cellulose, Polyvinyl alcohol and Polyethylene glycol) content of 1.5, 3 and 6% by  $\text{Al}_2\text{O}_3$  weight to determine the optimum additives to improve plasticity of mixture and showed tubular shape and to determine alumina particle sizes and additives resulted pore size 0.1-10  $\mu\text{m}$  35-50 % porosity and bending strength more than 10 MPa. Subsequently, studies of water amount for tubular forming by extrusion machine, sintering temperature, heating rate and soaking time in order to obtain macro porous and the best properties of tubular filters were carried out on the second part. Then water permeability and percent of rejection rate of tubular filter prepared in this experiment was studied compare to those of commercial filter. The results of the first part showed a mixture that can form tubular shape for extrusion can be achieved by adding Carboxymethyl cellulose. Moreover, carboxymethyl cellulose provided highest porosity on the work pieces compared to work pieces formed by adding Polyvinyl alcohol and Polyethylene

glycol. Tubular filter prepared from the mixture of alumina 0.7  $\mu\text{m}$  (50 wt%) and 5  $\mu\text{m}$  (50 wt%), alumina 5  $\mu\text{m}$  (100 wt%) exhibited optimum porosity pore size and bending strength. The second experiment, the results showed the amount of water in mixture was a very important factor for tubular forming by extrusion machine. The appropriate amount of water was 25-28 wt% of alumina. It was found that particle size is the most important factor affecting porosity, pore size and strength. Using different amounts of additives resulted in more changes of porosity than of pore size. The pore size distribution and average pore size were observed to be narrower with increasing sintering temperature and soaking time. Tubular filter prepared from the mixture of 0.7  $\mu\text{m}$  (50 wt%) and 5  $\mu\text{m}$  (50 wt%) with 3% CMC at 1500°C showed 41.46% porosity which average pore size of 0.39  $\mu\text{m}$ . Bending strength was 40.50 MPa water flux rate at 1 bar 2.69 m.h and residual 89.7% rejection.

School of Ceramic Engineering

Academic Year 2007

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจาก ผู้วิจัยได้รับกำลังใจและความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณทุกท่านดังต่อไปนี้

1. คุณอภิชาติ และ คุณเสาวณีย์ ชงชัย บิดามารดาผู้ให้การดูแล เลี้ยงดู สนับสนุนและให้โอกาสทางการศึกษา อีกทั้งเป็นดั่งแรงกำลังใจในการทำงาน
2. ผศ. ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ศิริพร ลากเกียรติถาวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดในสิ่งที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย
3. รศ. ดร.จรัสศรี ลอประยูร และ อ. ดร.วีระยุทธ ลอประยูร ผู้ให้ความเมตตา กรุณา กับผู้วิจัยมาโดยตลอด
4. รศ. ดร.สุทิน กุหาเรืองรอง ผู้ให้คำแนะนำทั้งในเรื่องการดำเนินชีวิตและการศึกษาแก่ผู้วิจัย
5. คุณกิตติพล เจริญพรพิทักษ์ คุณชงชัย สวนเวียง คุณรุ่งเรือง สิงข์ไข่มุก รวมทั้งพนักงานสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ ทุก ๆ ท่าน สำหรับน้ำใจและมิตรภาพอันดีตลอดระยะเวลาขณะปฏิบัติงาน สถาบันวิจัย ฯ จนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยได้สำเร็จ
6. คุณโชคชัย ยาทองชัย คุณปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ และเพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจและคำปรึกษามาโดยตลอด
7. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่สนับสนุนทุนทำวิจัย
8. ครูอาจารย์ในอดีตทุกท่าน

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวมาไว้ข้างต้น รวมทั้งผู้ช่วยเหลือและให้กำลังใจที่มีได้เอ่ยนาม จนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ธณิกานต์ ชงชัย



## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 วัสดุพูนตัว.....	4
2.1.1 การจัดประเภทของรูปพูน.....	4
2.1.2 ข้อดีของวัสดุพูนตัวทางเซรามิก.....	6
2.2 โครงสร้างของวัสดุพูนตัวทางเซรามิก.....	9
2.2.1 โครงสร้างแบบสมมาตร.....	9
2.2.2 โครงสร้างแบบไม่สมมาตร.....	9
2.3 วัสดุและรูปแบบของวัสดุพูนตัวทางเซรามิก.....	10
2.3.1 วัสดุที่ใช้ผลิตวัสดุพูนตัวทางเซรามิก .....	10
2.3.2 รูปแบบของวัสดุพูนตัวเซรามิก.....	10
2.4 วัสดุพูนตัวเซรามิกทางการค้า.....	11
2.4.1 วัสดุพูนตัวเซอร์โคเนีย.....	11
2.4.2 วัสดุพูนตัวอะลูมินา .....	11

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3	วัสดุพูนตัวซิลิกา.....	12
2.5	วิธีการผลิตวัสดุพูนตัวเซรามิก.....	13
2.5.1	วิธีการขึ้นรูป.....	13
2.5.2	สารเติมแต่ง.....	19
2.5.3	การทำให้แห้งและการกำจัดสารเติม.....	25
2.5.4	การเผาผนึก.....	26
2.6	กระบวนการกรองโดยวัสดุพูนตัว.....	29
2.6.1	กระบวนการออสโมซิสผันกลับ.....	29
2.6.2	กระบวนการอุตราฟิลเตรชั่น.....	30
2.6.3	กระบวนการไมโครฟิลเตรชั่น.....	30
2.7	ความสามารถในการไหลผ่านของวัสดุพูนตัว.....	32
2.8	การทำความสะอาดวัสดุพูนตัว.....	33
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
<b>3</b>	<b>วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>42</b>
3.1	อุปกรณ์การทดลอง.....	42
3.2	วัสดุและสารเคมี.....	43
3.3	วิธีการทดลอง.....	44
3.3.1	การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น.....	45
3.3.2	ออกแบบการทดลอง.....	46
3.3.3	การเผาผนึก.....	49
3.3.4	การตรวจสอบคุณสมบัติหลังเผาของชิ้นงาน.....	50
<b>4</b>	<b>ผลการทดลองและอภิปรายผล.....</b>	<b>57</b>
4.1	การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น.....	57
4.2	ผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาและสารเติมแต่งต่อลักษณะเฉพาะ และความทนต่อการดัดโค้ง (Bending strength) จากวิธีทดลองตอนที่ 1.....	60

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

4.2.1	การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน.....	60
4.2.2	การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุน.....	62
4.2.3	การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อความทนต่อการตัดโค้ง.....	63
4.2.4	การศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อลักษณะความเหนียวของเนื้อส่วนผสม.....	65
4.2.5	การศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน.....	67
4.2.6	การศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุน.....	71
4.3	การผลิตวัสดุพูนตัวด้วยการขึ้นรูปแบบรีด (Extrusion).....	76
4.3.1	การเตรียมเนื้อส่วนผสม .....	76
4.3.2	การศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุพูนตัว.....	79
4.3.3	การศึกษาผลของจำนวนรอบต่อหน้าที่ของสกรูเครื่องรีดแบบต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	82
4.4	ผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีดแบบ.....	91
4.4.1	การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีด.....	91
4.4.2	การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีด.....	92
4.4.3	การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีด.....	94
4.4.4	การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน.....	95

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.5 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ พูนตัว.....	96
4.5 การศึกษาผลสารเติมแต่งต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัสดุพูนตัว ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด.....	97
4.5.1 การศึกษาผลสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพูน ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ.....	97
4.5.2 การศึกษาผลสารเติมแต่งต่อค่าเฉลี่ยขนาดพูนและการกระจายตัว ของขนาดรูพูนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีด.....	99
4.5.3 การศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อค่าความทนต่อการตัด โคง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ.....	102
4.5.4 การศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ พูนตัว.....	105
4.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติ ของวัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีดแบบ.....	108
4.6.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาที่มีต่อความหนาแน่น และปริมาณรูพูน.....	108
4.6.2 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาที่มีค่าเฉลี่ยขนาดพูน และการกระจายตัวของขนาดรูพูนของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูป ด้วยวิธีรีด.....	110
4.6.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อค่าความทนต่อการตัด โคง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด.....	112
4.6.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพูนตัว.....	116
4.6.5 การศึกษาผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่มีต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพูนของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูป ด้วยวิธีรีด.....	119

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.6	การศึกษาผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่มีต่อการกระจายของขนาดอนุของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูปด้วยวิธีรีด.....	121
4.6.7	การศึกษาผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพูนตัว.....	124
4.6.8	การศึกษาผลของเวลาการเผาแซ่ที่มีต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพูนของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูปด้วยวิธีรีด.....	125
4.6.9	การศึกษาผลของเวลาการเผาแซ่ต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพูนของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูปด้วยวิธีรีดแบบ.....	128
4.6.10	การศึกษาผลของเวลาการเผาแซ่ต่อ โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพูนตัว.....	130
4.7	การศึกษาคุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่านและการกักสาร.....	132
4.7.1	คุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่าน.....	132
4.7.2	คุณสมบัติในการกักสาร.....	135
4.8	การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุพูนตัวทางการค้า.....	137
4.8.1	การศึกษาความหนาแน่นและปริมาณรูพูน.....	138
4.8.2	การศึกษาการกระจายของขนาดอนุของชิ้นงาน.....	138
4.8.3	การศึกษาโครงสร้างจุลภาค.....	139
4.8.4	คุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่าน.....	141
4.8.5	คุณสมบัติในการกักสาร.....	142
4.9	การเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองกับวัสดุพูนตัวทางการค้า.....	143
4.9.1	ความหนาแน่นและปริมาณรูพูน.....	143
4.9.2	ค่าเฉลี่ยและการกระจายขนาดอนุ.....	144
4.9.3	ความทนต่อการตัดโค้ง.....	144
4.9.4	การทดสอบปลั๊กซ์น้ำกับเวลา.....	145
4.9.5	คุณสมบัติในการกักสาร.....	145
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	146
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	146

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	147
รายการอ้างอิง.....	149
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลการทดสอบการกรอง.....	152
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	161
ประวัติผู้เขียน.....	163

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ประเภทของเซรามิกรูพรุน (Porous ceramic) แบ่งตามขนาดของรูพรุน..... 4
2.2	แสดงความแตกต่างของกระบวนการกรองโดยอาศัยความดันที่ให้กับสารละลายเป็นแรงขับ..... 5
2.3	เปรียบเทียบความสามารถในการนำมาใช้งานระหว่างวัสดุรูพรุนตัวที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกพอลิเมอร์และโลหะ..... 7
2.4	แสดงข้อจำกัดของวิธีการขึ้นรูป.....18
2.5	ตัวหล่อลื่นที่นิยมใช้.....23
2.6	แสดงชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบต่าง ๆ.....25
2.7	แสดงชื่อสารเติมแต่งที่นิยมใช้ในการขึ้นรูป..... 25
3.1	แสดงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 42
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....43
3.3	ส่วนประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมออกไซด์ชนิดต่าง ๆ.....43
3.4	แสดงองค์ประกอบของส่วนผสมในแต่ละตัวอย่าง.....47
4.1	แสดงลักษณะจำเพาะที่วัดได้ของผงอะลูมินา..... 57
4.2	แสดงความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 0.7 ไมครอน 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50, 5 ไมครอน และ 5 ไมครอน ผสมกับอะลูมินา 58 ไมครอนชนิดละ 50 กรัม โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา..... 61
4.3	แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50, 5 ไมครอน และ 5 ไมครอนผสมกับอะลูมินา 58 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา..... 62

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.4	แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน, 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50, 5 ไมครอน และ 5 ไมครอนผสมกับอะลูมินา 58 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	64
4.5	แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีน ไกลคอล ในปริมาณร้อยละ 3 ร้อยละ โดยน้ำหนักอะลูมินาปริมาณน้ำร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก.....	65
4.6	แสดงความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอล ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 ร้อยละ โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	68
4.7	แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	71
4.8	แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	71
4.9	แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดโพลีเอทิลีนไกลคอล ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	72
4.10	แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอลในปริมาณ ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	74



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 แสดงขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและความทนต่อการคัดโค้ง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย อะลูมินาขนาดต่าง ๆ โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาพริกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	76
4.12 แสดงส่วนผสมในการเตรียมชิ้นงานเพื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ ด้วยอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก.....	78
4.13 แสดงส่วนผสมในการเตรียมชิ้นงานเพื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ ด้วยอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน.....	78
4.14 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบของเนื้อส่วนผสม ที่ใช้ อะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก, อะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยผสมกับสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณ ร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ใช้ซิงค์สเตียเรตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก อะลูมินา.....	79
4.15 แสดงค่าจำนวนรอบต่อนาที ณ การปรับระดับทั้งหมด 10 ระดับ.....	82
4.16 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยใช้สารเติมแต่งชนิด คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบ ทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที.....	83
4.17 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยใช้สารเติมแต่งชนิด คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบ ทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที.....	84
4.18 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยใช้สารเติมแต่งชนิด คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบ ทั้ง 10 ระดับทำการทดลองที่ 10 วินาที.....	85

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.19 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที.....	87
4.20 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที.....	88
4.21 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที.....	89
4.22 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาพูนที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและ 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	91
4.23 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาพูนที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	93
4.24 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาพูนที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ชนิดละ 50 กรัมและ 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	94
4.25 แสดงขนาดรูพรุน ปริมาณรูพรุนและความทนต่อการตัดโค้ง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอะลูมินาขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาพูนที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	95

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.26 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุพูนตัวที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 30 ถึง 1000°C .....	96
4.27 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพูนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 ร้อยละโดยน้ำหนักอะลูมินา .....	98
4.28 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพูนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 ร้อยละโดยน้ำหนักอะลูมินา.....	98
4.29 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพูนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	100
4.30 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพูนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	101
4.31 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ชนิดละ 50 กรัม โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	102
4.32 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	102

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.33 แสดงขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและความทนต่อการคัดโค้ง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอะลูมินาขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดละ 50 โดยน้ำหนัก และขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	104
4.34 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดละ 50 โดยน้ำหนักและ 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	108
4.35 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	109
4.36 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	110
4.37 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา หลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	111
4.38 แสดงความค่าความทนต่อการคัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ชนิดละ 50 กรัม โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	113
4.39 แสดงความค่าความทนต่อการคัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอนโดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	113

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.40 แสดงขนาดรูปพรุน ปริมาตรรูปพรุนและความทนต่อการคัดโค้ง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอะลูมินาขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียด 50 โดยน้ำหนัก และขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาพริกที่อุณหภูมิ 1300-1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการเผา 300°C ต่อชั่วโมง.....	115
4.41 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูปพรุนของชิ้นงานหลังเผาด้วยอัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/Hour (H) (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียด 50 โดยน้ำหนักและ 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	119
4.42 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูปพรุนของชิ้นงานหลังเผาด้วยอัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอนโดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	120
4.43 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูปพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียด 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา หลังเผาพริกที่อัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C.....	121
4.44 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูปพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา หลังเผาพริกที่อัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C.....	122

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.45 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาด้วยเวลาการเผาแช่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1500°C ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและ 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	126
4.46 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาด้วยเวลาการเผาแช่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1500°C ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา....	126
4.47 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผานึ่งที่เวลาการเผาแช่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง.....	128
4.48 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผานึ่งที่เวลาการเผาแช่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง.....	128
4.49 แสดงฟลักซ์น้ำที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์.....	133
4.50 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุพูนตัวทางการค้าของบริษัท LPE .....	138
4.51 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของวัสดุพูนตัวทางการค้าของบริษัท LPE .....	138
4.52 แสดงฟลักซ์น้ำที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์.....	141
4.53 เปรียบเทียบความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองกับวัสดุพูนตัวทางการค้าของบริษัท LPE .....	143

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงภาพโครงสร้างของวัสดุพูนตัวทางเซรามิกโครงสร้างแบบสมมาตร..... 9
2.2	แสดงภาพโครงสร้างของวัสดุพูนตัวทางเซรามิกโครงสร้างแบบไม่สมมาตร..... 9
2.3	แสดงรูปแบบวัสดุพูนตัวทางเซรามิกรูปแบบท่อกวาง ท่อรังผึ้งและแบบแผ่น..... 10
2.4	แสดงวิธีขึ้นรูปวัสดุพูนตัวทางเซรามิก ..... 13
2.5	แสดงการขึ้นรูปแบบให้แรงดันอัดทิศทางเดียว..... 14
2.6	แสดงการขึ้นรูปแบบให้แรงดันอัดทุกทิศทาง ..... 15
2.7	แสดงการขึ้นรูปแบบหล่อ..... 16
2.8	แสดงเครื่องขึ้นรูปแบบรีด: แบบลูกสูบ..... 17
2.9	แสดงเครื่องขึ้นรูปแบบรีด: แบบสกรู..... 17
2.10	แสดงห้องต่าง ๆ ภายในเครื่องรีดแบบ..... 18
2.11	แสดงการเชื่อมอนุภาคเซรามิกเข้าด้วยกันด้วยตัวประสานพอลิเมอร์..... 20
2.12	แสดงความสัมพันธ์ของความหนืดกับความเข้มข้นของตัวประสาน..... 21
2.13	ตัวประสานชนิดอินทรีย์สาร..... 22
2.14	แสดงการเกิดประจุที่ผิวอะลูมินาเนื่องด้วย $H_3O^+$ และ $OH^-$ ..... 24
2.15	แสดงการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคขณะเผา..... 28
2.16	แสดงหลักการกรอง..... 29
2.17	ลักษณะการกรองในระบบไมโครฟิลเตรชัน..... 31
3.1	แสดงขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง ตอนที่ 1..... 44
3.2	แสดงขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง ตอนที่ 2..... 45
3.3	แสดงแบบจำลองขนาดวัสดุพูนที่ใช้ในการทดสอบการทนต่อการตัดโค้ง..... 52
3.4	แสดงเครื่องมือทดสอบการกรอง..... 54
3.5	แสดงแบบจำลองส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบการกรอง..... 55
4.1	แสดงรูปแบบฟีก XRD ของผงอะลูมินาที่มีขนาดอนุภาคต่าง ๆ..... 58
4.2	แสดงปริมาณสะสม (ร้อยละ) ของผงอะลูมินาขนาดเฉลี่ย 0.7 ไมครอน..... 59
4.3	แสดงปริมาณสะสม (ร้อยละ) ของผงอะลูมินาขนาดเฉลี่ย 5 ไมครอน..... 59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงปริมาณสะสม (ร้อยละ) ของฟองอะลูมินาขนาดเฉลี่ย 58 ไมครอน.....	60
4.5 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อปริมาณรูพรุน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	61
4.6 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500°C ต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุน.....	63
4.7 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าความทนต่อการคัด ค้าง.....	64
4.8 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อส่วนผสมที่ใช้อุณหภูมิขนาด 0.7 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	66
4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อส่วนผสมที่ใช้อุณหภูมิขนาด 0.7 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	66
4.10 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อส่วนผสมที่ใช้อุณหภูมิขนาด 0.7 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดโพลีเอทิลีนไกลคอล ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	67
4.11 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งต่อปริมาณรูพรุน.....	68
4.12 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....	70
4.13 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์.....	70
4.14 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของโพลีเอทิลีนไกลคอล.....	71
4.15 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุน.....	72
4.16 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุน.....	73
4.17 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งชนิดโพลีเอทิลีนไกลคอลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุน.....	73
4.18 แสดงผลของสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และโพลีเอทิลีนไกลคอลต่อการกระจายขนาดรูพรุนและปริมาณพรอท.....	74
4.19 แสดงแบบจำลองขนาดวัสดุรูพรุนที่ผลิตได้.....	77



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 แสดงผลของความหนาแน่น ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ตามลำดับ.....	86
4.21 แสดงผลของความยาว ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ตามลำดับ.....	86
4.22 แสดงผลของความหนาแน่นที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ.....	90
4.23 แสดงผลของความยาวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ.....	90
4.24 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อปริมาณรูพรุน.....	92
4.25 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อการกระจายขนาดตัวของขนาดรูพรุน.....	93
4.26 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าความทนต่อการตัด โค้ง.....	94
4.27 แสดงภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคของวัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วย (ก) อนุภาคอะลูมินา ขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 (ข) อนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เสาพนักที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	97
4.28 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อปริมาณรูพรุน.....	99

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	100
4.30 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	101
4.31 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความทนต่อการคัดโค้งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและอนุภาคขนาด 5 ไมครอน โดยใช้ที่อุณหภูมิเผา 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	103
4.32 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยภาพ 4.32 (ก) 4.32 (ข) และ 4.32 (ค) ใช้สารเติมแต่งปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนัก อะลูมินา ตามลำดับ.....	105
4.33 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยภาพ 4.33 (ก) 4.33 (ข) และ 4.33 (ค) ใช้สารเติมแต่งปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ตามลำดับ.....	106
4.34 แสดงผลของอุณหภูมิการเผาต่อปริมาณรูพรุน.....	109

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาต่อการกระจายตัวของขนาดพูนของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปด้วย อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิด ละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	111
4.36 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาต่อการกระจายตัวของขนาดพูนของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิด คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	112
4.37 แสดงผลของอุณหภูมิการเผา 1300-1600°C ต่อความทนต่อการคัดโค้งของชิ้นงานที่ ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิด ละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและอนุภาคขนาด 5 ไมครอนโดยใช้สารเติมแต่งชนิด คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา .....	114
4.38 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติม แต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา โดยภาพ 4.38 (ก) 4.38 (ข) และ 4.38 (ค) เผาที่อุณหภูมิ 1400, 1500 และ 1600°C ตามลำดับ.....	116
4.39 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา โดยภาพ 4.39(ก) 4.39 (ข) และ 4.39 (ค) เผาที่อุณหภูมิ 1400, 1500 และ 1600°C ตามลำดับ.....	117
4.40 แสดงผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ต่อปริมาณรูพูน.....	120
4.41 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C ต่อการกระจายตัวของขนาดพูนของชิ้นงานที่ขึ้นรูป ด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก.....	122

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผา ชั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C ต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน.....	123
4.43 แสดงถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้ สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อะลูมินา โดยภาพ 4.43 (ก) 4.43 (ข) และ 4.43 (ค) โดยใช้อัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาชั้นที่ 2 และ 3) เผาที่อุณหภูมิ 1500°C ตามลำดับ.....	124
4.44 แสดงผลของเวลาการเผาแช่ที่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมงต่อปริมาณรูพรุน ของชิ้นงานที่ขึ้น รูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดละ 50 โดยน้ำหนัก และอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิด คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา.....	127
4.45 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาการเผาแช่ต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนและปริมาณ พรอทของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดละ 50 .....	129
4.46 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาการเผาแช่ต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนและปริมาณ พรอทของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน.....	129
4.47 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่ง ชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา โดยภาพ 4.47 (ก) 4.47 (ข) และ 4.47 (ค) เผาที่อุณหภูมิ 1500°C โดยใช้เวลาเผาแช่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ.....	130
4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์น้ำกับเวลาที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ ของวัสดุ พรุนตัวที่ผลิต.....	133
4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและฟลักซ์น้ำของวัสดุพรุนตัวที่ผลิต.....	134

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.50	แสดงฟลักซ์น้ำของวัสดุพูนตัว 2 ชั้นที่ผลิตในสถานะเดียวกันแต่ผลิตคนละครั้ง..... 134
4.51	(ก) แสดงน้ำสาหร่ายที่ใช้ในการกรอง (ข) แสดงน้ำสาหร่ายที่ผ่านการกรองสาหร่าย นอสดอกออกไป และ (ค) แสดงสาหร่ายที่วัสดุพูนตัวไม่สามารถกักกันไว้ตามลำดับ..... 136
4.52	แสดงเพอมีเอทฟลักซ์ของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้น เมื่อใช้สาหร่ายนอสดอกความเข้มข้น 1.87 กรัม/ลิตร ที่ความดัน 1 บาร์..... 137
4.53	แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพูนของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE..... 138
4.54	โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวด้านในของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE..... 139
4.55	โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวด้านในนอกของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE..... 139
4.56	โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวจากรอยแตกของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE..... 140
4.57	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์น้ำกับเวลาที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ ของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE..... 141
4.58	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและฟลักซ์น้ำของวัสดุพูนตัวทางการค้า จากบริษัท LPE..... 142
4.59	แสดงเพอมีเอทฟลักซ์ของวัสดุพูนตัวจากบริษัท LPE เมื่อใช้สาหร่ายนอสดอก ความเข้มข้น 1.87 กรัม/ลิตร ที่ความดัน 1 บาร์..... 143
4.60	แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อการกระจายตัวของขนาดรูพูนเปรียบเทียบ ระหว่างวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองและวัสดุพูนตัวจากบริษัท LPE..... 144

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

วัสดุรูพรุนหรือวัสดุพรุนตัว (Porous material) หมายถึง วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ มีรูพรุนเปิดภายใน เป็นรูพรุนที่เชื่อมโยงถึงกันและสามารถติดต่อกับผิวของชิ้นงานได้ เมื่อพิจารณาการใช้งานของวัสดุพรุนตัวโดยใช้ความดันที่ให้กับสารละลายเป็นแรงขับ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ออสโมซิสผกกลับ (Reverse osmosis : RO) อุลตราฟิลเตรชัน (Ultra filtration : UF) และไมโครฟิลเตรชัน (Micro filtration : MF) ปัจจุบันกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันหรือกระบวนการกรองที่ขนาดรูพรุนของวัสดุพรุนตัวอยู่ในช่วง 0.1-10 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) มีความดันอยู่ในช่วง 0.5-2 บาร์ เป็นแรงขับ โดยตัวทำละลายและสารละลายที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนจะผ่านวัสดุพรุนตัวออกไป ได้ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์สำหรับกรองน้ำโลหะในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (Lahiere, R.J. and Goodboy, K.P., 1993) ใช้เพื่อแยกสีและน้ำออกจากกันในอุตสาหกรรมการผลิตสี (Nooijen, W.F.J.M. and Muilwijk, B., 1994) ทั้งนี้รวมถึงการนำเอาวัสดุรูพรุนมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการทำให้สารบริสุทธิ์ ในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการกรองแบคทีเรียออกจากเบียร์ ไวน์ ในอุตสาหกรรมผลิตนม ใช้ผลิตโปรตีนเข้มข้นจากหางนม (ปฏิมา เทพายน, 2542) นอกจากนี้ในงานระดับงานวิจัยมีการใช้วัสดุพรุนตัวในประโยชน์ต่าง ๆ เช่น ในทางการแพทย์ใช้วัสดุพรุนตัวในการแยกสารบางอย่างจากเลือดในคนไข้โรคไต นอกจากนี้ในทางเทคโนโลยีชีวภาพมีการใช้วัสดุพรุนตัวในการแยกผลิตภัณฑ์จากการหมักจากปฏิกิริยาของเอ็นไซม์ การแยกเซลล์จุลินทรีย์หรือการแยกสารละลายออกจากน้ำเพื่อบำบัดน้ำเสียหรือดักจับสารพิษที่ก่อให้เกิดพิษ (ฉัฐพล ทรงประเสริฐ, 2536) เป็นต้น

วัสดุสำหรับผลิตวัสดุพรุนตัวนั้นแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ

1. สารอินทรีย์ ได้แก่ พอลิเมอร์ (Polymer) เช่น เซลลูโลส เอสเทอร์ (Cellulose ester) อย่างไรก็ตามวัสดุพรุนตัวที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์เหล่านี้มีอายุการใช้งานประมาณ 1-4 ปี และไม่สามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรด-ด่างหรือแรงดันสูง ๆ ได้
2. สารอนินทรีย์ ได้แก่ โลหะและเซรามิก โลหะ เช่น สแตนเลส (Stainless) อัดลอยด์ (Alloy) วัสดุพรุนตัวที่ผลิตจากโลหะจะมีความทนทานต่อความดันและความร้อนแต่มีราคาแพง ในขณะที่วัสดุที่ใช้ทำวัสดุพรุนตัวทางเซรามิก เช่น อะลูมินา (Alumina) ซิลิกา (Silica) เซอร์โคเนีย

(Zirconia) วัสดุพอร์ซันที่ผลิตจากสารวัสดุเซรามิกจะมีความสามารถทนต่อสารเคมี ทนอุณหภูมิสูง มีความแข็งแรง ทนความดันสูง อายุการใช้งานนาน

จากการสำรวจตลาดทั่วโลกในปี 1990 พบว่า ตลาดของวัสดุพอร์ซันตัวทางเซรามิกมีแนวโน้มในการนำมาใช้งานมากขึ้นเรื่อย ๆ (Crull. A., 1991) เนื่องจากสามารถนำมาใช้งานในสภาวะต่าง ๆ ได้ดี แข็งแรง ทนต่ออุณหภูมิหรือความดันสูงและมีอายุการใช้งานนาน วัสดุพอร์ซันจะมีหลายรูปแบบ โดยในการเลือกรูปแบบใดเพื่อใช้งานนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงนอกจาก ความแข็งแรง ทนทาน ลักษณะการติดตั้งและการบำรุงรักษาแล้ว สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือ พื้นที่และปริมาณในการกรอง โดยในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้วัสดุพอร์ซันตัวรูปแบบท่อเพื่อพื้นที่และปริมาณการกรองสูง ซึ่งนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีรีด (Extrusion) (ปฏิมา เทพยายน, 2542) ในการผลิตวัสดุพอร์ซันตัวทางเซรามิกแบบท่อนั้น วัสดุที่นิยมนำมาผลิตวัสดุพอร์ซันตัว ได้แก่ อะลูมินา เนื่องจากอะลูมินา เป็นวัสดุที่มีความโดดเด่นด้านความแข็งแรง (Strength) ทนต่อสารเคมี กรด-ด่าง (Chemical resistance) อย่างไรก็ตาม อะลูมินาเป็นวัสดุไม่มีความเหนียว (Non plastic material) ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเหนียวและควบคุมปริมาณความชื้น เพื่อให้เนื้อส่วนผสมสามารถขึ้นรูปแบบรีดได้วัสดุพอร์ซันตัวแบบท่อกลวง นอกจากนี้ขนาดอนุภาค ชนิด และปริมาณสารเติมแต่ง ยังส่งผลต่อความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน ขนาดรูพรุน ความแข็งแรงของวัสดุพอร์ซันตัวด้วย

จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาและวิจัย ชนิดของสารเติมแต่งที่สามารถปรับปรุงเนื้อส่วนผสมให้เกิดความเหนียว ปริมาณน้ำและสภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป ผลของขนาดอนุภาคอะลูมินา ปริมาณสารเติมแต่งและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุพอร์ซันตัวรูปแบบท่อกลวง ด้วยการขึ้นรูปแบบรีด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการผลิตวัสดุพอร์ซันตัวระดับแมคโครพอร์ เพื่อใช้งานในกระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันในงานอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่ง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinly alcohol, PVA) และโพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethyleneglycol, PEG) ขนาดอนุภาคอะลูมินาในช่วง 0.7-60 ไมครอน และอุณหภูมิกับเวลาในการเผาพูนึกต่อคุณสมบัติด้านความหนาแน่น ปริมาณความพรุนตัวขนาดของรูพรุนและความทนต่อการดัดโค้ง (Bending strength)

2. เพื่อศึกษาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของเนื้อส่วนผสม และให้ได้เทคโนโลยีในการขึ้นรูปเนื้ออะลูมินาแบบรีด ให้มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 0.1-10 ไมครอนมีปริมาณความพรุนตัว

อยู่ในช่วงร้อยละ 35-50 และมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง : ความทนต่อการตัดโค้ง มากกว่า 10 เมกกะปาสคาล

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารเติมแต่ง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอล ขนาดของอนุภาคอะลูมินาในช่วง 0.7-60 ไมครอนและอุณหภูมิการเผาผนึก ที่มีผลต่อความหนาแน่น ปริมาณความพรุนตัว ขนาดรูพรุนและความทนต่อการตัดโค้ง

2. หาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของเนื้อส่วนผสมระหว่างเนื้ออะลูมินา ในช่วงขนาด 0.7-60 ไมครอน และสารเติมแต่งที่เหมาะสม โดยเลือกจาก คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอล เพื่อขึ้นรูปเนื้อส่วนผสมให้มีลักษณะเป็นท่อกวางด้วยวิธีการรีด เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีรูพรุนอยู่ในช่วง 0.1-10 ไมครอน มีปริมาณความพรุนตัวร้อยละ 35-50 และมีสมบัติเชิงกลด้านความทนต่อการตัดโค้งมากกว่า 10 เมกกะปาสคาล

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบชนิดสารเติมแต่งที่ให้ลักษณะความเหนียวที่เหมาะสมแก่การขึ้นรูปแบบรีด
2. ทำให้ทราบขนาดอนุภาคอะลูมินาและปริมาณสารเติมแต่งที่ให้วัสดุพรุนที่มีขนาดรูพรุนในระดับแมคโครพอร์
3. ทำให้ทราบปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุพรุนตัวรูปแบบท่อกวาง
4. ทำให้ทราบอิทธิพลของ อุณหภูมิการ เผา อัตราการเผาและอุณหภูมิการเผาแช่ต่อคุณสมบัติของวัสดุพรุนตัวรูปแบบท่อกวาง
5. ได้กรรมวิธีการผลิตวัสดุพรุนตัวรูปแบบท่อกวาง



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุพอร์นตัว

##### 2.1.1 การจัดประเภทของรูพอร์น

หากพิจารณาขนาดรูพอร์นเป็นเกณฑ์ โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งได้ดังนี้ ไมโครพอร์ (Micro porous) มีโซพอร์ (Meso porous) และแมโครพอร์ (Macro porous)

ตารางที่ 2.1 ประเภทของเซรามิกรูพอร์น (Porous ceramic) แบ่งตามขนาดของรูพอร์น

(Kang, S., Yu, J.S., Krunk, M. and Jaronlec, M., 2002)

ประเภทของรูพอร์น	ขนาดรูพอร์น (นาโนเมตร)
ไมโครพอร์	น้อยกว่า 2
มีโซพอร์	2-50
แมโครพอร์	มากกว่า 50

หากพิจารณาโดยอาศัยความแตกต่างความดันที่ให้กับสารละลายเป็นแรงขับ คือ

1. ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis)
2. อุลตราฟิลเตรชัน (Ultra filtration)
3. ไมโครฟิลเตรชัน (Micro filtration)

ตารางที่ 2.2 แสดงความแตกต่างของกระบวนการกรองโดยอาศัยความดันที่ให้กับสารละลาย เป็นแรงขับ (ณัฐพล ทรงประเสริฐ, 2536)

การใช้งาน	กระบวนการ		
	RO	UF	MF
1.ความดันใช้งาน (บาร์)	20-80	1-10	0.5-2
2.ขนาดของรูพรุน (ไมครอน)	0.0001-0.001	0.001-0.1	0.1-10
3.การไหลผ่านโมเลกุลตัวทำละลาย	Solution Diffusion	Flow through pore	Flow through pore
4.การไหลผ่านโมเลกุลตัวถูกละลาย	Diffusion หรือ Molecular sieve	Diffusion หรือ Molecular sieve	Diffusion หรือ Molecular sieve

จากตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 พบว่า ขนาดรูพรุนในระดับไมโครพอร์ เหมาะที่จะใช้งานในกระบวนการกรองแบบออสโมซิสผันกลับ มีโซพอร์ เหมาะที่จะใช้งานในกระบวนการอูลตราฟิลเตรชัน ซึ่งกระบวนการนี้ ส่วนใหญ่จะใช้เพิ่มความเข้มข้นโปรตีนในน้ำนมก่อนทำเนยแข็ง และขนาดรูพรุนในช่วงแมคโครพอร์เหมาะที่จะใช้งานในช่วงการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน ในปัจจุบันการกรองประเภทไมโครฟิลเตรชัน ได้รับความสนใจในการศึกษาและวิจัยเนื่องจากประโยชน์ในการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมในหลาย ๆ ด้าน เช่น

1. อุตสาหกรรมนม ใช้วัสดุพรุนเพื่อกำจัดแบคทีเรียและไขมันออกจากน้ำนม (ปฏิมา เทพายน, 2542)
2. อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เช่น เบียร์ ไวน์และน้ำผลไม้ ใช้วัสดุพรุนตัวกรองจุลินทรีย์ออกไปทำให้ผลิตภัณฑ์สะอาด ปราศจากเชื้อ (ปฏิมา เทพายน, 2542)
3. การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมปิโตรเคมีใช้วัสดุพรุนตัวอะลูมินากรองน้ำโลหะหนัก (Lahiere, R.J. and Goodboy, K.P., 1993)
4. อุตสาหกรรมการผลิตสี ใช้วัสดุพรุนตัวเพื่อแยกสีและน้ำออกจากกัน (Nooijen and Mulwijk, 1994)
5. ระดับงานวิจัยด้านเทคโนโลยีชีวภาพ ใช้ในกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ (ณัฐพล ทรงประเสริฐ, 2536)

ดังที่ได้กล่าวเบื้องต้นวัสดุที่ใช้ในการทำวัสดุพรุนตัว แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันตลาดของวัสดุพรุนตัวที่ผลิตจากสารอนินทรีย์มีแนวโน้มการถูกนำมาใช้งานมากขึ้น โดยเฉพาะวัสดุพรุนตัวทางเซรามิก เนื่องจากสามารถนำมาใช้งานในสภาวะต่าง ๆ และทนทานต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิสูง ความดัน

สูง หรือสภาวะกรด-ด่าง อีกทั้งสามารถเก็บรักษาและทำความสะอาดได้ง่ายกว่าเพราะมีความแข็งแรง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

### 2.1.2 ข้อดีของวัสดุพอร์นตัวทางเซรามิก

1. เสถียรต่ออุณหภูมิ (Thermal stability) วัสดุพอร์นตัวทางเซรามิกสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าวัสดุพอร์นตัวจากสารอินทรีย์ บางครั้งสามารถนำวัสดุพอร์นตัวทางเซรามิกไปใช้กับงานที่อุณหภูมิสูงถึง 300°C ได้ ข้อดีนี้ทำให้สามารถนำวัสดุพอร์นตัวทางเซรามิกไปใช้งานในอุณหภูมิสูงเพื่อลดความหนืดของสารป้อน ซึ่งจะทำให้ฟลักซ์ของวัสดุพอร์นตัวเพิ่มขึ้น รวมทั้งสามารถใช้ไอน้ำทำความสะอาดเพื่อฆ่าเชื้ออุปกรณ์วัสดุพอร์นตัวในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อุตสาหกรรมนม เครื่องดื่มและยารักษาโรคได้

2. ทนตัวกลางที่ไม่ใช่น้ำ (Non-aqueous media) จึงสามารถใช้ได้กับสารไฮโดรคาร์บอนและตัวทำละลายทั้งหลาย

3. ทนทานต่อสารเคมีและกรด-ด่าง (Chemical resistance) สามารถใช้กับสารละลายที่มีความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำหรือสูงมาก ๆ ได้ นอกจากนี้การทำความสะอาดทำได้ง่ายโดยใช้กรด หรือด่างโดยไม่ทำให้คุณสมบัติของวัสดุพอร์นตัวเสียไป ส่วนวัสดุพอร์นตัวจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่จะใช้งานได้กับสารละลายที่มี pH ในช่วงแคบกว่า

4. ทนทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ (Biological resistance) วัสดุที่ใช้ผลิตวัสดุพอร์นตัวทางเซรามิกเป็นพวกอนินทรีย์สาร ซึ่งไม่มีสารอาหารที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพอร์นตัวที่ผลิตขึ้นจากสารอินทรีย์

5. มีความแข็งแรงสูง จึงสามารถใช้งานที่มีแรงดันสูง ๆ ได้

6. อายุการใช้งานยาวนาน

7. ทำความสะอาดและเก็บรักษาได้ง่าย โดยสามารถทำความสะอาดโดยใช้สารเคมีกรด-ด่าง หรือขณะกำลังกรองอาจใช้วิธีอัดความดันเข้าด้านหลังของวัสดุพอร์นตัว เพื่อให้แรงดันไปดันให้อนุภาคที่สะสมอยู่บนผิววัสดุพอร์นตัวหลุดออกไป นอกจากนี้การเก็บรักษาสามารถเก็บไว้ที่บรรยากาศภายนอกได้ไม่เหมือนกับวัสดุพอร์นตัวจากสารอินทรีย์ซึ่งจะต้องแช่สารเคมี เช่น ฟอมาลิน (Formalin) หรือ แอลกอฮอล์ (Alcohol) และผิวของวัสดุพอร์นตัวจากสารอินทรีย์ต้องเปียกอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากถ้าแห้งอาจจะทำให้คุณสมบัติในการกรองเปลี่ยนไป



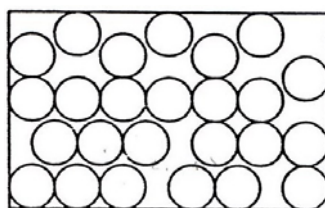


## 2.2 โครงสร้างของวัสดุพอร์นตัวทางเซรามิก

โดยในการผลิตวัสดุพอร์นตัวเซรามิกนั้น เมื่อพิจารณาตามสัณฐานวิทยา คือ พิจารณาตามลักษณะพื้นผิวและรูพอร์นจะสามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างเป็น 2 แบบ คือ

### 2.2.1 โครงสร้างแบบสมมาตร (Symmetric structure)

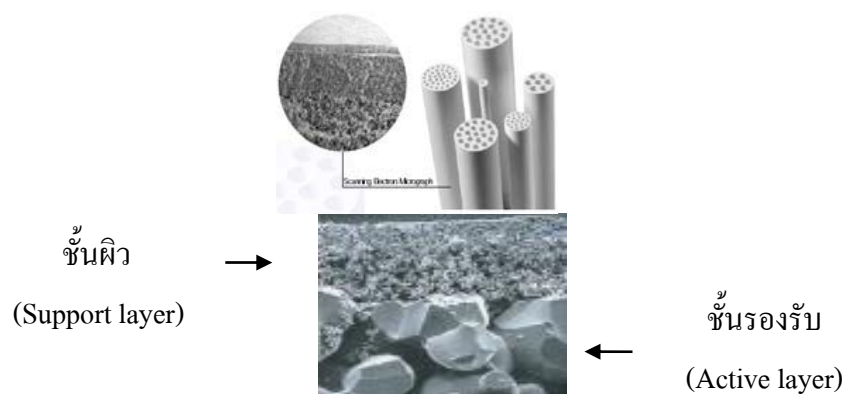
เป็นโครงสร้างที่มีรูพอร์นสม่ำเสมอตลอดความหนาของชั้นงาน



รูปที่ 2.1 แสดงภาพโครงสร้างของวัสดุพอร์นตัวทางเซรามิกโครงสร้างแบบสมมาตร  
(ปฎิมา เทพยายน, 2542)

### 2.2.2 โครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Asymmetric structure)

เป็นโครงสร้างที่มีโครงสร้างหลายชั้น นั่นคือ ประกอบด้วยชั้นรองรับและชั้นผิว ซึ่งทำหน้าที่ในการกรองสาร โดยชั้นผิวอาจจะเคลือบอยู่ด้านนอกหรือด้านในของวัสดุพอร์นตัวก็ได้



รูปที่ 2.2 แสดงภาพโครงสร้างของวัสดุพอร์นตัวทางเซรามิกโครงสร้างแบบไม่สมมาตร  
(Pall Corporation, www, 2007)

## 2.3 วัสดุและรูปแบบของวัสดุพอร์ซิวทางเซรามิก

### 2.3.1 วัสดุที่ใช้ผลิตวัสดุพอร์ซิวทางเซรามิก

วัสดุเซรามิกที่ใช้ในการผลิตวัสดุพอร์ซิวทางเซรามิกเพื่อใช้งานด้านการกรองสารสามารถแบ่งออก เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มออกไซด์ (Oxides) เช่น อะลูมินา ซิลิกา เซอร์โคเนีย เป็นต้น
2. กลุ่มนอนออกไซด์ (Non oxides) เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ซิลิกอนไนไตรด์ (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้น

ในกระบวนการผลิตวัสดุพอร์ซิวเซรามิกนั้น นอกจากกระบวนการในการผลิตแล้ว วัสดุที่ใช้ในการผลิตก็เป็นตัวแปรสำคัญตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุพอร์ซิว นั่นคือ ต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในการใช้งานรวมทั้งต้นทุนในการผลิตอีกด้วย โดยทั้งสองกลุ่มที่กล่าวมา เมื่อเปรียบเทียบโดยรวมแล้ว กลุ่มออกไซด์จะมีราคาถูกและกระบวนการผลิตง่ายกว่า ในขณะที่กลุ่มนอนออกไซด์จะให้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติทางกลและใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า

### 2.3.2 รูปแบบของวัสดุพอร์ซิวเซรามิก

รูปแบบของวัสดุพอร์ซิวทางเซรามิกนั้น แบ่งเป็น 3 รูปแบบด้วยกันคือ แบบแผ่น (Disk) แบบท่อกลวง (Tube) และแบบท่อรังผึ้ง (Multichannel monolith)



รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบวัสดุพอร์ซิวทางเซรามิกในรูปแบบท่อกลวง ท่อรังผึ้งและแบบแผ่น

(Attaxx, www, 2005)

โดยในการเลือกวัสดุพอร์ซิวเซรามิกในรูปแบบใดนั้น นอกจากจะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงทนทาน การติดตั้ง บำรุงรักษาแล้ว ปริมาตรต่อพื้นที่ในการกรองจะต้องสูง ดังนั้น วัสดุพอร์ซิวแบบแผ่น จึงเหมาะสำหรับห้องวิจัยหรืองานทางการแพทย์ แต่โดยรวมแล้วไม่เป็นที่นิยมมากนัก สำหรับงานอุตสาหกรรมแล้วนิยมใช้แบบท่อกลวงหรือแบบรังผึ้งมากกว่า

## 2.4 วัสดุพรมตัวเซรามิกทางการค้า

### 2.4.1 วัสดุพรมตัวเซอโรโคเนีย

บริษัท Gaston county dyeing machine ซึ่งเป็นเครือบริษัทของ Union carbide ได้ผลิตวัสดุพรมตัวอุลตราฟิวเตรชันติดอยู่บนแผ่นรองรับพรมที่ทำด้วยคาร์บอน มีชื่อทางการค้าว่า Ucarsep<sup>2</sup> วัสดุพรมตัวนี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มโดยทนสภาวะความเป็นกรดต่างได้ตั้งแต่ pH 1-14 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในทางปฏิบัติประมาณ 150°C วัสดุพรมตัวระบบนี้จะให้ประโยชน์ได้มากที่สุดเมื่อใช้งานอยู่ในช่วงความดันระหว่าง 20 ถึง 200 psi และมีอัตราการไหลแบบ Cross flow อยู่ในช่วง 4-7 m/s ที่อุณหภูมิ 38°C ความสามารถในการยอมให้น้ำไหลผ่าน (Water permeability) ของวัสดุพรมตัวนี้มีค่าประมาณ 50-120 L/m<sup>2</sup>.h.bar วัสดุพรมตัว Ucarsep<sup>2</sup> ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การกำจัดน้ำมันออกจากน้ำทิ้ง กระบวนการทำชีวจีว อุตสาหกรรมกระดาษ เพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียนในอุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมแอลกอฮอล์ การแยกสารย้อมสีในอุตสาหกรรมทอผ้า เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

บริษัท SPEC (Societe de fabrication d' elements catalyques) ในฝรั่งเศสได้ปรับปรุงวัสดุพรมตัว Ucarsep<sup>2</sup> โดยทำให้ชั้นวัสดุพรมตัวเซอโรโคเนียยึดเกาะกับชั้นรองรับคาร์บอนที่มีรูพรุนและให้ชื่อทางการค้าของวัสดุพรมตัวที่ผลิตขึ้นใหม่นี้ว่า Carbosep วัสดุพรมตัวชนิดนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร รวมทั้งเทคโนโลยีชีวภาพและอุตสาหกรรมยา เช่น การทำน้ำผลไม้ให้ใส การแยกโปรตีนจากหางนม เพิ่มความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียและไวรัสในวัคซีน การสังเคราะห์สารประกอบของกรดอะมิโน และเอ็นไซม์ การผลิตเนยแข็งจากหางนม ในการทำความสะอาดจะใช้ pH อยู่ในช่วง 1-13 และถึงแม้ว่าวัสดุพรมตัวนี้สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ถึง 300°C ในทางปฏิบัติงานจริงอุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรสูงเกินกว่า 150°C เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตตามรอยต่อท่อต่าง ๆ จะเสื่อมสภาพได้ง่ายถ้าได้รับอุณหภูมิสูง ความสามารถในการยอมให้น้ำไหลผ่านวัสดุพรมตัวนี้มีค่าประมาณ 45-250 L/m<sup>2</sup>.h.bar ที่อุณหภูมิ 25°C ระบบของวัสดุพรมตัว Carbosep<sup>2</sup> นี้สามารถทำให้ปลอดเชื้อโดยใช้ไอน้ำได้และทำความสะอาดด้วยสารเคมี นั่นคือ ด้วยกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) ได้อุณหภูมิ 50 ถึง 80°C

### 2.4.2 วัสดุพรมตัวอะลูมินา

บริษัท Alcoa/SCT ได้ผลิตวัสดุพรมตัวไมโครฟิวเตรชันจากอะลูมินา ขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน ความสามารถในการยอมให้น้ำไหลผ่าน มีค่าประมาณ 3000 L/m<sup>2</sup>.h.bar ในแบบ Multichannel monolith ภายใต้ชื่อการค้าว่า Membralox<sup>2</sup> แต่ละกลุ่มของ monolith ใน multichannel ประกอบไปด้วยช่องจำนวน 19 ช่อง ภายในช่องถูกเคลือบด้วยชั้นของวัสดุพรมตัวซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ในช่วง 40 อังสตรอม (Å) ถึง 5 ไมครอน แต่ละส่วนของ Housing จะ



ประกอบด้วย 19 Monolith multichannel ถึงแม้วัสดุพอร์ซันสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ แต่อุปกรณ์ที่ใช้กันรั้วตามข้อต่อต่าง ๆ ซึ่งผลิตจากสารพอลิเอลาสโตเมอร์ (Elastomer) จะไม่ทนทานต่ออุณหภูมิสูงมากนัก ดังนั้น จึงควรใช้อุณหภูมิในการสเตรอไรซ์ด้วยไอน้ำประมาณ 140°C เพื่อทำความสะอาดวัสดุพอร์ซัน ส่วนวัสดุพอร์ซันไมโครไฟเวรชันสามารถใช้สารเคมีในการทำมาสะอาดได้ เช่นเดียวกับวัสดุพอร์ซันที่ผลิตจากเซอร์โคเนีย เช่น Carbosep<sup>2</sup> ตัวอย่างการใช้วัสดุพอร์ซัน Membralox<sup>2</sup> ในอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมเครื่องคั้ม เช่น เบียร์ น้ำผลไม้และไวน์ ใช้วัสดุพอร์ซันนี้ในการกรองของเหลวให้ใสและปราศจากเชื้อ นอกจากนี้ก็มีการใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันและนมพร้อมมันเนย รวมทั้งใช้ในการกรองจุลินทรีย์ออกจากของเหลวในอุตสาหกรรมยา เป็นต้น

บริษัท Norton ได้ผลิตวัสดุพอร์ซันอะลูมินาในรูปแบบท่อเดี่ยว มีชื่อทางการค้าว่า Ceraflo<sup>2</sup> จนกระทั่ง 1987 จึงได้ออกแบบวัสดุพอร์ซันไมโครไฟเวรชัน Alpha alumina โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพอร์ซันอยู่ในช่วง 0.2-2 ไมครอน สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 750°C แต่ถึงกระนั้นก็ตาม อุณหภูมิที่ใช้งานจริงจะอยู่ที่ 140°C เท่านั้น วัสดุพอร์ซันนี้สามารถนำไปฆ่าเชื้อด้วยการสเตรอไรซ์ด้วยไอน้ำ ความสามารถในการยอมให้น้ำไหลผ่านของวัสดุพอร์ซัน Ceraflo<sup>2</sup> ใกล้เคียงวัสดุพอร์ซัน Membralox<sup>2</sup> วัสดุพอร์ซัน Ceraflo<sup>2</sup> สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องคั้ม เทคโนโลยีชีวภาพและอุตสาหกรรมยา

บริษัท NGK insulator ของญี่ปุ่นได้ผลิตวัสดุพอร์ซันอะลูมินาซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพอร์ซันเล็กประมาณ 0.2 ไมครอน วัสดุพอร์ซันที่ผลิตขึ้นนี้มีรูปแบบเป็นท่อและแบบแผ่น มีการนำไปใช้ในการกำจัดแบคทีเรียออกจากเบียร์และไวน์ การกรองน้ำที่ไม่มีประจุและการแยกผลึกในอุตสาหกรรมยา

### 2.4.3 วัสดุพอร์ซันซีลิกา

บริษัท Asahi glass บริษัท Fuji filter manufacturing company และบริษัท Schott glass ได้ผลิตวัสดุพอร์ซันแก้วในรูปแบบของท่ออะปิลลารีที่มีครวมกันแบบท่อเดี่ยวและแบบแผ่นเรียบจากแก้ว เพื่อใช้ในกระบวนการแยกวัสดุพอร์ซันที่ผลิตขึ้นนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพอร์ซันอยู่ในช่วง 40 อังสตรอม ถึง 3 ไมครอน สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ไม่เกิน 800°C วัสดุพอร์ซันที่ผลิตจากแก้วหรือซีลิกานี้ได้นำมาใช้ผลิตน้ำดีจากน้ำทะเลและจากน้ำกร่อย ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายยูเรีย โดยอาศัยหลักการของไฮเปอร์ไฟเวรชันส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันจากสารแขวนลอยผสมระหว่างน้ำและน้ำมัน จะใช้กระบวนการอุลตราไฟเวรชัน ที่มีความดันสูงและการแยกผลึกกันเมตาบอลิกจากเลือดในไต วัสดุพอร์ซันที่ผลิตจากแก้วนี้จะทนอุณหภูมิสูงได้ในช่วง 700-800°C ความสามารถในการยอมให้น้ำไหลผ่านได้มีค่าประมาณ 1-1.5 L/m<sup>2</sup>.h.bar

## 2.5 วิธีการผลิตวัสดุพูนตัวเซรามิก

ในกระบวนการผลิตวัสดุพูนตัวเซรามิกนั้น จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

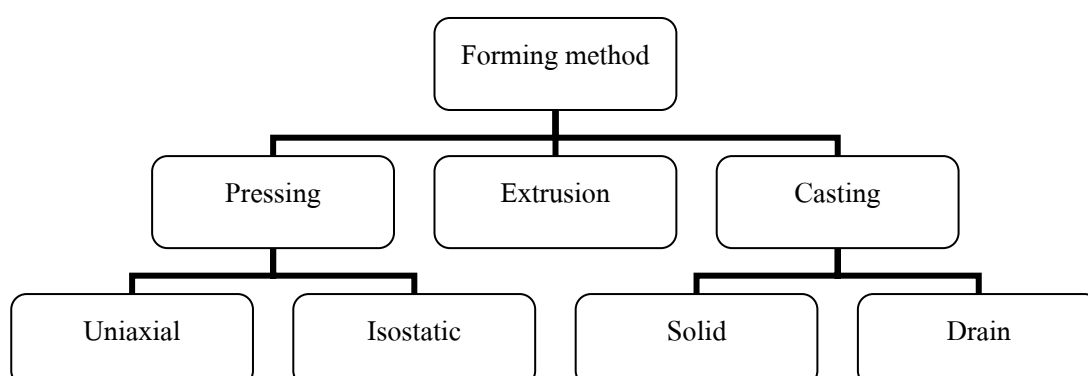
1. การขึ้นรูป เป็นขั้นตอนสำหรับขึ้นรูปวัสดุพูนตัวให้มีรูปทรงหรือรูปแบบตามต้องการ
2. การทำให้แห้งและกำจัดสารเติมแต่ง
3. การเผาผลาญ เป็นขั้นตอนการทำให้วัสดุพูนตัวมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยใช้อุณหภูมิ

สูง

ซึ่งวิธีการขึ้นรูปที่เป็นที่แพร่หลายสำหรับการขึ้นรูปแบบทอกลวงและแบบรังผึ้ง คือ วิธีรีด โดยวัตถุดิบที่นิยมนำมาขึ้นรูปกันอย่างแพร่หลายคือ อะลูมินา เนื่องจาก สมบัติที่โดดเด่นกว่าวัสดุอื่น ๆ เช่น ด้านความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนทางเคมีและทนต่อการขีดสี อะลูมินาเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียว ดังนั้น ในการขึ้นรูปจึงต้องเตรียมเนื้องานให้มีความเหนียว (Plastic body) เพื่อสามารถขึ้นรูปแบบรีดและประยุกต์ใช้เป็นวัสดุพูนตัวนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เช่น ตัวประสาน (Binder) และสารหล่อลื่น (Lubricant) เพื่อปรับให้เนื้อส่วนผสมที่จะทำการขึ้นรูปมีความเหนียวสามารถขึ้นรูปได้ วัตถุดิบในการขึ้นรูปจึงประกอบด้วย ผงอะลูมินาและสารเติมแต่ง ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้จะต้องถูกผสมให้เข้ากันโดยมีการปรับหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพื่อให้ได้เนื้อส่วนผสมที่สามารถเกาะตัวเป็นก้อนมีความเหนียวและความยืดหยุ่นตัว เพื่อให้ชิ้นงานสามารถคงรูปและผลิตเป็นวัสดุพูนตัวได้หลังทำการขึ้นรูป ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาผลของสารเติมแต่งในเนื้ออะลูมินาและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงสมบัติ เช่น ร้อยละความพูนตัว (Percent porosity), ขนาดของรูพูน (Pore size) และสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง (Strength) ให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

### 2.5.1 วิธีการขึ้นรูป (Forming method)

การเลือกวิธีการขึ้นรูปวัสดุพูนตัวนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ รูปแบบของวัสดุพูนตัวที่ต้องการ (แบบแผ่น แบบทอกลวง หรือแบบรังผึ้ง) รวมถึงโครงสร้าง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี



## รูปที่ 2.4 แสดงวิธีขึ้นรูปวัสดุพูนตัวทางเซรามิก

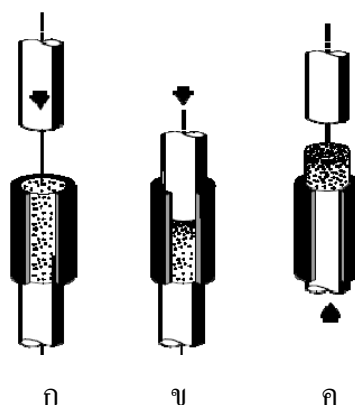
### 1. การอัดแบบ (Pressing)

ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบ (Pressing) นั้น ผงเซรามิกและสารเติมแต่งจะนำมาผสมให้เข้ากันโดยใช้ น้ำหรือตัวทำละลาย จากนั้นของผสมจะนำมาทำให้แห้ง โดยการพ่นอยู่ในภาชนะปิดซึ่งให้ลมร้อนหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ได้อนุภาค รูปร่างกลม เรียกว่า แกรนูล (Granule) พร้อมจะนำไปขึ้นรูป โดยวิธีนี้เรียกว่าสเปร์รราย (Spray drying)

การอัดขึ้นรูปนี้ จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะทิศทางของการให้แรงดัน

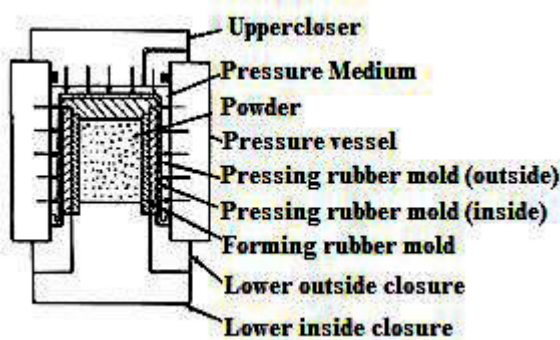
- การให้แรงดันอัดทิศทางเดียว (Uniaxial pressing) คือ การขึ้นรูปโดยการนำเม็ดอนุภาคใส่ลงในแบบแล้วทำการให้แรงดันทั้งด้านบนและล่างหรือเฉพาะด้านบนหรือด้านล่าง ก็ได้ขึ้นอยู่กัลักษณะของเครื่องมือ ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการขึ้นรูปที่ง่าย ได้อัตราการผลิตที่สูงแต่ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่หรือต้องการรูปร่างซับซ้อน

- การให้แรงดันอัดทุกทิศทาง (Isostatic pressing) คือ การขึ้นรูปด้วยการนำเม็ดอนุภาคใส่ลงในแบบที่อยู่ภายในของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านแรงดัน หรือใส่ในแบบข้างจากนั้นทำการให้ความดันในทุกทิศทาง การขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้จะเหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน สามารถควบคุมความหนาแน่นของชิ้นงานได้ดี แต่มีข้อเสียคืออัตราการผลิตต่ำและเครื่องมือมีราคาแพง



รูปที่ 2.5 แสดงการขึ้นรูปแบบให้แรงดันอัดทิศทางเดียว

(José Luis Amorós Albaro, www, 2000)



รูปที่ 2.6 แสดงการขึ้นรูปแบบให้แรงดันอัดทุกทิศทาง

(José Luis Amorós Albaro, www, 2000)

## 2. การหล่อแบบ (Slip casting)

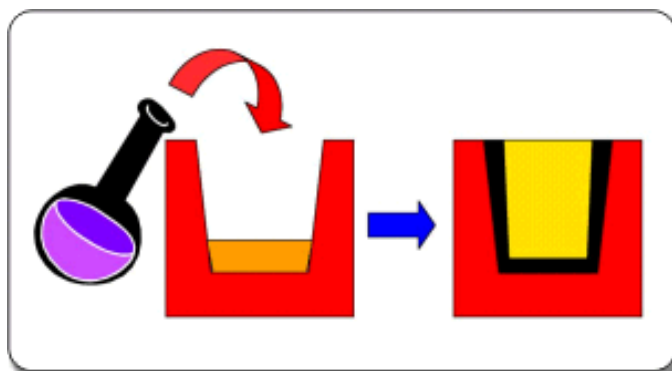
ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ (Slip casting) นั้น ผงเซรามิกจะนำมาผสมกับสารเติมแต่งและตัวทำละลายที่เหมาะสม เพื่อให้ได้น้ำสลิป (Slip) โดยลักษณะจะเป็นสารแขวนลอย (Suspension) หรือเติมสารอื่น ๆ เพื่อปรับคุณสมบัติของน้ำสลิปให้เป็นไปตามต้องการ โดยในกระบวนการผลิตวัสดุรูปทรงทางเซรามิกด้วยวิธีการหล่อนั้น แม่แบบในที่นี้จะหมายถึงแผ่นวัสดุทางเซรามิกที่เป็นชั้นรองรับ

กระบวนการขึ้นรูปแบบการหล่อแบบ มี 2 วิธี ด้วยกันคือ

- วิธีหล่อตัน (Solid casting) คือ การเทแบบโดยมีการทำให้น้ำสลิป แข็งตัวอยู่ในแบบ จึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีความหนา ต้องการรูปร่างแปลกหรือซับซ้อน

- วิธีหล่อแบบเทออก (Drain casting) คือ การเทแบบโดยมีการเทน้ำสลิปที่เหลือออกไปหลังจากได้ความหนาของชิ้นงานตามต้องการเป็นวิธีที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่ต้องการผนังบางและมีความหนาสม่ำเสมอ

กระบวนการขึ้นรูปด้วยเซรามิกนั้นเป็นวิธีที่ง่าย สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และมีรูปร่างซับซ้อน แต่กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะให้อัตราการผลิตต่ำ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการรอให้อุณหภูมิของเซรามิกในสารแขวนลอยค่อย ๆ เกาะตัวบนผิวแบบที่น้ำคูดซึมออกไป ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีการพัฒนาโดยใช้ความดันเข้ามาช่วยขณะที่ทำการขึ้นรูปเพื่อเร่งให้น้ำคูดซึมบนผิวแบบเร็วยิ่งขึ้น ช่วยให้อัตราการผลิตสูงขึ้น เรียกวิธีการนี้ว่า การหล่อแบบ แบบใช้แรงดัน (Pressure slip casting)



รูปที่ 2.7 แสดงการขึ้นรูปแบบหล่อ (Dynamic Ceramic, WWW, 2007)

### 3. การขึ้นรูปแบบรีด (Extrusion)

Extrusion คือ การขึ้นรูปที่วัสดุหรือเนื้อส่วนผสมต้องมีความเหนียว โดยการให้แรงกด รีด หรือบีบให้เนื้อวัตถุดิบเซรามิก ผ่านหัวแบบ (Die) โดยผลิตภัณฑ์ได้ออกมาจะมีรูปร่างตามหัวแบบที่กำหนด มีการใช้การขึ้นรูปแบบรีดผลิตผลิตภัณฑ์ชิ้นงานเซรามิกที่มีรูปร่างเป็นท่อ (Tubular) หรือมีลักษณะเป็นแท่ง ๆ เช่น อิฐ

วัตถุดิบที่จะนำมาขึ้นรูปแบบรีด ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- มีคุณสมบัติความเหนียวเพื่อไหลตัว (Flow) ได้เมื่อถูกแรงบีบหรือกด
- มีความแข็งแรงพอที่จะรับน้ำหนักรูปทรงของตัวเองได้เมื่อรีดเสร็จ

โดยวัตถุดิบหลักในการขึ้นรูปวัสดุพูนตัวในที่นี่ หมายถึง ผงเซรามิกรวมกับสารเติมแต่ง เช่น ตัวประสาน ตัวหล่อลื่นและน้ำหรืออาจเป็นตัวทำละลายอื่น เช่น แอลกอฮอล์ จากนั้นจึงผสมให้เข้ากัน โดยให้มีลักษณะเนื้อส่วนผสมที่เกาะตัวกันเป็นก้อน มีความเหนียวยืดหยุ่น

เครื่องที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบรีด เรียกว่า เครื่องอัดรีด (Extruder) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- แบบลูกสูบ (Piston extruder) มีประกอบด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ เสื้อสูบ (Barrel) ลูกสูบ (Piston) และหัวแบบ (Die) ลักษณะการทำงาน คือ แรงดันของลูกสูบจะทำหน้าที่ดันเนื้อส่วนผสมออกมา ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามหัวแบบที่อยู่ปลายอีกด้านหนึ่งของเสื้อสูบ ดังรูปที่ 2.8

- แบบสกรู (Auger extruder) ประกอบด้วย

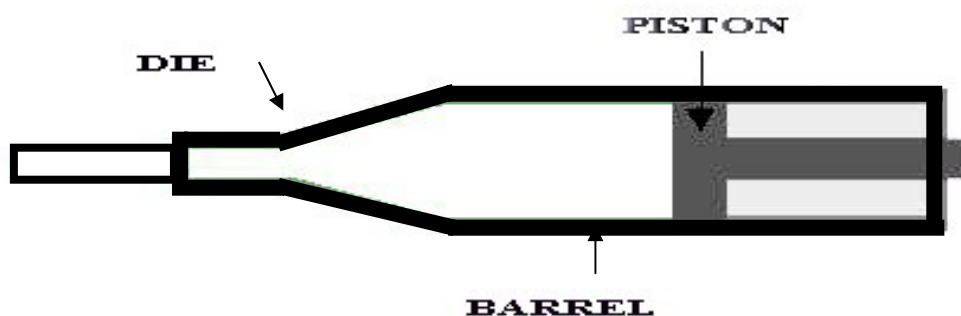
ใบกวน (Revolving blade) ทำหน้าที่ผสมส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

สกรู (Screw) ทำหน้าที่ ดันของเนื้อส่วนผสมให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า

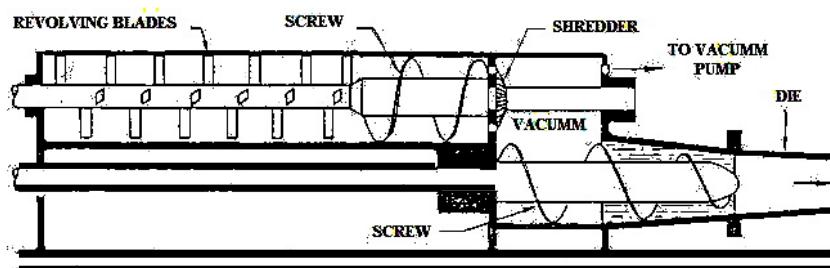
ตัวสับย่อย (Shredder) ทำหน้าที่ย่อยให้เนื้อส่วนผสม ดันออกมาเป็นชิ้นเล็ก ๆ

ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ทำหน้าที่ดูดเอาอากาศออกเพื่อไม่ให้มีอากาศปนผสมในเนื้อส่วนผสม

หัวแบบ (Die) ทำหน้าที่เป็นแบบเพื่อเนื้อส่วนผสมที่ผ่านออกมาจะมีรูปร่างตามต้องการ



รูปที่ 2.8 แสดงเครื่องขึ้นรูปแบบรีด : แบบลูกสูบ (Jumblez, www, 2007)



รูปที่ 2.9 แสดงเครื่องขึ้นรูปแบบรีด : แบบสกรู (Kingery, W.D., 1960)

แบ่งเครื่องรีดแบบ แบ่งออกเป็นห้อง (Chamber) ได้ 4 ห้องทำงาน คือ

- ห้องผสม (Pug mill) คือ ห้องที่เนื้อส่วนผสมจะถูกผสมคลุกให้เข้าเนื้อกัน
- ห้องดูดอากาศ (Deair chamber) คือ ห้องที่จะดูดเอาอากาศออกจากดินที่จะนำไปอัด

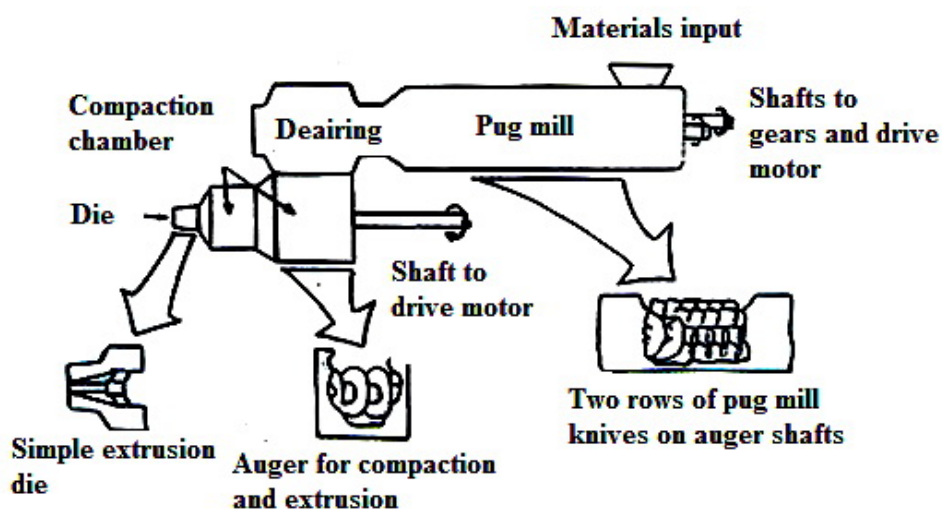
ไปอัด

- ห้องอัดรีดเนื้อส่วนผสม (Compaction chamber) คือ ห้องอัดและดันเนื้อส่วนผสมให้เคลื่อนที่สู่หัวแบบ

ให้เคลื่อนที่สู่หัวแบบ

- หัวแบบ (Die) คือ ส่วนที่เนื้อส่วนผสมเคลื่อนที่ผ่านเพื่อให้ชิ้นงานมีรูปร่างตาม

ต้องการ



รูปที่ 2.10 แสดงห้องต่าง ๆ ภายในเครื่องรีดแบบ (Richerson, 1992  
อ้างถึงใน สุธรรม ศรีห่มสั๊ก, 2542, หน้า 43)

จากที่กล่าวมาถึงวิธีการขึ้นรูปทั้งหมดข้างต้น จะเห็นได้ว่าสามารถผลิตวัสดุพูนตัวเซรามิกได้หลายวิธี แต่การเลือกวิธีการขึ้นรูปแบบใดนั้น มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจสรุปถึงข้อจำกัดของแต่ละวิธีการได้ดังนี้

ตารางที่ 2.4 แสดงข้อจำกัดของวิธีการขึ้นรูป

วิธีการขึ้นรูป	ความเหมาะสมกับชิ้นงาน	ปริมาณการผลิต
การให้แรงดันอัดทิศทางเดียว	ขนาดเล็ก รูปร่างไม่ซับซ้อน เช่น แบบแผ่น	สูง
การให้แรงดันอัดทุกทิศทาง	ไม่จำกัดขนาดและรูปร่าง	ต่ำ
การขึ้นรูปแบบรีด	ไม่จำกัดขนาดแต่รูปร่างต้องมีความคงที่ในแนวตัดขวาง เช่น ท่อกลาง ท่อรังผึ้ง	สูง (แบบสกรู) ต่ำ (แบบลูกสูบ)
การขึ้นรูปแบบหล่อ	ไม่จำกัดขนาดและรูปร่าง	ต่ำ

## 2.5.2 สารเติมแต่ง (Additives)

วิธีการขึ้นรูปวัสดุรูพรุนทางเซรามิกนั้น จะเห็นว่าวัตถุดิบที่นำมาขึ้นรูปโดยส่วนมากจะเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียวในตัวเอง ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูป นั่นคือ การนำผงเซรามิกผสมกับน้ำแล้วนำมาขึ้นรูปจึงเป็นไปได้ ดังนั้น การที่จะขึ้นรูปไม่ว่าจะด้วยวิธีการใดก็ตามควรใช้สารเติมแต่งเพื่อปรับให้เนื้อส่วนผสมมีความเหนียวรวมทั้งปรับให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น อีกทั้งสารเติมแต่งยังเป็นส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานอีกด้วย โดยสรุปปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการเติมสารเติมแต่งลงไปช่วยในการขึ้นรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบรีด คือ

- เมื่อเติมลงไปแล้วเนื้อส่วนผสมต้องมีความเหนียวพอที่จะไหลผ่านหัวแบบได้อีก ทั้งต้องมีความแข็งแรงพอที่จะรักษารูปทรงได้
- เนื้อส่วนผสมที่เตรียมได้ไม่ควรเหนียวเหนอะจนติดแบบหรือเครื่องมือจนเกินไป อีกทั้งผิวของชิ้นงานที่ผลิตออกมาได้ต้องมีความเรียบ
- ผงเซรามิกและสารเติมแต่งจะต้องไม่แยกตัวออกจากกันเมื่อถูกแรงอัด
- เมื่อเข้าสู่กระบวนการเผา สารเติมแต่งจะต้องสามารถไหม้หรือระเหยออกไปจากชิ้นงานได้ง่ายเหลือขี้เถ้าเล็กน้อย
- ไม่มีความเป็นพิษ
- ราคาไม่สูงมาก
- ในที่นี้จะกล่าวถึงสารเติมแต่งหลัก ๆ คือ ตัวประสาน (Binder) ตัวเพิ่มความเป็นพลาสติก (Plasticizer) ตัวหล่อลื่น (Lubricant) และสารช่วยกระจายตัว (Deflocculant) โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1. ตัวประสาน (Binder)

แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของสาร คือ

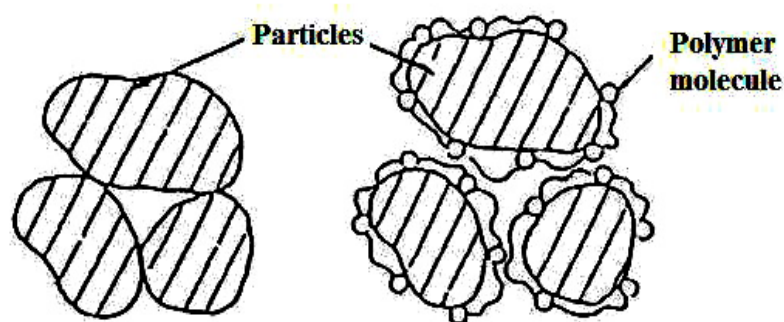
- ชนิดอนินทรีย์สาร (Inorganic binders) เช่น เบนโทไนต์ (Bentonite)
- ชนิดอินทรีย์สาร (Organic binders) ได้แก่ พอลิเมอร์ (Polymer) เช่น

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์

สำหรับเซรามิกแนวใหม่ (Advance ceramic) ซึ่งต้องการคุณสมบัติเฉพาะด้านเพื่อประโยชน์ทางวิศวกรรมและการใช้งาน ดังนั้น จึงนิยมใช้ตัวประสานกลุ่มอินทรีย์สารมากกว่า เนื่องจากตัวประสานที่คตินั้น จะต้องให้ความเหนียวแก่เนื้อเซรามิกหรือให้ความแข็งแรงแก่ชิ้นงานรวมทั้งเมื่อทำการเผาผลึก ยังต้องสามารถกำจัดอินทรีย์สารให้หมดไปจากชิ้นงานได้ด้วย ดังนั้น ในการขึ้นรูปจึงนิยมเลือกใช้ตัวประสานกลุ่มอินทรีย์สาร



ตัวประสานชนิดอินทรีย์สารเป็นสารเติมที่มีความจำเป็นในกระบวนการขึ้นรูปเป็นอย่างมากและจากกระบวนการขึ้นรูปต่าง ๆ ดังกล่าวมา พบว่า โดยส่วนมากแล้วตัวประสานต้องอยู่ในรูปของสารละลายทั้งสิ้น ซึ่งตัวประสานนั้นมักจะละลายในน้ำหรือตัวทำละลายต่าง ๆ หรืออาจอยู่ในรูปของเหลวที่มีลักษณะเป็นอิมัลชัน (Emulsion) ก็ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการอยู่ในสถานะของเหลวเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการลื่นไหล (Fluidity) ในน้ำสลิปหรือมีความจำเป็นสำหรับให้เกิดความเหนียว ยึดหยุ่นตัวของเนื้อส่วนผสม ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดตัวประสานจะเชื่อมอนุภาคเซรามิกเข้าด้วยกันเป็นผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.11 แสดงการเชื่อมอนุภาคเซรามิกเข้าด้วยกันด้วยตัวประสานพอลิเมอร์ (Reed, J.S., 1988)

โดยตัวประสานชนิดอินทรีย์สารนี้ จะแบ่งออกเป็นกลุ่มตามค่าความหนืดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\text{Log } \eta = kc \quad (2-1)$$

โดย  $\eta$  = ค่าความหนืด (Centipoise or mPa/s)

$c$  = ค่าความเข้มข้น (wt%)

$k$  = ค่าคงที่ ซึ่งจะบ่งบอกระดับความหนืดของตัวประสาน

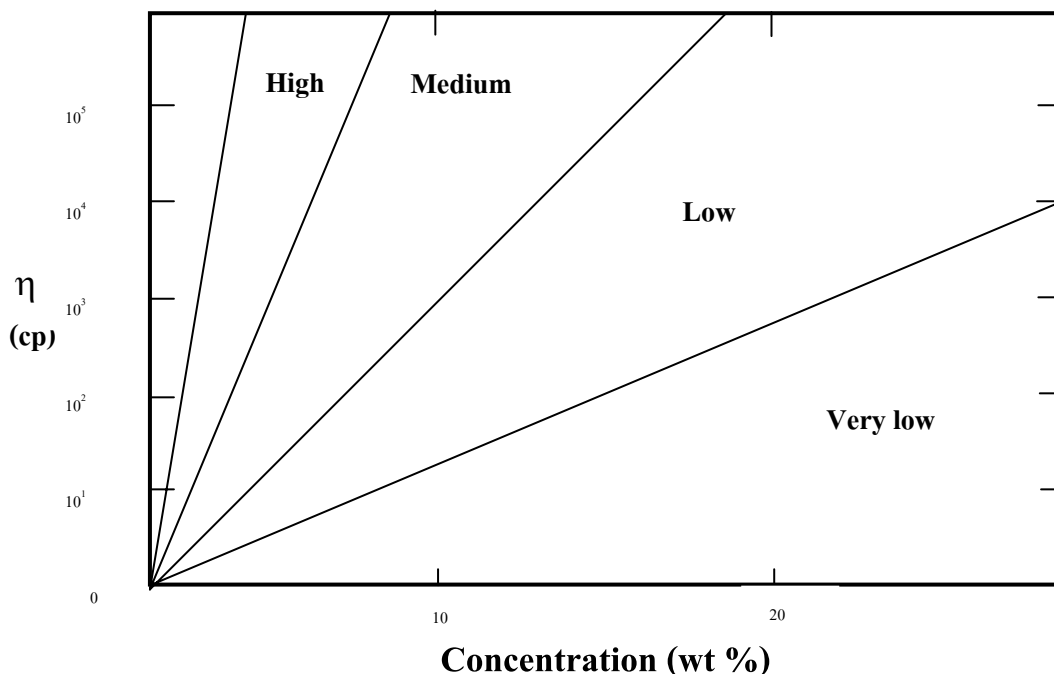
จากความสัมพันธ์ของสมการ (2-1) สามารถแบ่งความหนืดตัวประสานชนิดอินทรีย์สารออกเป็น 5 ระดับ

ระดับต่ำมาก (Very low) =  $0 < k < 0.133$

ระดับต่ำ (Low) =  $0.133 < k < 0.333$

ระดับปานกลาง (Medium) =  $0.333 < k < 1.0$

ระดับสูง (High) =  $1.0 < k < 3.0$   
 ระดับสูงมาก (Very high) =  $3.0 < k < \infty$



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของความหนืดกับความเข้มข้นของตัวประสาน (Onada, G.Y., Jr. and Hench, L.L., 1978)

จะเห็นว่าตัวประสานชนิดอินทรีย์สารแต่ละชนิดนั้นจะให้ค่าความหนืดต่าง ๆ กันที่ค่าความเข้มข้นเท่ากัน ดังนั้น ตัวประสานในแต่ละระดับความหนืดนั้นจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เพื่อเตรียมเนื้อส่วนผสมสำหรับขึ้นรูปแต่ละวิธีต่างกันคือ

- ตัวประสานที่มีระดับความหนืดระดับปานกลางและสูงเหมาะสมกับวิธีขึ้นรูปแบบรีด
  - ตัวประสานที่มีระดับความหนืดระดับต่ำหรือต่ำมากเหมาะสมกับวิธีขึ้นรูปแบบหล่อแบบ
  - ตัวประสานที่มีระดับความหนืดระดับต่ำมากเหมาะสมกับวิธีขึ้นรูปแบบอัด
- ตัวประสานชนิดอินทรีย์สารมีอยู่หลายชนิดให้เลือกใช้ ทั้งละลายในน้ำและในตัวทำละลายอื่น ๆ รวมทั้งระดับความหนืดของแต่ละชนิดอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.13

	Viscosity grade					Electro-chemical type			
	Very low	Low	Medium	High	Very high	Nonionic	Anionic	Cationic	Biodegradable
Gum arabic	•						X		X
Lignosulfonates	•						X		X
Lignin liquor	•						X		X
Molasses	•					X			X
Dextrins	—					X			X
Polyvinylpyrrolidone	—					X			
Poly(vinyl alcohol)	—					X			
Poly(ethylene oxide)		—				X			
Starch		—				X			X
Acrylics		—					X		
Polyethylenimine (PEI)		—						X	
Methycellulose			—			X			X
Sodium carboxymethylcellulose			—				X		X
Hydroxypropylmethylcellulose			—			X			X
Hydroxyethylcellulose			—			X			X
Sodium alginate				—			X		X
Ammonium alginate				—			X		X
Polyacrylamide					—	X			
Scleroglucan					•	X			X
Irish moss					•		X		X
Xanthan gum					•				X
Cationic galactomanan					•			X	X
Gum tragacanth					•	X			X
Locust bean gum					•	X			X
Gum karaya					•	X			X
Guar gum					—		X	X	X

หมายเหตุ • คือ ระดับความหนืดของสารอินทรีย์

X คือ ชนิดประจุของสารเคมี

รูปที่ 2.13 ตัวประสานชนิดอินทรีย์สาร (Rahaman, M.N., 1995)

## 2. ตัวเพิ่มความเป็นพลาสติก (Plasticizer)

โดยทั่วไปการใช้ตัวประสานมักจะต้องใช้ร่วมกับ Plasticizer ทั้งนี้เนื่องจากจะเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่ (Chain) ของโมเลกุลตัวประสานซึ่งผลที่ได้ คือ เป็นการช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นแก่ชิ้นงาน ตัวประสานจะมีผลโดยตรงต่อความหนืดของเนื้อเซรามิก เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ค่อนข้างต่ำจึงเปรียบเสมือนตัวทำละลาย ดังนั้น จึงควรใช้ในปริมาณที่พอเหมาะโดยตัวประสานที่นิยมใช้กัน คือ น้ำ สารกลุ่มไกลคอล (Glycols) เช่น โพลีเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น

## 3. ตัวหล่อลื่น (Lubricant)

ตัวหล่อลื่น มีหน้าที่หลัก 2 ประการ คือ ลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ เช่นระหว่างผนังแม่พิมพ์กับหัวอัดและลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเซรามิกช่วยให้การไหลตัวของเนื้อเซรามิกดีขึ้นตัวหล่อลื่นนี้จะใช้ผสมกับผงเซรามิกขณะเตรียมเนื้อเซรามิกหรืออีกแบบหนึ่ง

ที่นิยมใช้ก็คือ ใช้ตัวหล่อลื่นเฉพาะบริเวณอุปกรณ์ขึ้นรูปก็ได้กระบวนการขึ้นรูปที่จำเป็นต้องใช้ตัวหล่อลื่น คือ การขึ้นรูปแบบบริด ซึ่งตัวหล่อลื่นที่นิยมใช้โดยทั่วไปดังแสดงใน ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวหล่อลื่นที่นิยมใช้ (Onada, G.Y., Jr. and Hench, L.L., 1978)

Common Lubricant)
Paraffin wax
Zinc stearate
Aluminum stearate
Sodium stearate
Steric acid
Oleic acid
Boron nitride

#### 4. สารช่วยการกระจายตัว (Deflocculant)

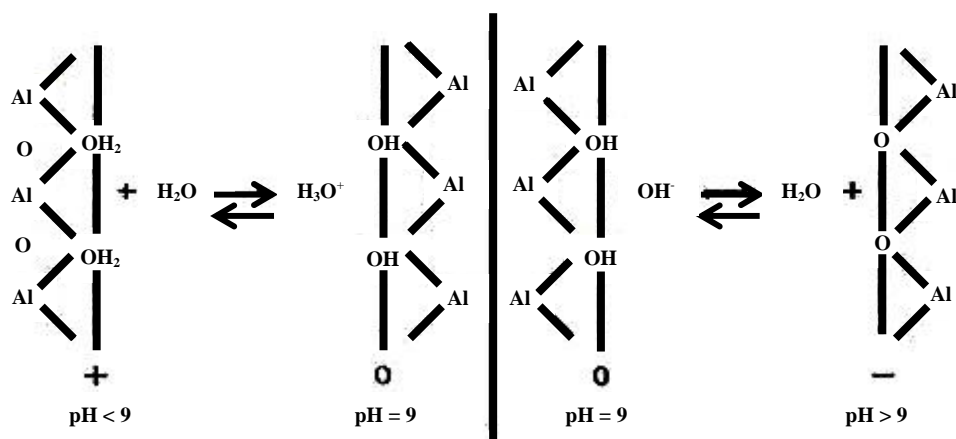
สารช่วยการกระจายตัว หมายถึง สารที่เติมเข้าไปในส่วนผสมแล้วทำให้ผิวของอนุภาคเกิดประจุที่เหมือนกันจำนวนมาก เป็นการเพิ่มประจุไฟฟ้าสถิตที่ผิวของอนุภาค ซึ่งแรงผลักระหว่างอนุภาคที่เกิดจากประจุไฟฟ้าสถิตนี้ทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวและแขวนลอยในสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ว่าถ้าประจุเหมือนกันจะผลักรัน ถ้าประจุต่างกันจะดูดกัน ซึ่งสารช่วยการกระจายตัวนี้จะใช้กับวิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบ

สารช่วยการกระจายตัวนั้นใช้ได้ทั้งชนิดที่เป็นกรดและด่าง ซึ่งจะมีผลต่อผิวของอนุภาคโดยทำให้ผิวของอนุภาคมีประจุ (Reed, J.S., 1998) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 กล่าวคือ

- สารช่วยการกระจายตัวที่มีสภาพเป็นกรด เช่น กรดไนตริก หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เมื่อเติมลงไปใต้น้ำอะลูมินา (Alumina slip) คือ เป็นการเติมไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) ลงไปจะเป็นสาเหตุให้น้ำอะลูมินามีพีเอช (pH) ลดลงและยังทำให้ผิวของผงอะลูมินา ซึ่งแต่เดิมไม่มีประจุนั้นกลายเป็นผิวซึ่งมีประจุบวกได้

- การเติมสารช่วยการกระจายตัวซึ่งมีความเป็นด่าง เช่น เมื่อเติมประเภทอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) ลงน้ำอะลูมินาคือการเติมไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนจากผิวและสร้างประจุขึ้นที่ผิวของผงอะลูมินา อีกทั้งยังเป็นผลให้ pH ของน้ำอะลูมินาสูงขึ้นอีกด้วย

จากที่กล่าวมาอาจสรุปเรื่องสารช่วยการกระจายตัวสำหรับน้ำอะลูมินาโดยยึดค่าความเป็น กรด-ด่าง เป็นเกณฑ์ได้ คือในช่วง pH เท่ากับ 3.5-4.5 ประจุที่ผิวส่วนใหญ่เป็นประจุบวกทำให้เกิดการกระจายตัว เนื่องจากมีการผลักกัน และเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ประจุบวกที่ผิวจะเริ่มลดลงจนกระทั่ง pH เท่ากับ 8-9 เป็นจุดที่ผิวของอะลูมินาไม่มีประจุทำให้อนุภาคมีการเกาะตัวกันอย่างมาก แต่เมื่อ pH เท่ากับ 11-12 ผิวของอนุภาคส่วนใหญ่กลายเป็นประจุลบและน้ำอะลูมินาจะกลับสู่สภาวะการกระจายตัวอีกครั้ง



รูปที่ 2.14 แสดงการเกิดประจุที่ผิวอะลูมินาเนื่องด้วย  $H_3O^+$  และ  $OH^-$  (Reed, J.S., 1988)

สารเติมทั้ง 4 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสารเติมหลักที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการเตรียมเนื้อเซรามิกเพื่อทำการขึ้นรูป ตารางที่ 2.6 แสดงสารเติมแต่งที่ต้องใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุพูนตัว

ตารางที่ 2.6 แสดงชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบต่าง ๆ (Rahaman, M.N. 1995)

Forming method	Binder	Plasticizer	Dispersant	Lubricant
Die compaction	X			X
Isostatic pressing	X			
Slip casting	X		X	
Tape casting	X	X	X	
Extrusion	X			X
Injection molding	X	X		X

แต่ยังมีสารเติมอีกหลายชนิดที่จะให้คุณสมบัติต่าง ๆ แก่เนื้อเซรามิก ดังแสดงในตารางที่ 2.7 อย่างไรก็ตามการใช้สารเติมควรใช้ในปริมาณที่น้อย ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตแล้ว ยังเป็นการลดความเสี่ยงในการเสีรูปร่างของชิ้นงานเมื่อผ่านขั้นตอนการกำจัดสารเติมเหล่านี้อีกด้วย อีกประการหนึ่งปริมาณสารเติมแต่งมากจะทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานต่ำทำให้ชิ้นงานไม่แข็งแรง

ตารางที่ 2.7 แสดงชื่อสารเติมแต่งที่นิยมใช้ในการขึ้นรูป (ฉัฐพล ทรงประเสริฐ, 2536)

ชนิดสารเติมแต่ง	หน้าที่
Binder	เพิ่มความแข็งแรงให้กับ Green Body
Lubricant	ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค
Deflocculant	อนุภาคเกิดการลอยตัวไม่เกาะกัน
Wetting agent	ลดแรงตึงผิวของของเหลว
Water retainer	ป้องกันการแห้งของผลิตภัณฑ์ ในระหว่างการบ่ม ( Aging )
Anti – electrostatic agent	ป้องกันไฟฟ้าสถิตย์
Anti – foaming agent	ป้องกันการเกิดฟองอากาศ
Chelating agent	ทำให้ประจุ ( ion ) ที่ไม่ต้องการเกิดการเชื่อม

### 2.5.3 การทำให้แห้งและการกำจัดสารเติม

ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปจะอยู่ในลักษณะกึ่งเปียก กึ่งแห้ง (ยกเว้นการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแบบ) เมื่อมีแรงมากระทบชิ้นงานจะเสีรูปร่างทันที ดังนั้น ควรทำให้ชิ้นงานแห้งสนิทก่อนซึ่งการ

ทำให้แห้งนี้ทำได้โดยการวางชิ้นงานไว้ในอุณหภูมิปกติ น้ำที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคจะระเหยออกไปสู่บรรยากาศ ทำให้อนุภาคชิดกันมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานแห้งและแข็งแรง แต่การทำให้แห้งนี้ควรป้องกันไม่ให้น้ำระเหยเร็วมากเกินไป เช่น ไม่ควรวางชิ้นงานบริเวณที่มีแสงแดดหรือมีลมพัดตลอดเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานโก่งงอหรือแตกร้าว

สารเติมแต่งนั้นถึงแม้จะมีประโยชน์ในการเตรียมเนื้อเซรามิกแต่อย่างไรก็ตาม สารเติมเหล่านี้อาจต้องถูกกำจัดออกไปก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการเผา ซึ่งขั้นตอนการกำจัดสารเติมแต่งนี้ เป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการผลิตชิ้นงานจากเซรามิกเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มีรูปร่างซับซ้อนหรือใช้ปริมาณสารเติมแต่งมาก ขณะเตรียมเนื้อเซรามิก การกำจัดสารเติมแต่งเป็นขั้นตอนที่ต้องระมัดระวังมาก เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความร้อน รวมทั้งต้องใช้เวลาเป็นอย่างมากด้วย โดยบางครั้งชิ้นงานที่นามีขนาดใหญ่หรือมีรูปร่างซับซ้อน อาจต้องใช้เวลาเพื่อการกำจัดสารเติมแต่งนี้เป็นเวลานาน ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงข้อบกพร่อง (Defects) ที่อาจเกิดขึ้นและข้อบกพร่องเหล่านี้ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น การแตกร้าว (Cracking)

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการกำจัดสารเติมเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความร้อนซึ่งโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิในช่วง 200-800°C เนื่องจากสารเติมที่ใช้เป็นกลุ่มอินทรีย์สารซึ่งมีจุดหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวและจะกลายเป็นไอออกจากชิ้นงานแต่มีข้อควรระวัง คือ การเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิดังกล่าวไม่ควรจะรวดเร็วมากนัก หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าอัตราเร็วของการเผา (Heating rate) ไม่ควรเร็วเกินไป เพราะหากชิ้นงานมีความหนาจะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้านนอกกับผิวด้านใน ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้ อีกประการหนึ่งคือผิวด้านนอกของชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงกว่า สารเติมแต่งระเหยออกไปเร็วกว่าการหดตัวที่ผิวด้านนอกมากกว่าทำให้ชิ้นงานโก่งงอ นอกจากนี้การที่สารเติมเกิดการหลอมละลายและกลายเป็นไอ แต่ไม่สามารถระเหยออกจากชิ้นงานได้ เนื่องจากบริเวณผิวเกิดการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคไปแล้วทำให้ไอเหล่านั้นถูกปิดกั้นเป็นผลให้ชิ้นงานเกิดการบวมหรือพอง

อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมิมีผลกระทบดังที่กล่าวมา ดังนั้น จึงไม่ควรให้มี การเพิ่ม อุณหภูมิเร็วเกินไปแต่ขณะเดียวกันก็ไม่ควรช้าเกินไป เนื่องจากเป็นการเสียเวลาและเพิ่มต้นทุนการผลิต (เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าเสื่อมของเตาเผา) แต่เวลาที่เหมาะสมนั้นไม่สามารถกำหนดได้เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย ดังนั้น ขั้นตอนการกำจัดสารเติมนี้จะต้องศึกษาและทดลองให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ผลิตออกมา

#### 2.5.4 การเผาผนึก (Sintering)

กระบวนการเผาผนึก คือ ขบวนการที่ผงวัตถุดิบที่ทำการขึ้นรูปแล้วได้รับความร้อนเกิดการขยับชิดติดกันและเกิดการหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเกิดจากการนำรูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคออกเพื่อให้เกิดการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาค ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเผาผนึก คือ อะตอม

ภายในอนุภาคมีการเคลื่อนที่ (Transportation) ซึ่งกลไกของการเคลื่อนที่อาศัยการแพร่ (Diffusion) และการไหลตัวเมื่ออนุภาคได้รับความร้อน (Viscous flow)

โดยแรงขับ (Driving force) ที่จะทำให้เกิดการเผาผนึกยากหรือง่ายขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระของระบบก่อนและหลังการเผาผนึก โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระของการเกิดการเผาผนึกมีค่าน้อยมาก (Joule/mole) เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น จึงเป็นไปได้ยากที่จะให้เกิดการเผาผนึกโดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำ กระบวนการเผาผนึกนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยมีแรงขับ คือ การลดพลังงานอิสระโดยรวมของชิ้นงาน ( $\Delta G_T$ ) ให้ลดต่ำลง ดังสมการ (2-2)

$$\Delta G_T = \Delta G_V + \Delta G_B + \Delta G_S \quad (2-2)$$

เมื่อ  $\Delta G_V$   $\Delta G_B$  และ  $\Delta G_S$  คือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระที่เกี่ยวข้องกับปริมาตร (Volume) ขอบ (Boundary) และ ผิว (Surface) ของอนุภาคตามลำดับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระ โดยรวมนี้ ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของ พลังงานอิสระที่ผิว ( $\Delta G_S$ ) เป็นหลัก ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าแรงขับสำหรับกระบวนการเผาผนึก คือ พลังงานอิสระที่ผิว จะถูกทำให้ลดลงโดยการพยายามลดพื้นที่ผิว (Surface area) ของอนุภาคให้น้อยลงเป็นผลให้อนุภาคเกิดการเชื่อมติดกัน

การเผาผนึกนี้จะทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น มีความแข็งแรงมากขึ้นหรือมีความหนาแน่นมากขึ้นแต่ขณะเดียวกันชิ้นงานจะเกิดการหดตัวอย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงการรักษารูปร่างของชิ้นงานด้วย

กระบวนการเผาผนึกสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้โดยอาศัยพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของผงเซรามิกเหล่านั้น ซึ่งเริ่มจากการที่เม็ดอนุภาคแต่ละอนุภาคเชื่อมติดกันจนกลายเป็นโครงสร้างแบบหลายผลึก (Polycrystalline structure) การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

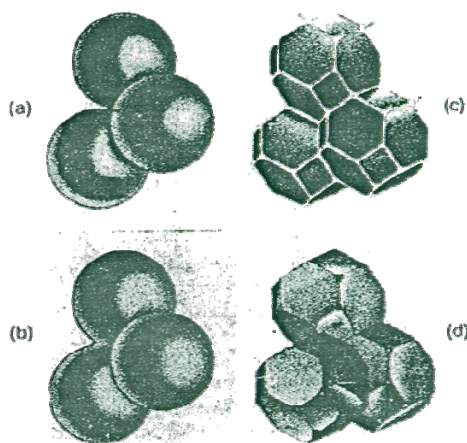
- ช่วงแรก (Initial stage) ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่อนุภาคขยับตัว (Rearrangement) มาชิดกันเพื่อให้มีจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคมากที่สุดเป็นช่วงที่อนุภาคจะเชื่อมติดกัน โดยเริ่มจากการที่อนุภาคที่อยู่ชิดกันและมีจุดสัมผัสกันเกิดการถ่ายเทมวล (Mass transport) นั่นคือ เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมหรือการแพร่ของอะตอมระหว่างอนุภาคที่สัมผัสกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดขอบรอยต่อขึ้นมาระหว่างอนุภาค ที่เรียกว่า Neck

- ช่วงกลาง (Intermediate stage) เป็นช่วงที่ Neck มีการเติบโตขยายใหญ่ขึ้นและส่งผลให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวลดลงพร้อมกับปริมาตรหดตัวลงและจุดศูนย์กลางของอนุภาคขยับ



เคลื่อนที่เข้ามาหากัน เกิดรูพรุนต่อเนื่องเป็นช่องกลวงยาว ซึ่งจะเรียกว่า Interconnected pore ในขณะเดียวกันขอบเกรน (Grain boundary) ขยายยาวขึ้นเกิดการกลืนเอาเกรนเล็ก ๆ ที่อยู่ติดกันเข้าไป ทำให้รูปทรงของเกรนเปลี่ยนไปส่งผลให้ Neck มีขนาดใหญ่ขึ้นไปเรื่อย ๆ ปริมาตรรูพรุนลดลงและขึ้นงานเกิดการหดตัว จนกระทั่ง Interconnected pore เปลี่ยนจากรูพรุนต่อเนื่องเป็นรูพรุนที่แยกเป็นหย่อม ๆ หรือเรียกว่า Isolated pore

- ช่วงสุดท้าย (Final stage) จำนวนของรูพรุนจะลดน้อยลง เกรนเล็กจะถูกเกรนใหญ่กลืนเพื่อลดพลังงานที่ผิว (Surface energy) และเกรนใหญ่จะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีรูพรุนค้อย ๆ กระจายไปเป็นรูพรุนเดี่ยว ๆ โดยบางส่วนจะอยู่ในเกรนแต่ส่วนใหญ่ยังคงอยู่บนขอบเกรนนั่นเอง ดังนั้น ในช่วงนี้จึงต้องควบคุมอัตราการโตของเกรนและการออกไปของช่องว่างให้เหมาะสม เนื่องจากหากปล่อยให้เกรนโตขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่อัตราการออกไปของช่องว่างเกิดได้ช้า ผลคือรูพรุนจะอยู่ห่างจากขอบเกรนไปเรื่อย ๆ จนสุดท้ายก็ไม่สามารถไ้รูพรุนออกไปตามร่องเกรนได้ทัน ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูพรุนมาก



รูปที่ 2.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคขณะเผาพูนิก (Rahaman, M.N., 1995)

ช่วงแรก (a) อนุภาคเริ่มจัดเรียงตัวอยู่ชิดกัน

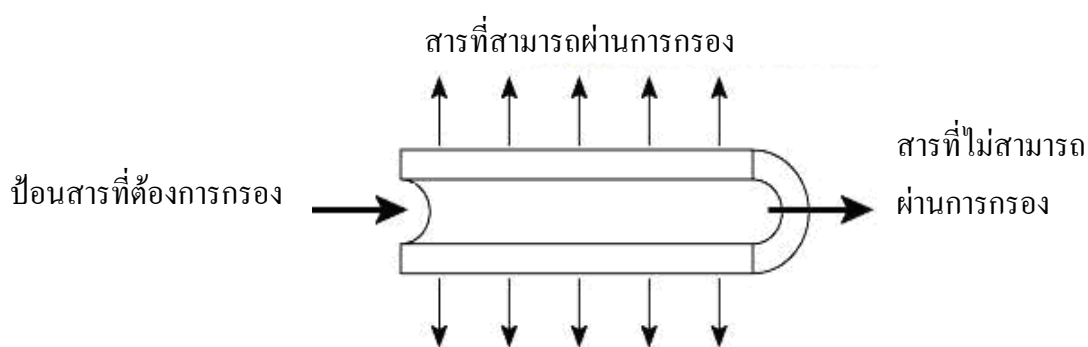
ช่วงแรก (b) เกิด Neck และชิ้นงานเริ่มหดตัว

ช่วงกลาง (c) เกิดรูพรุนระหว่างอนุภาค

ช่วงท้าย (d) เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น รูพรุนลดลง

## 2.6 กระบวนการกรองโดยวัสดุพุนตัว

ได้มีการจำแนกหลักการในการแยกสารตามชนิดของแรงขับเคลื่อน (Driving force) กล่าวคือ ถ้าแรงขับเคลื่อนที่ทำให้โมเลกุลของสารผ่านวัสดุพุนตัวที่ใช้เป็นตัวกรองเป็นผลต่างของความเข้มข้น เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis) ถ้าแรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้า เรียกกระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis) แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความดันก็สามารถแยกออกเป็นกระบวนการย่อย ๆ ได้อีก คือ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและกระบวนการออสโมซิสผันกลับ



รูปที่ 2.16 แสดงหลักการกรอง (Kochmembrane, www, 2006)

จากรูปที่ 2.16 ได้แสดงหลักการของกระบวนการแยกสารโดยแรงดัน ตัวถูกละลายที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าวัสดุพุนตัวจะถูกวัสดุพุนตัวกักไว้ สารที่ไม่สามารถผ่านวัสดุพุนตัวได้ เรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) หรือสารละลายเข้มข้น (Concentrate) ส่วนตัวทำละลายหรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็กที่สามารถผ่านวัสดุพุนตัวได้ เรียกว่า เพอเมอเทต (Permeate)

กระบวนการแยกสารที่อาศัยแรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความดัน สามารถแบ่งแยกตามลักษณะการใช้งาน ได้เป็น 3 กระบวนการ คือ

### 2.6.1 กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis, RO)

เป็นกระบวนการแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดเล็ก ๆ คือ มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 หรือขนาดโมเลกุลอยู่ระหว่าง 0.0001-0.001 ไมครอน เช่น เกลือ น้ำตาล เป็นต้น ความดันที่ใช้ประมาณ 20-80 บาร์ โดยทั่วไปเรารู้จักกระบวนการออสโมซิสว่าเป็นปรากฏการณ์ที่ตัวทำละลายไหลผ่านวัสดุพุนตัว จากสารละลายที่มีความเจือจางไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่า ถ้าเราให้ความดันแก่สารละลายที่เข้มข้นกว่าและความดันนั้นมีความสูงกว่าความดันออสโมติกก็จะเกิดการไหลของตัวทำละลายผ่านวัสดุพุนตัวจากด้านที่สารละลายมีความเข้มข้นสูงไปยังด้านที่สารละลายเจือจางกว่า เรียกกระบวนการนี้ว่า ออสโมซิสผันกลับ

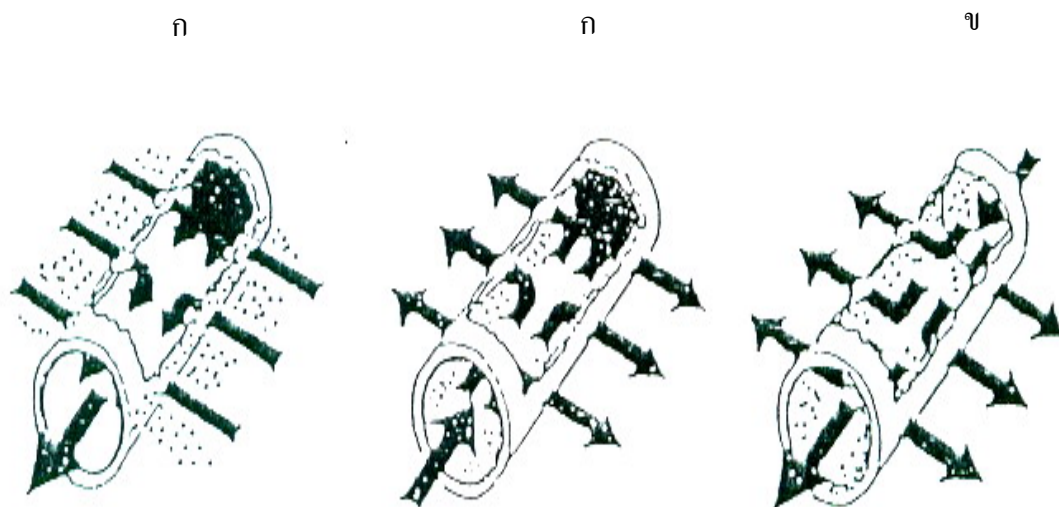
ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับความดันที่ให้แก่สารละลายมีค่าสูงกว่าความดันออสโมติกของสารละลาย ทำให้สารโมเลกุลเล็ก ๆ ถูกคัดไว้ แต่ตัวทำละลายสามารถไหลผ่านวัสดุพุนตัวไปยังสารละลายที่เจือจางกว่า กระบวนการนี้จึงมักใช้ในการแยกตัวถูกละลายโมเลกุลเล็ก เช่น เกลือ น้ำตาลหรืออามอน เป็นต้น ออกจากสารละลายหรือเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ตัวอย่างกระบวนการที่สามารถใช้ออสโมซิสผันกลับ เช่น การแยกเกลือออกจากน้ำทะเลเพื่อทำน้ำจืด เป็นต้น

### 2.6.2 กระบวนการอุลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)

เป็นกระบวนการแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 500-300,000 หรือขนาดอนุภาคระหว่าง 0.001-0.01 ไมครอน เช่น โปรตีน เอ็มไซม์ โพลีแซคคาไรด์ เป็นต้น ออกจากน้ำและสารโมเลกุลเล็กอื่น ๆ ความดันที่ให้แก่สารละลายอยู่ในช่วง 1-10 บาร์ ซึ่งต้องเลือกชนิดและขนาดของรูพุนของวัสดุพุนตัวให้เหมาะสม วัสดุพุนตัวที่มีการผลิตออกจำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบัน มีการบอกลักษณะของวัสดุพุนตัวที่ใช้งานโดยบอกเป็นค่าฟลักซ์ (Flux) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาตรการไหลของน้ำผ่านวัสดุพุนตัวต่อพื้นที่วัสดุพุนตัวต่อเวลาที่ใช้ ( $m^3/m^2 \cdot h$ ) หรือบอกเป็น Molecular weight cut-off (MWCO) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกักสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่กำหนดหรือมากกว่าที่กำหนด ได้อย่างต่ำ 90 เปอร์เซ็นต์ เช่น วัสดุพุนตัวสังเคราะห์ที่มี MWCO 25,000 หมายถึง วัสดุพุนตัวสังเคราะห์นี้มีความสามารถในการกักกันสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับหรือมากกว่า 25,000 ได้อย่างต่ำ 90 เปอร์เซ็นต์ของสารตั้งต้น ส่วนสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 25,000 ก็สามารถผ่านวัสดุพุนตัวสังเคราะห์นี้ไปได้ แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการกักกันสารของวัสดุพุนตัวยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ชนิดและรูปร่างโมเลกุลของสารที่ต้องการแยกปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุล ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลกับวัสดุพุนตัวและความเป็นกรดต่างของสารละลาย ตลอดจนสภาพการใช้งานของวัสดุพุนตัวสังเคราะห์ เป็นต้น

### 2.6.3 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)

เป็นกระบวนการแยกอนุภาคออกจากสารละลายแขวนลอยโดยให้สารละลายแขวนลอยไหลผ่านวัสดุพุนตัวซึ่งใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนทำให้ตัวทำละลายและสารที่มีขนาดเล็กกว่ารูพุนของวัสดุพุนตัวสามารถผ่านวัสดุพุนตัวออกมาได้ ความดันที่ให้กับสารละลายจะไม่เกิน 5 บาร์ และสามารถกักสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 300,000 หรือมีขนาดโมเลกุลประมาณ 0.1-10 ไมครอน



รูปที่ 2.17 ลักษณะการกรองในระบบไมโครฟิลเตรชัน

ก. การกรองแบบ Through flow

ข. การกรองแบบ Cross flow (เชิดชัย ตั้งอมรสฤษดิ์, 2537)

ลักษณะการกรองของกระบวนการนี้อาจแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบ Through-flow และแบบ Cross-flow ดังแสดงในรูปที่ 2.17 การกรองแบบ Through-flow เป็นการใช้ความดันป้อนสารให้ไหลผ่านวัสดุพอร์ตัว เมื่ออนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ถูกกักไว้บนผิวหน้าวัสดุพอร์ตัวและเกิดการสะสมของอนุภาคมากขึ้นเพอมีเอทจะไหลผ่านวัสดุพอร์ตัวได้น้อย ดังนั้น ลักษณะการกรองนี้จึงจำเป็นต้องทำการล้างหรือเปลี่ยนวัสดุพอร์ตัวใหม่ ระบบนี้เหมาะสมสำหรับที่จะกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอนเล็กน้อย หรือกรองสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นต่ำ

การกรองแบบ Cross-flow หรือเรียกว่า Tangential-flow เป็นการใช้ความดันป้อนสารให้ไหลผ่านไปขนานกับผิววัสดุพอร์ตัวเพื่อให้สารละลายเกิดแรงเฉือนและกวาดอนุภาคที่เกาะอยู่กับผิววัสดุพอร์ตัวให้กลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่องในระบบนี้เหมาะสมสำหรับการกรองอนุภาคที่มีขนาด 0.1-10 ไมครอน สารที่มีความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยสูงและสารละลายอิมัลชัน โดยทั่วไปวัสดุพอร์ตัวที่ใช้ในการกรองแบบ Cross-flow จะมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าขนาดของอนุภาคที่จะกรองมาก อนุภาคที่ถูกกักอยู่บนผิววัสดุพอร์ตัวจะถูกแรงเฉือนจากสารละลายกวาดอนุภาคเหล่านี้กลับเข้าไปในสารละลายอีก ทำให้สามารถควบคุมการอุดตันและอัตราการไหลของเพอมีเอทได้ดี ในบางกรณีอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกับรูพรุนจะถูกกักอยู่ภายในรูพรุน ทำให้เกิดการอุดตันและทำให้อัตราการไหลของเพอมีเอทลดลงอย่างมาก

## 2.7 ความสามารถในการไหลผ่านของวัสดุพอรุนตัว

ในกระบวนการกรอง ฟลักซ์ จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบ โดยแสดงถึง ปริมาตรของเพอมีเอทที่ผ่านรูพอรุนของวัสดุพอรุนตัวต่อหน่วยพื้นที่ของวัสดุพอรุนตัวต่อเวลาซึ่งกรณีที่ ไม่มีตัวถูกละลาย ฟลักซ์น้ำที่ผ่านวัสดุพอรุนตัวที่ผ่านรูพอรุนของวัสดุพอรุนตัวจะแปรผัน โดยตรงกับ ความดันที่ให้กับระบบ

ฟลักซ์ (Flux) คือ ปริมาตรของตัวทำละลายที่ผ่านเชื่อมต่อเวลาต่อพื้นที่การกรองมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร × ชั่วโมง (Ismail, A.F., Hassan, A.R. and Cheer, N.B., 2002)

$$Flux, J = \frac{Volume\ Permeate\ (V / t)}{Cylindrical\ Area\ (A)} \quad (2-3)$$

คุณสมบัติในการกักสาร (%Rejection) คือ ความสามารถในการกักสารของเยื่อแผ่นมีหน่วย เป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งคำนวณได้ดังนี้ (Ismail, A.F. et al, 2002)

$$\% Rejection = \left(1 - \frac{C_p}{C_b}\right) * 100 \quad (2-4)$$

$C_b$  = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

$C_p$  = ความเข้มข้นของเพอมีเอท

ความสามารถในการยอมให้สารผ่าน ณ ความดันนั้น (Permeability,  $P$ ) คือ ปริมาตรของ เพอมีเอทที่ผ่านรูพอรุนของวัสดุพอรุนตัวต่อหน่วยพื้นที่ของวัสดุพอรุนตัวต่อเวลาต่อความดันที่ให้กับ ระบบมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร × ชั่วโมง × ความดัน โดยหาจากสมการ (Ismail, A.F. et al, 2002)

$$J = P \Delta P \quad (2-5)$$

โดย  $J$  คือ ฟลักซ์ของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร / ตารางเมตร × ชั่วโมง)

$P$  คือ ความสามารถในการยอมให้สารผ่าน (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร × ชั่วโมง × ความดัน)

$\Delta P$  คือ ความดันที่ให้กับระบบ

## 2.8 การทำความสะอาดวัสดุพูนตัว

การอุดตัน (Fouling) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเสมอเมื่อมีการกรองสารผ่านวัสดุพูนตัว อาจกล่าวให้เข้าใจง่าย ๆ ได้ว่า เป็นปรากฏการณ์การอุดตันของวัสดุพูนตัวซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์และค่าการกักกัน (Rejection) เปลี่ยนแปลงไป ยกตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมนมตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการอุดตัน คือ โปรตีน ไขมันและเกลือแคลเซียม ในการทำความสะอาดวัสดุพูนตัวเพื่อให้ทำงานได้ดีเหมือนเดิมนั้น อาจทำได้โดยวิธีทางกายภาพหรือวิธีทางเคมี วัสดุพูนตัวทางเซรามิกมีคุณสมบัติพิเศษในเรื่องความทนทานสูง ดังนั้น การทำความสะอาด อาจใช้กรด-ด่าง หรือ สารเคมีอื่น ๆ ในช่วง pH 0 ถึง 14

การทำความสะอาดวัสดุพูนตัวโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นทางอินทรีย์หรือทางอนินทรีย์ปกติจะล้างครั้งแรกด้วยกรดก่อนแล้วจึงตามด้วยด่าง โดยกรดมาตรฐานที่ใช้ คือ กรดไนตริก หรือ กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ด่างมาตรฐานที่ใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้า พบว่า มีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ได้ทำการวิจัยในเรื่องการศึกษาสารเติมแต่งปริมาณความชื้น ในเนื้ออะลูมินาเพื่อการขึ้นรูปแบบบริด

Salamone, A.L., และ Reed, J.S. (1979) ได้ศึกษาค่าความหนืด (Viscosity) และแรงดันจากการรีดแบบ ของอะลูมินาที่ใช้ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส (Hydroxymethylcellulose, HMC) เป็นตัวประสานและทำการปรับค่า pH ด้วย อะลูมินัมไตรคลอไรด์ ( $AlCl_3$ ) พบว่า การเติมอะลูมินัมไตรคลอไรด์ เข้าไปในอะลูมินาที่ผสมด้วย ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส จะช่วยปรับให้ค่า pH จาก 10 ลดลงมาจนมีค่าประมาณ 8 ซึ่งเมื่อทำการทดสอบค่าความสามารถในการยอมให้สารผ่านและค่าร้อยละความพูนตัว พบว่า เมื่อค่า pH ลดลงจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการยอมให้สารผ่านและค่าร้อยละความพูนตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบค่าความแตกต่างของแรงดัน ณ หัวแบบขณะเริ่มรีดกับแรงดันสูงสุดเมื่อรีดแบบเสร็จ พบว่า ค่าความแตกต่างของแรงดันจะลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่าความต้านทานการไหลของเนื้อวัสดุขณะอัดตัวผ่านหัวรีดแบบลดลง เนื่องจากค่า pH ลดลง ซึ่งเป็นผลจากการเติมอะลูมินัมไตรคลอไรด์ ซึ่งจะทำให้ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลสเกาะตัวยึดเหนี่ยวกับอะลูมินาได้ดีขึ้นและลดการเกิด Binder migration

Schuetz. J.E. (1986) ได้ทำการศึกษาจุด Thermal gelation point ของสารเมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose, MC) ที่ได้ผสมในผงอะลูมินาต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงบิด (Torque) และค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของชิ้นงานหลังขึ้นรูป (Green compressive strength) พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการผสมเมทิลเซลลูโลสแต่ละชนิดต่ำกว่าจุด Thermal gelation point ค่าความแข็งแรงต่อแรงบิดจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่ออุณหภูมิในการผสมละลายเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ค่าความ

แข็งแรงต่อแรงบิดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณสัดส่วนของน้ำในการผสม และปริมาณเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงบิดลดลง ในขณะเดียวกันพบว่า ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของชิ้นงานหลังขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้น

Tiller, F.M. และ Tsai, C.D. (1986). เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขึ้นรูปเซรามิกโดยวิธีหล่อแบบ ซึ่งใช้ได้ทั้งกรณีที่มีความดันหรือไม่มีความดัน โดยจากแบบจำลองนั้นพบว่า ความหนาของชั้นบาง ๆ ที่ติดกับพิมพ์นั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของระยะเวลาในการหล่อแบบและอัตราความเร็วในการเกิดชั้นบาง ๆ ขึ้นที่ผิวแม่พิมพ์นั้น ขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของแม่พิมพ์ด้วย กล่าวคือ ที่เวลาเท่ากันแม่พิมพ์ที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะได้ชั้นที่มีความหนามากกว่าแม่พิมพ์ที่มีขนาดรูพรุนเล็กเพราะสามารถดูดซึมน้ำหรือตัวทำละลายออกไปได้เร็วมากกว่า

Terpastra, R.A., Bonekamp, B.C., และ Vergina, H.J. (1988) ผลิตภัณฑ์วัสดุพูนตัวอะลูมินาแบบทอกหลวงโครงสร้างแบบไม่สมมาตรชนิดไมโครฟิลเตรชัน โดยทำการทดลองเพื่อเตรียมชั้นรองรับจาก อัลฟา อะลูมินา ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) ขึ้นรูปด้วยวิธีรีดและนำไปเผาผนึก (Sintering) ที่อุณหภูมิ  $1600^\circ\text{C}$  พบว่า แรงดันที่ใช้ในการขึ้นรูปมีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุพูนตัวไม่มากนักและผลิตชั้นผิวโดยเคลือบสารอัลฟาอะลูมินาลงบนผิวด้านในของท่อรองรับ จากนั้นจึงนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ  $1200^\circ\text{C}$  องศาเซลเซียส จะได้ชั้นไมโครฟิลเตรชัน หนา 30 ไมครอน ซึ่งจากการศึกษาสรุปว่า ความหนาของชั้นไมโครฟิลเตรชันจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลือบและความหนืดของสารแขวนลอยโดยความหนืดนั้นสามารถควบคุมได้โดยเปลี่ยนปริมาณของผงอะลูมินาในสารแขวนลอยนั้น ๆ

Alain, A. และ Jacques, G. (1988) ผลิตภัณฑ์วัสดุพูนตัวอะลูมินาเซรามิกรูปทรงทอกหลวงโครงสร้างพูนแบบไม่สมมาตร โดยเสนอการผลิตวัสดุพูนตัว 3 แบบ ดังนี้

1. เป็นวัสดุพูนตัวที่มีชั้นรองรับ 1 ชั้นและชั้นผิว 2 ชั้น โดยเตรียมชั้นรองรับเป็นวัสดุพูนตัวอะลูมินา ขึ้นรูปด้วยวิธีรีดและอบที่  $180^\circ\text{C}$  ในบรรยากาศรีดชั้น (Reduction) จากนั้นเคลือบชั้นผิวด้วยสารแขวนลอยอะลูมินา ความหนืด 5 Poise โดยวิธีหล่อแบบ ได้ความหนา 20 ไมครอน โดยเคลือบบนผิวด้านในจากนั้นทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ  $1550^\circ\text{C}$  ในบรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation) แล้วเคลือบชั้นผิวอีกชั้นลงบนผิวชั้นที่ 1 ด้วยสารแขวนลอยไททานเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ความหนืด 5 Poise โดยวิธีหล่อแบบ จากนั้นเผาผนึกที่อุณหภูมิ  $1000^\circ\text{C}$

2. ทำการผลิตวัสดุพูนตัวโดยใช้วัสดุและวิธีการเหมือนแบบที่ 1 แต่มีความแตกต่างกันตรงที่ชั้นผิวทั้งสองนั้นจะเคลือบบนผิวด้านนอกของชั้นรองรับ

3. เป็นวัสดุพูนตัวที่มีชั้นรองรับ 2 ชั้นและชั้นผิว 1 ชั้น โดยชั้นรองรับเป็นอะลูมินาเซรามิก ขึ้นรูปด้วยวิธี Coaxial extrusion จะได้ชั้นรองรับออกมาเป็น 2 ชั้นและอบที่  $180^\circ\text{C}$  ในบรรยากาศรีดชั้น จากนั้นเคลือบชั้นผิวด้วยสารแขวนลอยอะลูมินาโดยวิธีหล่อแบบโดยเคลือบบน

ผิวด้านในของชั้นรองรับแล้วทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1550°C ในบรรยากาศออกซิเดชัน จากการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุพูนตัวแบบที่ 1 และแบบที่ 2 พบว่า ค่าความสามารถในการยอมให้สารผ่านของน้ำและอากาศของวัสดุพูนตัวแบบที่ 2 นั้นมีมากกว่าประมาณ 1.25 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากการเคลือบชั้นผิวบนผิวด้านนอกนั้น ทำให้ชั้นผิวมีพื้นที่ผิวมากกว่าพื้นที่ผิวของวัสดุพูนตัวแบบที่ 1 และพบว่า วัสดุพูนตัวแบบที่ 3 มีค่าสภาพการยอมให้ผ่านได้ของน้ำและอากาศต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพูนตัวแบบที่ 1 แต่มีค่าความต้านทานต่อความดันมากกว่าทั้งนี้เนื่องจากการที่มีความหนาแน่นมากกว่าจึงมีความแข็งแรงและรับแรงดันได้มากกว่า สรุปได้ว่าความหนาและพื้นที่ผิวมีผลต่อความแข็งแรงและสมบัติการยอมให้ของเหลวและก๊าซผ่านของวัสดุพูนตัวมาก

Chen, A.Y. และ Cawley, J.D. (1992) ได้ทำการทดลองใช้โบไมท์ (Boehmite, AIO (OH)) ที่มีค่า pH เท่ากับ 4 มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคประมาณ 50 นาโนเมตรประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก เป็นสารตัวเติมในเนื้ออะลูมินาโดยจะทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง ส่วนผสมที่ใช้ผงโบไมท์และโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ ส่วนผสมที่ใช้โบไมท์ ซอล (Boehmite sol) และโพลิไวนิลแอลกอฮอล์และส่วนผสมที่ใช้โพลิไวนิลแอลกอฮอล์แต่ไม่มีการเติมโบไมท์ในเนื้ออะลูมินา ทำการรีดแบบเพื่อทดสอบแรงดันจากการรีดแบบและทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1550°C, 1650°C ด้วยอัตราเร็วของการเผา (Heating rate) และอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) 10°C ต่อนาที พบว่า ส่วนผสมที่ไม่มีการเติมโบไมท์ ซอลนั้นแรงดันจากการรีดจะสูงกว่า นอกจากนั้นทำการทดสอบโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of rupture, MOR) เปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมของอะลูมินาและโบไมท์ ซอลที่เติมและไม่เติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่า การเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงไปจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานหลังจากขึ้นรูป (Green strength) กว่าร้อยละ 70 และพบว่า ที่อุณหภูมิ 1550°C ชิ้นงานมี Theoretical Density ร้อยละ 98 และมี Radial shrinkage มากกว่า Longitudinal shrinkage ของชิ้นงาน เช่นเดียวกับชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650°C มีการหดตัวในแนว Radial shrinkage ร้อยละ 21 และมี Longitudinal shrinkage ร้อยละ 19

เจริญพงษ์ สุขสวัสดิ์และคณะ (2536) สร้างเครื่องรีดแบบ แบบสกรูเพื่อใช้ในการขึ้นรูปเซรามิกให้มีลักษณะเป็นท่อกวางโดยทดลองใช้ขึ้นรูปดินเหนียว พบว่า ส่วนผสมที่มีน้ำในปริมาณร้อยละ 18-20 ให้ผลค่อนข้างดี ได้ชิ้นงานที่เป็นท่อกวางค้ำให้ตรงได้และไม่แตกร้าวเมื่อแห้ง ซึ่งส่วนผสมที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่านี้เนื้อดินจะแห้งและแข็งอยู่ในกระบอกลอบ แต่หากมีปริมาณความชื้นมากกว่านี้ ดินจะเกาะติดสกรูไม่เคลื่อนตัวไปข้างหน้า

ณัฐพล ทรงประเสริฐ (2536) ทดลองผลิตวัสดุพูนตัวอะลูมินาชนิดอุตราฟิลเตรชัน โครงสร้างแบบไม่สามารถ รูปแบบท่อกวางโดยวิธีซอล-เจล (Sol gel) โดยการเคลือบลงบนชั้นรองรับอะลูมินาขนาดรูพรุน 0.5 ไมครอน พบว่า



1. การเตรียมซอลเมื่อนำมาเคลือบลงบนชิ้นรองรับ พบว่า ชั้นผิวจะมีรอยร้าวและบางส่วนแตกหักหลุดออกมา

2. ขนาดรูพรุนมีการเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิการเผาผนึกโดยวัสดุพรุนตัวที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 400-1000°C เมื่อนำมาทดสอบสมบัติ พบว่า มีขนาดรูพรุน 2.76-5.58 นาโนเมตรตามลำดับ

3. ค่าฟลักซ์น้ำของวัสดุพรุนตัวมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิการเผาผนึก โดยวัสดุพรุนตัวที่ผ่านอุณหภูมิการเผาผนึกสูงจะมีฟลักซ์น้ำสูงขึ้น

Sugiura, I., Nomura, H., Shinohara, N. และ TSubaki, J. (1993) ศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวประสานที่มีต่อสมบัติของชิ้นงานโดยมีการเตรียมชิ้นงานดังนี้

ผงอะลูมินา น้ำ และตัวประสาน โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวประสาน ร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผสมให้เข้ากันแล้วทำให้แห้งเป็นเม็ดอนุภาคเล็ก ๆ ด้วยวิธี Spray drying จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีให้แรงดันเท่ากันทุกทิศทาง (Cold isostatic pressing, CIP) ทำการเผาผนึกไล่ตัวประสานโดยใช้อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการศึกษาสมบัติชิ้นงานพบว่า

1. ก่อนทำการเผาผนึกไล่ตัวประสาน : ชิ้นงานที่มีปริมาณตัวประสานมาก (ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก) จะมีความหนาแน่นมากที่สุด

2. หลังทำการเผาผนึกไล่ตัวประสาน : ชิ้นงานที่มีปริมาณตัวประสานมาก (ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก) จะมีความหนาแน่นน้อยที่สุด

3. หลังจากทำการเผาผนึกแล้ว : ชิ้นงานที่มีปริมาณตัวประสานมาก (ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก) จะมีความหนาแน่นต่ำและมีความทนต่อการดัดโค้ง (Bending strength) ต่ำกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณตัวประสาน ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ถึง 10 โดยน้ำหนัก

4. ชิ้นงานที่ใช้แรงดันในการขึ้นรูปสูง (200-300 เมกกะปาสกาล) หลังจากที่ผ่านการเผาผนึกแล้วจะมีค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ชิ้นงานที่ใช้แรงดันในการขึ้นรูปต่ำ (100-200 เมกกะปาสกาล) ชิ้นงานที่มีปริมาณตัวประสานร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักจะมีค่าความหนาแน่นสูงกว่ามาก

Zheng, J., Reed, J.S. และ Verma. S.K. (1994) ได้ทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งชนิดโพลีเอทิลีนไกลคอล, โพลีเอทิลีนออกไซด์ (Polyethyleneoxide, PEO), ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส และเมทิลเซลลูโลสที่ผสมในผงอะลูมินาเพื่อการขึ้นรูปด้วยวิธีรีด ทำการทดลองโดย

1. ระบบอะลูมินา-โพลีเอทิลีนไกลคอล-โพลีเอทิลีนออกไซด์ : ทำการผสมผงอะลูมินากับสารละลายโพลีเอทิลีนไกลคอล ซึ่งใช้เป็นสารเติมแต่งหลักและสารละลายโพลีเอทิลีนออกไซด์เป็นสารเติมแต่งรอง ในปริมาณต่าง ๆ พบว่า แรงดันจากการรีดแบบจะลดลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ

แรงเสียดทาน ณ หัวแบบ ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลและจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโพลีเอทิลีนออกไซด์ นอกจากนี้ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังจากขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลและจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโพลีเอทิลีนออกไซด์

2. ระบบอะลูมินา-ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลสและระบบอะลูมินา-เมทิลเซลลูโลส : ทำการผสมผงอะลูมินากับสารละลายไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลสและผสมอะลูมินากับสารละลายเมทิลเซลลูโลส เมื่อทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปทิ้งไว้ให้แห้งแล้วเปรียบเทียบกับระบบอะลูมินาโพลีเอทิลีนไกลคอล-โพลีเอทิลีนออกไซด์ พบว่า ในระบบอะลูมินาโพลีเอทิลีนไกลคอล-โพลีเอทิลีนออกไซด์ มีแรงดันจากการรีดเบบ้น้อยกว่า นั่นคือ แรงเสียดทานระหว่างรีดแบบ ณ หัวแบบน้อยกว่าระบบอะลูมินา-ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลสและระบบอะลูมินา-เมทิลเซลลูโลส ในขณะที่ เดียวกันระบบอะลูมินา-ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลสและระบบอะลูมินา-เมทิลเซลลูโลสจะให้ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังขึ้นรูปสูงกว่า

3. ระบบอะลูมินา-เมทิลเซลลูโลส-โพลีเอทิลีนไกลคอลและระบบอะลูมินา-ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส-โพลีเอทิลีนไกลคอล : พบว่า การเติมโพลีเอทิลีนไกลคอลลงในระบบทั้งสองนั้นจะช่วยลดแรงเสียดทาน ณ หัวแบบ นอกจากนี้ พบว่า ค่าโมดูลัสของการแตกหักของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปของระบบอะลูมินา-เมทิลเซลลูโลส-โพลีเอทิลีนไกลคอล จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณของเมทิลเซลลูโลสจะลดลงในช่วง ร้อยละ 3.5-2 โดยน้ำหนัก และปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอลจะเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 0-2 โดยน้ำหนัก โดยค่าโมดูลัสของการแตกหักจะลดลงจาก 35 เมกกะปาสคาล มาเป็น 8 เมกกะปาสคาล ในขณะที่เดียวกันก็พบว่า แรงเสียดทาน ณ หัวแบบขณะรีดแบบลดลง ส่วนในระบบอะลูมินา-ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส-โพลีเอทิลีนไกลคอล ค่าโมดูลัสของการแตกหัก จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลสลดลงในช่วง ร้อยละ 3-1 โดยน้ำหนักและปริมาณโพลีเอทิลีนไกลคอล เพิ่มขึ้นในช่วง ร้อยละ 0.5-2.5 โดยน้ำหนัก โดยค่าโมดูลัสของการแตกหัก จะลดลงจาก 25 เมกกะปาสคาล มาเป็น 14 เมกกะปาสคาล แต่อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสของการแตกหักของระบบอะลูมินา-ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส จะน้อยกว่าระบบอะลูมินา-เมทิลเซลลูโลส

Kawamura, K. และ Endo, H. (1996) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ Pre heat treatment และอุณหภูมิในการเผาผนึกที่มีต่อความทนต่อการคั่วโค้งของอะลูมินาพูนตัวที่เตรียมจาก อลูมินัมโมโนไฮดรอกไซด์ (Aluminum monohydroxide, AlOOH) ชนิดโบไมท์ โดยโบไมท์ ซอล เตรียมจาก อลูมินัมไอโซโพรพอกไซด์ (Aluminum isopropoxide) ที่ใช้กรดอะซิติก (Acetic Acid, CH<sub>3</sub>COOH) เป็นสารช่วยกระจายตัว (Deflocculating agent) จากนั้นทำให้แห้งเพื่อให้กลายเป็นเจลและทำการ Pre heat ที่อุณหภูมิ 100 จนถึง 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการบดและคัดขนาดให้มีขนาดประมาณ 149 ไมครอนหรือน้อยกว่า เพื่อทำการอัดด้วยแรงดัน 200 เมกกะปาสคาล

จากนั้นจึงทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500, 1550, 1600 และ 1650°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็วของการเผา 2°C ต่อนาที จึงทำการตรวจสอบร้อยละความพรุนตัวและความทนต่อการตัดโค้ง พบว่าร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานหลังทำการเผาผนึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการ Pre heat Treatment โบไมท์ เจล (Boehmite gel) นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิการ Pre heat treatment เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละความพรุนตัวเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันพบว่า ความทนต่อการตัดโค้งลดลง พิจารณาที่อุณหภูมิ preheat treatment 200°C มี ค่าความพรุนตัวร้อยละ 40 และมีความทนต่อการตัดโค้ง 40 เมกกะปาสคาลและที่อุณหภูมิ pre heat treatment 800°C มี ค่าความพรุนตัวร้อยละ 46 และมีความทนต่อการตัดโค้ง 27 เมกกะปาสคาล

Maeda, M., Suzuki, M. และ Shibasaki, Y. (1997) ทำการศึกษาผลการเติมพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ในซิลิกอนไนไตรด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) เพื่อขึ้นรูปด้วยการรีดแบบ โดยใช้สี่อะคลิลิก แอมโมเนียม ร้อยละ 0.2 โดยมวล เติมลงในผงวัตถุดิบ 1 กิโลกรัมประกอบด้วย ร้อยละ 92 โดยมวล อัลฟาซิลิกอนไนไตรด์ ( $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ), ร้อยละ 4 โดยมวล อัลฟาอะลูมินา ร้อยละ 4 โดยมวล อิตเทรียมออกไซด์ ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) และน้ำกลั่น 0.67 กิโลกรัม บดด้วยหม้อบดอะลูมินาเป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการเติมโพลีแซคคาไรด์ ร้อยละ 5 โดยมวล ทำการนวดผสมแล้วขึ้นรูปด้วยการรีด ทำการเผาผนึกไล่สารเติมแต่งที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1650-1800°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนด้วยความดัน 0.9 เมกกะปาสคาล จากนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผาผนึกและหลังเผาผนึก พบว่า ความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผาผนึกเท่ากับ  $1.36 \times 10^3$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาผนึกเพิ่มตามอุณหภูมิการเผาผนึกและทำการประมาณค่าความเป็นพลาสติก (Plasticity evaluation) โดยทำการเติมน้ำกลั่นในผงซิลิกอนไนไตรด์ ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) อัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนักและเติมโพลีแซคคาไรด์ ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ในขณะนวดผสม พบว่า การเติมโพลีแซคคาไรด์ร้อยละ 5 โดยมวลลงไปทำให้ค่า Water retentivity และค่า Characteristic value of plasticity ที่สูงกว่า

ปฎิมา เทพายน (2542) ศึกษาวิธีการผลิตวัสดุพรุนตัวอะลูมินารูปแบบท่อกลวง โครงสร้างแบบไม่สมมาตรโดยในส่วนของชั้นรองรับจะเตรียม 2 วิธี คือ

1. เตรียมวัตถุดิบ โดยเตรียมส่วนผสมซึ่งประกอบด้วย ผงอะลูมินา, ตัวประสานคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC), สารหล่อลื่น ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) และน้ำ ในอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วจึงทำการบดผสมด้วยเครื่อง Planetary mill
2. เตรียมวัตถุดิบ โดยใช้ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในน้ำ และผงอะลูมินา ในอัตราส่วนต่าง ๆ ผสมให้เข้ากันด้วยวิธีการนวด

ในส่วนของชั้นผิวเตรียมโดยใช้ผงอะลูมินาและน้ำในอัตราส่วน 25:75 ตามลำดับแล้วเติมกรดไนตริก เพื่อควบคุมค่า pH ให้เท่ากับ 4 แล้วจึงนำไปชุบเคลือบลงบนชั้นรองรับ ด้วย 2 เทคนิค คือ เทแบบ (Draining) และจุ่มแบบ (Dipping)

จากนั้นจึงนำไปศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการอบเผาผนึก ขนาดของรูพรุน สมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่านและสมบัติการกักสาร (%Rejection)

จากผลการศึกษาพบว่า

1. ส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่ออะลูมินา คือ ผงอะลูมินา คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ซิงค์สเตียเรต และน้ำในอัตราส่วน ร้อยละ 72.5:2:0.5:25 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณา รูพรุนที่ได้จากชั้นผิวแล้วพบว่า มีขนาดรูพรุนขนาดเดียวกับชั้นรองรับจึงได้ทำการทดลองปรับ ส่วนผสมด้วยการใช้ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในน้ำและผงอะลูมินา จากนั้นนำวดให้เข้ากันโดยไม่ใช้ Planetary mill พบว่า ปริมาณอะลูมินาต่อน้ำที่สามารถขึ้นรูปท่อ อะลูมินาที่คงรูปได้ดีและได้รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ คือ ร้อยละ 70:30 โดยน้ำหนัก

2. ชั้นผิวในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากชั้นผิวหลุดออกจากชั้นรองรับหลัง ผ่านการเผาผนึกหรือหลุดออกกระหว่างทดสอบพลิกชั้นน้ำ

3. จากการศึกษาอุณหภูมิการเผาผนึก (1400, 1450 และ 1600°C) และเวลาในการเผาผนึก (1, 3 และ 5 ชั่วโมง) พบว่า ไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดรูพรุนแต่ส่งผลกระทบต่อปริมาณและการกระจาย ขนาดรูพรุน (Pore size distribution) นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิการเผาผนึกสูงขึ้นปริมาณรูพรุนจะลดลง และมีการกระจายขนาดรูพรุนแคบกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

4. ชั้นรองรับเมื่อนำไปทดสอบสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่านและสมบัติการกักสาร พบว่า มีค่าการยอมให้น้ำไหลผ่าน  $7.63 \times 10^{-10}$  เมตร ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและมีสมบัติการกักสารเท่ากับ 100 %

Benito, J.M., Conesa, A., Rubio, F. และ Rodriguez, M.A. (2004) ศึกษาเตรียม Tubular ceramics membrane สำหรับ Treat oil emulsion โดยประกอบด้วย

1. ชั้นรองรับจะเตรียมจาก อะลูมินา, Colloidal SiO<sub>2</sub> ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก, โพลีเอทิลีน ไกลคอล น้ำหนักโมเลกุล 1000 กรัมต่อโมล ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก, โพลีเอทิลีน ไกลคอล น้ำหนัก โมเลกุล 1000 กรัมต่อโมล ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก, คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ร้อยละ 1.5 โดย น้ำหนัก, น้ำกลั่น ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่ 1600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการ เผาผนึกและอัตราการเย็นตัว 360°C ต่อชั่วโมง Cordierite, น้ำกลั่น ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เผาผนึก ที่ 1200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเผาผนึกและอัตราการเย็นตัว 300°C ต่อชั่วโมง

2. ชั้นกลาง เตรียมจากอัลฟาอะลูมินา, สารช่วยกระจายตัว ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักและ คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส (Low viscosity) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แล้วจึงเทลงด้านในของชั้นรองรับ

ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วย อัตราการเผาผนึกและ อัตราการเย็นตัว 200°C ต่อชั่วโมง

3. ชั้นผิวเตรียมด้วยกระบวนการ ซอล-เจล เพื่อให้ได้ แกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) โดยใช้ 0.75 โมลโบไมท์ ที่เติม ร้อยละ 33, 40 และ 45 โดยน้ำหนักของ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ทำการ calcined ที่ 450, 550 และ 650°C ด้วย อัตราการเผาผนึกและอัตราการเย็นตัว 60°C ต่อชั่วโมง พบว่า ชั้นรองรับอะลูมินาให้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 1.2 ไมครอน, ค่าความพรุนตัว ร้อยละ 35 ส่วน Cordierite มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 10 ไมครอนและมีค่าความพรุนตัว ร้อยละ 45 Intermediate layer ให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 90 นาโนเมตร, ค่าความพรุน ตัวร้อยละ 40 และ Top layer ที่มีความเข้มข้นของโบไมท์เท่ากับขนาดของรูพรุนจะเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิ calcined และพบว่า โบไมท์ ซอล 0.75 โมลโบไมท์ ทำให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ รูพรุน 4 นาโนเมตร, ค่าความพรุนตัวร้อยละ 40 และไม่ปรากฏรอยแตกร้าว

Ananthkumar, S., Manobar, P. และ Warriar, K.G.K. (2004) ได้ศึกษาผลต่างของความ ดันต่อเวลาและค่าความแข็งแรงต่อแรงบิด ต่อ Shear rate โดยการใช้โบไมท์, ไฮดรอกซีโพรพิล เมทิลเซลลูโลส (HPMC), โพลีไวนิลแอลกอฮอล์, โพลีเอทิลีนไกลคอล และกลีเซอริน (Glycerin) เป็นตัวประสาน โดยในการทดลองจะเปรียบเทียบระหว่าง อะลูมินา-โบไมท์ ซึ่งมีโบไมท์ เป็นตัวประสาน ในช่วงร้อยละ 15-40 โดยน้ำหนักและอะลูมินา ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของโบไมท์ ที่เติมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์, โพลีเอทิลีนไกลคอลและกลีเซอรินกับอะลูมินา-ไฮดรอกซีโพรพิล เมทิลเซลลูโลส ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก พบว่า

1. อะลูมินา-ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ใช้แรงดันในการรีด 0.2 เมกกะปาสคาล ขณะที่อะลูมินา-โบไมท์ ใช้แรงดันในการรีดแบบที่มากกว่าและจะมากขึ้นตาม ปริมาณ ร้อยละโดยน้ำหนักของโบไมท์ที่เพิ่มขึ้น

2. เมื่อเติมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ในอะลูมินา ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของ โบไมท์ พบว่า สามารถลดแรงดันในการรีดแบบ ลงจาก 1.6 เมกกะปาสคาล เป็น 1.0 เมกกะปาสคาล

3. เมื่อเติมโพลีเอทิลีนไกลคอล ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก หรือ กลีเซอริน ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ลงในอะลูมินา ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของโบไมท์ พบว่า สามารถลดแรงดันในการ รีดแบบ ลงจนเกือบเท่าอะลูมินา-ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

4. เปรียบเทียบระหว่างการใช้อะลูมินาและอะลูมินา ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ของโบไมท์-โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และโพลีเอทิลีนไกลคอล ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า อะลูมินาให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงบิดที่สูงกว่านั้นคือประมาณ 69.8

กิโลปาสกาล แม้จะทดสอบด้วย Shear rate ที่ต่ำ ในขณะที่ อะลูมินา ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของ โปไมท์ ทั้งมีและไม่มีตัวประสานจะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงบิดที่ต่ำลงตามลำดับ

Isobe, T., Tomota, T., Kameshima, Y., Nakajima, A. และ Okada, K. (2006) ศึกษาการเตรียมอะลูมินาพรุนตัว ด้วยวิธีรีด โดยใช้คาร์บอนไฟเบอร์ เป็นตัว Porous foaming agent กำหนดให้มีลักษณะ Unidirectional oriented pore เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดยพบว่า ส่วนผสมคือ อะลูมินา 0.7 ไมครอน, คาร์บอนไฟเบอร์ ร้อยละ 52 โดยปริมาตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 ไมครอน, ความยาว 600 ไมครอน, เมทิลเซลลูโลส ร้อยละ 4 โดยมวล, Ammonium poly-carboxylic acid ร้อยละ 0.4 โดยมวล และน้ำกลั่น ร้อยละ 17.6 โดยมวล ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาภาพตัดขวาง จาก Scanning electron microscopy พบว่า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 14 ไมครอน, ค่าความพรุนตัวร้อยละ 38 และเมื่อทดสอบความทนต่อการตัดโค้ง พบว่า มีค่า 171 เมกกะปาสกาล และค่าโมดูลัสของยัง (Young modulus) เท่ากับ 132 จิกกะปาสกาล

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์และทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	แบบ/รุ่น
High temperature furnace (1600°C)	Yamato scientific	FJ 31
Extrusion machine	Petkasem ceramic machine	
Universal testing machine	Instron	5565
Scanning electron microscope	JEOL	5410LV
Centrifugal particle size analyzer	Shimadzu	SA -CP3L
Energy dispersive x-ray spectrometer (EDX)	Oxford	ISIS 300
Dilatometer	Netzsch	Dil 420 PC
X-ray diffractometer	Shimadzu	6000
Pore master mercury porosimeters	Quantachrome	Poremaster 60
เครื่องชั่ง	Mettler toledo	AE 200
Digital stirrer	-	-
ชุดทดลอง Archimedes method	Mettler toledo	AE 200
อุปกรณ์ทดสอบการทำงานของวัสดุพูนตัวประกอบด้วย 1.ปั๊ม 2.ถังป้อนสาร 3.เกจวัดความดัน	ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย	

### 3.2 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	ชนิด	ผู้ผลิต
Aluminium oxide	A12 (ขนาดเฉลี่ย 58 ไมครอน)	Showa Denko Co.,Ltd.
Aluminium oxide	A33F (ขนาดเฉลี่ย 0.7 ไมครอน)	Showa Denko Co.,Ltd.
Aluminium oxide	CA5m (ขนาดเฉลี่ย 5 ไมครอน)	Amarin ceramic
Carboxymethyl cellulose (CMC)	High Viscosity Code21903	Fluka
Polyvinyl alcohol (PVA)	MW. 100,000 g.mol <sup>-1</sup>	Fluka
Polyethylene glycol (PEG)	MW. 10,000 g.mol <sup>-1</sup>	Fluka
Zinc stearate	-	Cernic international
น้ำกลั่น	-	-

หมายเหตุ : Aluminium oxide ใช้เป็นเนื้อส่วนผสมหลักในการขึ้นรูป

Carboxymethyl cellulose , Polyvinyl alcohol , Polyethylene glycol

ใช้เป็นสารเติมแต่ง

Zinc state ใช้เป็นสารหล่อลื่น

น้ำกลั่นใช้สำหรับละลายสารเติมแต่งและเป็นตัวกลางนวดเนื้อส่วนผสมหลักและสารเติมแต่งให้เข้ากัน

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมออกไซด์ชนิดต่าง ๆ

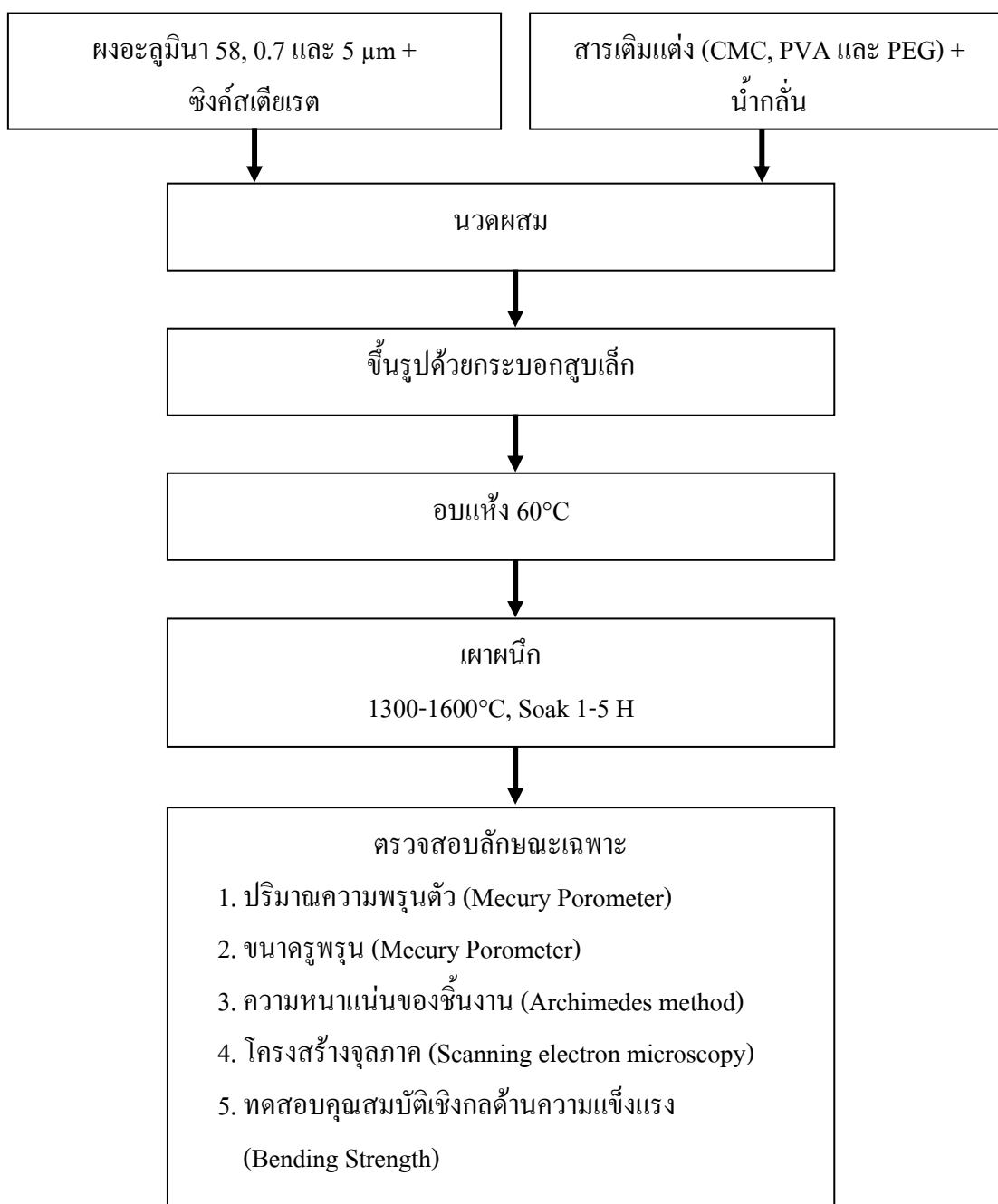
Alumina (µm)	Chemical composition				
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	L.O.I
A12	99.7	0.27	0.01	0.02	0.05
A33F	99.6	0.35	0.01	0.02	0.1
CA5m	99.5	0.35	0.02	0.02	0.2



### 3.3 วิธีการทดลอง

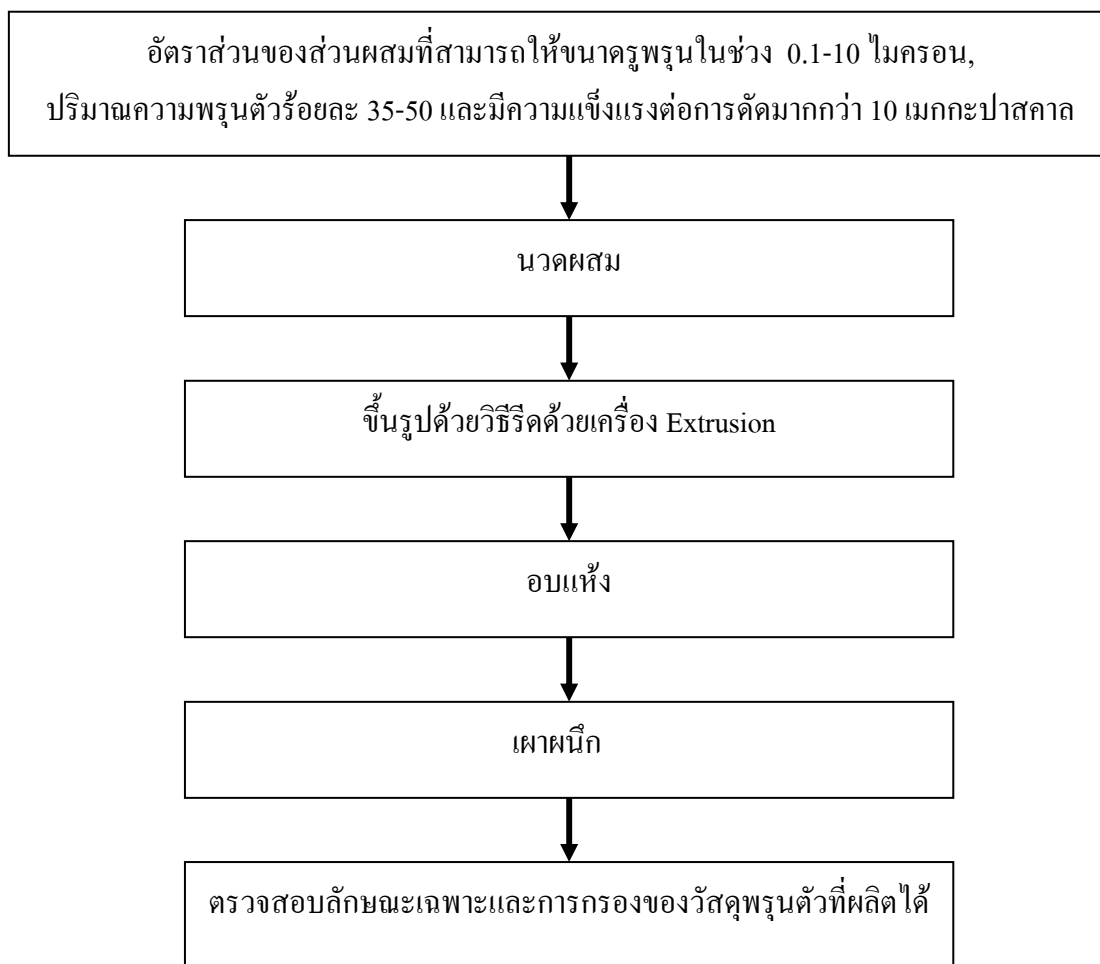
ขั้นตอนและวิธีการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1

ตอนที่ 1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง ตอนที่ 1

## ตอนที่ 2



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง ตอนที่ 2

จากแผนภาพสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนและวิธีการทดลอง ดังนี้

### 3.3.1 การตรวจสอบลักษณะจำเพาะของสารตั้งต้น

#### 1. การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงตัวอย่าง

การหาขนาดและการกระจายอนุภาคของผงตัวอย่าง ด้วยหลักการ การเหวี่ยงและการตกตะกอนแล้วทำการตรวจวัดความขุ่นของอนุภาคเพื่อทำการเทียบแสง โดยใช้ ฮาโลเจน แลมป์ (Halogen lamp) เป็นแหล่งกำเนิดแสง

เครื่องมือ : Particle size analyzer

บริษัท : Shimadzu Co., Ltd รุ่น SA-CP3L

#### วิธีการทดสอบ

- สุ่มผงตัวอย่างทำการชั่งน้ำหนักปริมาณ 3 กรัม
- เตรียมสารละลาย Sodium hexamethaphosphate ในปริมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์
- เติมสารละลาย Sodium hexamethaphosphate ผสมกับผงตัวอย่างในบีกเกอร์ให้ได้ปริมาณ 5 มิลลิลิตร

- นำแมกเนติก บาร์ (Magnetic bar) ใส่ลงในบีกเกอร์ของสารละลายผงตัวอย่างทำการปั่นเพื่อป้องกันการตกตะกอนของอนุภาคผงตัวอย่าง

- นำตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องสั่นสะเทือนโดยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

#### 2. การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส (Phase analysis)

การตรวจวิเคราะห์ โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ซึ่งผลึกของสารชนิดนั้น ๆ จะให้รูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิดตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law)

เครื่องมือ : XRD 6000 จากบริษัท Shimadzu ใช้  $\text{CuK}\alpha$  เป็นแหล่งกำเนิดรังสี

#### วิธีการทดสอบ

- ตักผงตัวอย่างโปรยใส่ลงในหลุมใส่ผงตัวอย่าง (Sample holder)
- ใช้แผ่นกระจกกดผงตัวอย่างให้เรียบและอัดตัวแน่นในหลุมใส่ผงตัวอย่างแล้วจึงปิดฝาหลังเข้ากับหลุมใส่ผงตัวอย่าง วิเคราะห์ผล

#### ภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

Generate voltage	= 40 kV
Generate current	= 30 mA
Start angle	= 5°
End angle	= 80°
Scan speed	= 2.0°/min
Sample pitch	= 0.02°

### 3.3.2 ออกแบบการทดลอง

#### 1. การทดลองตอนที่ 1

เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างอะลูมินา ขนาดต่าง ๆ ต่อ ปริมาณสารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส, โพลีเอทิลีนไกลคอลและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ทำให้ชิ้นงานมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงแมคโครพอร์หรือในช่วงการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันมีและมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงต่อการคัดมากกว่า 10 เมกะปาสคาล รวมทั้งเลือกชนิดของ

สารเติมแต่งที่สามารถเตรียมได้ง่ายและให้คุณลักษณะของเนื้อส่วนผสมที่มีความเหนียว ยืดหยุ่นตัวสูง โดยตัวแปร คือ ปริมาณและชนิดของสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ และขนาดอนุภาคอะลูมินา ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงองค์ประกอบของส่วนผสมในแต่ละตัวอย่าง

ขนาดอนุภาคอะลูมินา ( $\mu\text{m}$ )	ปริมาณสารเติมแต่ง (ร้อยละโดยน้ำหนักอะลูมินา)			ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร)
	CMC	PVA	PEG	
0.7 (100 g)	1.5	1.5	1.5	25
	3	3	3	25
	6	6	6	25
0.7 (50 g) + 5 (50g)	1.5	1.5	1.5	25
	3	3	3	25
	6	6	6	25
5 (100 g)	1.5	1.5	1.5	25
	3	3	3	25
	6	6	6	25
5 (50 g) + 58 (50 g)	1.5	1.5	1.5	25
	3	3	3	25
	6	6	6	25

#### การเตรียมส่วนผสมและการขึ้นรูป

- เตรียมส่วนผสมโดยการชั่งอะลูมินาขนาดต่าง ๆ โดยในการทดลองจะใช้ทั้งหมด 4 ขนาดด้วยกัน คือ

อะลูมินา 0.7 ไมครอน ปริมาณ 100 กรัม

อะลูมินา 0.7 ไมครอนผสมกับอะลูมินา 5 ไมครอน ชนิดละ 50 กรัม

อะลูมินา 5 ไมครอน ปริมาณ 100 กรัม

อะลูมินา 5 ไมครอนผสมกับอะลูมินา 58 ไมครอน ชนิดละ 50 กรัม

- ชั่งน้ำหนักสารหล่อลื่น (ซิงค์สเตียเรต) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักอะลูมินา เติมนลงในอะลูมินาแต่ละขนาดที่ได้ทำการชั่งเตรียมไว้

- ชั่งน้ำหนักสารเติมแต่ง ตัวอย่างเช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักอะลูมินาจากนั้นจึงผสมกับน้ำ 25 มิลลิลิตร
- นำสารเติมแต่งที่ได้ทำการผสมน้ำไว้ในข้อที่ 3 มาวัดผสมกับอะลูมินาทั้ง 4 ขนาดที่ได้ทำการเติมสารหล่อลื่นไว้ จากนั้นนวดให้เข้ากัน
- ทำการขึ้นรูปด้วยกระบอกสูบเล็กซึ่งดัดแปลงจากเข็มฉีดยาปริมาตร 20 มิลลิลิตร
- ทำการตัดตัวอย่างให้มีความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร
- ทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วันแล้วจึงนำไปอบที่ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

หมายเหตุ : ทำการชั่งน้ำหนักคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา แล้วจึงทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 3-8 อีกครั้งสารเติมแต่งอีก 2 ชนิด นั่นคือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอลทำการทดลองเช่นเดียวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

## 2. การทดลองตอนที่ 2

เป็นการทดลองเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะทอกลวง โดยการทดลองจะเลือกขนาดอนุภาคอะลูมินาและชนิดของสารเติมแต่งจากการทดลองตอนที่ 1 ที่ให้ชิ้นงานที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงแมคโครพอร์หรือในช่วงการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน และมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงต่อการคดมากกว่า 10 เมกะปาสคาล รวมทั้งให้ลักษณะของเนื้อส่วนผสมที่มีความเหนียวที่ดีมีความยืดหยุ่นตัวสูงเหมาะแก่การขึ้นรูปด้วยวิธีรีด เพื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบรีด จากนั้นจึงทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุพรุนตัวที่ผลิตได้

การเตรียมส่วนผสมและการขึ้นรูป

- เตรียมส่วนผสมโดยการชั่งอะลูมินาขนาดต่าง ๆ ที่เลือกจากการทดลองตอนที่ 1 จำนวน 2 กิโลกรัม
- ชั่งน้ำหนักสารหล่อลื่น (ซิงค์สเตียเรต) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักอะลูมินา เติมลงในอะลูมินาแต่ละขนาดที่ได้ทำการชั่งเตรียมไว้
- เลือกสารเติมแต่งจากการทดลองตอนที่ 1 ทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งโดยเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งจากปริมาณร้อยละ 1.5 เป็น 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา นอกจากการศึกษาการเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งแล้วแล้วทำการศึกษาการลดหรือเพิ่มปริมาณน้ำ โดยเติมศึกษาจากปริมาณร้อยละ 20, จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็น 25, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นทอตรงกลวง คงรูปได้
- นำอะลูมินา สารเติมแต่ง น้ำ และสารหล่อลื่น มาวัดผสมให้เข้ากัน ตามสัดส่วนต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา

- นำส่วนผสมมาทำการนวดด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบรีด (Extrusion machine) ทำประมาณ 10 รอบ จนเนื้อส่วนผสมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวเข้ากันได้ดี
- ทำการใส่หัวแบบ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นท่อกลวง
- ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบรีด โดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนสกรูระดับ 10 หรือ 42 รอบต่อนาที ความเร็วการหมุนของสายพานลำเลียงระดับ 1 หรือ 2 รอบต่อนาที (ประมาณ 0.18 เมตรต่อนาที)
- นำชิ้นงานทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงทำการอบที่ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 3.3.3 การเผาผนึก (Sintering)

#### 1. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาผนึก

นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปทั้งในการทดลองตอนที่ 1 และตอนที่ 2 เผาผนึกด้วยเตาอุณหภูมิสูงเพื่อทำให้ชิ้นงานสุกตัวและเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาผนึก

เครื่องมือ : High temperature furnace (1600°C) ผลิตโดยบริษัท Yamato scientific รุ่น FJ 31

ภาวะที่ใช้ในการเผา

อุณหภูมิเริ่มต้น : 30°C

ขั้นการเผาที่ 1 : 2°C ต่อนาที ถึง 500°C เวลาเผาแช่ 60 นาที

ขั้นการเผาที่ 2 : 5°C ต่อนาที ถึง 1300°C เวลาเผาแช่ 60 นาที

ขั้นการเผาที่ 3 : 5°C ควบคุมการเย็นตัว ถึง 70°C

หมายเหตุ : เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาผนึก ทำการทดลองเผาโดยเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาในขั้นตอนที่ 2 โดยศึกษาที่ 1300-1600°C

#### 2. ศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วของการเผา (Heating rate) ในขั้นการเผาที่ 2 และ 3

นำชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบรีด มาทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราความร้อนในการเผา โดยทดลองที่ 3°C ต่อนาที, 5°C ต่อนาทีและ 10°C ต่อนาที ในขั้นการเผาที่ 2 และ 3 ถึงอุณหภูมิเผาผนึกที่ 1500°C เวลาในการเผาแช่ 1 ชั่วโมง

#### 3. ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเผาแช่ (Soaking time) ในขั้นการเผาที่ 2

นำชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบรีด มาทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการเผาแช่ โดยทดลองที่เวลา 60, 180 และ 300 นาที ที่อัตราเร็วการเผา 5°C ต่อนาที อุณหภูมิเผาผนึก 1500°C ในการเผาขั้นที่ 2 ตามการทดลองที่ 1.

### 3.3.4 การตรวจสอบคุณสมบัติหลังเผาของชิ้นงาน

#### 1. การทดสอบความหนาแน่นและปริมาณความพรุนตัวของชิ้นงาน

การทดสอบความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของตัวอย่าง จะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C373 (1994)

วิธีการทดสอบความหนาแน่นและปริมาณความพรุนตัว

- นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกไปทำการอบที่ 150°C จากนั้นนำไปพักให้เย็นในภาชนะดูดความชื้น (Desiccators) แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง ( $W_D$ )

- นำชิ้นงานในข้อที่ 1 ไปต้มในน้ำกลั่น โดยให้น้ำท่วมชิ้นงานตลอดเวลาเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงแช่ตัวอย่างไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- หลังจากครบ 24 ชั่วโมงนำชิ้นงานไปทำการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ ( $W_{SS}$ ) ด้วยชุดทดลอง Archimedes method บันทึกค่าน้ำหนักที่อ่านได้

- นำตัวอย่างที่ทำการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำแล้วเช็ดน้ำส่วนเกินที่ผิวออก แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักอิมมัวด้วยน้ำ ( $W_S$ ) บันทึกค่าน้ำหนักที่อ่านได้

- นำค่าน้ำหนักที่อ่านได้ไปคำนวณค่าความหนาแน่นและปริมาณความพรุนตัว

- วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (V)} = W_S - W_{SS} \quad (3-1)$$

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง (Bulk density)} = W_D / V \quad (3-2)$$

$$\text{ปริมาณรูพรุน (Apparent porosity)} = [(W_S - W_D) / V] \times 100 \quad (3-3)$$

$$\text{ปริมาณการดูดซึมน้ำ (Water absorption)} = [(W_S - W_D) / W_D] \times 100 \quad (3-4)$$

## 2. การตรวจสอบขนาดรูพรุน

เพื่อหาขนาดรูพรุนและการกระจายขนาดรูพรุนของชิ้นงานทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Pore master mercury porosimeters บริษัท Quantachrome รุ่น Poremaster 60

วิธีการทดสอบขนาดรูพรุน

- ตัดชิ้นงานให้มีความกว้าง 0.5 เซนติเมตร และยาวประมาณ 2 เซนติเมตร

- นำชิ้นงานที่ตัดไว้ อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 30 นาที

- ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า ชุด Sample tube

- นำชุด Sample tube ใส่ใน Port เพื่อทำการอัดปรอทที่ความดันต่ำเป็นเวลา 30 นาที

- ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าชุด Sample tube ที่ทำการอัดปรอทเสร็จแล้ว

- ทำการเทปรอทกลับสู่กระบอกบรรจุปรอท จากนั้นนำตัวอย่างที่ทำการอบไว้บรรจุในชุด Sample tube แล้วทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า

- นำชุด Sample tube ที่บรรจุชิ้นงานใส่ใน Port เพื่อทำการอัดปรอทที่ความดันต่ำเป็นเวลา 30 นาที

- ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าชุด Sample tube ที่บรรจุชิ้นงานและทำการอัดปรอทเสร็จแล้ว

- จากนั้นบรรจุลงใน Housing เพื่อทำการอัดปรอทที่ความดันสูง
- ทำการวิเคราะห์ขนาดความพรุนตัวและการกระจายขนาดของรูพรุน

### 3. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

การเตรียมตัวอย่าง

- ตัดชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง 0.5 เซนติเมตรและยาว 0.5 เซนติเมตร
- นำตัวอย่างไปแช่เพื่อขจัดผงหรือฝุ่นด้วยเครื่องสั่นสะเทือนโดยคลื่นเสียงความถี่สูง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมาล้างด้วยอะซิโตน (Acetone)

- เมื่อตัวอย่างแห้งแล้วนำไปวางบนสตัป (Stub) แล้วจึงทำการฉาบทองเพื่อให้ตัวอย่างมีการนำไฟฟ้า ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ เป็นเวลา 5 นาที

- นำตัวอย่างไปถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 4. ทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง (Bending strength)

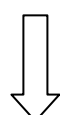
ทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง ตามมาตรฐาน ASTM C1161 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงกดของวัสดุ (Universal testing machine)

การเตรียมตัวอย่าง

- ตัวอย่างมีลักษณะเป็นท่อกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 เซนติเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.1 เซนติเมตรและมีความหนา 0.45 เซนติเมตร โดยตัดให้มีขนาดความยาว 15 เซนติเมตร ด้วยเครื่องตัดไบเพชร (Diamond saw)

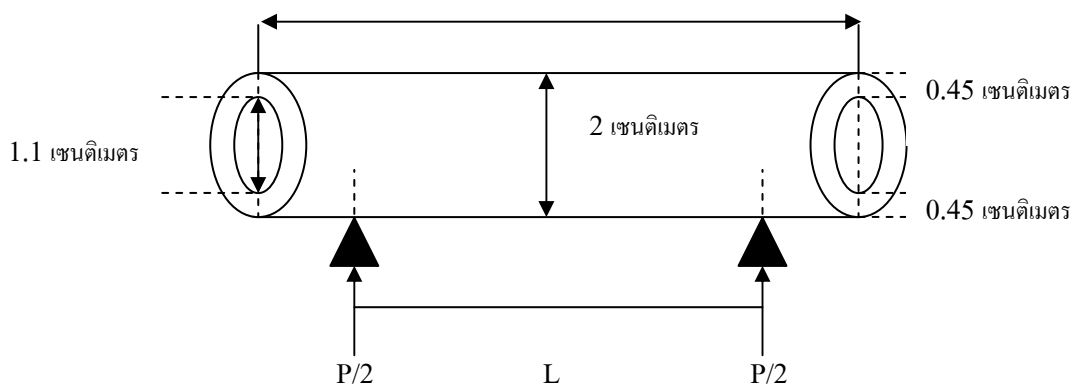
- ใช้กระดาษทรายขัดลบมุมของชิ้นงานให้เรียบแล้วนำไปทดสอบ

P (ทิศทางแรงอัด)



15 เซนติเมตร





รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองขนาดวัสดุรูปทรงแท่งที่ใช้ในการทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง

วิธีการทดสอบความทนต่อการดัดโค้ง

เป็นการทดสอบในแรงกระทำกับชิ้นงาน 3 จุด (Three-point bending) ลักษณะการทดสอบความแข็งแรงแบบนี้จะมีการให้น้ำหนักที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานระหว่างตัวรองรับทั้งสอง ดังภาพ 3.3

เครื่องมือ : Universal testing machine บริษัท Instron

วิธีทดสอบ

- นำตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมขนาดมาตรฐานมาทดสอบ
- ภาวะที่ใช้ทดสอบ

ความยาวของจุดรองรับตัวอย่าง = 80 มิลลิเมตร

ความเร็วในการกดดัดโค้ง (Crosshead speed) = 5 มิลลิเมตร/นาที

ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

การคำนวณความทนต่อการดัดโค้งได้จากสมการ (3-6)

$$\text{ท้อตัน MOR } (\sigma) = \frac{8PLD}{\pi D^3} \quad (3-5)$$

$$\text{ท่อกวาง MOR } (\sigma) = \frac{8PLD}{\pi(D^4 - d^4)} \quad (3-6)$$

เมื่อ

$\sigma$  = ค่าความแข็งแรงดัดโค้ง (เมกะปาสกาล)

P = แรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก (นิวตัน)

L = ระยะของฐานรองรับด้านล่าง (มิลลิเมตร)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

5. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of thermal expansion : COE)

ทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer บริษัท Netzsch รุ่น 402 PC

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

- ตัดตัวอย่างทดสอบให้เป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 0.8 เซนติเมตร × ยาว 3 เซนติเมตร × สูง 0.3 เซนติเมตร

- ภาชนะที่ใช้ทดสอบ

อุณหภูมิเริ่มต้น                      30°C

อุณหภูมิสิ้นสุด                              1500°C

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ                      5°C ต่อนาที

เวลาเผาเซ้                                      ไม่ใช่

นำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ตามสมการที่ (3.7)

$$\alpha_L = \frac{\Delta L}{L_0} \times \frac{1}{\Delta T} \quad (3.7)$$

เมื่อ

$\alpha_L$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

$\Delta L$  คือ ค่าความแตกต่างของความยาวที่อุณหภูมินั้น ๆ เทียบกับ  $L_0$   
 $L_0$  คือ ความยาวเริ่มต้น  
 $\Delta T$  คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ

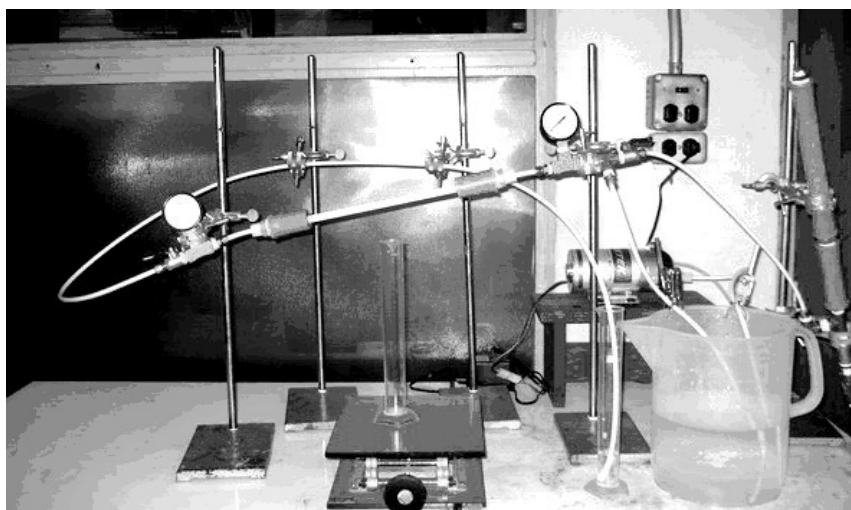
#### 6. การทดสอบการกรอง

เพื่อทดสอบความสามารถในการไหลผ่าน (Permeability) ของน้ำและความสามารถในการกักกันสารผ่านวัสดุพอร์นตัวรูปแบบท่อกลวงที่ผลิตได้

เครื่องมือในการทดสอบ

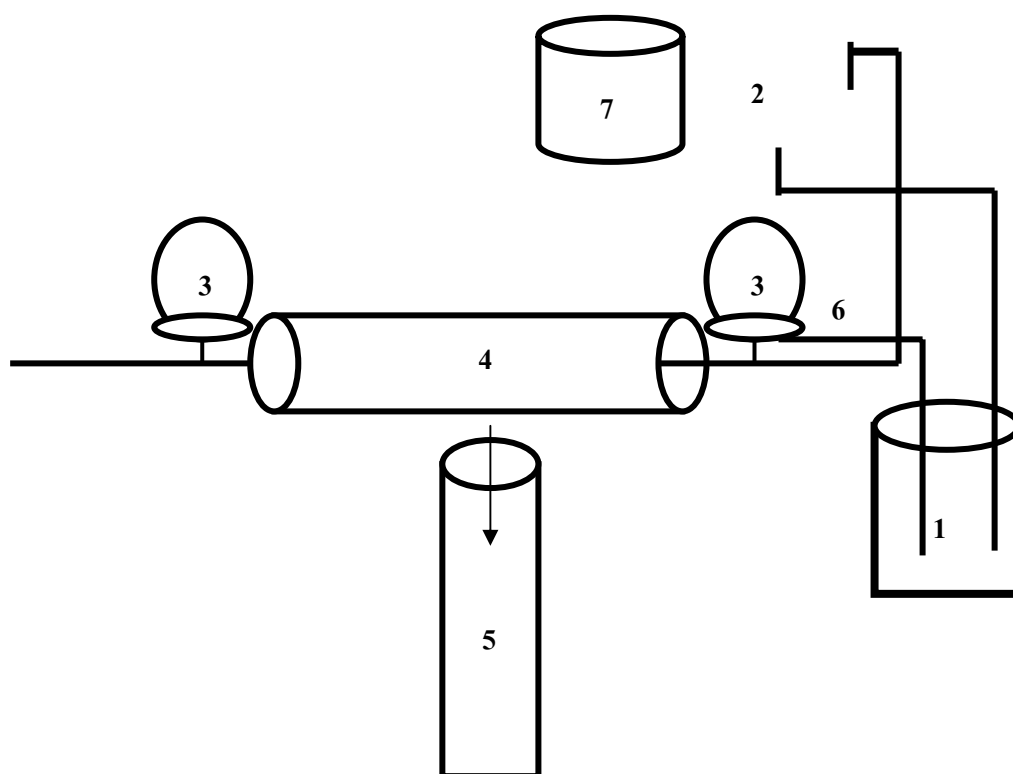
ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบวัสดุพอร์นรูปแบบท่อกลวง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยเครื่องมือทดสอบมีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

สารละลายหรือน้ำจะบรรจุไว้ในถังใส่สารจากนั้นจึงถูกดูดด้วย Pump เข้าสู่วัสดุพอร์นตัวที่ใช้กรอง โดยอัตราการไหลและความดันจะถูกควบคุมโดยการปรับวาล์วเกจวัดความดัน โดยสามารถวัดค่าอัตราการไหลจากบายพาส (By pass) จากนั้นสารละลายจะไหลผ่านวัสดุพอร์น ซึ่ง ณ ส่วนนี้จะมีบางส่วนผ่านวัสดุพอร์นออกมาได้ เรียกว่า “เพอมีเอท” ส่วนที่เหลือ “รีเทนเทต” จะไหลกลับสู่ถังใส่สารหรือปิกเกอร์รองรับอีกครั้ง



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องมือทดสอบการกรอง





รูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบการกรอง

1. ถังใส่น้ำ
2. Pump
3. เกจวัดและปรับความดัน
4. วัสดุพูนตัวรูปแบบท่อกลวง
5. ถังเก็บน้ำหรือสารละลายที่กรองผ่านวัสดุพูนตัว (เพอมีเอท)
6. By pass
7. ถังเก็บสารที่ไม่ผ่านการกรอง (รีเทนเทต)

ดังได้กล่าวในหัวข้อ 2.7 ฟลักซ์ (Flux) คือ ปริมาตรของตัวทำละลายที่ผ่านวัสดุพอรุนตัวต่อพื้นที่ที่ทำการกรองมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร  $\times$  ชั่วโมง (Ismail, A.F. et al, 2002)

$$Flux, J = \frac{Volume\ Permeate\ (V / t)}{Cylindrical\ Area\ (A)} \quad (2-3)$$

จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบโดยแสดงถึงปริมาตรของเพอมีเอทที่ผ่านรูพอรุนของวัสดุตัวกรองที่ผลิตได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา โดยในการทดสอบนี้จะใช้เครื่องมือทดสอบดังที่ได้กล่าว และใช้น้ำกลั่น (Distill water) ในการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (27°C) ตั้งอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ทดลองวัดค่าฟลักซ์ทุก 1 นาที ที่ 5 นาทีแรก หลังจากนั้นวัดทุกๆ 5 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง ที่ความดัน 1, 2 และ 3 จากนั้นคำนวณฟลักซ์น้ำโดยใช้สมการ (2-3)

การทดสอบการกักกันสาร

ดังได้กล่าวในหัวข้อ 2.7 คุณสมบัติในการกักกันสาร (%Rejection) คือ ความสามารถในการกักกันสารของวัสดุพอรุนตัวมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งคำนวณได้ดังนี้ (Ismail, A.F. et al, 2002)

$$\% Rejection = \left(1 - \frac{C_p}{C_b}\right) * 100 \quad (2-4)$$

$C_b$  = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

$C_p$  = ความเข้มข้นของเพอมีเอท

วิธีการทดสอบเป็นเช่นเดียวกับการทดสอบฟลักซ์น้ำ แต่ต่างเพียงในการทดสอบการกักกันสารจะใช้สารแวนิลอยแทนน้ำ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารแวนิลอยของสำหรับ ซึ่งสารที่นำมาทดสอบมีความเข้มข้น 1.87 กรัม/ลิตร ทดลองวัดค่าฟลักซ์ทุก 1 นาที ที่ 5 นาทีแรก หลังจากนั้นวัดทุกๆ 5 นาทีจนครบ 1 ชั่วโมงที่ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิห้อง (27°C) ตั้งอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที จากนั้นเก็บตัวอย่างเพอมีเอทที่เวลาต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ผ่านวัสดุตัวกรองออกมาได้ แล้วจึงนำมาคำนวณค่าการกักกันสาร โดยใช้สมการ (2-4)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะของสารตั้งต้น

##### 4.1.1 การศึกษาลักษณะจำเพาะของผงอะลูมินา

ผลการศึกษาลักษณะจำเพาะของผงอะลูมินา

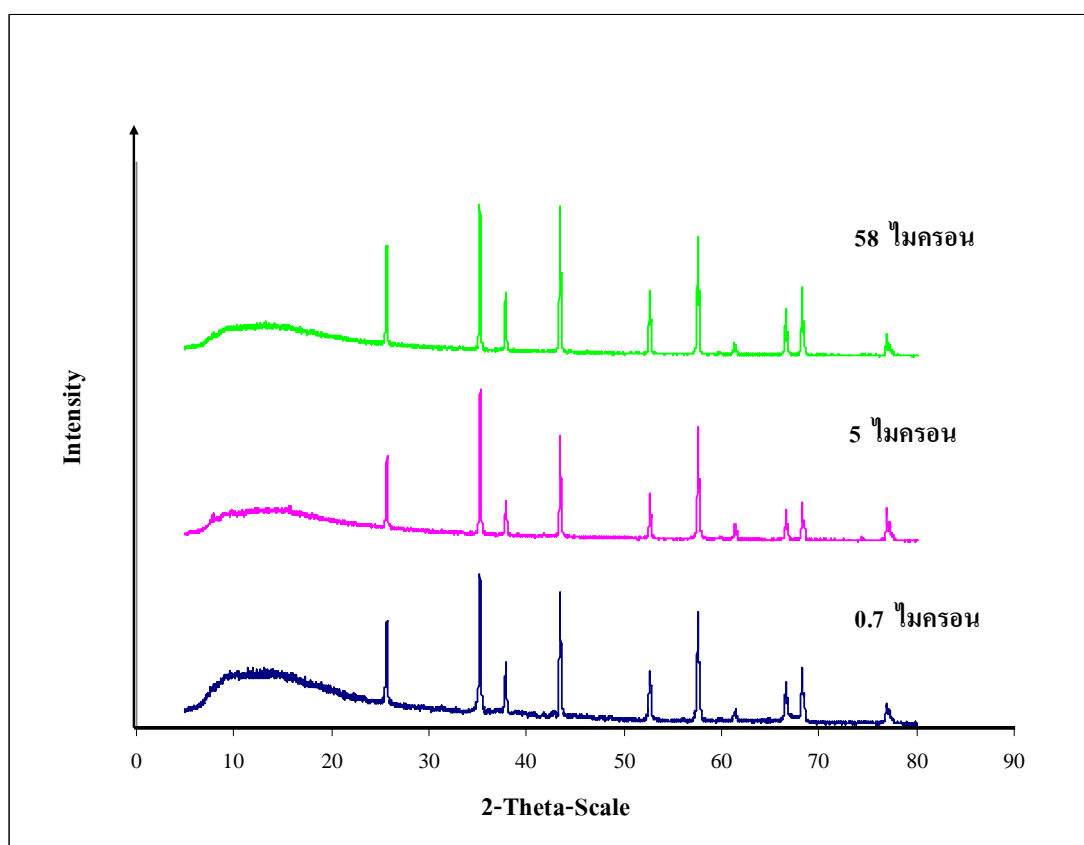
ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะจำเพาะที่วัดได้ของผงอะลูมินา

ลักษณะจำเพาะ	อะลูมินา		
	A12 <sup>1</sup>	A33F <sup>1</sup>	CA5M <sup>2</sup>
ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค (ไมครอน)	58	0.7	5
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	3.96	3.80	3.90
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.7	99.6	99.5
Na <sub>2</sub> O	0.27	0.36	0.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.02
SiO <sub>2</sub>	0.02	0.012	0.02
L.O.I	0.05	0.3	0.2

<sup>1</sup> ข้อมูลจากบริษัท Cernic international

<sup>2</sup> ข้อมูลจากบริษัท Amarin ceramic

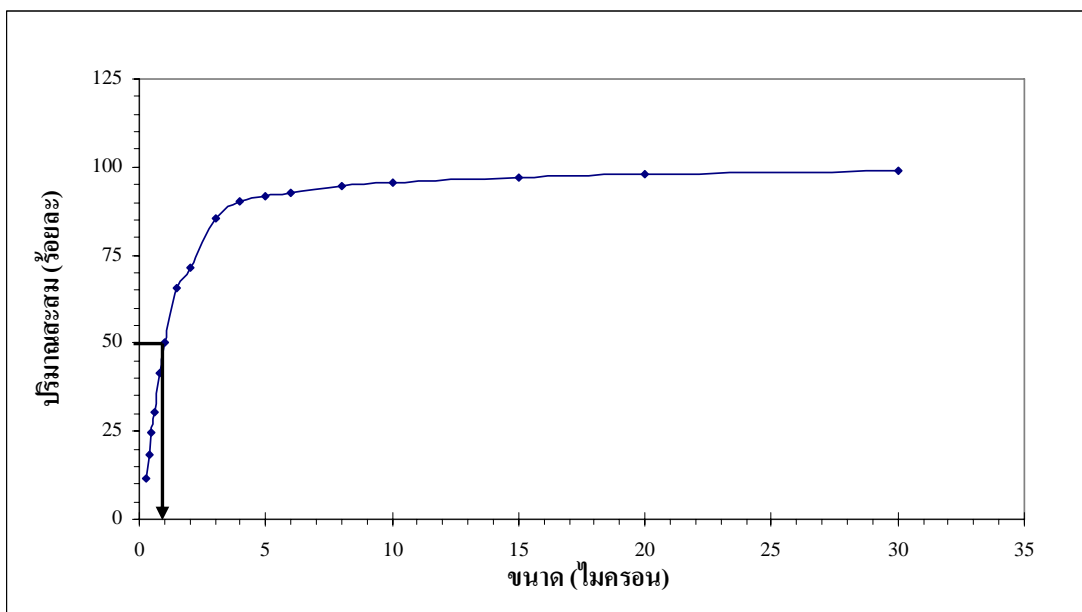
การวิเคราะห์วัสดุภาคด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (XRD) รูปแบบพีก (Peak) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า อะลูมินาทั้งขนาด 0.7 ไมครอน 5 ไมครอนและ 58 ไมครอน พีกที่มีความเข้ม (Intensity) สูงสุดอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 35.15 องศา โดยพีกที่มีความเข้มชั้นรองลงมาอยู่ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 43.35 และ 57.49 องศาตามลำดับ มีวัฏภาคอยู่ในรูป แอลฟา-อะลูมินา (Card number 82-1468)



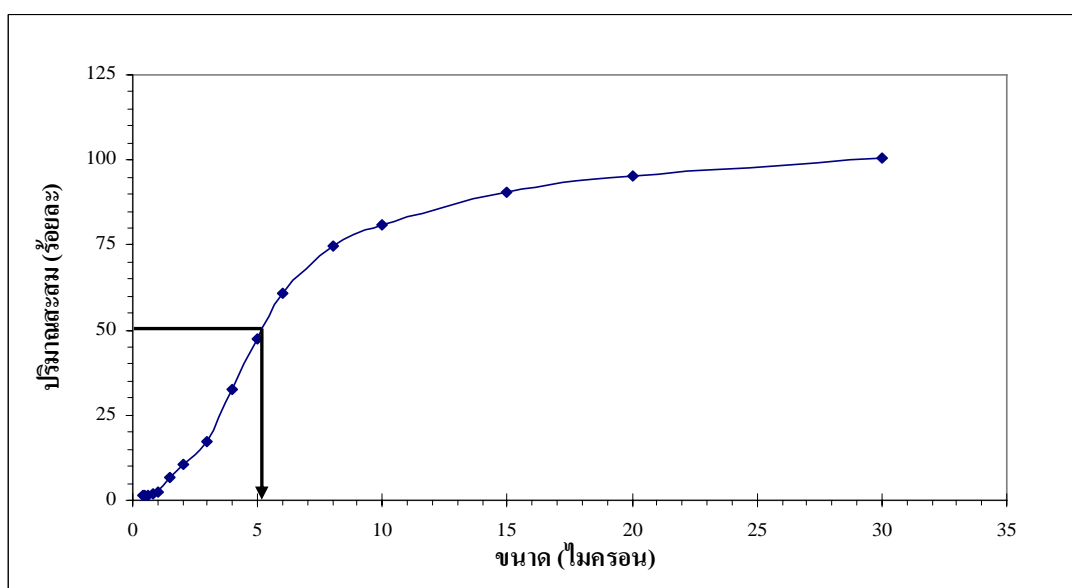
รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบพีก XRD ของผงอะลูมินาที่มีขนาดอนุภาคต่าง ๆ

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ขนาดของผงอะลูมินา

รูปที่ 4.2 ถึง 4.4 แสดงการวิเคราะห์ขนาดของผงอะลูมินา ขนาด 0.7 ไมครอน, 5 ไมครอนและ 58 ไมครอน ตามลำดับ

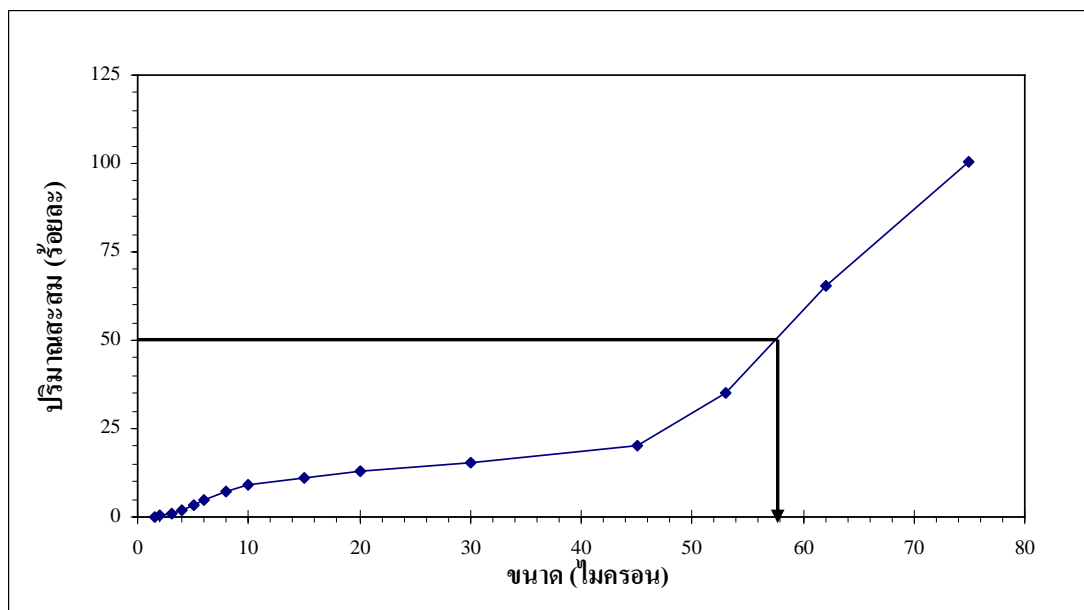


รูปที่ 4.2 แสดงปริมาณสะสม (ร้อยละ) ของผงอะลูมินาขนาดเฉลี่ย 0.7 ไมครอน



รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณสะสม (ร้อยละ) ของผงอะลูมินาขนาดเฉลี่ย 5 ไมครอน





รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณสะสม (ร้อยละ) ของผงอะลูมินาขนาดเฉลี่ย 58 ไมครอน

รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคอะลูมินา จากการศึกษาด้วยเครื่องมือวัดขนาดอนุภาค พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 0.73, 5.08 และ 58.06 ไมครอนตามลำดับ

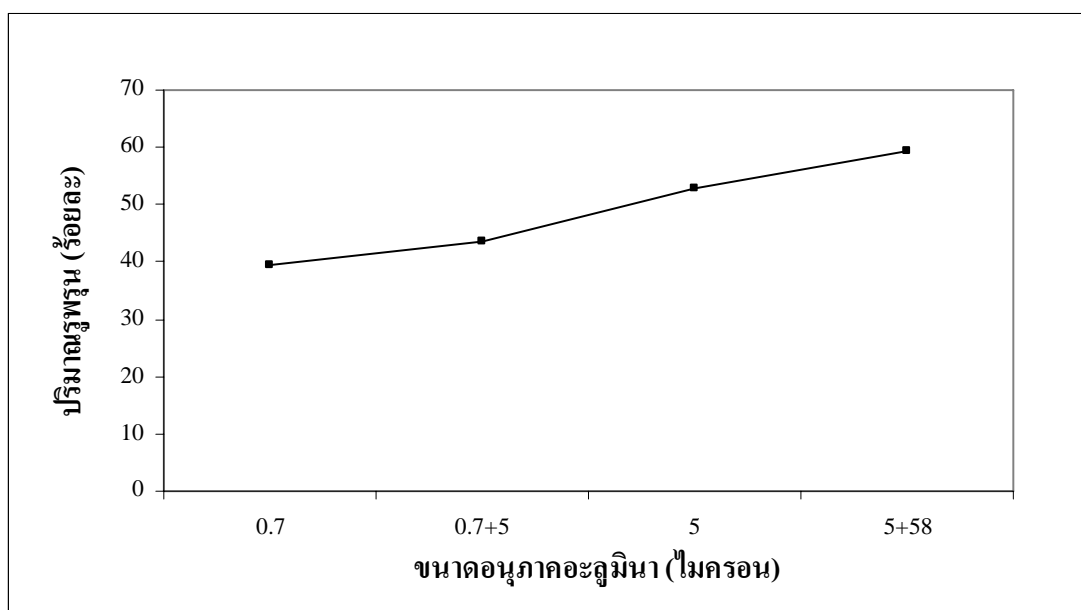
## 4.2 ผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาและสารเติมแต่งต่อลักษณะเฉพาะและความทนต่อการดัดโค้ง (Bending strength) จากวิธีทดลองตอนที่ 1

### 4.2.1 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุน

ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 0.7 ไมครอน, 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50, 5 ไมครอน และ 5 ไมครอนผสมกับอะลูมินา 58 ไมครอนชนิดละ 50 กรัม โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคอะลูมินา (ไมครอน)	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณรูพรุน (ร้อยละ)
1	0.7	100	2.59	39.31
2	0.7 ผสมกับ 5	50:50	2.50	43.70
3	5	100	1.96	52.99
4	5 ผสมกับ 58	50:50	1.38	59.51



รูปที่ 4.5 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อปริมาณรูพรุน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5 พิจารณาตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 3 พบว่า เมื่อขนาดอนุภาคอะลูมินามีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานจะลดลงในทางกลับกันค่าปริมาณรูพรุนที่ได้จะเพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่า ณ อุณหภูมิเดียวกัน อนุภาคขนาดเล็กเกิดการ

เผาผลาญที่ต่ำกว่าทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้มีค่าสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายของ Kingery, W.D. (1960) ซึ่งอธิบายไว้ว่า ณ อุณหภูมิการเผาผลาญเดียวกัน อัตราการเผาผลาญจะแปรผันตรงกับขนาดอนุภาคเริ่มต้น ส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กจะมีอัตราการเผาผลาญที่เร็วกว่า ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงกว่าส่งผลให้ปริมาณรูพรุนมีค่าน้อยกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

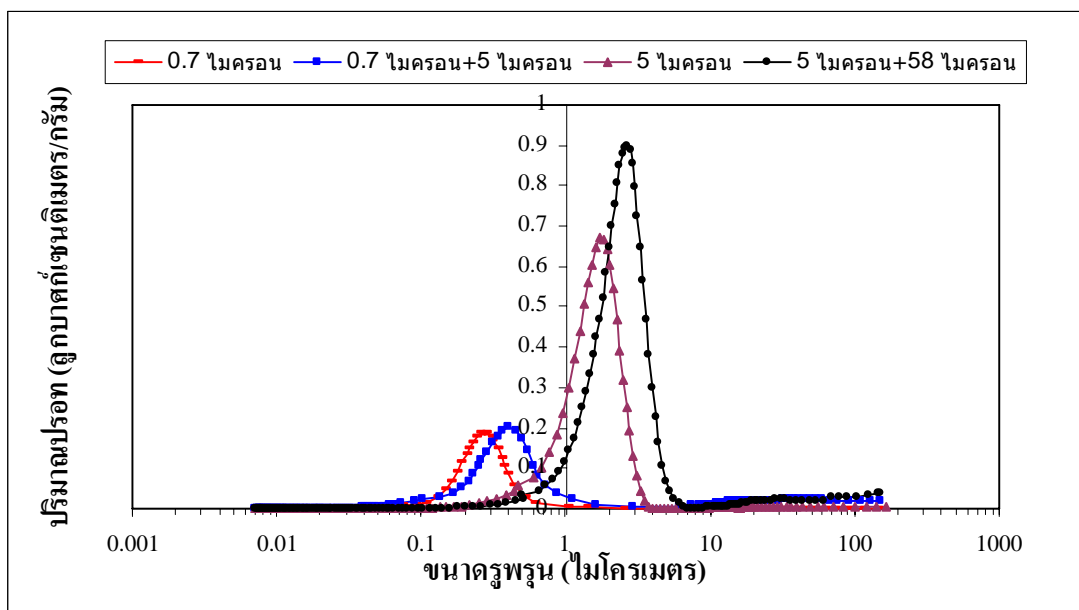
นอกจากนี้เมื่อพิจารณา ตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากการผสมอนุภาคขนาดเล็กลงไปในอนุภาคขนาดใหญ่จะให้ความหนาแน่นของชิ้นงานที่สูงกว่าซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายของ Rahaman, M.N. (1995) และ Reed, J.S. (1988) ซึ่งอธิบายว่า เมื่อทำการผสมอนุภาคสองขนาดเข้าด้วยกัน (Binary mixer) โดยผสมอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงไปในอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จะเพิ่มความหนาแน่นการบรรจุ (Packing density) ดังนั้น ความหนาแน่นของชิ้นงานจาก ตัวอย่างที่ 2 จึงมีความหนาแน่นมากกว่าตัวอย่างที่ 3

#### 4.2.2 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุน

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคอะลูมินาที่มีต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและลักษณะการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผลาญที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน, 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50, 5 ไมครอน และ 5 ไมครอนผสมกับอะลูมินา 58 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคอะลูมินา (ไมครอน)	ปริมาณ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	0.7	100	0.27 ± 0.0081
2	0.7 ผสมกับ 5	50:50	0.41 ± 0.0094
3	5	100	1.72 ± 0.0390
4	5 ผสมกับ 58	50:50	2.74 ± 0.041



รูปที่ 4.6 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500°C ต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุน

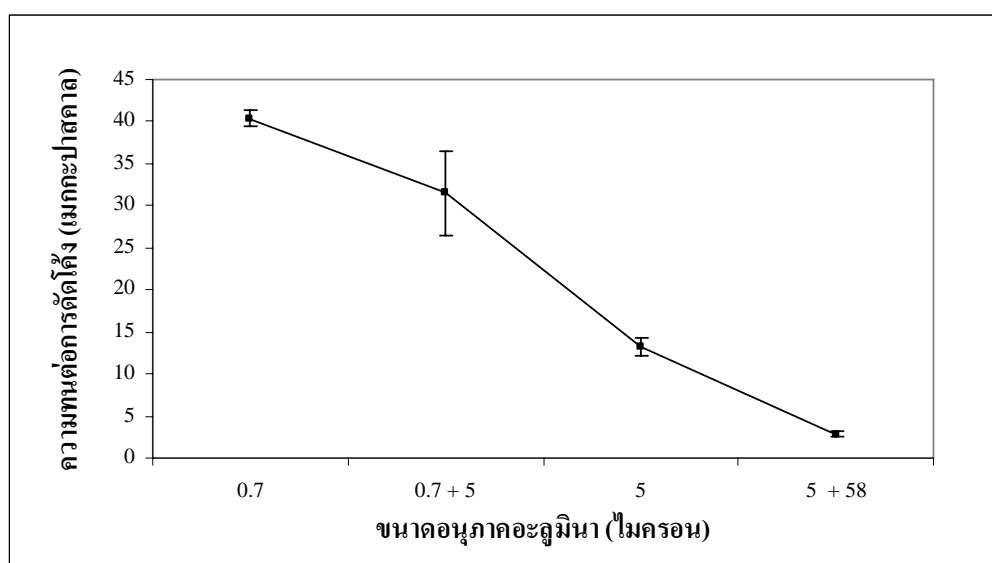
จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 พบว่า ขนาดอนุภาคอะลูมินามีผลต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนนั่นคือ การเพิ่มขนาดอนุภาคอะลูมินาจะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ในการทดลองนี้ อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนให้ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนที่เล็กที่สุดคือ 0.27 ไมครอน เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคอะลูมินาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนจากการทดลอง 4.2.1

#### 4.2.3 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อความทนต่อการดัดโค้ง

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อความทนทานต่อการดัดโค้ง

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน, 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ปริมาณชนิดละร้อยละ 50, 5 ไมครอน และ 5 ไมครอนผสมกับอะลูมินา 58 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ใน ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคอะลูมินา (ไมครอน)	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความทนต่อการตัดโค้ง (เมกะปาสคาล)
1	0.7	100	40.35 ± 0.97
2	0.7 ผสมกับ 5	50:50	31.50 ± 5.02
3	5	100	13.25 ± 1.10
4	5 ผสมกับ 58	50:50	2.86 ± 0.34



รูปที่ 4.7 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าความทนต่อการตัดโค้ง

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 พบว่า ขนาดอนุภาคอะลูมินามีผลต่อค่าความทนต่อการตัดโค้ง ดังพิจารณาผลการทดลองที่ 4.2.1 ณ อุณหภูมิเผาผนึกเดียวกัน ขนาดอนุภาคอะลูมินาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะลดความสามารถในการเผาผนึกของชิ้นงานลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงและปริมาณรูพรุนในชิ้นงานเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงส่งผลต่อค่าความทนทานต่อการตัดโค้ง นั่นคือ เมื่อขนาดอนุภาคอะลูมินามีขนาดใหญ่ขึ้นค่าความทนทานต่อการตัดโค้งจะมีค่าลดลง

#### 4.2.4 การศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อลักษณะความเหนียวของเนื้อส่วนผสม

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 แสดงการศึกษาลักษณะความเหนียวของเนื้อส่วนผสม

ตารางที่ 4.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และ โพลีเอทิลีน ไกลคอล ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา ปริมาณน้ำร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละ โดย น้ำหนัก)	ลักษณะของชิ้นงาน
1	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	3	สารเติมแต่งสามารถผนวกรวมเข้ากับผงอะลูมินาได้ดี โดยเนื้อส่วนผสมสามารถผนวกรวมเข้าด้วยกันเป็นก้อนไม่ติดภาชนะ (Cohesive) มีการยึดเกาะและความยืดหยุ่นตัวที่ดี นอกจากนี้พบว่าชิ้นงานที่ได้มีความเหนียว และสามารถผนวกรวมให้ชิ้นงานมีความยาวกว่า 30 เซนติเมตร โดยชิ้นงานไม่มีรอยแตกและขาดออกจากกัน
2	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	3	เนื้อส่วนผสมจะมีความเหนียวสูงผนวกรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยากและต้องใช้เวลาอันจึงจะสามารถผนวกรวมกับผงอะลูมินาได้ เนื่องจากเนื้อส่วนผสมจะมีลักษณะเหนียวติดภาชนะ (Adhesive) ไม่มีความยืดหยุ่นตัว เมื่อพยายามผนวกรวมให้เป็นเส้นยาวทำให้ชิ้นงานมีรอยแตกและได้ความยาวของชิ้นงานเพียง 10 เซนติเมตร
3	โพลีเอทิลีนไกลคอล	3	เมื่อทำการผสมสารเติมแต่งกับผงอะลูมินาจะสังเกตได้ว่าลักษณะของเนื้อส่วนผสมจะไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากส่วนผสมไม่มีความเหนียว มีลักษณะแตกย่อย ไม่สามารถปั้นให้เป็นเส้นยาวได้



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อส่วนผสมที่ใช้อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อส่วนผสมที่ใช้อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา



รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อส่วนผสมที่ใช้อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดโพลีเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 จะเห็นได้ว่าสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ให้ลักษณะทางกายภาพของเนื้อส่วนผสมที่มีความเหนียวและความยืดหยุ่นตัวสูง สามารถตัวผนวกรวมเข้ากับผงอะลูมินาได้ดี โดยที่เนื้อส่วนผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันไม่ติดภาชนะ ในขณะที่เนื้อส่วนผสมที่เตรียมจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์จะมีลักษณะเหนียวคล้ายกาวติดภาชนะและโพลีเอทิลีนไกลคอลไม่สามารถให้ความเหนียวที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีรีดได้

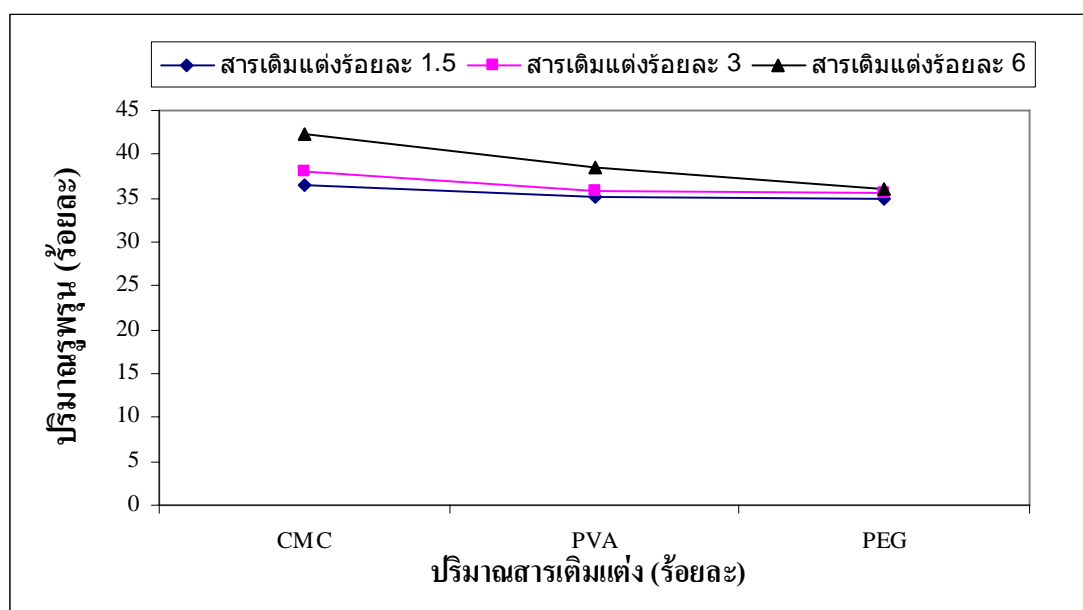
#### 4.2.5 การศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11 แสดงศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุน



ตารางที่ 4.6 แสดงความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอล ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 ร้อยละโดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณรูพรุน (ร้อยละ)
1	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	1.5	2.62	36.41
		3	2.59	39.31
		6	2.50	42.31
2	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	1.5	2.65	35.10
		3	2.64	35.80
		6	2.64	38.45
3	โพลีเอทิลีนไกลคอล	1.5	2.70	34.99
		3	2.70	35.60
		6	2.66	36.11



รูปที่ 4.11 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งต่อปริมาณรูพรุน

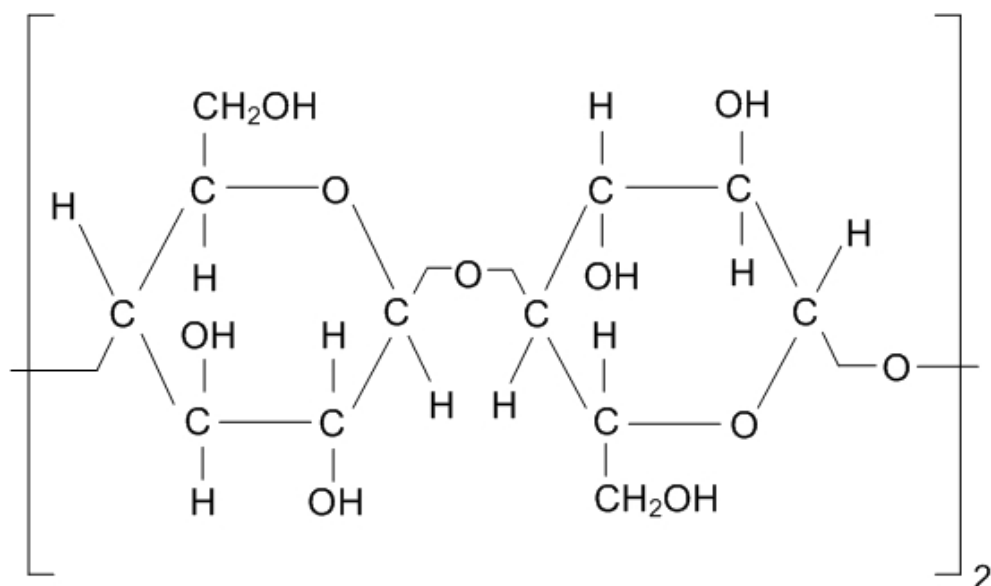
จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11 พบว่า สารเติมแต่งชนิดโพลีเอทิลีนไกลคอลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมากที่สุด รองลงมาเป็นโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามลำดับ ในทางกลับกันค่าปริมาณรูพรุนที่ได้จากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงสูงที่สุด นอกจากนี้ปริมาณสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงซึ่งการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sugiura, I. et al. (1993) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ชนิดของสารเติมแต่งมีผลต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน ซึ่งจากการทดลองพบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารเติมแต่งที่ให้ค่าปริมาณรูพรุนมากที่สุด

แม้สารเติมแต่งทั้งสามชนิดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างโมเลกุล (Molecular structure) ของพอลิเมอร์ทั้งสามชนิด จะพบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหหรือแบบเชื่อมโยง (Network or cross link) ในขณะที่โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอลมีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงที่มีสาขา (Branch polymer) โดยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด Fully hydrolyzed ซึ่งต้องละลายในน้ำร้อน เมื่อโมเลกุลโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ได้รับความร้อนจะเกิดการสั่น (Vibrate) โഴพอลิเมอร์จะสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและมากขึ้น ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลงความสามารถในการละลาย จะเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำจะแพร่เข้าหาโมเลกุลของพอลิเมอร์ เกิดสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ดังนั้น จากการที่โพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีโครงสร้างเป็นแบบพอลิเมอร์สาขาและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเมื่อเกิดสารละลายพอลิเมอร์ เนื้อส่วนผสมที่ใช้สารเติมแต่งชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์จึงมีความเหนียวสูงจนเกิดการติดภาชนะ

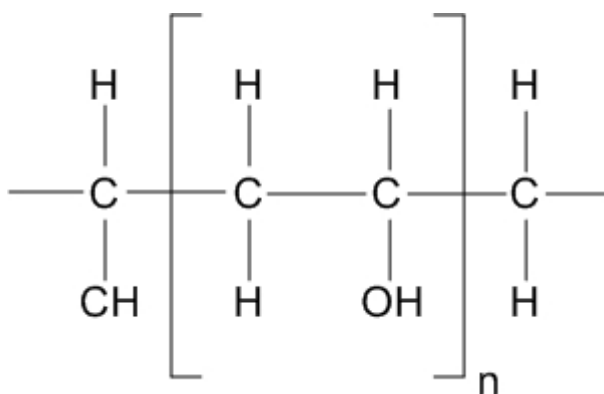
โพลีเอทิลีนไกลคอลมีโครงสร้างแบบพอลิเมอร์สาขาเช่นเดียวกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์แต่สามารถละลายได้ในอุณหภูมิปกติ โดยในงานวิจัยนี้ใช้โพลีเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ( $10,000 \text{ กรัม. โมล}^{-1}$ ) ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีความเหนียว

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแหหรือแบบเชื่อมโยง ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างโมเลกุล แล้วพบว่า ในหนึ่งหน่วยซ้ำ (Repeating unit) ของหนึ่งโมเลกุล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีความยาว มากกว่าโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอล ซึ่งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสนั้นเมื่อละลายในตัวทำละลายที่มีสภาพเป็นขั้วสูงหรือในน้ำ จะสามารถกักเก็บน้ำไว้ในโมเลกุลได้สูง (Water retention) เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{—OH}$ ) อยู่ถึงสามหมู่ซึ่งทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน ซึ่งในกระบวนการละลายของพอลิเมอร์นั้น โมเลกุลของตัวทำละลายซึ่งในที่นี้คือ น้ำจะแพร่เข้าหาโมเลกุลของพอลิเมอร์อย่างช้า ๆ โมเลกุลของพอลิเมอร์จะขยายตัวออกโดยบวมตัวขึ้น ถ้าแรงดึงดูดหรือการกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและ พอลิเมอร์มีมากพอ หรือ พอลิเมอร์นั้นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน การละลายจะค่อย ๆ ขยายตัวออกไปจนกระทั่งสามารถผสมกับโมเลกุลตัวทำละลายอย่างเต็มที่เกิด

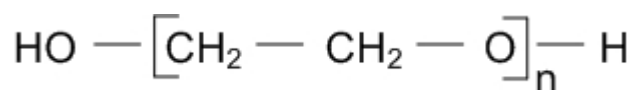
สารละลาย พอลิเมอร์อย่างแท้จริง แต่เนื่องจากโครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นแบบร่างแหหรือเชื่อมโยง พันธะไฮโดรเจนจะทำให้พอลิเมอร์นั้นไม่ละลายโดยสมบูรณ์ ปรากฏเพียงการบวมตัวเป็นวุ้นหรือขยายตัวออก (Swell) เท่านั้น (ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2527) ผลจากการบวมนี้ทำให้ภายในโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีการอุ้มน้ำไว้ภายในโครงสร้าง จากการทดลองที่ 4.2.4 จึงพบว่า เนื้อส่วนผสมที่ใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะมีความยืดหยุ่นตัวสูงและสามารถนวดเข้าด้วยกันเป็นก้อนไม่ติดภาชนะ (Cohesive) และคุณสมบัติการกักเก็บน้ำไว้ในโมเลกุลได้สูงนี้ส่งผลให้ชิ้นงานหลังการเผาผนึกมีปริมาณรูพรุนที่สูงกว่าพอลิเมอร์อีกสองชนิด



รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส (Reed, J.S., 1988)



รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Reed, J.S., 1988)



รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของโพลีเอทิลีนไกลคอล (Reed, J.S., 1988)

#### 4.2.6 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุน

ตารางที่ 4.7 ถึง 4.10 และรูปที่ 4.15 ถึง 4.18 แสดงการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา

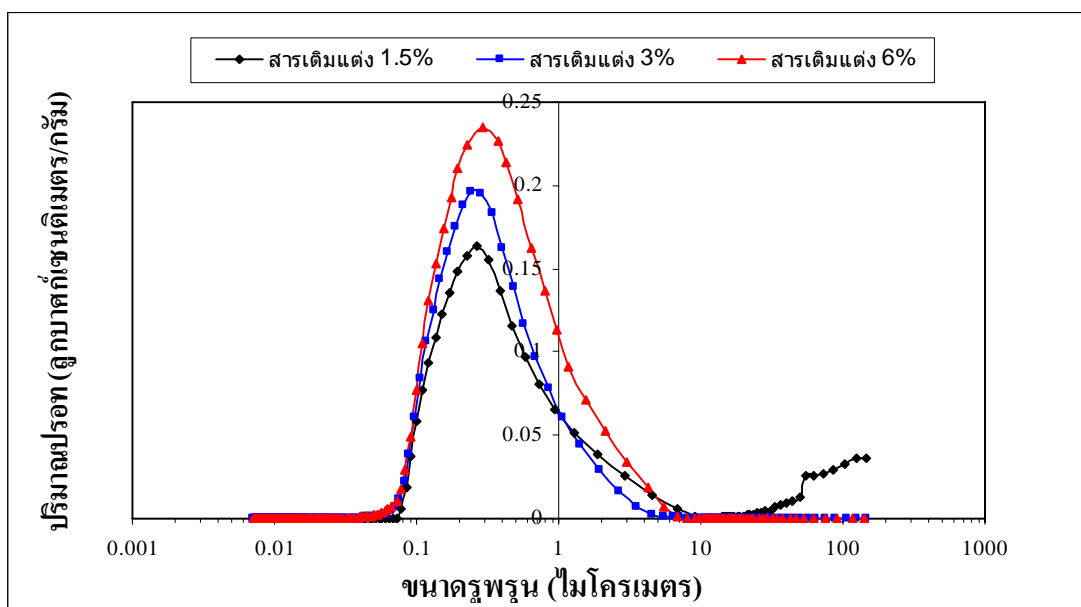
ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	1.5	0.26 ± 0.0041
2	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	3	0.26 ± 0.0025
3	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	6	0.27 ± 0.0024

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา

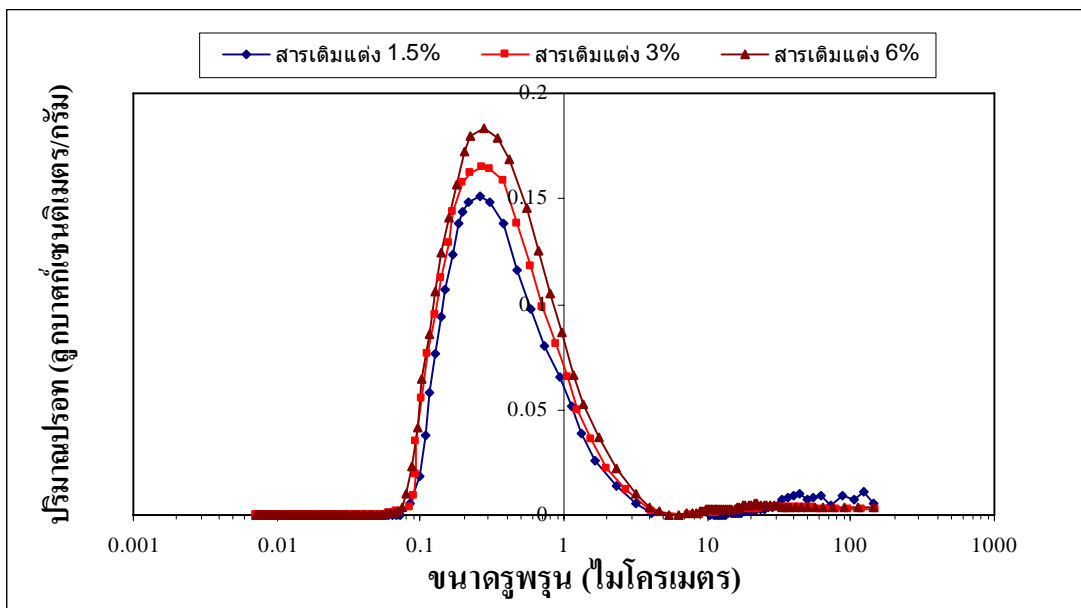
ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	1.5	0.26 ± 0.0020
2	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	3	0.26 ± 0.0015
3	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	6	0.26 ± 0.0030

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิด โพลีเอทิลีนไกลคอล ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา

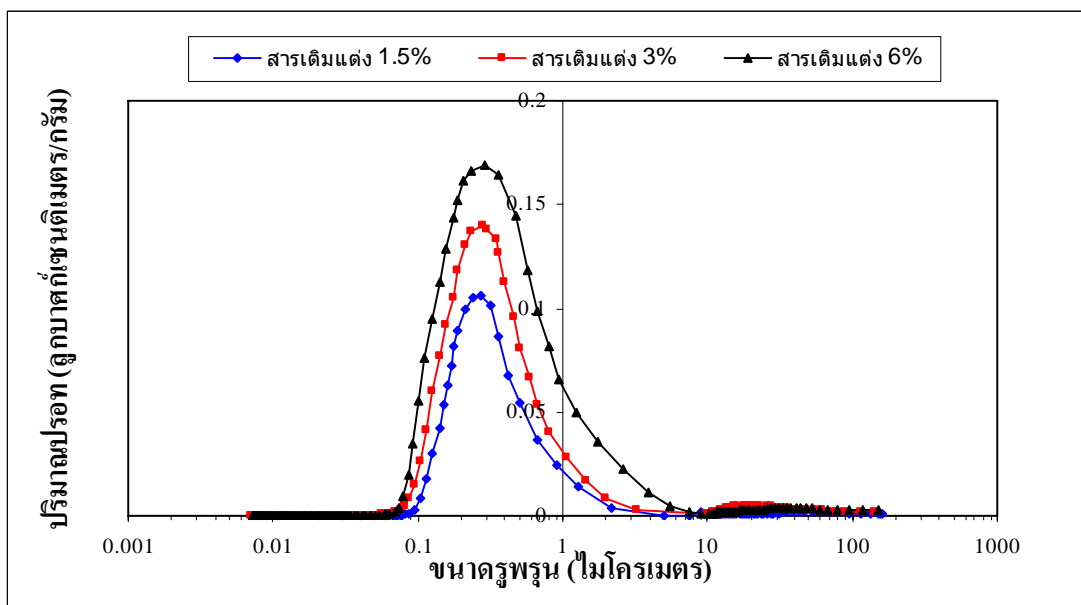
ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	โพลีเอทิลีนไกลคอล	1.5	$0.26 \pm 0.0040$
2	โพลีเอทิลีนไกลคอล	3	$0.26 \pm 0.0035$
3	โพลีเอทิลีนไกลคอล	6	$0.26 \pm 0.0020$



รูปที่ 4.15 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุน



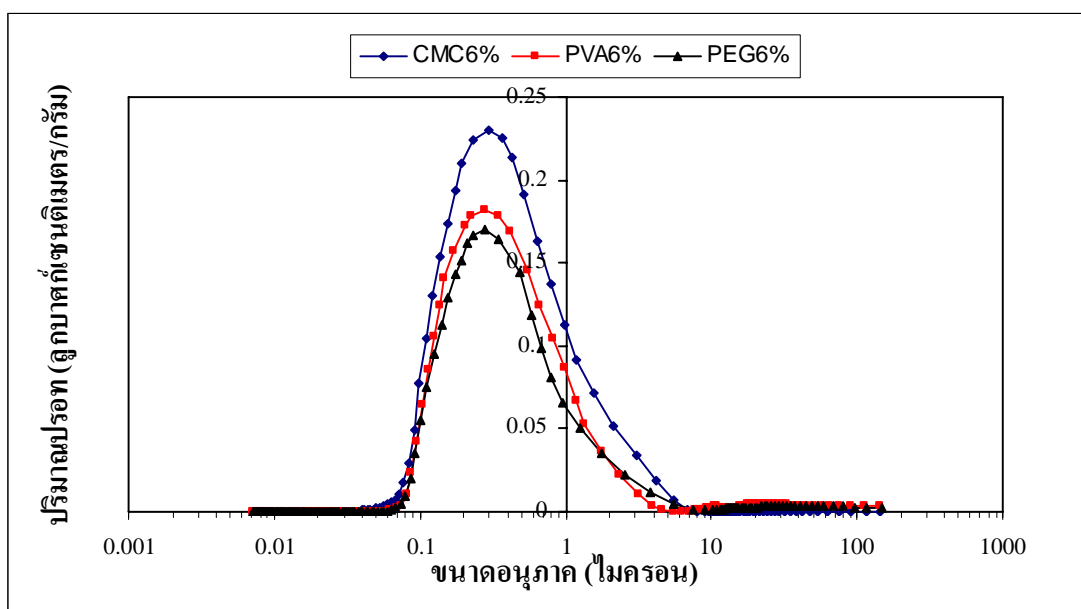
รูปที่ 4.16 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งชนิดฟทาลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาค



รูปที่ 4.17 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งชนิดฟทาลิเอทีลินไกลคอลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน โดยเลือกใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอลในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	6	$0.27 \pm 0.0045$
2	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	6	$0.26 \pm 0.0034$
3	โพลีเอทิลีนไกลคอล	6	$0.26 \pm 0.0025$



รูปที่ 4.18 แสดงผลของสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และโพลีเอทิลีนไกลคอลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุน

จากตารางที่ 4.7 ถึง 4.9 และรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 แสดงการเปรียบเทียบผลของปริมาณสารเติมแต่ง ต่อ ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน พบว่า การเพิ่มปริมาณของสารเติมแต่งมีผลต่อค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนน้อยมาก นั่นคือ ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนที่ได้จากการใช้สารเติมแต่งในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากสารเติมแต่งที่ใช้เป็นชนิดเดียวกัน มีน้ำหนักโมเลกุลที่เท่ากัน จึงส่งผลให้

ปริมาณรูปพรุนที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามปริมาณรูปพรุนที่ได้จะแตกต่างกัน รูปที่ 4.15 ถึง 4.17 พิจารณาปริมาณพรุนที่ถูกดันอัดเข้าไปในชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงานที่ใช้ปริมาณสารเติมแต่งที่มากกว่าจะมีปริมาณพรุนเข้าไปในชิ้นงานสูงกว่า นั้นแสดงถึง ปริมาณรูปพรุนที่มีมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองที่ 4.2.5

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งทั้งสามชนิด ให้ค่าเฉลี่ยขนาด รูปพรุนที่ไม่ต่างกันนักแต่สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้ค่าเฉลี่ยขนาดรูปพรุนใหญ่ที่สุด คือ 0.27 ไมครอน ในขณะที่โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอลให้ค่าเฉลี่ยขนาดรูปพรุนเล็กลงมา แม้สารเติมแต่งทั้งสามชนิดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ แต่การละลายของพอลิเมอร์มีปัจจัยคือ น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของพอลิเมอร์ โพลีไวนิลเอทิลีนไกลคอลมีโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรงที่มีสาขาเช่นเดียวกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ส่งผลให้มีความสามารถในการละลายดีกว่าโครงสร้างแบบร่างแหหรือแบบเชื่อมโยง โดยในการทดลองใช้โพลีเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10000 กรัมต่อโมล ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์อีกสองชนิดในการทดลอง ทำให้โพลีเอทิลีนไกลคอลเกิดการละลายได้ดีกว่าโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด Fully hydrolyzed ซึ่งต้องละลายในน้ำร้อน เมื่อโมเลกุลโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ได้รับความร้อน จะเกิดการสั่น (Vibrate) โข่พอลิเมอร์จะสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและมากขึ้นทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง ความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งสามารถผสมกับโมเลกุลน้ำได้อย่างเต็มที่ เกิดสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์อย่างแท้จริง แต่เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห มีสายโซ่โครงสร้างมีความยาวกว่าโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอลและมีกลุ่มหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ถึงสามหมู่ เมื่อทำละลายด้วยน้ำจึงเกิดการบวม ในขณะที่โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอล มีลักษณะโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ที่มีสาขาและมีกลุ่มไฮดรอกซิลน้อยกว่า ดังนั้น เมื่อเกิดการละลายจะทำให้ น้ำเข้าไปแทรกจับกับโมเลกุล เมื่อทำละลายด้วยน้ำเมื่อทำการเผาไล่สารเติมแต่งจึงพบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จะให้ค่าเฉลี่ยของขนาดรูปพรุนที่ใหญ่กว่า



ตารางที่ 4.11 แสดงขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและความทนต่อการตัดโค้ง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย อะลูมินาขนาดต่าง ๆ โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

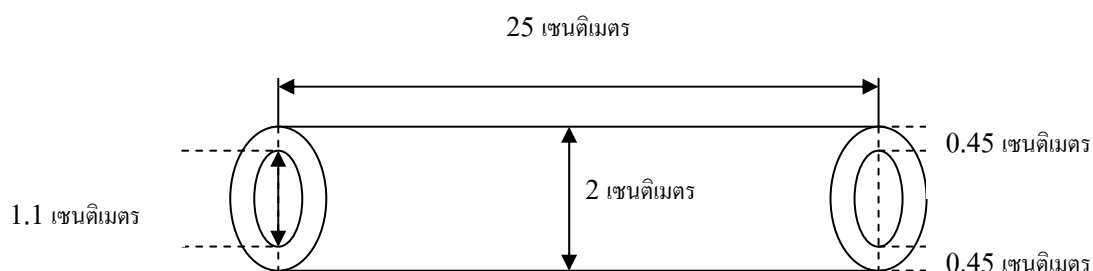
ขนาดอนุภาค อะลูมินา (ไมครอน)	สมบัติที่ต้องการ			
	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (0.1-10 ไมครอน)	ปริมาตรรูพรุน (ร้อยละ 35-50)	ความทนต่อการตัด โค้ง (> 10 เมกกะปาสกาล)	ผล
0.7	$0.27 \pm 0.0081$	39.31	$40.35 \pm 0.97$	ผ่าน
0.7 ผสมกับ 5	$0.41 \pm 0.0094$	43.70	$31.50 \pm 5.02$	ผ่าน
5	$1.72 \pm 0.0390$	52.99	$13.25 \pm 1.10$	ผ่าน
5 ผสมกับ 58	$2.74 \pm 0.0410$	59.51	$2.86 \pm 0.34$	ไม่ผ่าน

จากตารางที่ 4.11 พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากขนาดอนุภาคอะลูมินา 0.7 ไมครอน และขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ผ่านสมบัติที่ต้องการทั้ง สามประการ นั่นคือ มีค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน อยู่ในช่วง 0.1-10 ไมครอน มีปริมาตรรูพรุนร้อยละ 35-50 และมีความทนต่อการตัดโค้ง มากกว่า 10 เมกกะปาสกาล ในขณะที่อะลูมินา ขนาด 5 ไมครอน มีค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและความทนต่อการตัดโค้งอยู่ในช่วงที่ต้องการ แต่มีปริมาตรรูพรุนมากกว่า ร้อยละ 50 แม้จะไม่ได้อยู่ในช่วงที่ต้องการแต่ถือว่า อยู่สูงกว่าช่วงที่ต้องการจึงถือว่าผ่าน และเมื่อ พิจารณาชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอนผสมกับ 58 ไมครอน พบว่า ค่าความ ทนต่อการตัดโค้ง น้อยกว่า 10 เมกกะปาสกาล จึงถือว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคอะลูมินา ในช่วงนี้ คุณสมบัติที่ต้องการไม่ผ่านครบทุกข้อ

### 4.3 การผลิตวัสดุพรุนตัวด้วยการขึ้นรูปแบบรีด (Extrusion)

#### 4.3.1 การเตรียมเนื้อส่วนผสม

วัสดุพรุนตัวขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ (Extrusion machine) มีลักษณะเป็นท่อกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 เซนติเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.1 เซนติเมตรและ มีความหนา 0.45 เซนติเมตร



รูปที่ 4.19 แสดงแบบจำลองขนาดวัสดุพูนที่ผลิตได้

โดยในการทดลองตอนที่ 2 นี้ จะทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ ซึ่งมีขนาดใหญ่ ใช้เนื้อวัตถุดิบในการรีดแบบแต่ละครั้งไม่ต่ำกว่า 2 กิโลกรัม ดังนั้น จากการทดลองตอนที่ 1 จึงต้องเลือกขนาดอนุภาคอะลูมินาและสารเติมแต่งที่ได้ทำการทดลอง มาทำการผลิตวัสดุพูนตัว ขนาดอนุภาคอะลูมินาที่ทำการทดลองในตอนที 1 ทั้งหมดมี 4 ขนาดด้วยกันคือ ขนาด 0.7 ไมครอน, 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ชนิดละ 50 กรัม, 5 ไมครอน และ 5 ไมครอนผสมกับอะลูมินา 58 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สารเติมแต่งที่ทำการทดลองคือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอล เมื่อได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเนื้อขึ้นงานพบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สามารถผนวเข้ากับผงอะลูมินาได้ดี เนื้อส่วนผสมสามารถผนวเข้าด้วยกันเป็นก้อนไม่ติดภาชนะ มีการยึดเกาะและความยืดหยุ่นตัวที่ดี อีกทั้งให้ปริมาณความพูนตัวสูงและมีราคาถูกกว่าสารเติมแต่งอีกสองชนิด จึงเลือกสารเติมแต่งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในส่วนของอนุภาคอะลูมินานั้น เมื่อทำการทดลองที่ชนิดและปริมาณสารเติมแต่งรวมทั้งอุณหภูมิการเผาเดียวกัน จึงเลือกอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และขนาด 5 ไมครอน เนื่องจาก อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน แม้ให้ค่าความทนต่อการดัดโค้งสูงที่สุดแต่ให้ค่าความพูนตัวที่น้อยที่สุดอีกทั้งมีราคาที่สูงมาก ในขณะที่อนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอนผสมกับ 58 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ให้ค่าปริมาณความพูนตัวสูงแต่เมื่อพิจารณาค่าความทนต่อการดัดโค้งแล้วยังอยู่ในระดับต่ำ ดังนั้นเริ่มต้นจึงเลือก อะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก, อะลูมินาขนาด 5 ไมครอน, คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, ซิงค์สเตียเรตและน้ำกลั่น

ตารางที่ 4.12 แสดงส่วนผสมในการเตรียมชิ้นงานเพื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ ด้วยอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก


ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาค อะลูมินา (ไมครอน)	ชนิดของ สารเติมแต่ง	สารหล่อลื่น (ร้อยละ0.5 โดย น้ำหนักอะลูมินา)	ปริมาณ (อะลูมินาต่อ สารเติมแต่ง)	ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
1	0.7 ผสมกับ 5	คาร์บอนซี เมทิล เซลลูโลส	ซิงค์สเตียเรต	100:1.5	20-24
				100:3	
				100:6	
2	0.7 ผสมกับ 5	คาร์บอนซี เมทิล เซลลูโลส	ซิงค์สเตียเรต	100:1.5	25-28
				100:3	
				100:6	
3	0.7 ผสมกับ 5	คาร์บอนซี เมทิล เซลลูโลส	ซิงค์สเตียเรต	100:1.5	29-40
				100:3	
				100:6	

ตารางที่ 4.13 แสดงส่วนผสมในการเตรียมชิ้นงานเพื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบด้วยอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน


ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาค อะลูมินา (ไมครอน)	ชนิดของ สารเติมแต่ง	สารหล่อลื่น (ร้อยละ0.5 โดย น้ำหนักอะลูมินา)	ปริมาณ (อะลูมินาต่อ สารเติมแต่ง)	ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
1	5	คาร์บอนซี เมทิล เซลลูโลส	ซิงค์สเตียเรต	100:1.5	20-24
				100:3	
				100:6	
2	5	คาร์บอนซี เมทิล เซลลูโลส	ซิงค์สเตียเรต	100:1.5	25-28
				100:3	
				100:6	
3	5	คาร์บอนซี เมทิล เซลลูโลส	ซิงค์สเตียเรต	100:1.5	29-40
				100:3	
				100:6	

#### 4.3.2 การศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุพูนตัว


ตารางที่ 4.14 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบของเนื้อส่วนผสม ที่ใช้อะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก, อะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยผสมกับสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ใช้ซิงค์สเตียเรต ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ภาพการขึ้นรูป
1	20-24	<p>ปริมาณน้ำที่ใช้มากเกินไป ทำให้เนื้อส่วนผสมแห้งแข็งติดในเครื่อง ขณะกำลังขึ้นรูปเครื่องจะมีเสียงดังจากการหมุนของสกรูเนื่องจากความฝืดทำให้ต้องหยุดการทำงานดังภาพ</p> 

ตารางที่ 4.14 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบของเนื้อส่วนผสม ที่ใช้ อะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดย น้ำหนัก, อะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยผสมกับสารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมนต์ เซลลูโลสปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ใช้ซิงค์สเตียเรต ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักอะลูมินา (ต่อ)

ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ภาพการขึ้นรูป
2	25-28	<p>ปริมาณน้ำเหมาะสมสามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้ เมื่อทำการ นวดส่วนผสมด้วยเครื่องแล้วพบว่า เนื้อส่วนผสมสามารถ นวดเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน อีกทั้งสามารถรีดผ่านหัวแบบ ออกมาให้วัสดุพูนตัวที่มีลักษณะเป็นท่อกว้าง ตรง คง รูปได้ ดังภาพ</p> 

ตารางที่ 4.14 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบของเนื้อส่วนผสม ที่ใช้อะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยผสมกับสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ใช้ซิงค์สเตียเรตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักอะลูมินา (ต่อ)

ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ภาพการขึ้นรูป
3	29-40	<p>ปริมาณน้ำมากเกินไปทำให้เนื้อส่วนผสมเหลวและติดสกรู ไม่สามารถหมุนออกเครื่องรีดแบบ ดังภาพ</p> 

จากการทดลองขึ้นรูปวัสดุพูนตัวด้วยเครื่องรีดแบบ พบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุพูนตัวรูปแบบที่ออกแบบที่กล่าวถึงที่สามารถคงรูปได้ดีที่สุดของส่วนผสมที่เตรียมจากอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในปริมาณ

สารเติมแต่งร้อยละ 1.5, 3 และ 6 ของน้ำหนักอะลูมินา อยู่ในช่วงร้อยละ 25-28 โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับส่วนผสมที่เตรียมจากอะลูมินาขนาด 5 ไมครอนในปริมาณสารเติมแต่ง ร้อยละ 1.5, 3 และ 6 ของน้ำหนักอะลูมินา เมื่อปริมาณน้ำน้อยหรือมากกว่าในช่วงดังกล่าวจะไม่สามารถขึ้นรูป วัสดุพูนตัวรูปแบบที่อกลวงได้ ดังนั้น จึงพบว่า ปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการขึ้นรูปให้ ได้วัสดุพูนตัวรูปแบบที่อกลวง ตรง คงรูปได้ดี

#### 4.3.3 การศึกษาผลของจำนวนรอบต่อหน้าที่ของสกรูเครื่องรีดแบบต่อความหนาแน่นของ ชิ้นงาน

##### 1. การวัดของจำนวนรอบต่อหน้าที่ของสกรูเครื่องรีดแบบ

สกรูของเครื่องขึ้นรูปแบบรีดที่ผลิตจากบริษัทเพชรเกษมจักรกลมีการปรับระดับ ความเร็วของสกรูทั้งหมด 10 ระดับ

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าจำนวนรอบต่อหน้าที่ ณ การปรับระดับทั้งหมด 10 ระดับ

ระดับความเร็วของสกรู	จำนวนรอบต่อหน้าที่
1	2
2	6
3	11
4	15
5	19
6	24
7	29
8	34
9	38
10	42

##### 2. การวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน ณ ความเร็วการหมุนของสกรู 10 ระดับ

ตารางที่ 4.16 ถึง 4.21 แสดงการศึกษาอิทธิพลของระดับความเร็วรอบของสกรู ต่อความหนาแน่นของชิ้นงานขณะขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ ทำการทดลองที่ 10 วินาที เก็บตัวอย่าง ระดับความเร็วการหมุนของสกรูละ 10 ชั้น

ตารางที่ 4.16 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7

ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยใช้สารเติม  
แต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ  
ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที

ระดับความเร็ว ของสกรู	จำนวนรอบ ต่อนาที	ความยาว (เซนติเมตร)	น้ำหนักของ ชิ้นงาน (กรัม)	ความหนาแน่น $D=M/V$ (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	2	2.5	5.6	$1.02 \pm 0.003$
2	6	7.45	17.65	$1.08 \pm 0.005$
3	11	15.35	37.95	$1.13 \pm 0.002$
4	15	27.5	68.5	$1.14 \pm 0.001$
5	19	35.5	90.8	$1.17 \pm 0.003$
6	24	48.58	126	$1.18 \pm 0.009$
7	29	58.5	158.5	$1.24 \pm 0.003$
8	34	69.45	186.5	$1.26 \pm 0.002$
9	38	89.45	244.5	$1.25 \pm 0.003$
10	42	106.5	291.5	$1.25 \pm 0.002$

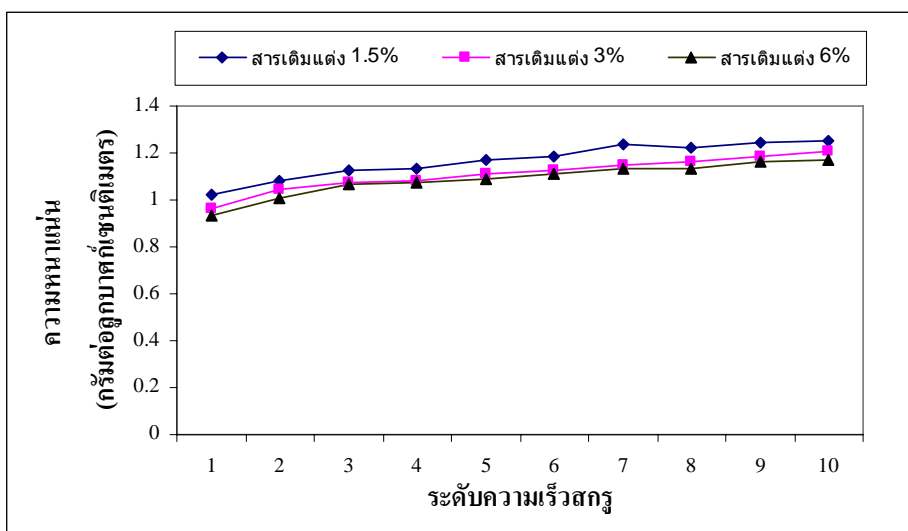


ตารางที่ 4.17 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที

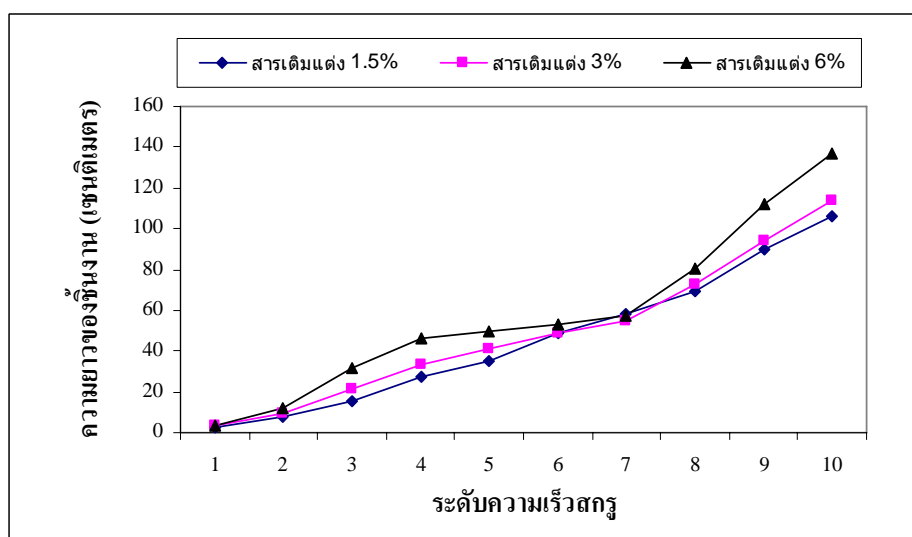
ระดับความเร็วของสกรู	จำนวนรอบต่อนาที	ความยาว (เซนติเมตร)	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)	ความหนาแน่น $D=M/V$ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	2	3.15	6.67	$0.97 \pm 0.002$
2	6	9.5	21.8	$1.05 \pm 0.035$
3	11	21.5	50.5	$1.07 \pm 0.003$
4	15	33.5	79.5	$1.08 \pm 0.008$
5	19	41.05	100.05	$1.11 \pm 0.007$
6	24	48.5	119.5	$1.12 \pm 0.006$
7	29	54.5	137.5	$1.15 \pm 0.004$
8	34	72.5	185	$1.16 \pm 0.007$
9	38	94.5	245.5	$1.19 \pm 0.004$
10	42	113.54	300.5	$1.21 \pm 0.007$

ตารางที่ 4.18 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมนต์เซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที

ระดับความเร็วของสกรู	จำนวนรอบต่อนาที	ความยาว (เซนติเมตร)	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)	ความหนาแน่น $D=M/V$ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	2	3.8	7.785	$0.94 \pm 0.004$
2	6	12	26.5	$1.01 \pm 0.002$
3	11	31.45	73.5	$1.07 \pm 0.006$
4	15	46.5	108.5	$1.074 \pm 0.006$
5	19	49.5	118.5	$1.09 \pm 0.003$
6	24	53.45	130.45	$1.11 \pm 0.006$
7	29	57.45	142.5	$1.13 \pm 0.004$
8	34	80.45	200.15	$1.135 \pm 0.003$
9	38	112.5	287.58	$1.166 \pm 0.006$
10	42	136.5	350.45	$1.171 \pm 0.002$



รูปที่ 4.20 แสดงผลของความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอซิมิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 แสดงผลของความยาวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอซิมิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.16 ถึง 4.18 และรูปที่ 4.20 ถึง 4.21 พบว่า ความหนาแน่นและความยาวของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ค่าความหนาแน่นและความยาวของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเร็วของสกรูเพิ่มขึ้นและจะนอกจากนั้นค่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่อปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.19 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที

ระดับความเร็วของสกรู	จำนวนรอบต่อนาที	ความยาว (เซนติเมตร)	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)	ความหนาแน่น $D=M/V$ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	2	2.53	5.45	$0.983 \pm 0.005$
2	6	7.50	17.45	$1.061 \pm 0.006$
3	11	15.50	37.5	$1.104 \pm 0.006$
4	15	28.88	70.5	$1.114 \pm 0.003$
5	19	36.67	90.5	$1.126 \pm 0.003$
6	24	50.50	127	$1.147 \pm 0.006$
7	29	57.70	146.5	$1.158 \pm 0.003$
8	34	71.77	183.5	$1.166 \pm 0.004$
9	38	91.55	235.5	$1.173 \pm 0.004$
10	42	109.50	285.5	$1.189 \pm 0.007$

ตารางที่ 4.20 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 5

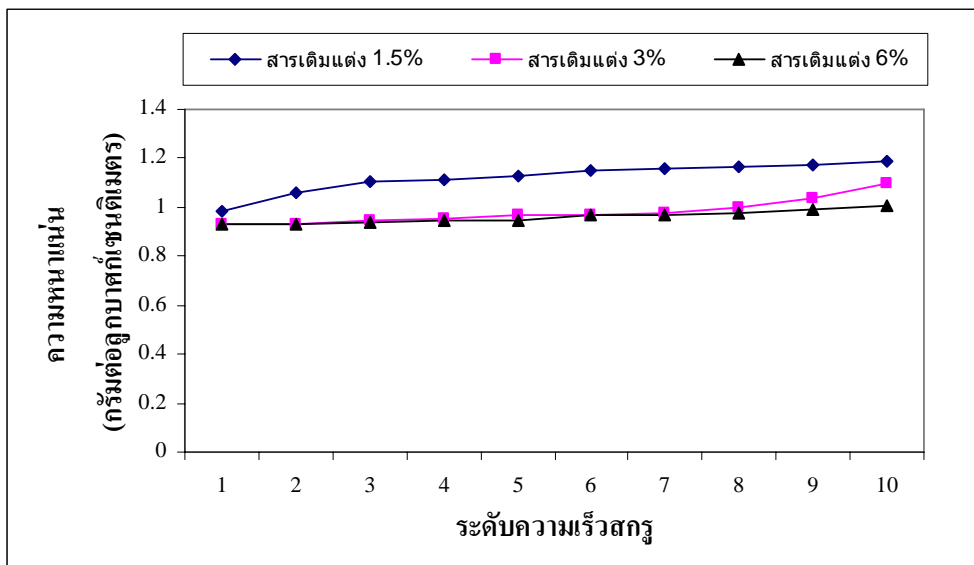
ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อะลูมินา ๓ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที

ระดับความเร็ว ของสกรู	จำนวนรอบ ต่อนาที	ความยาว (เซนติเมตร)	น้ำหนักของ ชิ้นงาน (กรัม)	ความหนาแน่น $D=M/V$ (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	2	3.27	6.67	$0.931 \pm 0.006$
2	6	9.83	20.1	$0.933 \pm 0.003$
3	11	22.68	47	$0.945 \pm 0.008$
4	15	36.12	75.4	$0.952 \pm 0.007$
5	19	45.50	96.5	$0.968 \pm 0.006$
6	24	54.67	116.5	$0.972 \pm 0.004$
7	29	60.50	130	$0.980 \pm 0.004$
8	34	79.88	175	$0.999 \pm 0.007$
9	38	101.10	230.5	$1.040 \pm 0.004$
10	42	120.50	290.5	$1.100 \pm 0.007$

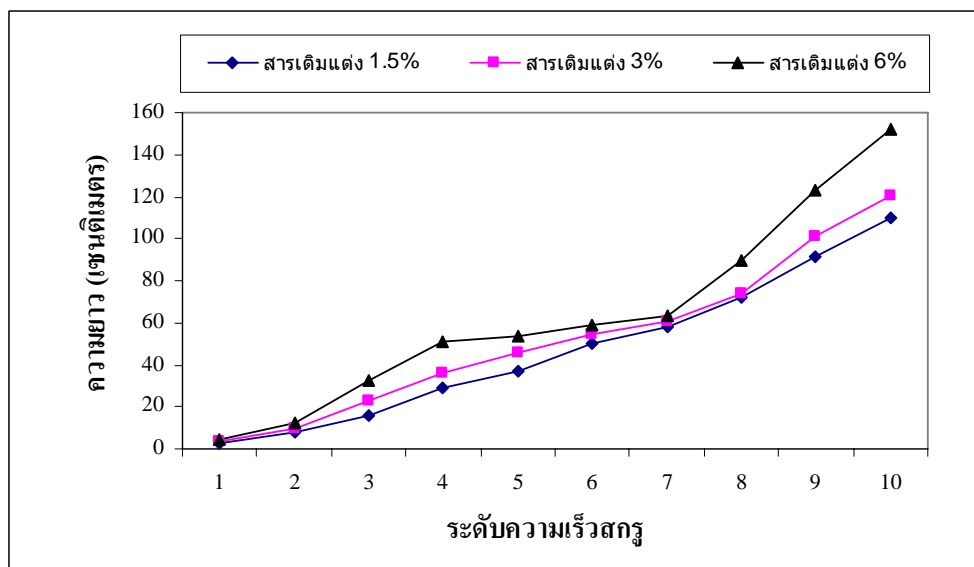
ตารางที่ 4.21 แสดงความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 5

ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก อะลูมินา ๓ ความเร็วรอบที่ 10 ระดับ ทำการทดลองที่ 10 วินาที

ระดับ ความเร็ว ของสกรู	จำนวนรอบ ต่อนาที	ความยาว (เซนติเมตร)	น้ำหนักของ ชิ้นงาน (กรัม)	ความหนาแน่น $D=M/V$ (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	2	4.17	8.5	$0.930 \pm 0.004$
2	6	12.72	26	$0.932 \pm 0.002$
3	11	32.22	66.3	$0.939 \pm 0.006$
4	15	50.56	104.5	$0.943 \pm 0.006$
5	19	53.81	111.5	$0.945 \pm 0.003$
6	24	59.10	125.5	$0.969 \pm 0.006$
7	29	63.58	135.5	$0.972 \pm 0.004$
8	34	90.05	192.5	$0.975 \pm 0.003$
9	38	123.29	268.5	$0.994 \pm 0.006$
10	42	151.70	334.5	$1.006 \pm 0.002$



รูปที่ 4.22 แสดงผลของความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 แสดงผลของความยาวของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาค อะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.19 ถึง 4.21 และรูปที่ 4.22 ถึง 4.23 พบว่า ความหนาแน่นและความยาวของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ณ ความเร็วรอบทั้ง 10 ระดับ ค่าความหนาแน่นและความยาวของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเร็วของสกรูเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่อปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มมากขึ้น

#### 4.4 ผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

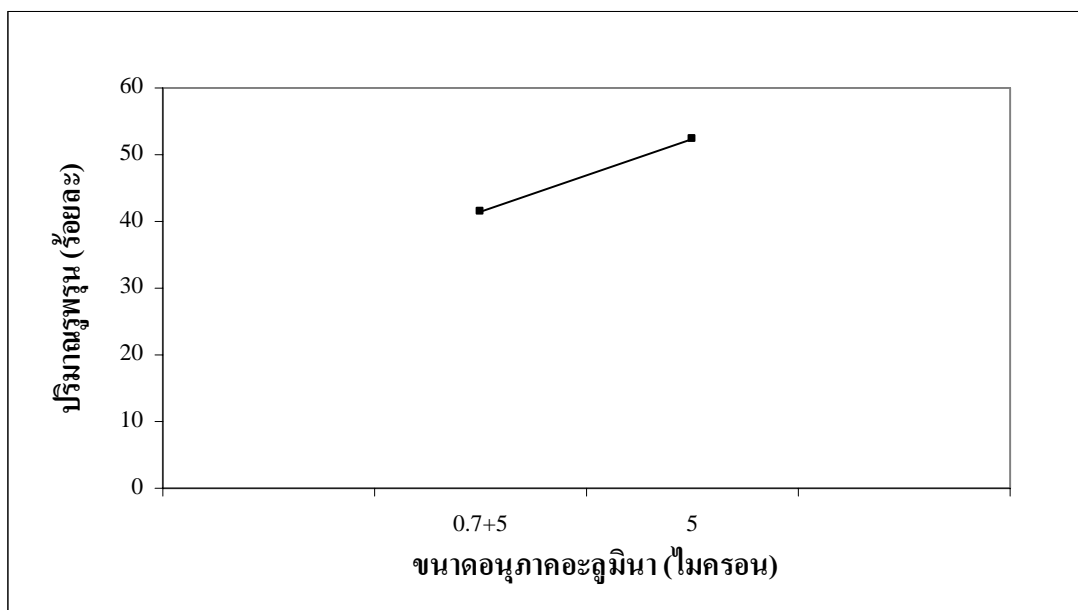
##### 4.4.1 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพูนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีด

ตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.24 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพูนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

ตารางที่ 4.22 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพูนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและ 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคอะลูมินา (ไมครอน)	ปริมาณ (ร้อยละ โดย น้ำหนัก)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ปริมาณ รูพูน (ร้อยละ)
1	0.7 ผสมกับ 5	50:50	2.53	41.46
2	5	100	2.10	52.50





รูปที่ 4.24 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อปริมาณปุ๋ย

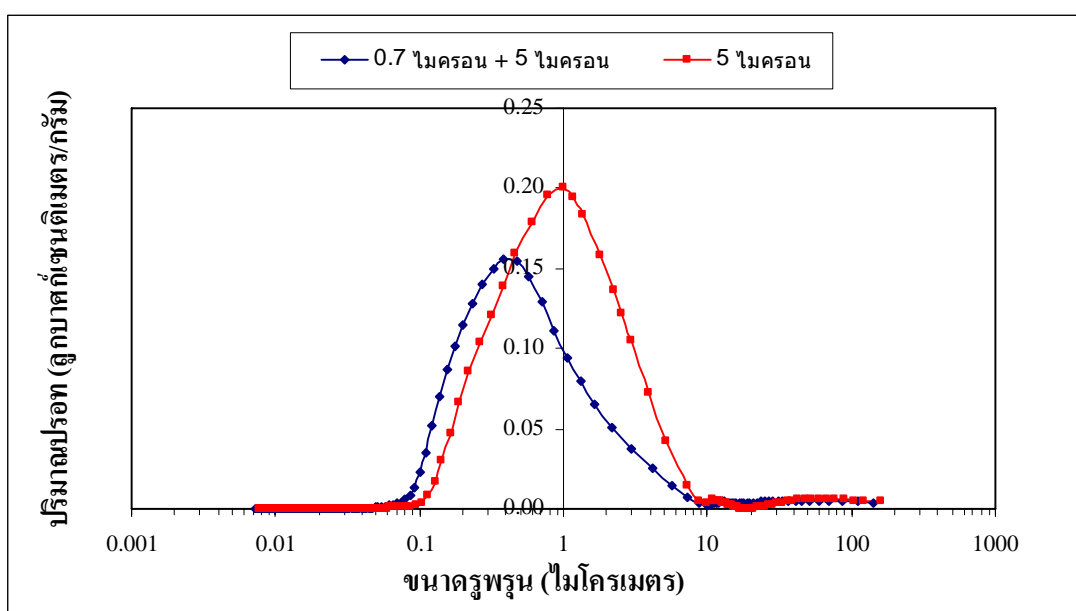
จากตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.24 พบว่า เมื่อขนาดอนุภาคอะลูมินามีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานจะลดลงในทางกลับกันค่าปริมาณปุ๋ยที่ได้จะเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2.1 เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่งานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดในการทดลองตอนที่ 2 เปรียบเทียบกับการทดลองตอนที่ 1 พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดจะมีความหนาแน่นมากกว่าชิ้นงานที่ทำการทดลองในตอนที่ 1 เนื่องจาก การขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบนี้ชิ้นงานจะถูกอัดแน่น ณ หัวแบบ ก่อนจะรีดออกมา ชิ้นงานที่ได้จึงมีความหนาแน่นสูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบลูกสูบในการทดลองตอนที่ 1 นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด การเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคอะลูมินาจากขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอนชนิดละ 50 กรัม เป็นขนาด 5 ไมครอน ต่างก็ทำให้ชิ้นงานมีปริมาณปุ๋ยอยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน

#### 4.4.2 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีด

ตารางที่ 4.23 และ รูปที่ 4.25 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคอะลูมินาที่มีต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

ตารางที่ 4.23 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคอะลูมินา (ไมครอน)	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	0.7 ผสมกับ 5	50:50	$0.39 \pm 0.0017$
2	5	100	$1.02 \pm 0.0213$



รูปที่ 4.25 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุน

จากตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.25 พบว่า ขนาดอนุภาคอะลูมินามีผลต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน กล่าวคือ การใช้อนุภาคอะลูมินาขนาดเดียวและมีขนาดใหญ่กว่าหรือการเพิ่มขนาดอนุภาคอะลูมินา จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นและลักษณะการกระจายของกราฟจะมีการกระจายในช่วงของขนาดรูพรุนใหญ่ที่มากกว่า จากการจัดเรียงตัวของชิ้นงานที่เกิดจากการผสมอนุภาคนาขนาดเข้าด้วยกัน อนุภาคที่เล็กกว่าจะเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างทำให้ได้ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนเล็กกว่าและลักษณะการกระจายของกราฟจะมีการกระจายในช่วงของขนาดรูพรุนเล็กที่มากกว่า สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2.2 นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด การเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคอะลูมินาจากขนาด 0.7 ผสมกับ

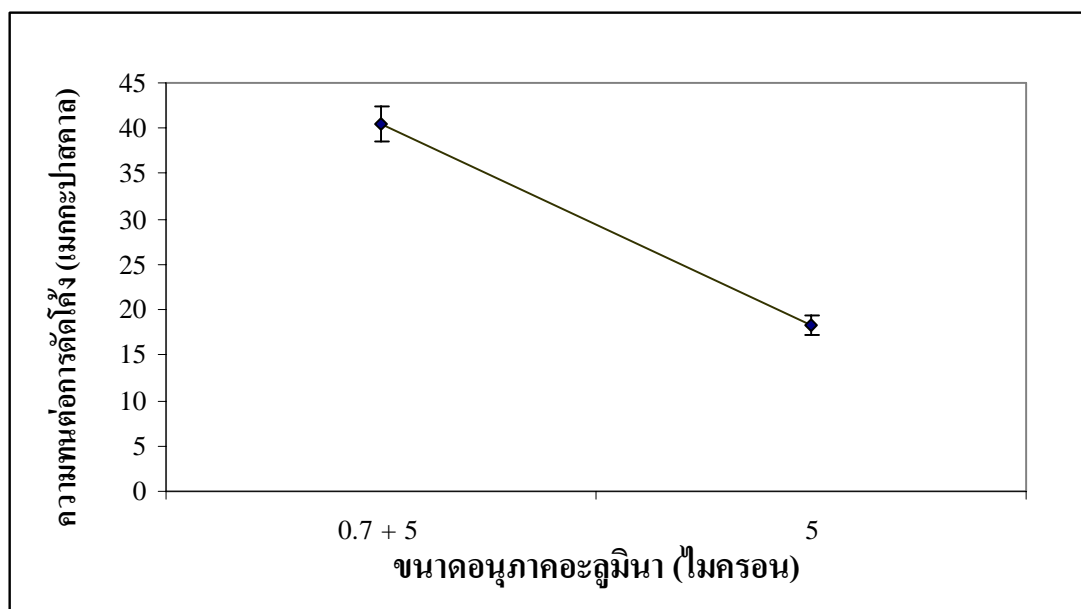
5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นขนาด 5 ไมครอน ต่างก็ทำให้ชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนอยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน

#### 4.4.3 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ

ตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.26 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.24 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก, และ 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมติกเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคอะลูมินา (ไมครอน)	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความทนต่อการตัดโค้ง (เมกะปาสคาล)
1	0.7 ผสมกับ 5	50:50	40.50 ± 2.02
2	5	100	18.25 ± 1.10



รูปที่ 4.26 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าความทนต่อการตัดโค้ง

จากตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.26 อุณหภูมิเผาผนึกเดียวกัน ขนาดอนุภาคอะลูมินาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะลดความสามารถในการเผาผนึกของชิ้นงานลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงและปริมาณรูพรุนในชิ้นงานเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานจะมีค่าลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2.3 นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด การเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคอะลูมินาจากขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นขนาด 5 ไมครอน ต่างก็ทำให้ชิ้นงานมีความทนต่อการตัดโค้งอยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน นั่นคือ มากกว่า 10 เมกกะปาสคาล

ตารางที่ 4.25 แสดงขนาดรูพรุน ปริมาณรูพรุนและความทนต่อการตัดโค้ง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอะลูมินาขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมนต์เซตลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขนาดอนุภาค อะลูมินา (ไมครอน)	สมบัติที่ต้องการ			
	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (0.1-10 ไมครอน)	ปริมาณรูพรุน (ร้อยละ 35-50)	ความทนต่อการตัดโค้ง (> 10 เมกกะปาสคาล)	ผล
0.7 ผสมกับ 5	0.3867 ± 0.0017	41.46	40.50 ± 2.02	ผ่าน
5	1.0152 ± 0.0213	52.50	18.25 ± 1.10	ผ่าน

จากการทดลอง 4.4.1 ถึง 4.4.3 พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบรีดจากขนาดอนุภาคอะลูมินา 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ชนิดละ 50 กรัม และ 5 ไมครอน ผ่านสมบัติที่ต้องการทั้งสามประการ นั่นคือ มีค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน อยู่ในช่วง 0.1-10 ไมครอน มีปริมาณรูพรุนร้อยละ 35-50 และมีความทนต่อการตัดโค้ง มากกว่า 10 เมกกะปาสคาล

#### 4.4.4 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ตารางที่ 4.26 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน

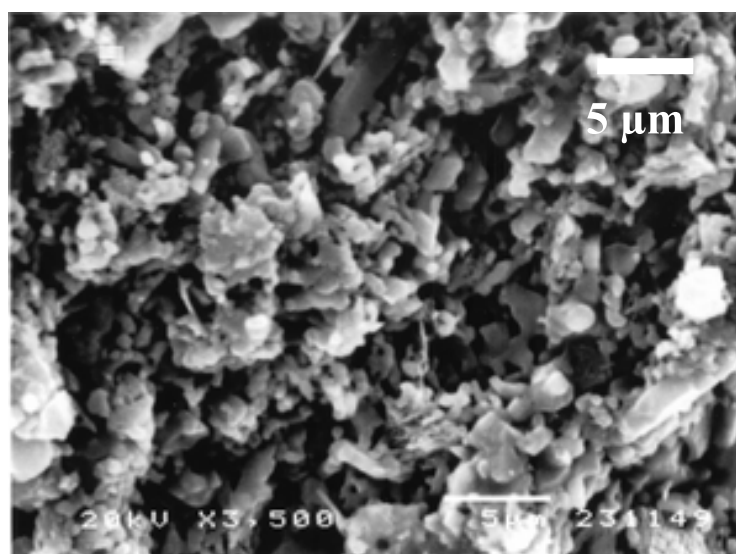
ตารางที่ 4.26 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุพูนตัวที่ความแตกต่างอุณหภูมิ 30 ถึง 1000°C

ตัวอย่าง	ปริมาณอะลูมินา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		ปริมาณสารเติมแต่ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก อะลูมินา)	ค่าสัมประสิทธิ์การ ขยายตัวเนื่องจากความ ร้อน ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
	0.7 ไมครอน	5 ไมครอน		
1	50	50	3	8.03
2	0	100	3	7.99

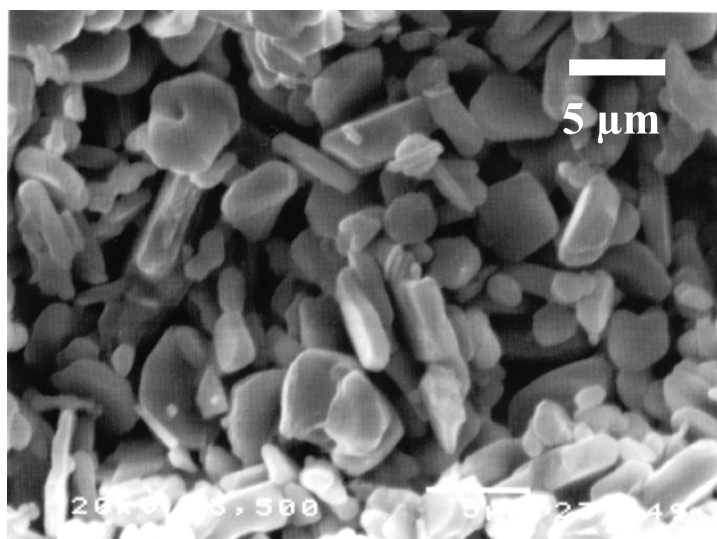
จากตารางที่ 4.26 พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากขนาดอนุภาคอะลูมินา 5 ไมครอนมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาดมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

#### 4.4.5 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพูนตัว

รูปที่ 27 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วย (ก) อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 (ข) อนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมนต์ซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



4.27 (ก)



4.27 (ข)

รูปที่ 4.27 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย (ก) อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 (ข) วัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน

จากภาพจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าขนาดอนุภาคอะลูมินามีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอนมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าและมีปริมาณรูพรุนที่มากกว่าสอดคล้องกับการทดลองที่ 4.4.1

#### 4.5 การศึกษาปริมาณของสารเติมแต่งต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

##### 4.5.1 การศึกษาปริมาณของสารเติมแต่งต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ

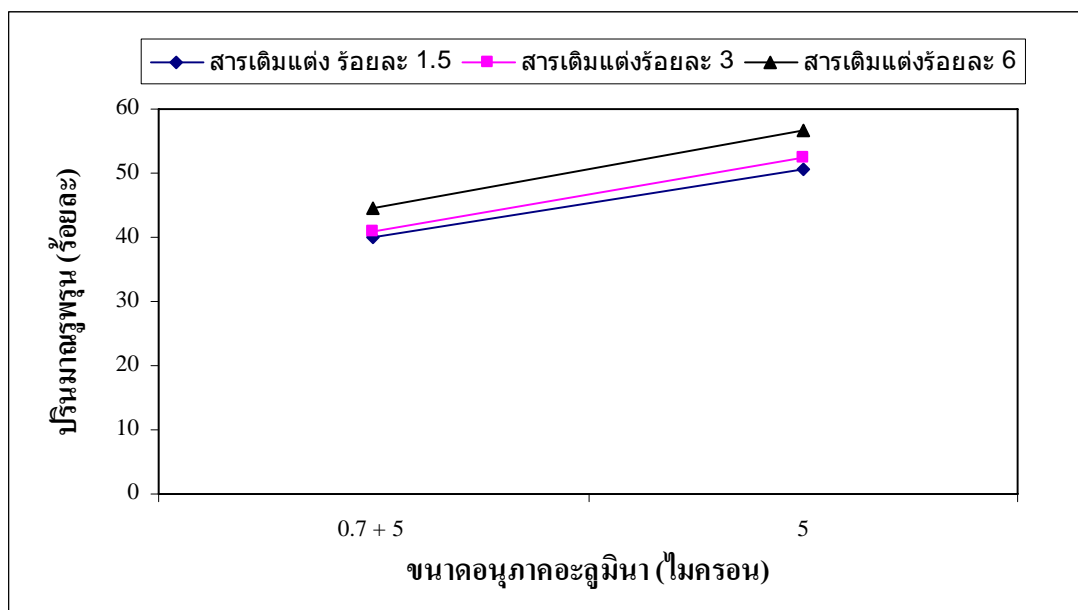
ตารางที่ 4.27 ถึง 4.28 และรูปที่ 4.28 แสดงผลการศึกษาปริมาณของคาร์บอนซีเมติกเซลลูโลสต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด หลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.27 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณรูพรุน (ร้อยละ)
1	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	1.5	2.56	39.85
2	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	3	2.53	41.46
3	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	6	2.52	43.41

ตารางที่ 4.28 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณรูพรุน (ร้อยละ)
1	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	1.5	2.12	45.45
2	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	3	2.10	52.50
3	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	6	2.02	56.57



รูปที่ 4.28 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสต่อปริมาณรุกรุน

จากตารางที่ 4.27 ถึง 4.28 และรูปที่ 4.28 พบว่า ปริมาณสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นหลังเผาของชิ้นงานลดลงซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sugiura, I. et al. (1993) และ สอดคล้องกับการทดลองที่ 4.2.5 เนื่องจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปจะถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิในช่วง 200-600°C (เจริญ นาคะสวรรค์, 2545) และจะทิ้งช่องว่างหรือรุกรุนทิ้งไว้ ดังนั้น ปริมาณสารเติมแต่งมากขึ้นย่อมให้ปริมาณรุกรุนที่มากขึ้นและความหนาแน่นน้อยลง อีกทั้งจากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด การเพิ่มขึ้นของปริมาณ สารเติมแต่ง นั้นคือ ร้อยละ 1.5, 3 และ 6 ต่างก็ทำให้ชิ้นงานมีปริมาณรุกรุนอยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน

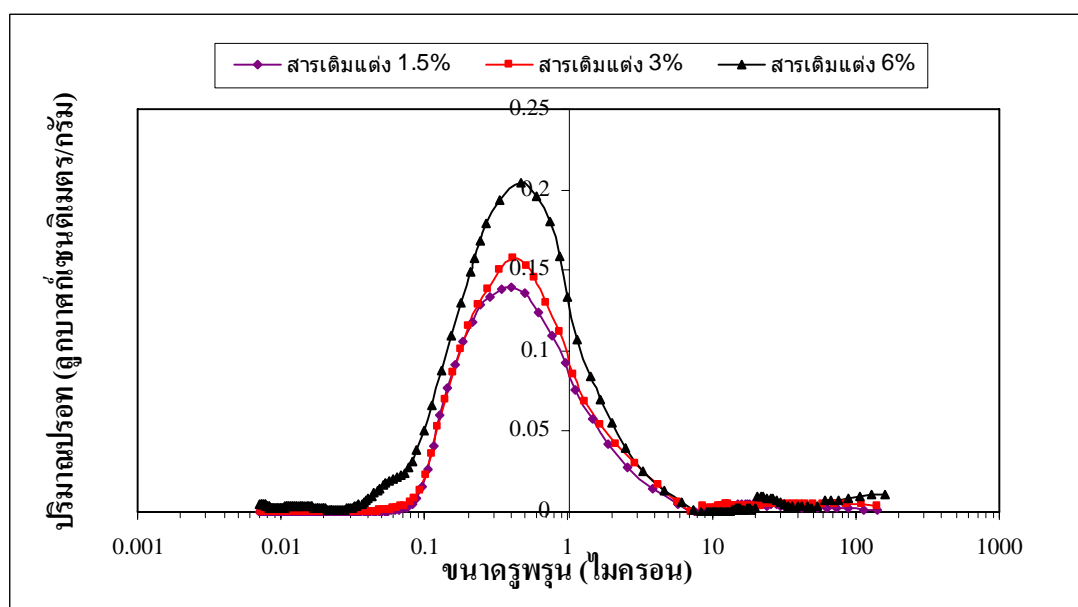
#### 4.5.2 การศึกษาปริมาณของสารเติมแต่งต่อค่าเฉลี่ยขนาดรุกรุนและการกระจายตัวของขนาดรุกรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีด

ตารางที่ 4.29 ถึง 4.30 และรูปที่ 4.29 ถึง 4.30 แสดงผลการศึกษาปริมาณผลของสารเติมแต่งต่อค่าเฉลี่ยขนาดรุกรุนและการกระจายตัวของขนาดรุกรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ หลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ตารางที่ 4.29 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

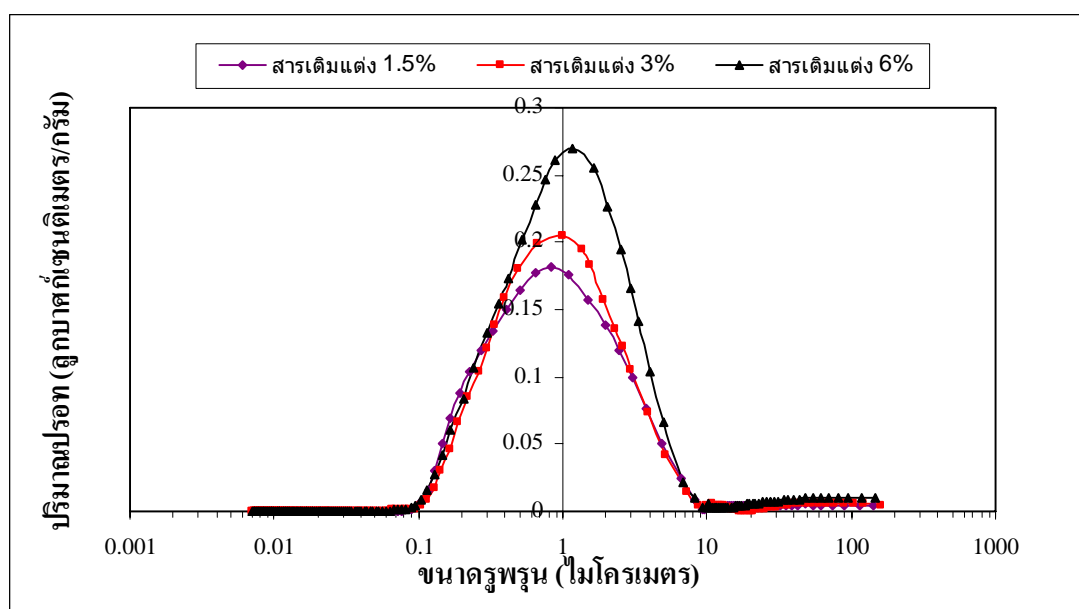
ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	1.5	$0.38 \pm 0.0028$
2	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	3	$0.39 \pm 0.0017$
3	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	6	$0.40 \pm 0.0044$



รูปที่ 4.29 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.30 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส	1.5	$0.94 \pm 0.0021$
2	คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส	3	$1.02 \pm 0.0213$
3	คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส	6	$1.11 \pm 0.0035$



รูปที่ 4.30 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.29 ถึง 4.30 และรูปที่ 4.29 ถึง 4.30 แสดงการเปรียบเทียบผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอะลูมินาทั้งสองขนาด พบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองที่ 4.2.6 นั่นคือ การเพิ่มปริมาณของสารเติมแต่งมีผลต่อค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนน้อยมาก ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนที่ได้จากการใช้สารเติมแต่งในปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ

โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกัน อนุภาคอะลูมินาขนาดใหญ่มิขนาดเฉลี่ยรูพรุนโตกว่าและมีค่าการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่กว้างกว่าและเมื่อพิจารณาปริมาณปรอทที่อัดเข้าไปในชิ้นงานพบว่าเมื่อขนาดอนุภาคอะลูมินาและปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มขึ้น ปริมาณปรอทที่อัดเข้าไปในชิ้นงานจะสูงขึ้นแสดงถึงปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานที่ อีกทั้งจากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเติมแต่ง นั่นคือ ร้อยละ 1.5, 3 และ 6 ต่างก็ทำให้ชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน อยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน

#### 4.5.3 การศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีด

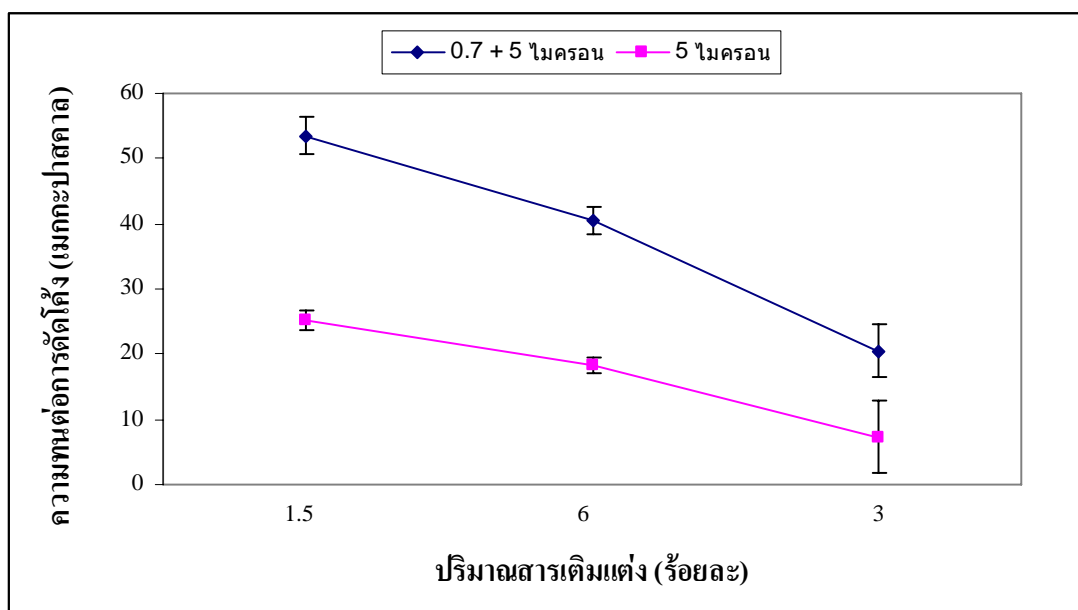
ตารางที่ 4.31 ถึง 4.32 และรูปที่ 4.31 แสดงผลการศึกษาของปริมาณคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสต่อความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่  $1500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.31 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ  $1500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความทนต่อการตัดโค้ง (เมกกะปาสคาล)
1	คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส	1.5	$53.52 \pm 2.85$
2	คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส	3	$40.50 \pm 2.02$
3	คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส	6	$20.45 \pm 4.05$

ตารางที่ 4.32 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ  $1500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	ชนิดของสารเติมแต่ง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความทนต่อการตัดโค้ง (เมกกะปาสคาล)
1	คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส	1.5	$25.19 \pm 1.42$
2	คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส	3	$18.25 \pm 1.10$
3	คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส	6	$7.34 \pm 5.65$



รูปที่ 4.31 แสดงผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน เผาพนักที่อุณหภูมิเผา 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.31 ถึง 4.32 และรูปที่ 4.31 สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.5.1 การเพิ่มของปริมาณสารเติมแต่งจะส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานสูงขึ้นทำให้ค่าความทนต่อการตัดโค้งลดลงและสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.4.3 ขนาดอนุภาคอะลูมินาที่ใหญ่ขึ้นมีผลทำให้ความทนต่อการตัดโค้งลดลง ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด อีกทั้งจากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเติมแต่ง นั่นคือ ร้อยละ 1.5, 3 และ 6 ต่างก็ทำให้ชิ้นงานมีความทนต่อการตัดโค้งอยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน นั่นคือ มากกว่า 10 เมกกะปาสกาล

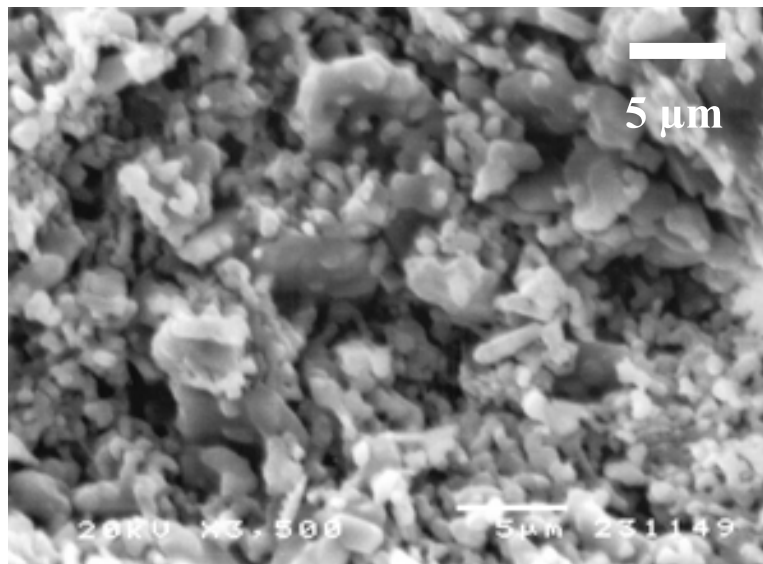
ตารางที่ 4.33 แสดงขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและความทนต่อการตัดโค้ง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย อะลูมินาขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และ ขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณ ร้อยละ 1.5, 3 และ 6 เผาพูนที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขนาดอนุภาค อะลูมินา (ไมครอน)	ปริมาณ สารเติมแต่ง (ร้อยละ)	สมบัติที่ต้องการ			
		ค่าเฉลี่ยขนาดรู พรุน (0.1-10 ไมครอน)	ปริมาตรรูพรุน (ร้อยละ 35- 50)	ความทนต่อการ ตัดโค้ง (> 10 เมกกะ ปาสคาล)	ผล
0.7 ผสมกับ 5	1.5	0.38 ± 0.0028	39.85	53.52 ± 2.85	ผ่าน
	3	0.39 ± 0.0017	41.46	40.50 ± 2.02	ผ่าน
	6	0.40 ± 0.0044	43.41	20.45 ± 4.05	ผ่าน
5	1.5	0.94 ± 0.0021	45.45	25.19 ± 1.42	ผ่าน
	3	1.02 ± 0.0213	52.50	18.25 ± 1.10	ผ่าน
	6	1.11 ± 0.0035	56.57	7.34 ± 5.65	ไม่ผ่าน

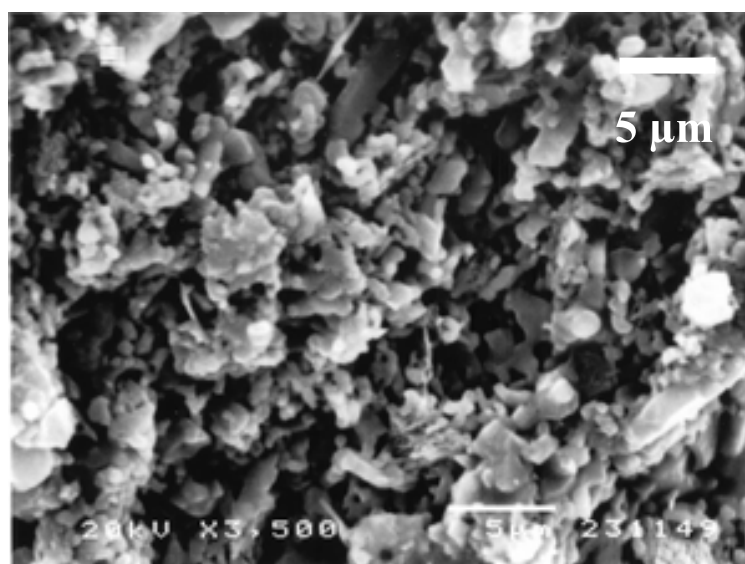
จากการทดลอง 4.5.1 ถึง 4.5.3 พบว่า ชิ้นงานทำการเพิ่มปริมาณสารเติมแต่ง ขึ้นรูป ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบรีดจากขนาดอนุภาคอะลูมินา 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียด ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และ 5 ไมครอน ผ่านสมบัติที่ต้องการทั้งสามประการ นั่นคือ มีค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน อยู่ในช่วง 0.1-10 ไมครอน มีปริมาตรรูพรุนร้อยละ 35-50 และมีความทนต่อการตัดโค้ง มากกว่า 10 เมกกะปาสคาล ยกเว้น ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินา ขนาด 5 ไมครอน ที่ใช้สารเติมแต่ง ร้อยละ 3 พบว่า ให้ค่าปริมาตรรูพรุน เกินกว่า ร้อยละ 50 มาเล็กน้อย แต่ยังคงให้ความทนต่อการ ตัดโค้งมากกว่า 10 เมกกะปาสคาล ในขณะที่ชิ้นงานที่ใช้สารเติมแต่งร้อยละ 6 พบว่า มีค่าปริมาตร ความพรุนตัวค่าความทนต่อการตัดโค้ง ไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ นั่นคือ น้อยกว่า 10 เมกกะปาสคาล รวมทั้งมีค่าปริมาตรรูพรุนเกินกว่าร้อยละ 50

#### 4.5.4 การศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพูนตัว

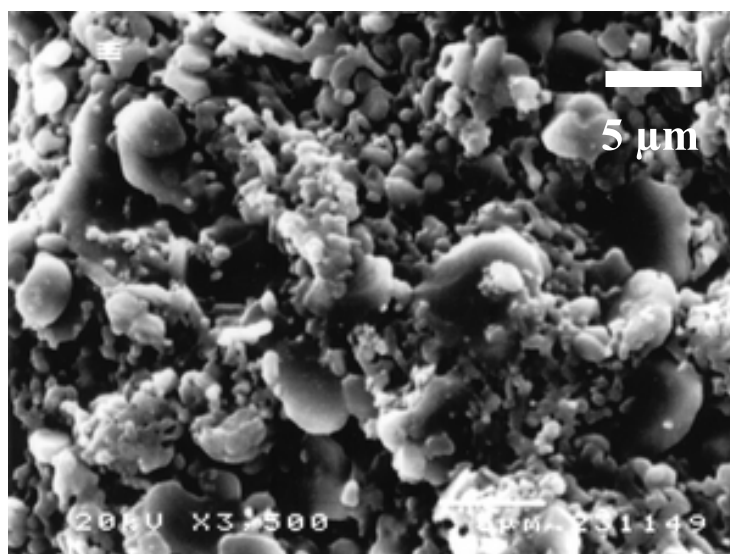
รูปที่ 4.32 และ 4.33 แสดงผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.32 (ก)

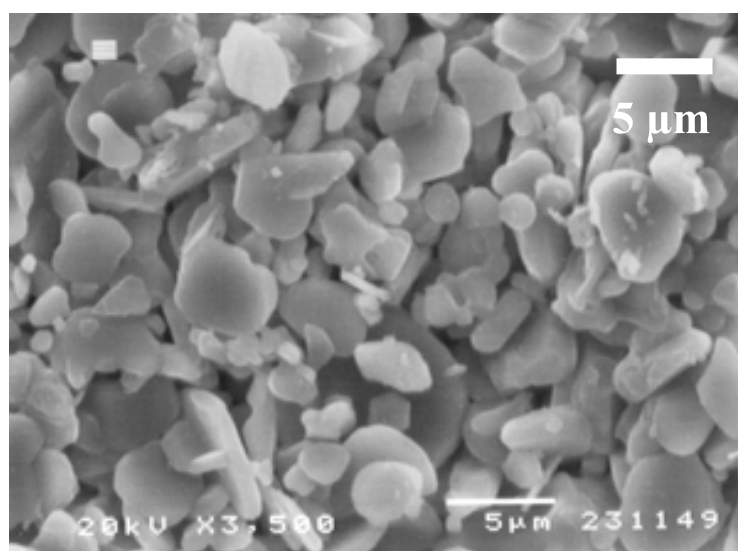


รูปที่ 4.32 (ข)

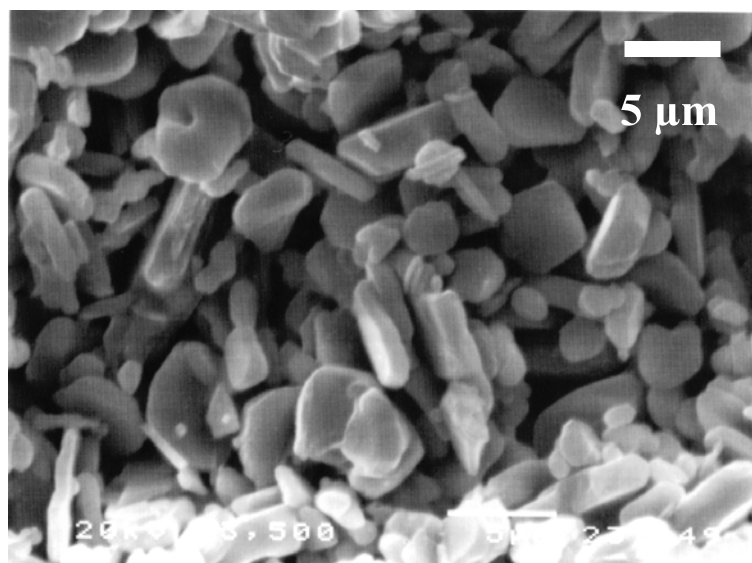


รูปที่ 4.32 (ค)

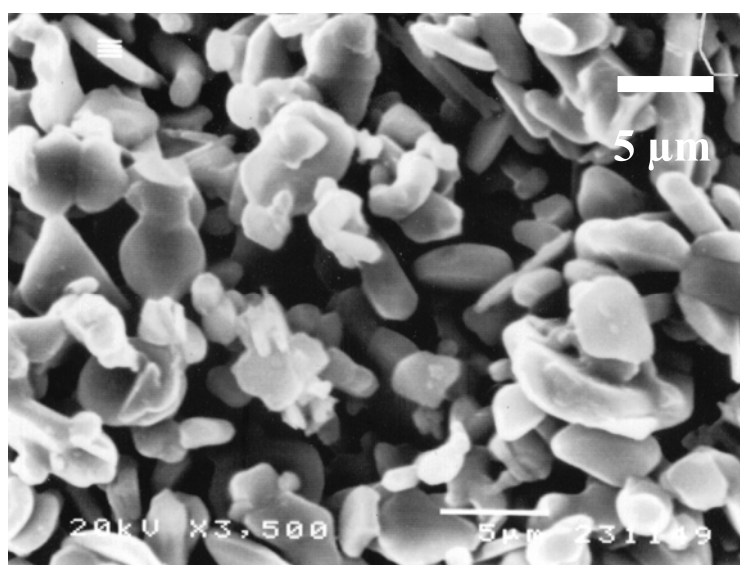
รูปที่ 4.32 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส เเผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยภาพ 4.32 (ก) 4.32 (ข) และ 4.32 (ค) ใช้สารเติมแต่งปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ตามลำดับ



รูปที่ 4.33 (ก)



รูปที่ 4.33 (ข)



รูปที่ 4.33 (ค)

รูปที่ 4.33 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส เผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยภาพ 4.33 (ก) 4.33 (ข) และ 4.33 (ค) ใช้สารเติมแต่งปริมาณร้อยละ 1.5, 3 และ 6 โดยน้ำหนักอะลูมินา ตามลำดับ



จากภาพ 4.32 และ 4.33 จะเห็นได้ว่าปริมาณสารเติมแต่งมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยชิ้นงานจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งจะพบว่าปริมาณรูพรุนในชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.5.1

#### 4.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของวัสดุ พูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

##### 4.6.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาที่มีต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุน

ตารางที่ 4.34 ถึง 4.35 และรูปที่ 4.34 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาผลึกต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และ 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

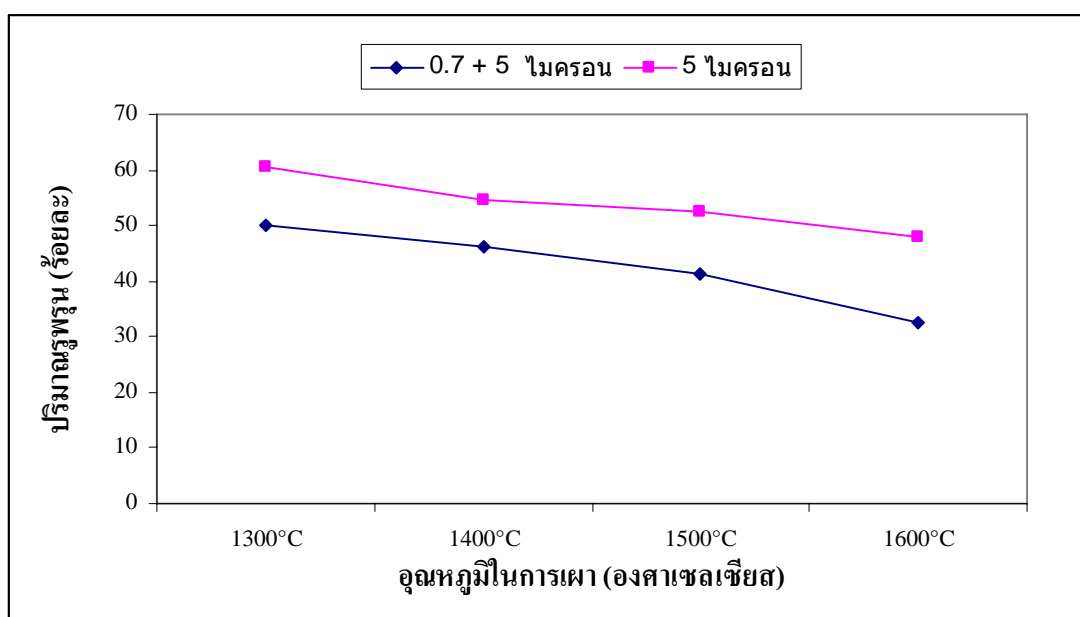
ตารางที่ 4.34 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผลึกที่อุณหภูมิ

1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณ รูพรุน (ร้อยละ)
1	1300	2.31	50.09
2	1400	2.35	46.26
3	1500	2.53	41.46
4	1600	2.78	32.57

ตารางที่ 4.35 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนกัมมันต์เคลือบเคลือบ ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณ รูพรุน (ร้อยละ)
1	1300	1.85	60.70
2	1400	1.954	54.57
3	1500	2.10	52.50
4	1600	2.22	48.12



รูปที่ 4.34 แสดงผลของอุณหภูมิการเผาต่อปริมาณรูพรุน

จากตารางที่ 4.34 ถึง 4.35 และรูปที่ 4.34 พบว่า อุณหภูมิการเผาที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน การเพิ่มอุณหภูมิการเผาส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานลดลงสอดคล้องกับการทดลองของ Kondo, Y., Hashisuka, Y., Nakahara, M. และ Yokoda, K. (1993) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาที่มีต่อปริมาณรูพรุนของวัสดุพูนตัว อะลูมินารูปแบบท่อกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ความหนา 0.3 เซนติเมตร พบว่า ที่อุณหภูมิ 1600°C จะมีปริมาณรูพรุนน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 1300°C หรือกล่าวอีก

นัยว่า การเพิ่มอุณหภูมิ เสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานกระตุ้นในการเผาผลาญให้เกิดการแพร่ (Diffusion) มากขึ้น ซึ่งการแพร่เป็นกลไกสำคัญที่ส่งผลให้อะตอมภายในอนุภาคเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้น ดังนั้น neck มีการเติบโตขยายขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคจึงมีการเชื่อมติดกันมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและปริมาณรูพรุนลดลงนั่นเอง นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียด 50 โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเผาผลาญต่างก็ให้ชิ้นงานที่มีปริมาณรูพรุนอยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน แต่ ณ อุณหภูมิ 1300°C จะให้ปริมาณรูพรุน สูงกว่า ร้อยละ 50 เช่นเดียวกับ ณ อุณหภูมิการเผาที่ 1300, 1400 และ 1500°C ที่เผาให้แก่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน ดังนั้น เพื่อให้ได้ปริมาณรูพรุน อยู่ในช่วงที่ต้องการ อาจทำการเผาโดยเพิ่มเวลาในการเผา แห้ให้มากขึ้นกว่า 1 ชั่วโมง

#### 4.6.2 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

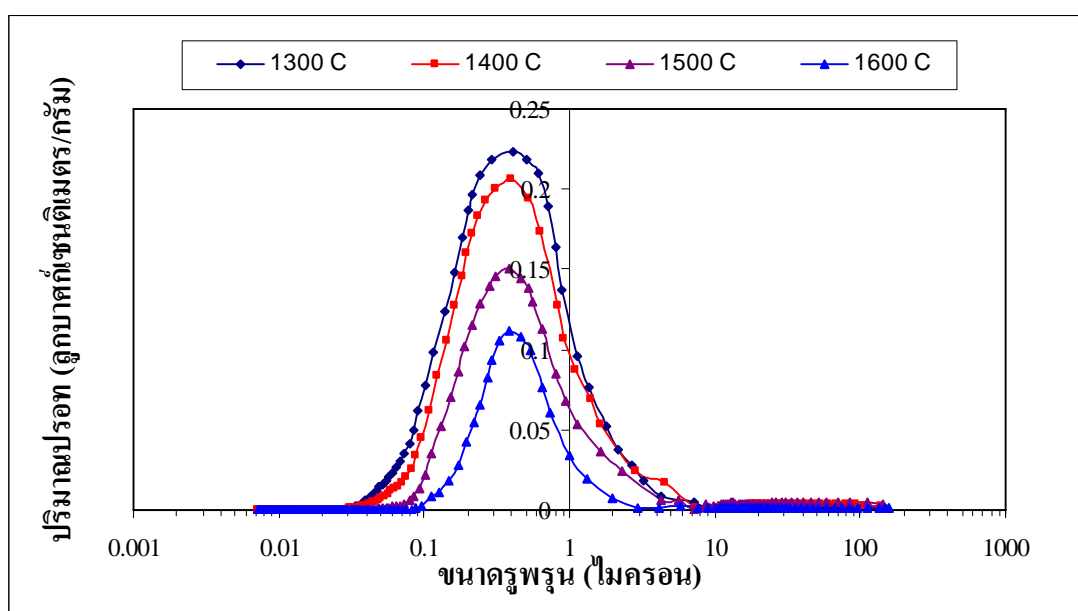
ตารางที่ 4.36 ถึง 4.37 และรูปที่ 4.35 ถึง 4.36 แสดงผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาที่มีต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดแบบ โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอเนียมทิลเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตารางที่ 4.36 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียด 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอเนียมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา ชิ้นงานหลังเผาผลาญที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

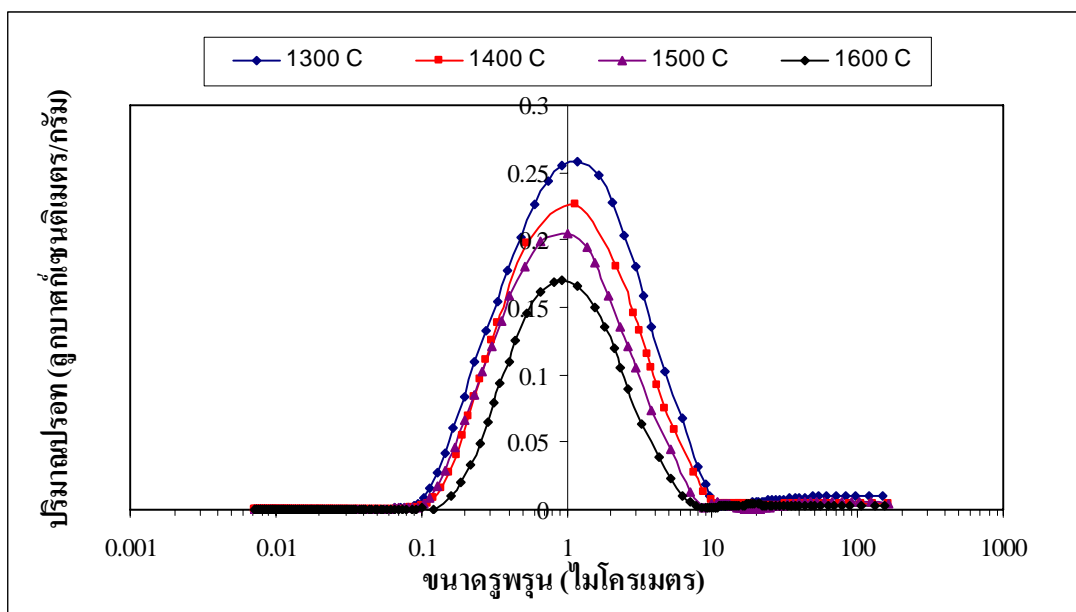
ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	1300	0.40 ± 0.0027
2	1400	0.39 ± 0.0028
3	1500	0.39 ± 0.0017
4	1600	0.38 ± 0.0031

ตารางที่ 4.37 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา หลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	1300	$1.30 \pm 0.0063$
2	1400	$1.14 \pm 0.0025$
3	1500	$1.02 \pm 0.0213$
4	1600	$1.03 \pm 0.0017$



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักโดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเผาต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

จากตารางที่ 4.36 ถึง 4.37 และรูปที่ 4.35 ถึง 4.36 พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาดเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการเผา ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคจะเล็กลงและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะแคบลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปฏิมา เทพยายน (2542) ที่ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาที่มีต่อค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของท่อวัสดุพอร์ซิวอะลูมินาแบบท่อกลวง โครงสร้างแบบสมมาตรและพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะทำให้ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคมีค่าลดลงและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคบลงด้วย นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเผานี้ก็ทำให้ชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน

#### 4.6.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อค่าความทนต่อการดัดโค้งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

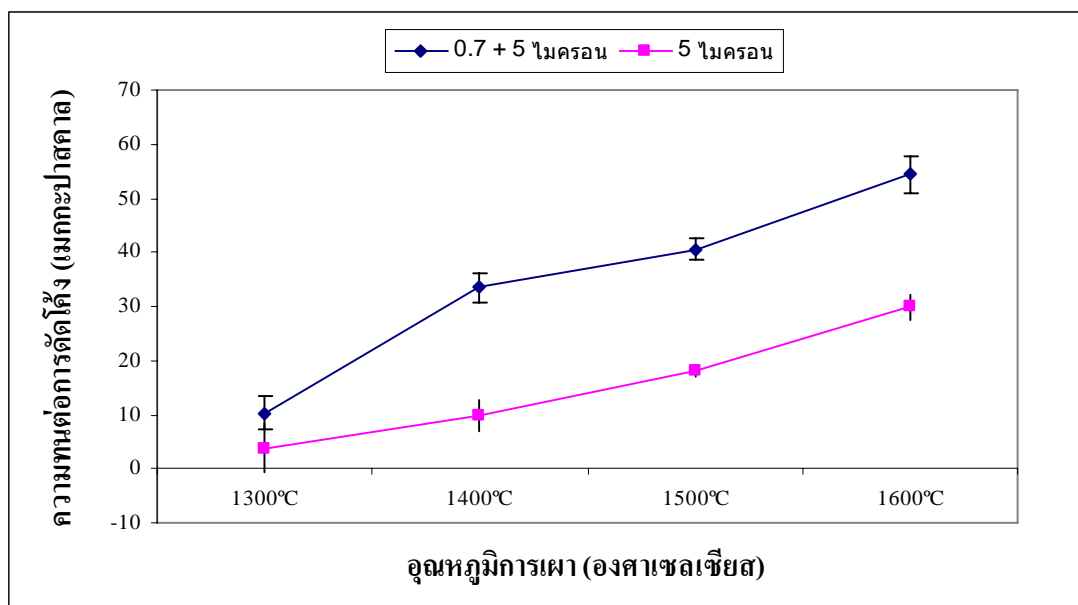
ตารางที่ 4.38 ถึง 4.39 และรูปที่ 4.37 แสดงผลการศึกษาอุณหภูมิการเผานี้ต่อความทนต่อการดัดโค้งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาต่างกัน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตารางที่ 4.38 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	ความทนต่อการตัดโค้ง (เมกกะปาสคาล)
1	1300	10.36 ± 3.05
2	1400	33.5 ± 2.72
3	1500	40.50 ± 2.02
4	1600	54.33 ± 3.40

ตารางที่ 4.39 แสดงค่าความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300-1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	ความทนต่อการตัดโค้ง (เมกกะปาสคาล)
1	1300	3.73 ± 4.50
2	1400	9.86 ± 2.95
3	1500	18.25 ± 1.10
4	1600	29.84 ± 2.45



รูปที่ 4.37 แสดงผลของอุณหภูมิการเผา 1300-1600°C ต่อความทนต่อการดัดโค้งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมนต์ซิลิเกตร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

จากตารางที่ 4.38, 4.39 และรูปที่ 4.37 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาามีผลให้ค่าความทนต่อการดัดโค้งของชิ้นงานสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นและปริมาณรูพรุนลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.6.1 นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเผานี้ทำให้ชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนอยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน แต่ ณ อุณหภูมิ 1300°C และ 1400°C ที่เผาให้แก่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา 5 ไมครอน จะให้ชิ้นงานที่มีความทนต่อการดัดโค้งน้อยกว่า 10 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 4.40 แสดงขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและความทนต่อการตัด โคงีง ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย อะลูมินาขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และ ขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาที่อุณหภูมิ 1300-1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการเผา 300°C ต่อชั่วโมง

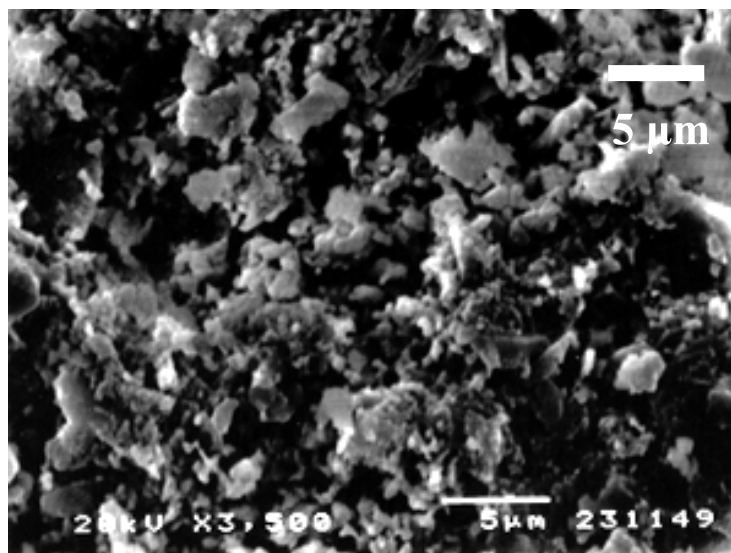
ขนาดอนุภาค อะลูมินา (ไมครอน)	อุณหภูมิการเผา (องศา เซลเซียส)	สมบัติที่ต้องการ			
		ค่าเฉลี่ยขนาด รูพรุน (0.1-10 ไมครอน)	ปริมาณรู พรุน (ร้อยละ 35- 50)	ความทนต่อการ ตัด โคงีง (> 10 เมกกะ ปาสกาล)	ผล
0.7 ผสมกับ 5	1300	0.40 ± 0.0027	50.09	10.36 ± 3.05	ผ่าน
	1400	0.39 ± 0.0028	46.26	33.5 ± 2.72	ผ่าน
	1500	0.39 ± 0.0017	41.46	40.50 ± 2.02	ผ่าน
	1600	0.38 ± 0.0031	32.57	54.33 ± 3.40	ผ่าน
5	1300	1.30 ± 0.0063	60.70	3.73 ± 4.50	ไม่ผ่าน
	1400	1.14 ± 0.0025	54.57	9.86 ± 2.95	ไม่ผ่าน
	1500	1.02 ± 0.0213	52.504	18.25 ± 1.10	ผ่าน
	1600	1.03 ± 0.0017	48.12	29.84 ± 2.45	ผ่าน

จากตารางที่ 4.40 จะเห็นได้ว่า ในช่วงอุณหภูมิการเผา 1300-1500°C ชิ้นงานที่ขึ้นรูป จากอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถ ให้ชิ้นงานที่มีขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและความทนต่อการตัด โคงีง ในขอบเขตที่ต้องการ (ยกเว้น ที่ 1300°C ที่ค่าปริมาณรูพรุน เกินกว่า ร้อยละ 50 มาเล็กน้อย อาจแก้ปัญหาโดยการเผาแช่ให้นาน กว่า 1 ชั่วโมง) ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน เมื่อเผาที่ 1300°C และ 1400°C จะพบว่า ชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนและความทนต่อการตัด โคงีงไม่อยู่ในขอบเขตที่ต้องการ และเมื่อเผาที่ 1500°C ค่าปริมาณรูพรุน เกินกว่าร้อยละ 50 มาเล็กน้อย ดังนั้น อาจแก้ปัญหาได้โดย การเผาแช่ ให้นานกว่า 1 ชั่วโมงเช่นกัน

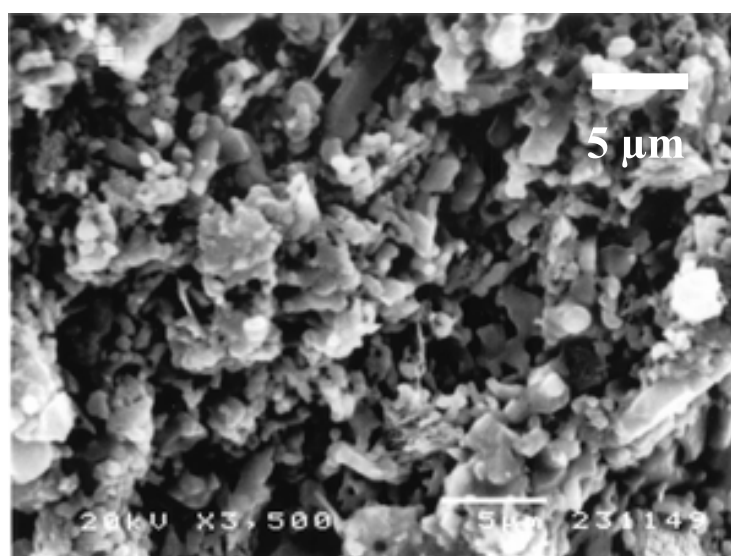


#### 4.6.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพูนตัว

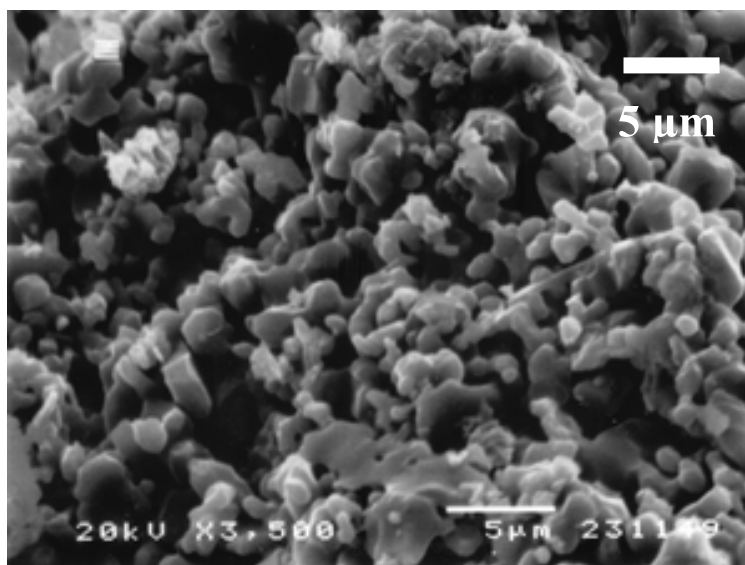
รูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.39 แสดงผลการศึกษาอุณหภูมิการเผานี้กต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาดต่างกัน โดยใช้สารเติมแต่งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา



รูปที่ 4.38 (ก)

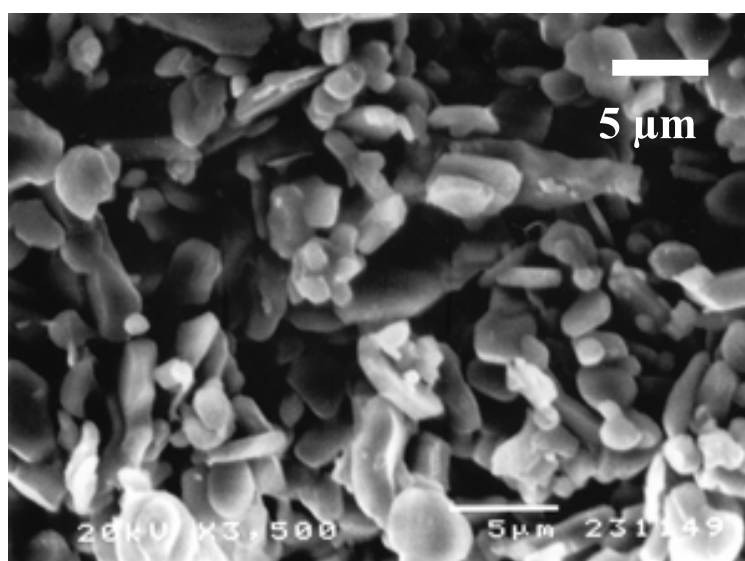


รูปที่ 4.38 (ข)

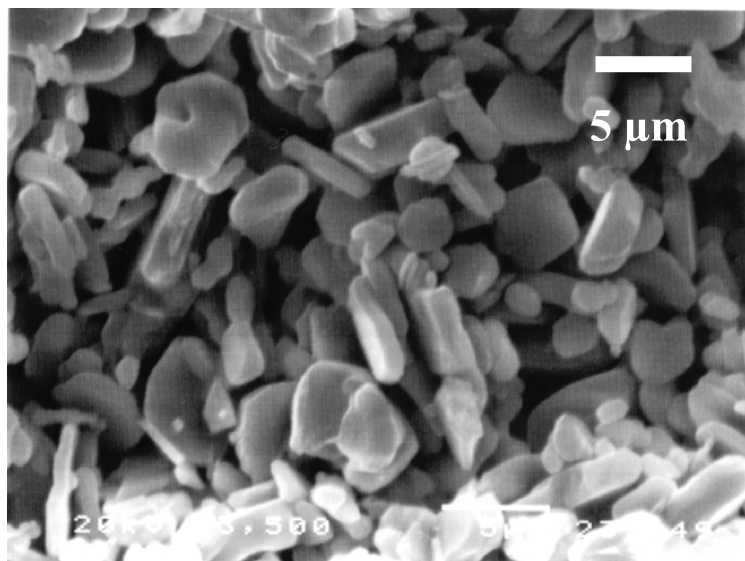


รูปที่ 4.38 (ค)

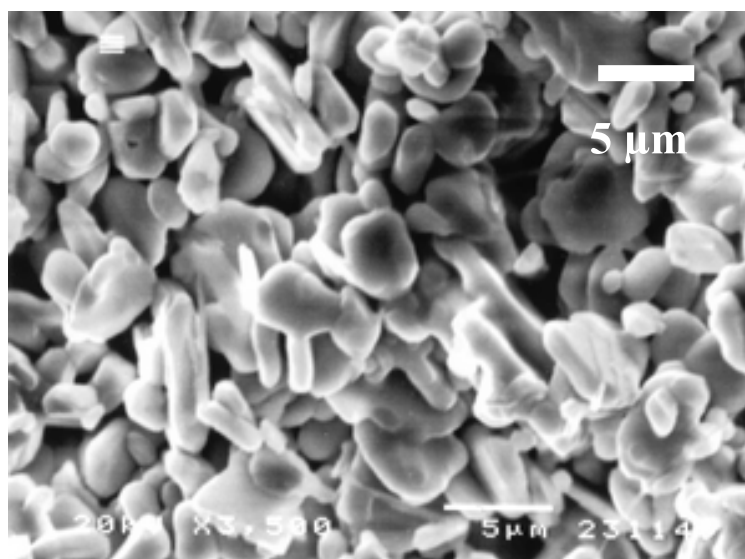
รูปที่ 4.38 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา โดยภาพ 4.38 (ก) 4.38 (ข) และ 4.38 (ค) เผาที่อุณหภูมิ 1400, 1500 และ 1600°C ตามลำดับ



รูปที่ 4.39 (ก)



รูปที่ 4.39 (ข)



รูปที่ 4.39 (ค)

รูปที่ 4.39 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา โดยภาพ 4.39 (ก) 4.39 (ข) และ 4.39 (ค) เผาที่อุณหภูมิ 1400, 1500 และ 1600°C ตามลำดับ

จากภาพจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิการเผามีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยชิ้นงานจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานจะลดลง เนื่องจากดังได้กล่าวมาแล้ว เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเสมือนเป็นการเพิ่มพลังงานกระตุ้นในการเผาผนึกทำให้เกิดการแพร่ (Diffusion) มากขึ้น ซึ่งการแพร่เป็นกลไกสำคัญที่ส่งผลให้อะตอมภายในอนุภาคเกิดการเคลื่อนที่มากขึ้น ดังนั้น neck มีการเติบโตขยายขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคจึงมีการเชื่อมติดกันมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและปริมาณรูพรุนลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.6.1

#### 4.6.5 การศึกษาผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่มีต่อความ

หนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

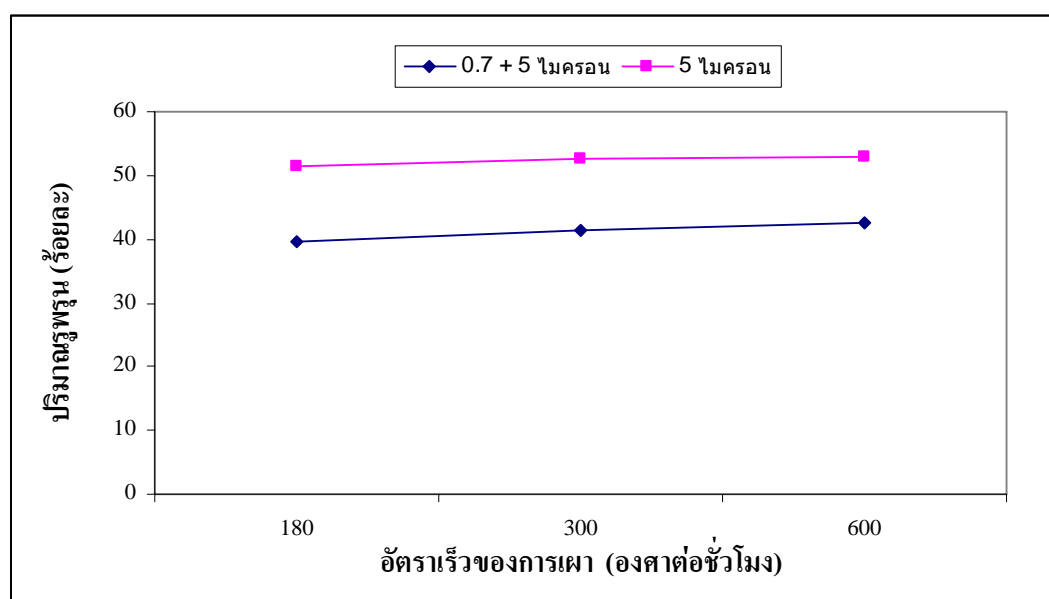
ตารางที่ 4.41 ถึง 4.42 และรูปที่ 4.40 แสดงผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอะลูมินาขนาดต่างกัน โดยใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.41 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาด้วยอัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/Hour (H) (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและ 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	อัตราเร็วของการเผา (องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณ รูพรุน (ร้อยละ)
1	180	2.53 ± 0.0120	39.63
2	300	2.52 ± 0.0136	41.46
3	600	2.51 ± 0.0122	42.57

ตารางที่ 4.42 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังเผาด้วยอัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอนโดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	อัตราเร็วของการเผา (องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณ รูพรุน (ร้อยละ)
1	180	2.14 ± 0.0110	51.57
2	300	2.10 ± 0.0122	52.51
3	600	2.05 ± 0.0143	53.05



รูปที่ 4.40 แสดงผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ต่อปริมาณรูพรุน

จากตารางที่ 4.41 ถึง 4.42 และรูปที่ 4.40 สรุปได้ว่าอัตราเร็วของการเผามีผลต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน โดยพบว่า การเพิ่มอัตราเร็วของการเผาส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าอัตราเร็วของการให้ความร้อนที่สูงหรือให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเร็วจะส่งผลให้ความสามารถในการเผาผนึกของชิ้นงานลดลง เนื่องจากอนุภาคภายในชิ้นงานไม่มีเวลาในการจัดเรียงตัวส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่เผาด้วยอัตราเร็วของการเผาที่ต่ำกว่า นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย

อนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ชนิดละ 50 กรัม เมื่อเพิ่มอัตราเร็วของการเผาจะได้ชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนอยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน แต่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน เมื่อเพิ่มอัตราเร็วของการเผาจะได้ชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนมากกว่าร้อยละ 50 ดังนั้น เพื่อให้ได้ปริมาณรูพรุนในขอบเขตที่ต้องการ อาจทำการเผา ณ อุณหภูมินี้โดยให้เวลาในการเผาแซ่สูงขึ้น

#### 4.6.6 การศึกษาผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่มีต่อค่าเฉลี่ย

ขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดพรุนของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

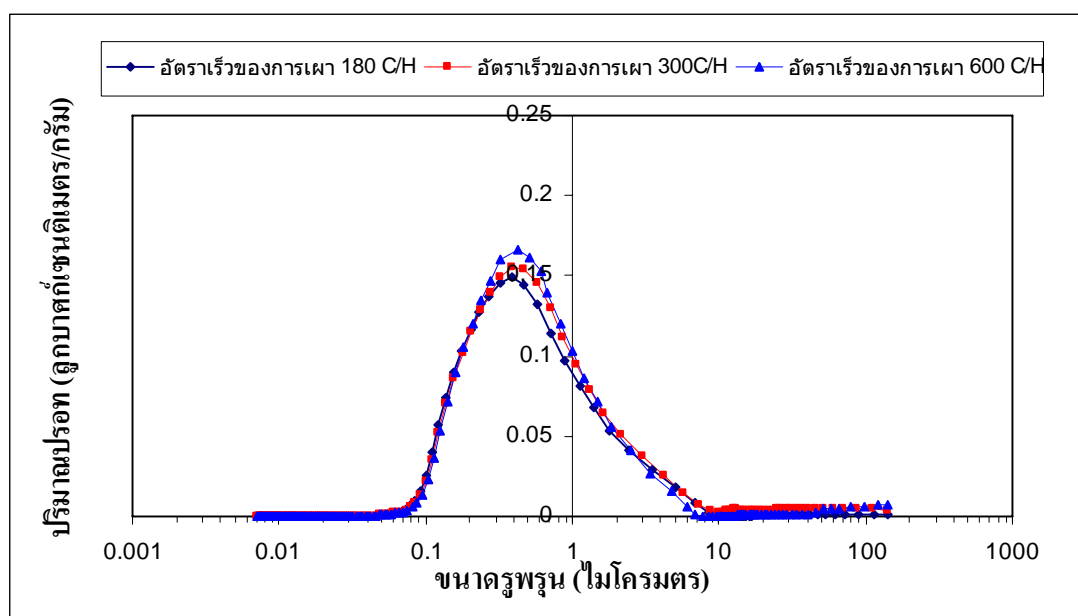
ตารางที่ 4.43 ถึง 4.44 และรูปที่ 4.41 ถึง 4.42 แสดงผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดพรุนของชิ้นงานด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาดต่าง ๆ โดยใช้คาร์บอเนียมทิลเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อะลูมินา เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.43 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอเนียมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา หลังเผาผนึกที่อัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C

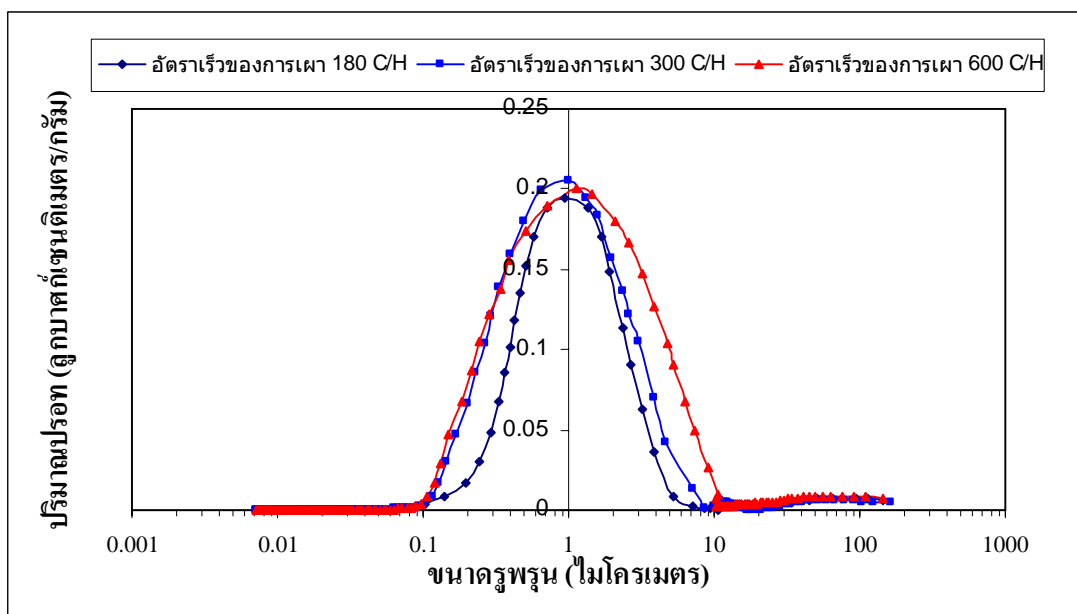
ตัวอย่าง	อัตราเร็วของการเผา (องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	180	0.38 ± 0.0025
2	300	0.39 ± 0.0017
3	600	0.40 ± 0.0045

ตารางที่ 4.44 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา หลังเผาขึ้นที่อัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขึ้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C

ตัวอย่าง	อัตราเร็วของการเผา (องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	180	0.98 ± 0.0060
2	300	1.02 ± 0.0213
3	600	1.11 ± 0.0035



รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขึ้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C ต่อ การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ที่อุณหภูมิ 1500°C ต่อ การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน

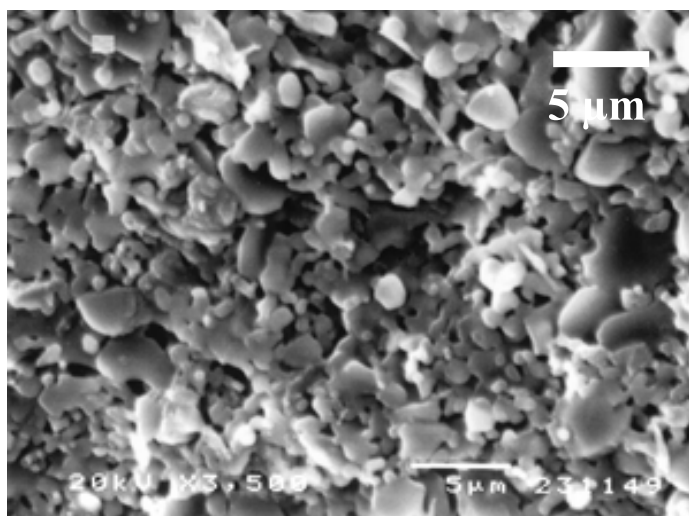
จากตารางที่ 4.43 ถึง 4.44 และรูปที่ 4.41 ถึง 4.42 จะเห็นว่าอัตราเร็วของการเผามีผลต่อค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ทั้งสองขนาดแตกต่างกัน กล่าวคือ จะทำให้ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่การเพิ่มอัตราเร็วของการเผาจะทำให้ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน เพิ่มขึ้นเล็กน้อย อนึ่งการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานช้า ๆ อนุภาคอะลูมินาที่กำลังได้รับความร้อนมีเวลาในการจัดเรียงตัวมากและ neck มีเวลาในการโต การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานช้า ๆ จึงทำให้เกิดการเผาผลาญอย่างสมบูรณ์ในแต่ละขั้นตอนการเผาได้ดีกว่า ส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง ปริมาณอนุภาคเพิ่มขึ้นและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วของการเผาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด การเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วของการเผาก็ทำให้ชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน



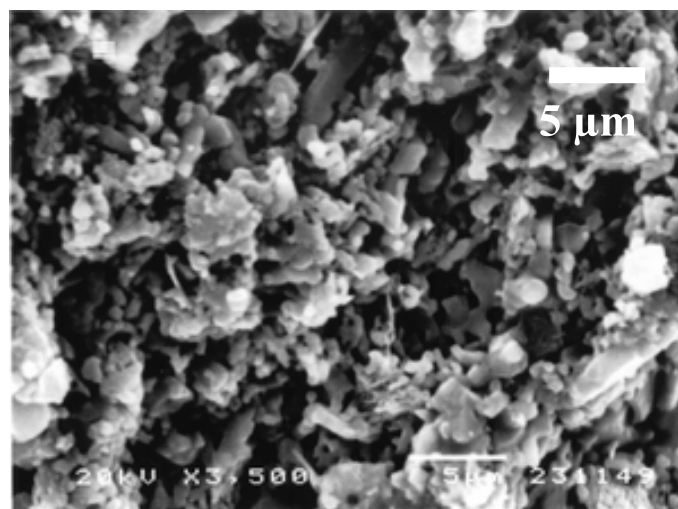
#### 4.6.7 การศึกษาผลของอัตราเร็วของการเผา (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) ต่อโครงสร้าง

##### จุลภาคของวัสดุพูนตัว

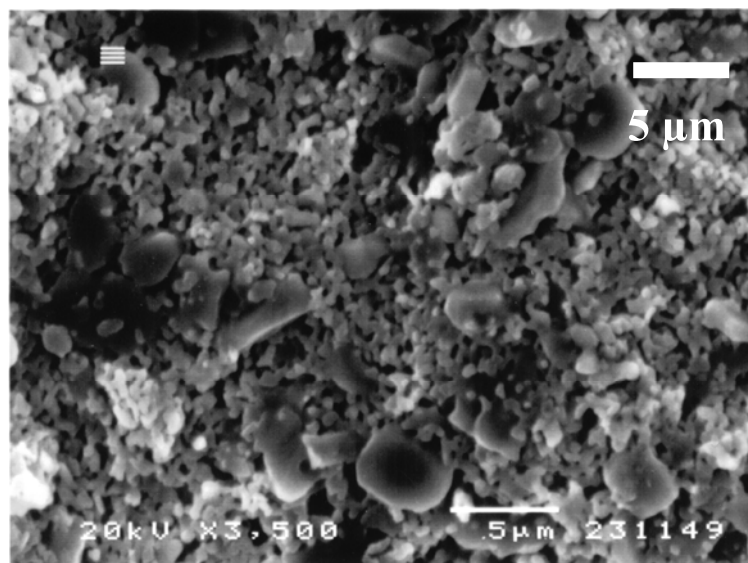
รูปที่ 4.43 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ใช้คาร์บอนซีเมนต์ล เซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา หลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร็วของการเผาที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.43 (ก)



รูปที่ 4.43 (ข)



รูปที่ 4.43 (ค)

รูปที่ 4.43 แสดงถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา โดยภาพ 4.43 (ก) 4.43 (ข) และ 4.43 (ค) ใช้อัตราเร็วของการเผา 180, 300 และ 600°C/H (ในการเผาขั้นที่ 2 และ 3) เผาที่อุณหภูมิ 1500°C ตามลำดับ

จากภาพพบว่า อัตราเร็วของการเผามีผลต่อโครงสร้างจุลภาค กล่าวคือ การเพิ่มอัตราเร็วของการเผาจะทำให้โครงสร้างมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.6.5 และ 4.6.6

#### 4.6.8 การศึกษาผลของเวลาการเผาแห้งที่มีต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

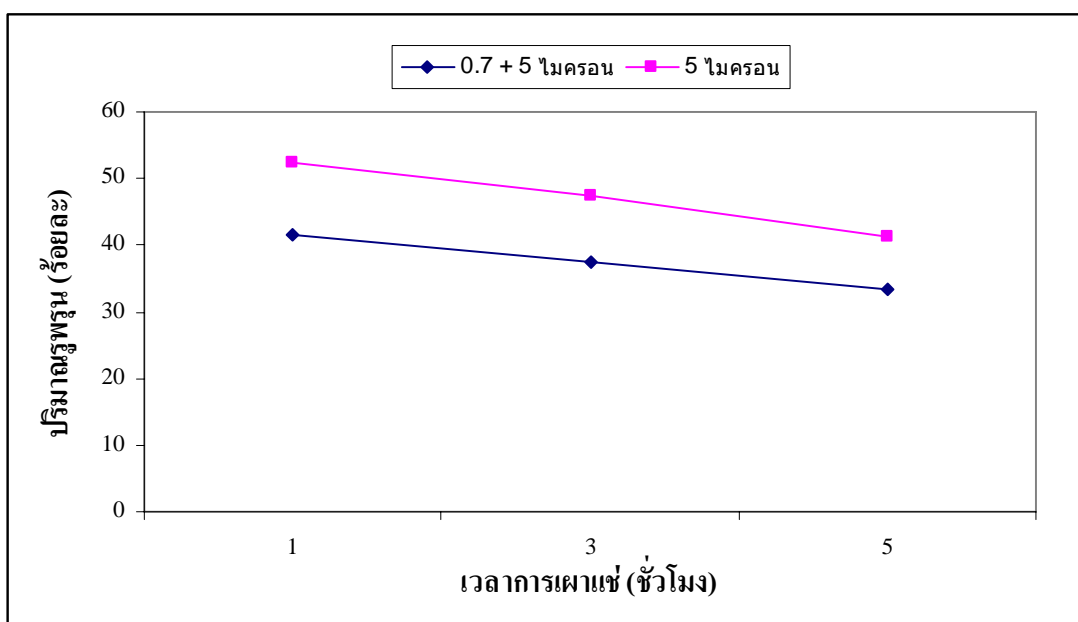
ตารางที่ 4.45 ถึง 4.46 และรูปที่ 4.44 แสดงผลของเวลาการเผาแห้งที่มีต่อความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานซึ่งขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาดต่าง ๆ โดยใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาหนักที่อุณหภูมิ 1500°C ด้วยอัตราเร็วของการเผา 300°C/H

ตารางที่ 4.45 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังการเผาแช่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1500°C ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	เวลาการเผาแช่ (ชั่วโมง)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณ รูพรุน (ร้อยละ)
1	1	2.53	41.46
2	3	2.68	37.46
3	5	2.81	33.50

ตารางที่ 4.46 แสดงค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของชิ้นงานหลังการเผาแช่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1500°C ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

ตัวอย่าง	เวลาการเผาแช่ (ชั่วโมง)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณ รูพรุน (ร้อยละ)
1	1	2.10	52.50
2	3	2.25	47.45
3	5	2.36	41.25



รูปที่ 4.44 แสดงผลของเวลาการเผาเซ้ที่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมงต่อปริมาณรุกรุน ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา

จากตารางที่ 4.45 ถึง 4.46 และรูปที่ 4.44 สรุปได้ว่าเวลาการเผาเซ้มีผลต่อความหนาแน่นและปริมาณรุกรุน โดยการเพิ่มเวลาในการเผาเซ้ส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันปริมาณรุกรุนของชิ้นงานจะลดลง เนื่องจากการให้ความร้อนในเวลาที่นานขึ้น จะช่วยให้อนุภาคอะลูมินาภายในชิ้นงานมีเวลาในการจัดเรียงตัวนานขึ้น นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ชนิดละ 50 กรัม และขนาด 5 ไมครอน เมื่อเพิ่มเวลาการเผาเซ้จาก 1 ชั่วโมงเป็น 3 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ ชิ้นงานที่ได้มีปริมาณรุกรุนอยู่ในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการ โดยจากการทดลองที่ 4.6.5 จะพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน เผาเซ้ที่ 1500°C เวลาการเผาเซ้ 1 ชั่วโมง อัตราการเผา 300°C ต่อชั่วโมง จะมีค่าปริมาณรุกรุนที่มากกว่าขอบเขตที่ต้องการแต่การเพิ่มเวลาการเผาเซ้ สามารถให้ชิ้นงานที่มีปริมาณรุกรุนอยู่ในขอบเขตที่ต้องการได้

#### 4.6.9 การศึกษาผลของเวลาการเผาแห้งต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานด้วยการขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

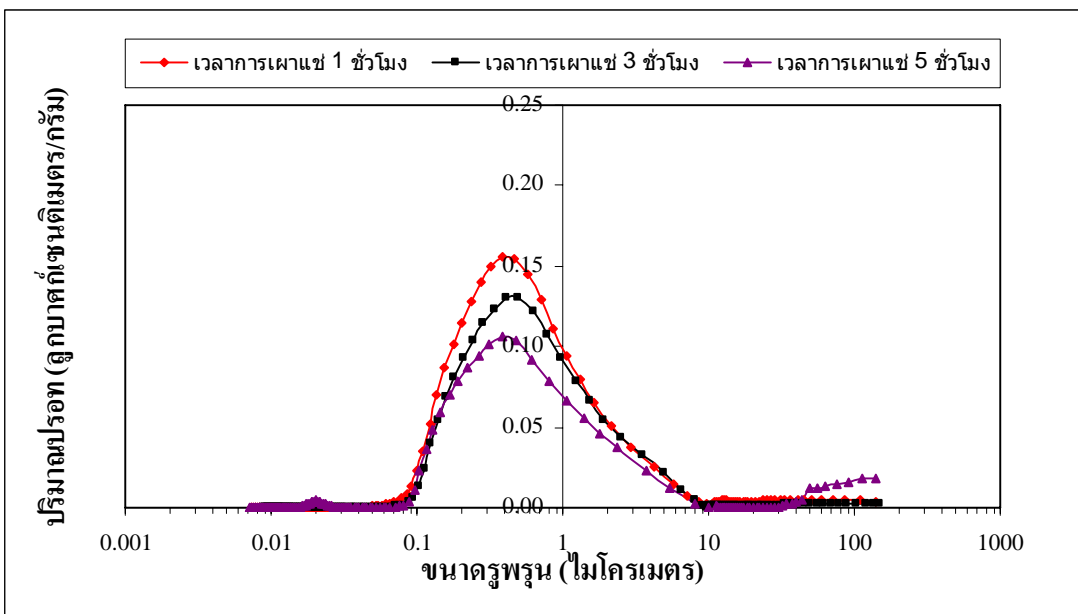
ตารางที่ 4.47 ถึง 4.48 และรูปที่ 4.45 ถึง 4.46 แสดงผลของเวลาการเผาแห้งต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาดต่าง ๆ โดยใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสปริมาณ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1500°C ด้วยอัตราการเผา 300°C/H

ตารางที่ 4.47 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่เวลาการเผาแห้ง 1, 3 และ 5 ชั่วโมง

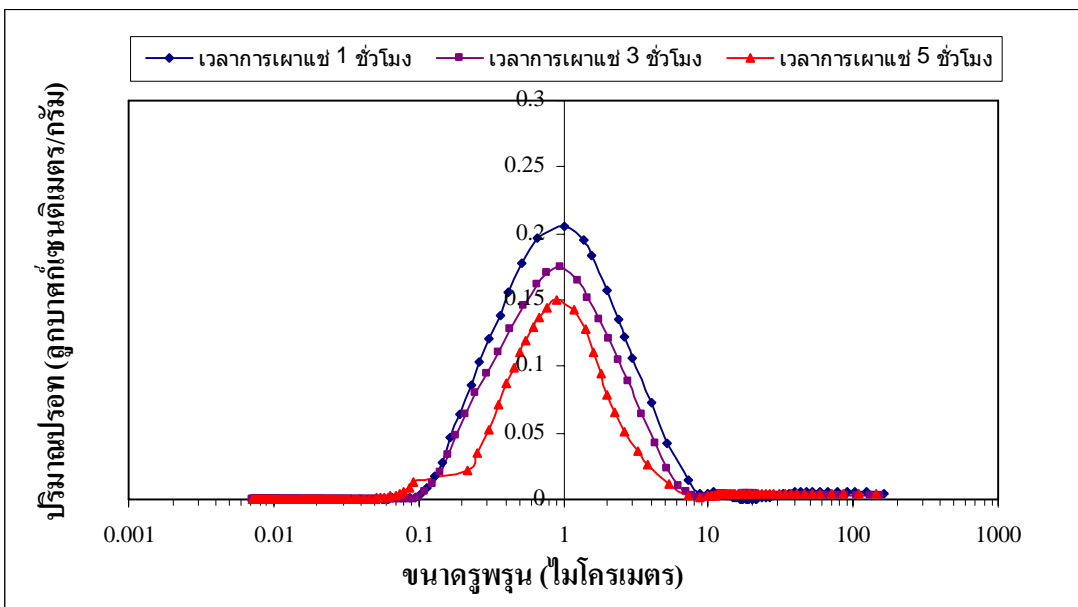
ตัวอย่าง	เวลาการเผาแห้ง (ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	1	0.39 ± 0.0017
2	3	0.38 ± 0.0020
3	5	0.37 ± 0.0015

ตารางที่ 4.48 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินาชิ้นงานหลังเผาผนึกที่เวลาการเผาแห้ง 1, 3 และ 5 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	เวลาการเผาแห้ง (ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
1	1	1.02 ± 0.0213
2	3	1.00 ± 0.0020
3	5	0.98 ± 0.0045



รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาการเผาแช่ต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละ ร้อยละ 50

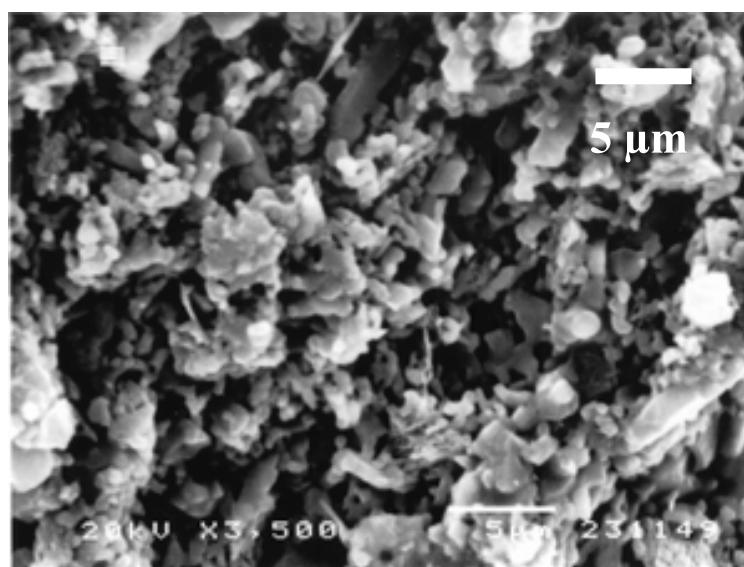


รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาการเผาแช่ต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน

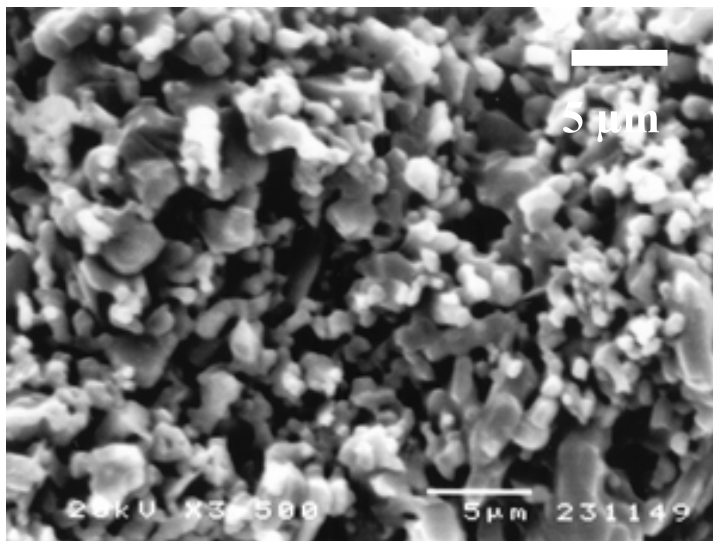
จากผลการทดลองที่ 4.6.8 และ 4.6.9 พบว่า เวลาการเผาแห้งมีผลต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่ผลิตจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด กล่าวคือ การเพิ่มระยะเวลาในการเผาแห้งจาก 1 ชั่วโมงเป็น 3 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ จะทำให้ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของชิ้นงานลดลง นอกจากนี้ปริมาณของรูพรุนก็จะลดลงด้วย นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาด การเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วของการผาผนึก ต่างก็ให้ชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนในขอบเขตของสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน

#### 4.6.10 การศึกษาผลของเวลาการเผาแห้งต่อโครงสร้างจุลภาคของวัสดุพรุนตัว

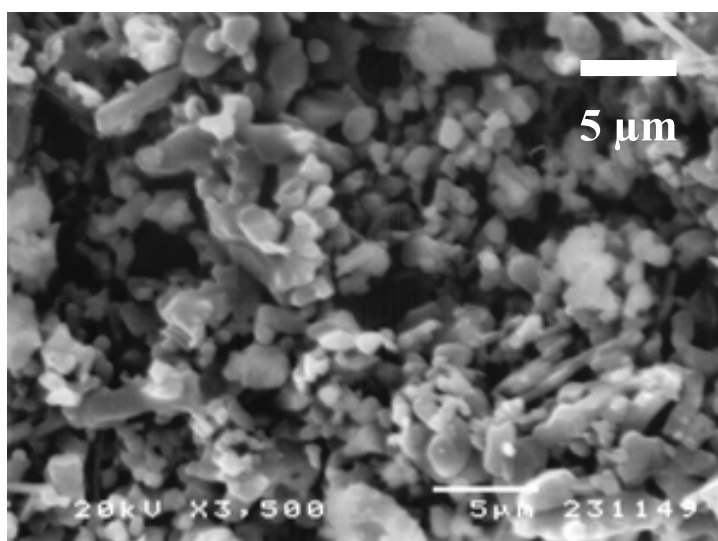
รูปที่ 4.47 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมนต์ซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา หลังเผาผนึกที่ 1500°C ด้วยอัตราเร็ว 300°C/H โดยใช้เวลาเผาแห้งต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.47 (ก)



รูปที่ 4.47 (ข)



รูปที่ 4.47 (ค)

รูปที่ 4.47 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดละ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมติกเซลลูโลสในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอะลูมินา โดยภาพ 4.47 (ก) 4.47 (ข) และ 4.47 (ค) เผาที่อุณหภูมิ 1500°C โดยใช้เวลาเผาแ่ง 1, 3 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ



จากภาพจะเห็นได้ว่าเวลาในการเผาแห้งมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยการเพิ่มอุณหภูมิการเผาแห้ง เปรียบเสมือนการเพิ่มเวลาให้อนุภาคเกิดการเผาแห้งอย่างสมบูรณ์มากขึ้น ดังนั้น ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เผาแห้งด้วยเวลา 5 ชั่วโมง จะมีลักษณะของชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงที่สุด มีรูพรุนน้อย นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าเกรนจะมีขนาดเล็กและสามารถมองเห็นขอบเกรน (Grain boundary) ได้อย่างชัดเจน

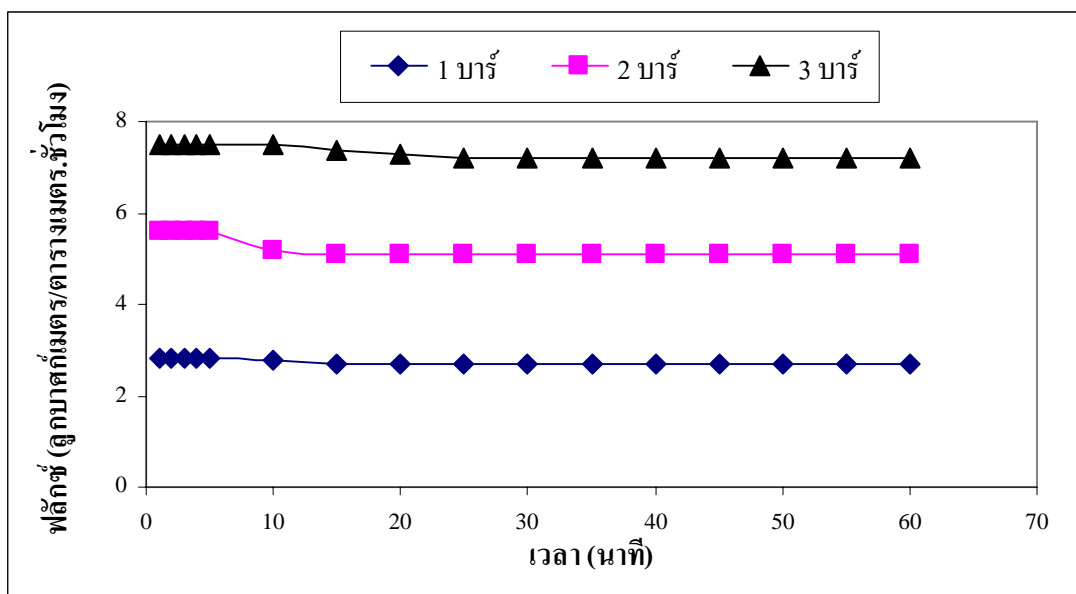
#### 4.7 การศึกษาคุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่านและการกักสาร

วัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้มีการผลิตในหลายสภาวะดังที่ได้กล่าวมาเบื้องต้นและมีความแตกต่างในด้านความหนาแน่น ปริมาณรูพรุนรวมทั้งขนาดรูพรุนและความทนต่อการตัดโค้ง นอกจากนี้คุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่านและคุณสมบัติการกักสาร นับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของวัสดุพูนตัวสำหรับการนำไปใช้งานในด้านการกรอง โดยวัสดุพูนตัวที่ทำการทดลองนี้ผู้ทำการวิจัยเลือกทดสอบเฉพาะวัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิเผาแห้ง 1500°C เวลาการเผาแห้ง 1 ชั่วโมง อัตราเร็วของการเผา 300°C/H ความหนาแน่น 2.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณรูพรุนร้อยละ 41.46 ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุน 0.39 ไมครอน ความทนต่อการตัดโค้ง  $40.50 \pm 2.02$  เมกกะปาสคาล ซึ่งการเลือกวัสดุพูนตัวที่ผลิตภายใต้สภาวะนี้ เนื่องจากวัสดุพูนตัวที่ผลิตจากอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอน แม้จะให้ปริมาณความพูนตัวที่สูงกว่าแต่มีความทนต่อการตัดโค้งต่ำ อีกทั้งขนาดรูพรุนที่ได้จะมีขนาดใหญ่และการกระจายขนาดรูพรุนกว้างกว่าวัสดุพูนตัวที่ผลิตจากอนุภาคอะลูมินา 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

##### 4.7.1 คุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่าน

###### 1. การทดสอบฟลักซ์น้ำกับเวลา

ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์น้ำกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.48 ซึ่งเป็นการทดสอบฟลักซ์น้ำที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ ของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า เมื่อจับเวลาเพื่อวัดค่าฟลักซ์น้ำจนถึง 1 ชั่วโมงค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ที่ได้มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยที่ความดัน 1 และ 2 บาร์ ฟลักซ์น้ำเริ่มมีสถานะคงที่ ณ นาทีที่ 15 ในขณะที่ความดัน 3 บาร์ ฟลักซ์น้ำเริ่มมีสถานะคงที่ ณ นาทีที่ 20 และพบว่า ค่าความสามารถในการยอมให้สารไหลผ่าน (Permeability,  $P$ ) เท่ากับ  $2.26$  ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร  $\times$  ชั่วโมง  $\times$  บาร์ โดยคำนวณตามสมการ (2-5) ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2



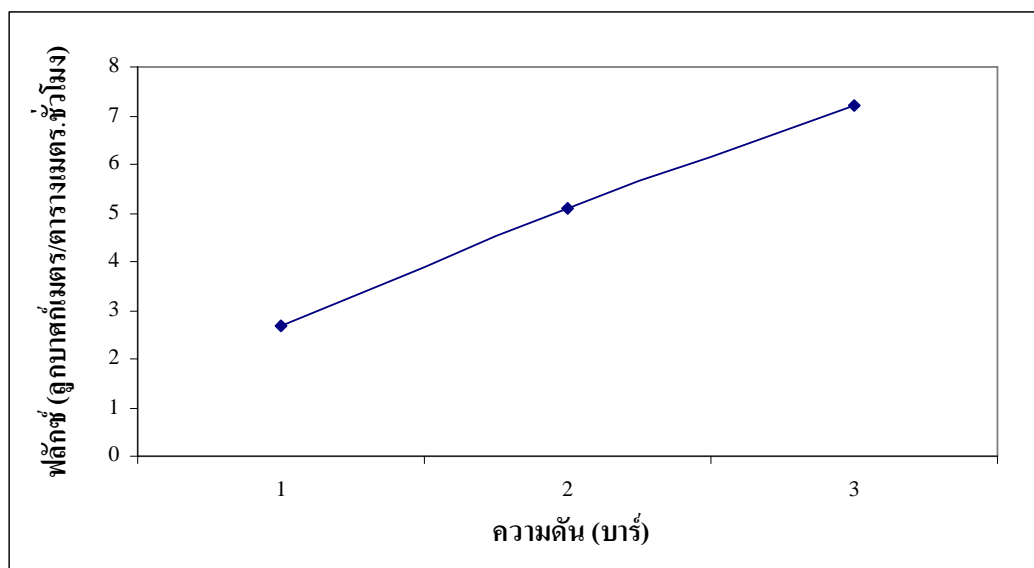
รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลาซิมน้ำกับเวลาที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์  
ของวัสดุพอรุนตัวที่ผลิต

## 2. การทดสอบพลาซิมน้ำกับความดัน

จากการทดสอบพลาซิมน้ำกับเวลา จะทราบค่าพลาซิมที่สภาวะคงที่ของแต่ละความดัน จากนั้นจึงนำค่าพลาซิมที่สภาวะคงที่มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลาซิมน้ำและความดัน จากตารางที่ 4.49 และรูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับพลาซิมน้ำ พบว่าพลาซิมน้ำจะแปรผันตรงกับความดัน

ตารางที่ 4.49 แสดงพลาซิมน้ำที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์

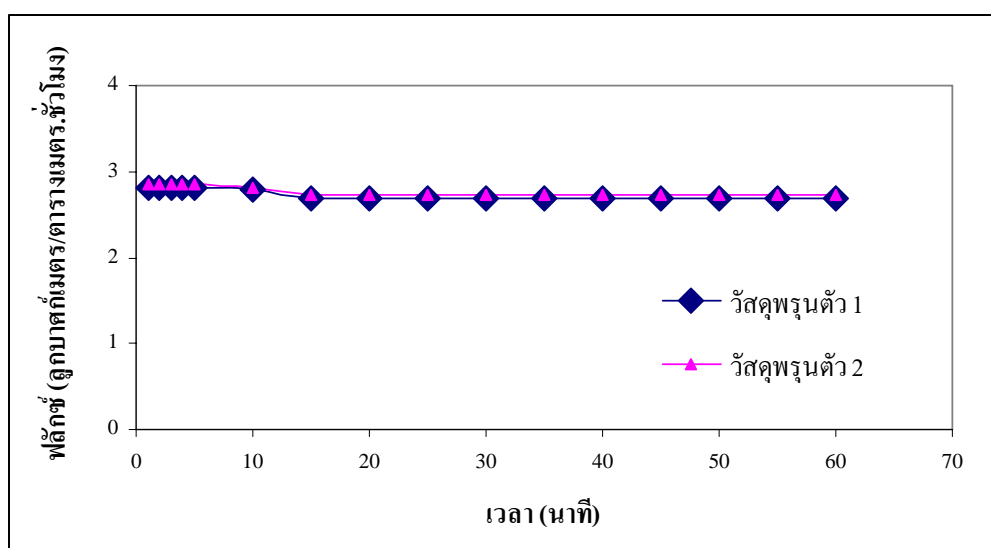
ความดัน (บาร์)	พลาซิมน้ำ (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร × ชั่วโมง)
1	2.69
2	5.47
3	7.20



รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและฟลักซ์น้ำของวัสดุพูนตัวที่ผลิต

### 3. การทดสอบซ้ำ

เพื่อให้มั่นใจว่าวัสดุพูนตัวที่ทำการผลิตภายใต้สภาวะเดียวกัน แต่ผลิตไม่พร้อมกันยังคงให้ฟลักซ์น้ำเช่นเดิม ดังนั้น ผู้วิจัยจึงผลิตวัสดุพูนตัวโดยใช้สภาวะเดิมแล้วทำการทดสอบฟลักซ์น้ำที่ความดัน 1 บาร์ อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที พบว่า ค่าฟลักซ์น้ำของวัสดุพูนตัวมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.50 แสดงฟลักซ์น้ำของวัสดุพูนตัว 2 ชั้นที่ผลิตในสภาวะเดียวกันแต่ผลิตคนละครั้ง

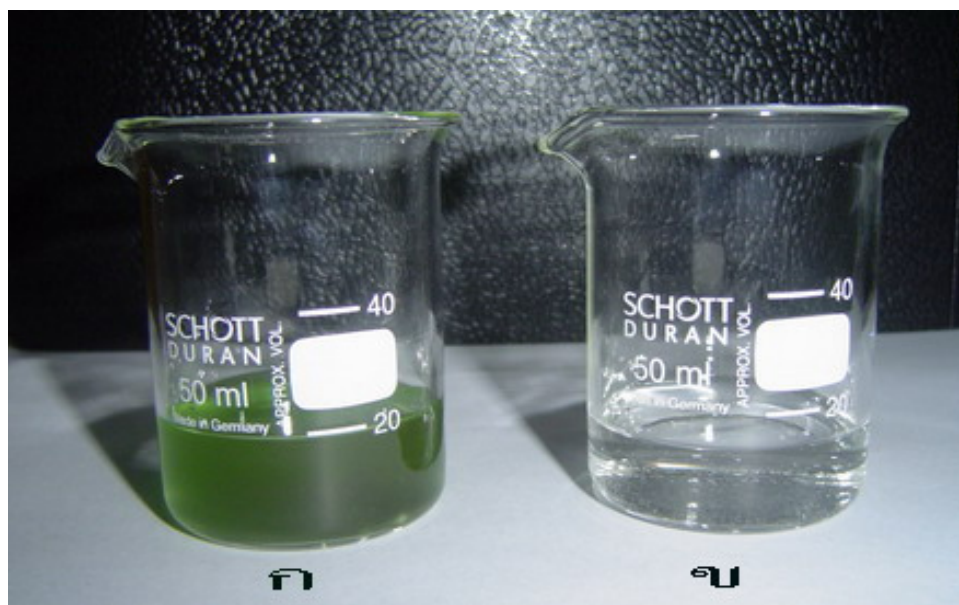
#### 4.7.2 คุณสมบัติในการกักสาร

สาหร่าย (Algae) คือ เป็นสิ่งมีชีวิตพวกยูคาริโอติกเซลล์ (Eucaryotic cell) หรือสิ่งมีชีวิตที่นิวเคลียสภายในเซลล์มีเยื่อหุ้ม มีไรโบโซม สาหร่ายเป็นพืชชั้นต่ำไม่มีส่วนที่เป็นราก ลำต้นและใบที่แท้จริง มีขนาดตั้งแต่เล็กมากมีเซลล์เดียว ไปจนถึงขนาดใหญ่ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมาก อาจเป็นเส้นสายหรือมีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูงที่อาศัยอยู่ในน้ำเป็นส่วนใหญ่ แต่บางชนิดพบในดิน ก้อนหินชื้น ๆ หรือในบ่อน้ำร้อน มีสารรงควัตถุหลัก 3 ชนิด คือ คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll), คาโรทีนอยด์ (Carotenoid) และไฟโคบิลิน (Phycobilin) ส่วนใหญ่จะมีสีเขียว (ฉัตรชัย ปรีชา, www, 2007)

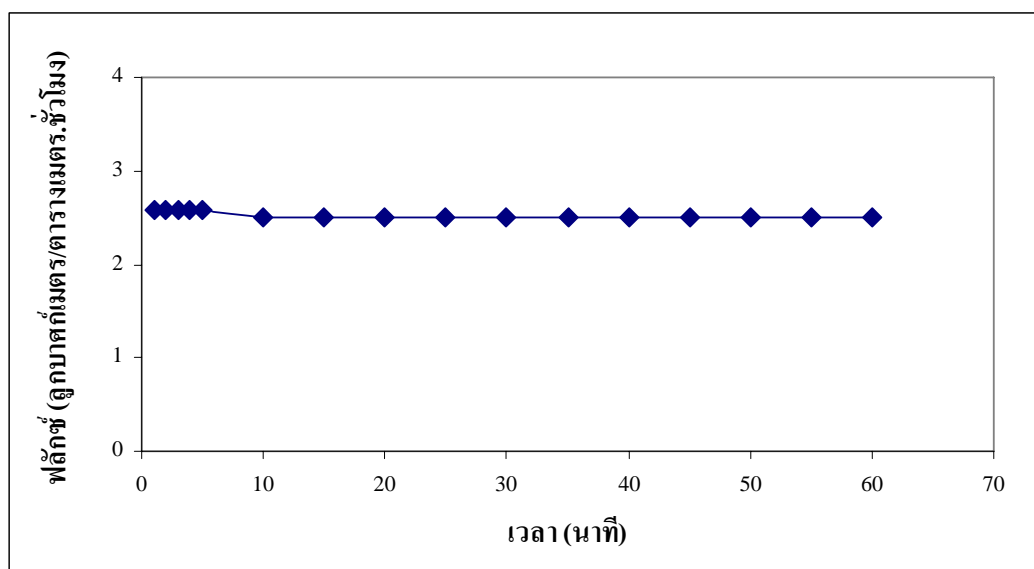
ในการกรองผู้วิจัยเลือกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue-alga, cyanobacterium) ซึ่งอยู่ในอาณาจักรมอเนอรา (monera) คิวซันไซยาโนไฟตา (cyanophyta) คลาสไซยาโนไฟซีอี (cyanophyceae) ออรัเคอร์ ออสซิลเลโทเรียล (oscillatoriales) จินัสโนสตอก (nostoc) (ฉัตรชัย ปรีชา, www, 2007)

แม้ในปัจจุบันสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากประโยชน์ในการใช้งาน เช่น ผลิตเป็นปุ๋ยชีวภาพและใช้เป็นแหล่งอาหารแก่พืชโดยเฉพาะข้าว เพิ่มไนโตรเจนให้กับดิน นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดยังสามารถนำมาผลิตเป็นอาหารได้ แต่อย่างไรก็ตามสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว ในเวลาอันสั้นทำให้มีสาหร่ายในปริมาณมหาศาล จนทำให้แหล่งน้ำนั้น ๆ เปลี่ยนสีไปและมักจะทำให้สัตว์น้ำตาย เนื่องจากการอุดตันของสาหร่ายบริเวณเหงือกหรือทำให้น้ำขาดออกซิเจนโดยเฉพาะในตอนกลางคืน นอกจากนี้ทำให้ น้ำเปลี่ยนสีแล้ว ยังสร้างสารประกอบทางเคมีที่ทำให้โคลนและน้ำมีกลิ่นคาว (Shrim zone, www, 2003) นอกจากนี้มีหลายงานวิจัยที่พบสารพิษจากสายพันธุ์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิด ได้แก่ ไมโครซิสติส (Microcystis), อะนาบินา (Anabaena), อะฟานิโซมินอน (Aphanizomenon), พิษจากสาหร่ายที่มีผลกระทบต่อระบบประสาท เรียกว่า "Neurotoxin" มีผลกระทบต่อตับเรียกว่า "Hepatotoxins" รวมทั้ง สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน จินัสโนสตอก (ธิดารัตน์ น้อยรักษา, www, 2543) ที่ผู้วิจัยได้เลือกนำมากรองด้วยวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นด้วย

สาหร่ายโนสตอกที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเฉลี่ย 3 ไมครอน ความเข้มข้น 1.87 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นของสาหร่ายวัดโดยการคำนวณน้ำหนักแห้งที่เหลือหลังอบของน้ำสาหร่ายจำนวน 1 ลิตร นำมาทดสอบการกักกันสารโดยใช้ความดัน 1 บาร์ อัตราการไหล 1 ลิตร/นาที อุณหภูมิ 25°C จากนั้นนำเพอมีเอทที่เวลาต่าง ๆ ไปวิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่หลุดออกมาเพื่อทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์รีเจคชั่น



รูปที่ 4.51 (ก) แสดงน้ำสาหร่ายที่ใช้ในการกรอง (ข) แสดงน้ำสาหร่ายที่ผ่านการกรองสาหร่าย  
นอสตอกออกไป และ (ค) แสดงสาหร่ายที่วัสดุพรมตัวไม่สามารถกักกันไว้ได้



รูปที่ 4.52 แสดงเพอมีเอทฟลักซ์ของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้น เมื่อใช้สำหรับายนอสตอกความเข้มข้น 1.87 กรัม/ลิตร ที่ความดัน 1 บาร์

จากรูปที่ 4.51 แสดงภาพของสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการกรองและสี่ของสี่เหลี่ยม ที่ผ่านการกรองรวมทั้งปริมาณสารที่หลุดออกมาขณะทำการกรองหรือไม่สามารถกรองได้ ซึ่งจากการทดลองพบว่า วัสดุพูนตัวสามารถกักกันสารนอสตอกไว้ได้จริงแต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกักกันยังไม่สูงนักเพียง 89.7 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

จากรูปที่ 4.52 พบว่า ในระยะแรกที่ทำการกรองค่าฟลักซ์น้ำที่ได้จะมีค่าสูงและค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ โดยค่าฟลักซ์น้ำจะแปรผันตรงกับความดัน สอดคล้องกับงานวิจัยของปฏิมา เทพทยาน (2542) เมื่อทำการจับเวลาเพื่อวัดค่าฟลักซ์น้ำจนถึง 1 ชั่วโมงค่าฟลักซ์น้ำบริสุทธิ์ที่ได้มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยที่ความดัน 1 บาร์ ฟลักซ์น้ำเริ่มมีสภาวะคงที่ ณ นาทีที่ 10 โดยวัสดุพูนตัวที่ผลิตได้มีเพอมีเอทฟลักซ์ของสารนอสตอกประมาณ 2.52 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร  $\times$  ชั่วโมง และเปอร์เซ็นต์รีเจกชันทดสอบที่ 1 บาร์ เท่ากับ 89.7

#### 4.8 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุพูนตัวทางการค้า

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติด้านความหนาแน่น ปริมาตรพูน การกระจายตัวของขนาดของพูนและโครงสร้างจุลภาค ของวัสดุพูนตัวทางการค้าของบริษัท LPE มีลักษณะเป็นท่อกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1 เซนติเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 เซนติเมตรและมีความหนา 0.2 เซนติเมตร

#### 4.8.1 การศึกษาความหนาแน่นและปริมาณรูพรุน

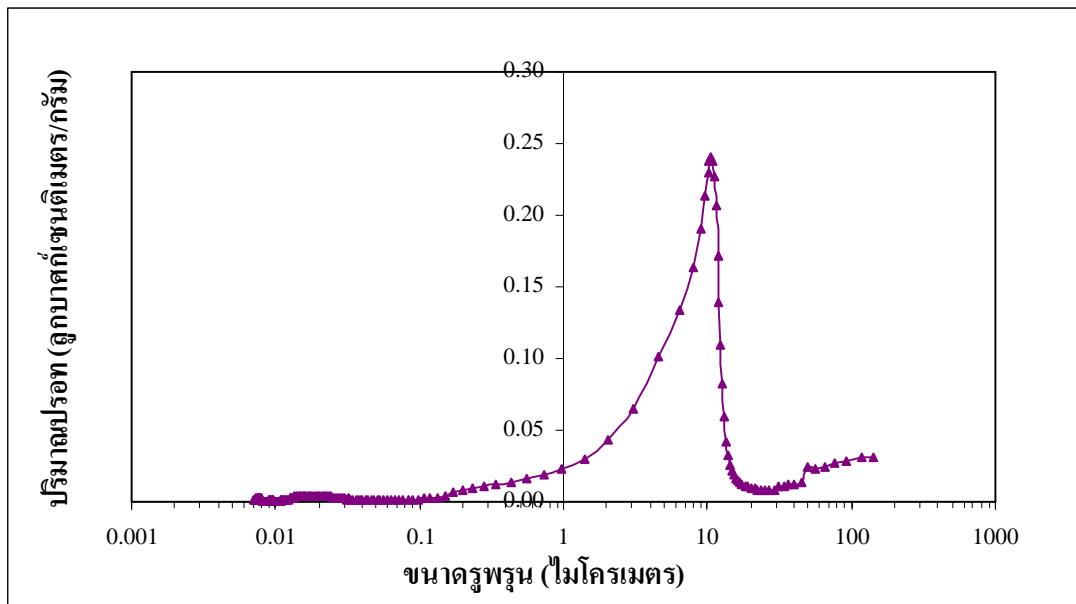
ตารางที่ 4.50 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุพูนตัวทางการค้าของบริษัท LPE

ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณ รูพรุน (ร้อยละ)
LPE tube	3.18	31.85

#### 4.8.2 การศึกษาการกระจายของขนาดพูนของชิ้นงาน

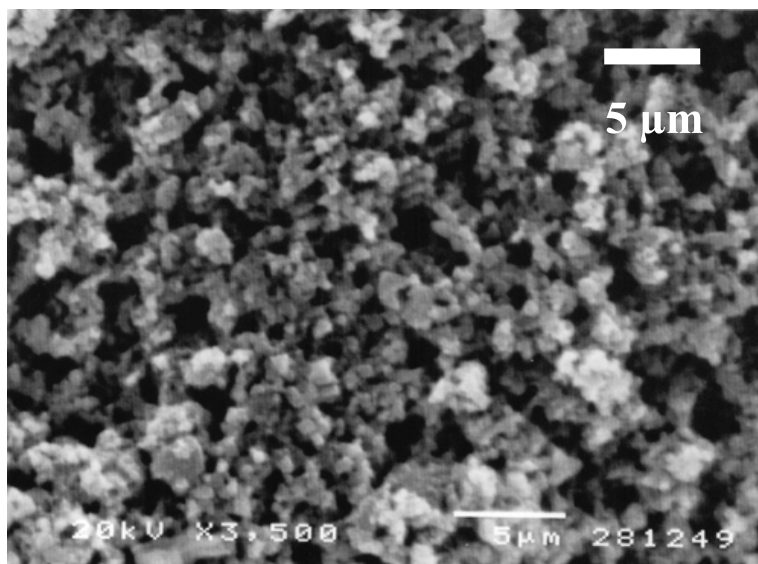
ตารางที่ 4.51 แสดงค่าเฉลี่ยขนาดพูนของวัสดุพูนตัวทางการค้าของบริษัท LPE

ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยขนาดพูน (ไมโครเมตร)
LPE tube	10.60

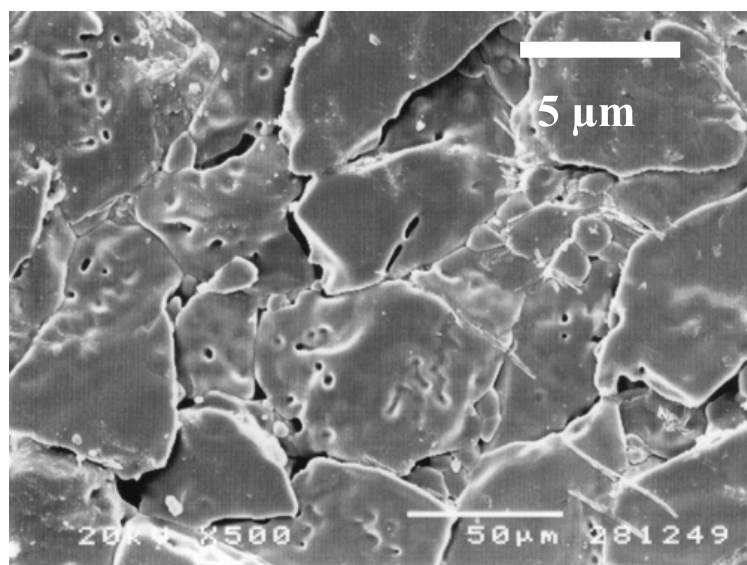


รูปที่ 4.53 แสดงการกระจายตัวของขนาดพูนของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE

#### 4.8.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

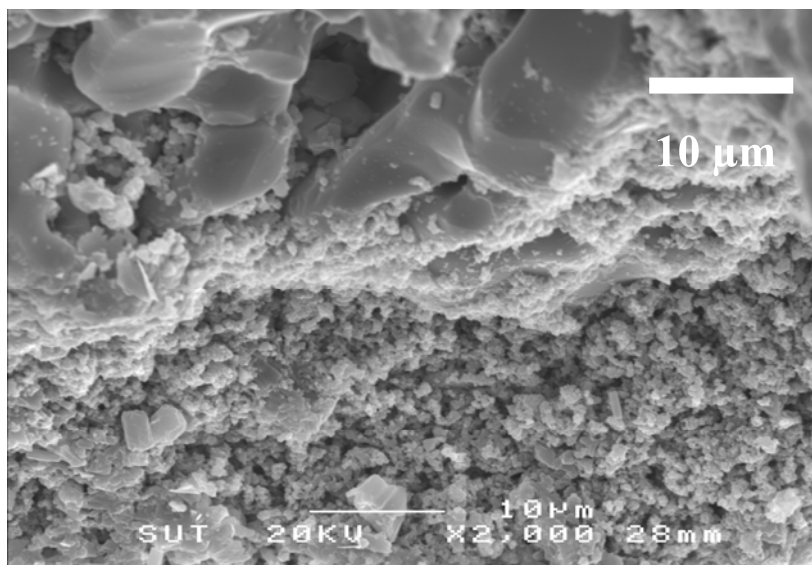


รูปที่ 4.54 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวด้านในของวัสดุพรุนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE



รูปที่ 4.55 โครงสร้างจุลภาคขบริเวณผิวด้านนอกของวัสดุพรุนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE





รูปที่ 4.56 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวจากรอยแตกของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE

รูปที่ 4.54 ถึง 4.56 แสดงภาพถ่ายวัสดุพูนตัว ผิวด้านใน ผิวด้านนอกและผิวจากรอยแตก ของชิ้นงาน ตามลำดับ พบว่า ผิวด้านในเกรนมีลักษณะกลม มีรูพูนขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน เมื่อพิจารณาผิวด้านนอกและผิวจากรอยแตกพบว่า มีลักษณะเป็นแผ่น มีความหนาแน่นสูงและมีรูพูนขนาดเล็กอยู่ประปราย

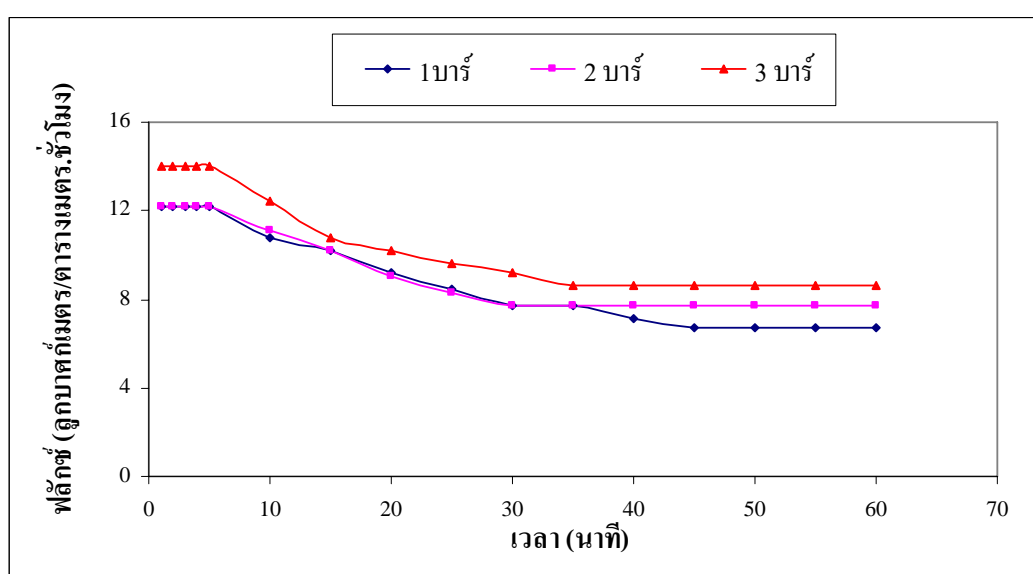
เมื่อพิจารณาจากภาพแสดงให้เห็นว่า วัสดุพูนตัวจากบริษัท LPE เป็นวัสดุพูนตัวรูปแบบท่อกลวง โครงสร้างไม่สมมาตร นั่นคือ ประกอบด้วยชั้นรองรับและชั้นสำหรับกรอง เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากผิวด้านนอกและผิวด้านในพบว่า มีขนาดของรูพูนและเกรนที่ต่างกัน โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 4.54 แสดงโครงสร้างจุลภาคผิวด้านใน พบว่า ผิวด้านในจะมีขนาดรูพูนและเกรนที่เล็กกว่า ในขณะที่ รูปที่ 4.55 และ 4.56 แสดงผิวด้านนอก อธิบายได้ว่า วัสดุพูนตัวจากบริษัท LPE ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ชั้น นั่นคือ ชั้นรองรับและชั้นผิวหรือที่เรียกว่าโครงสร้างแบบไม่สมมาตร

แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยขนาดรูพูนพบว่า ค่าเฉลี่ยขนาดรูพูนมีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Pore master mercury porosimeters เป็นการวัดทั้งตัวอย่างของชิ้นงานไม่สามารถแยกทั้งสองชั้นของวัสดุพูนตัวได้ ดังนั้น ชิ้นงานซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างสองชั้นที่มีขนาดรูพูนต่างกันมากเมื่อทำการวิเคราะห์ทั้งตัวอย่างของชิ้นงาน ไม่สามารถแยกวิเคราะห์ผิวด้านนอกหรือผิวด้านในของชิ้นงานได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถแยกให้เห็นความแตกต่างของโครงสร้างทั้งสองชั้นได้อย่างชัดเจนค่าเฉลี่ยที่ได้จึงแสดงผลของขนาดรูพูนเฉลี่ยทั้งชิ้นงาน

#### 4.8.4 คุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่าน

##### 1. การทดสอบปลั๊กซ์น้ำกับเวลา

ความสัมพันธ์ระหว่างปลั๊กซ์น้ำกับเวลาของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE ซึ่งเป็นการทดสอบปลั๊กซ์น้ำที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์พบว่า เมื่อทำจับเวลาเพื่อวัดค่าปลั๊กซ์น้ำจนถึง 1 ชั่วโมงค่าปลั๊กซ์น้ำบริสุทธิ์ที่ได้มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยที่ความดัน 1 บาร์ ปลั๊กซ์น้ำเริ่มมีสถานะคงที่ ณ นาทีที่ 45 ที่ความดัน 2 บาร์ ปลั๊กซ์น้ำเริ่มมีสถานะคงที่ ณ นาทีที่ 30 ในขณะที่ความดัน 3 บาร์ ปลั๊กซ์น้ำเริ่มมีสถานะคงที่ ณ นาทีที่ 35



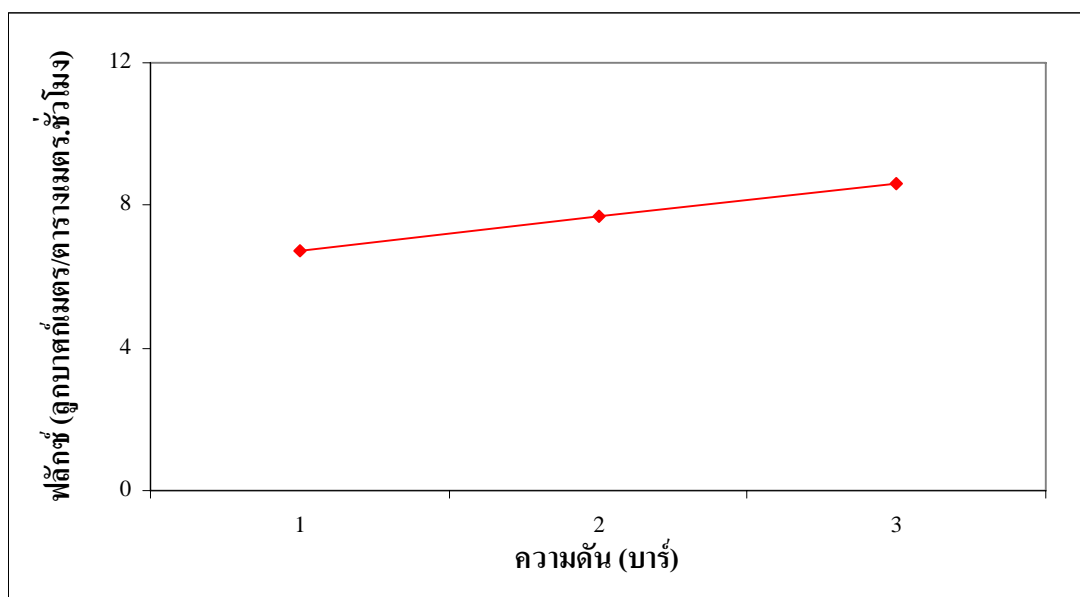
รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปลั๊กซ์น้ำกับเวลาที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ ของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE

##### 2. การทดสอบปลั๊กซ์น้ำกับความดัน

จากตารางที่ 4.52 และรูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปลั๊กซ์น้ำ พบว่า ปลั๊กซ์น้ำจะแปรผันตรงกับความดันเช่นเดียวกับวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเอง

ตารางที่ 4.52 แสดงฟลักซ์น้ำที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์

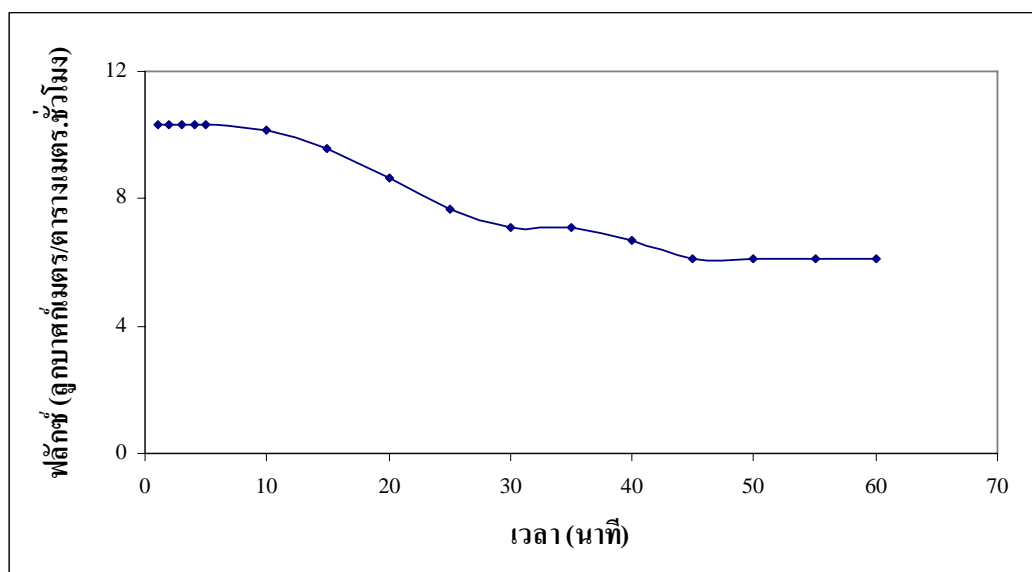
ความดัน (บาร์)	ฟลักซ์น้ำ (ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร × ชั่วโมง)
1	6.71
2	7.67
3	8.63



รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและฟลักซ์น้ำของวัสดุพูนตัวทางการค้า จากบริษัท LPE

#### 4.8.5 คุณสมบัติในการกักสาร

ทำการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.7.2 โดยใช้สาหร่ายนอสดอก ความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง คือ 1.87 กรัม/ลิตร นำมาทดสอบการกักกันสารโดยใช้ความดัน 1 บาร์ อัตราการไหล 1 ลิตร/นาที อุณหภูมิ 25°C จากนั้นนำเพอมีเอทที่เวลาต่าง ๆ ไปวิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่หลุดออกมาเพื่อทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์รีเจกชัน (% Rejection) จากการทดสอบพบว่า วัสดุพูนตัวจากบริษัท LPE มีเพอมีเอทฟลักซ์ของสาหร่ายนอสดอกประมาณ 6.14 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร × ชั่วโมงและเปอร์เซ็นต์รีเจกชันทดสอบที่ 1 บาร์ เท่ากับ 98



รูปที่ 4.59 แสดงเพอมีเอทฟลักซ์ของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE เมื่อใช้สำหรับ  
นอสตอกความเข้มข้น 1.87 กรัม/ลิตร ที่ความดัน 1 บาร์

#### 4.9 การเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองกับวัสดุพูนตัวทางการค้า

ในหัวข้อนี้จะกล่าวเปรียบเทียบระหว่างวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองด้วยอนุภาคอะลูมินา ขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและ 5 ไมครอน สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงกับวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE

##### 4.9.1 ความหนาแน่นและปริมาณรูพรุน

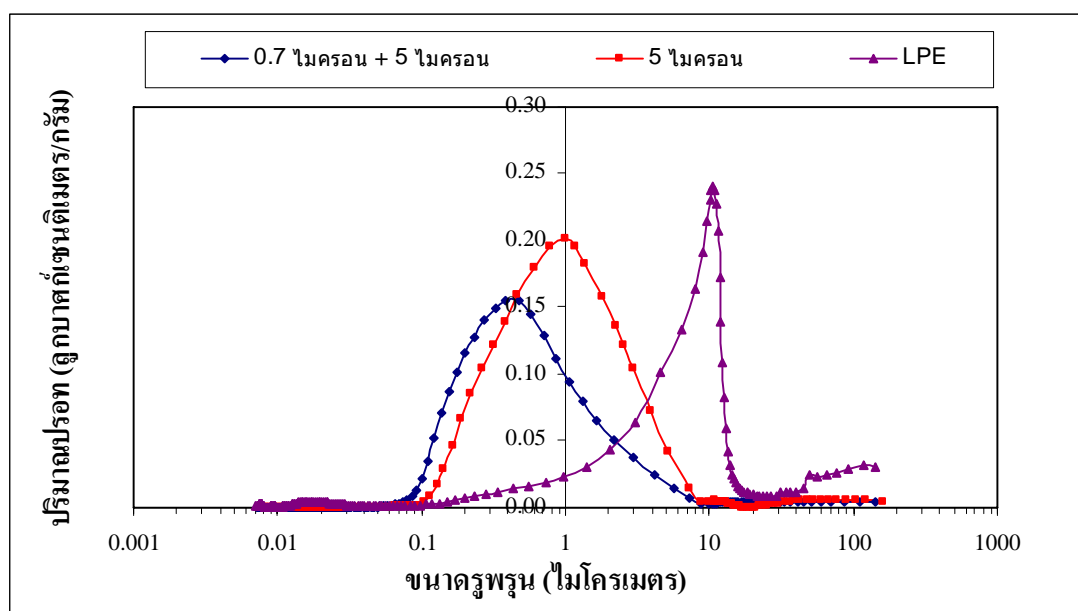
ตารางที่ 4.53 เปรียบเทียบความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองกับวัสดุพูนตัวทางการค้าของบริษัท LPE

ตัวอย่าง	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ปริมาณ รูพรุน (ร้อยละ)
0.7 ผสมกับ 5	50:50	2.53	41.46
5	100	2.10	52.50
LPE	-	3.18	31.85

ความหนาแน่นจากวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองทั้งสองขนาดต่างก็น้อยกว่าวัสดุพูนตัวทางการค้า ในทางกลับกันค่าปริมาณพูนที่ได้จึงมากกว่า

#### 4.9.2 ค่าเฉลี่ยและการกระจายขนาดพูน

ค่าเฉลี่ยของขนาดพูนของวัสดุพูนตัวที่ผลิตจากอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอน ผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและวัสดุพูนตัวที่ผลิตจากอนุภาคอะลูมินาขนาด 5 ไมครอนโดยใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่า 0.39 และ 1.02 ไมครอน ตามลำดับ และวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE มีค่าเฉลี่ยของขนาดพูน เท่ากับ 10.60 ไมครอน จากภาพการกระจายขนาดพูนของอนุภาคอะลูมินาที่ผลิตขึ้นเองเปรียบเทียบกับภาพการกระจายขนาดพูนของวัสดุทางการค้า พบว่าวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองจากอนุภาคอะลูมินาทั้งสองขนาดมีการกระจายขนาดพูนค่อนข้างสม่ำเสมอและมีค่าเฉลี่ยขนาดพูนที่เล็กกว่าวัสดุพูนตัวจากบริษัท LPE



รูปที่ 4.60 แสดงผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาต่อการกระจายตัวของขนาดพูนเปรียบเทียบระหว่างวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองและวัสดุพูนตัวจากบริษัท LPE

#### 4.9.3 ความทนต่อการตัดโค้ง

วัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองมีความทนต่อการตัดโค้งค่าต่าง ๆ ตามสภาวะการผลิต เช่น ขนาดอนุภาคอะลูมินา ปริมาณสารเติมแต่งและอุณหภูมิการเผา แต่วัสดุพูนตัวที่เลือกนำมาทดสอบคุณสมบัติในการยอมให้น้ำไหลผ่านและการกักกันสารคือวัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินา

ขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิเผาผนึก 1500°C เวลาการเผา 1 ชั่วโมง มีค่าความทนต่อการตัดโค้ง 32 เมกะปาสคาล อย่างไรก็ตามเนื่องจากวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE เป็นวัสดุที่สั่งซื้อมาในราคาสูงและมีจำนวนไม่มากจึงไม่สามารถที่จะทดสอบความทนต่อการตัดโค้งได้ อย่างไรก็ตามวัสดุพูนตัวที่ผลิตได้หากพิจารณาขนาดรูพูนเป็นเกณฑ์จะมีขนาดรูพูนอยู่ในช่วงเมกะโครพอร์ เมื่อจำแนกกระบวนการกรองโดยอาศัยความดันที่ให้กับสารละลายเป็นแรงขับเคลื่อนอยู่ในการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันซึ่งใช้ความดัน 0.5-2 บาร์ ดังนั้น เมื่อทำการทดลองในสภาวะการใช้งานจริงในส่วนของคุณสมบัติการยอมให้น้ำไหลผ่านจึงทำการทดลองที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ พบว่า วัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองและวัสดุพูนตัวทางการค้าสามารถใช้งานได้จริง ณ ความดันดังกล่าว

#### 4.9.4 การทดสอบฟลักซ์น้ำกับเวลา

เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์น้ำต่อเวลาวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองและวัสดุพูนตัวทางการค้า พบว่า วัสดุพูนตัวทางการค้ามีค่าฟลักซ์น้ำ ณ ความดันต่าง ๆ สูงกว่า เนื่องจากค่าเฉลี่ยขนาดรูพูนมีค่ามากกว่า อีกทั้งค่าการกระจายขนาดรูพูนของชิ้นงานมีค่าสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์น้ำกับเวลาของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นพบว่า ค่าฟลักซ์น้ำ ณ เวลาต่าง ๆ จะมีค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่วัสดุพูนตัวทางการค้าค่าฟลักซ์น้ำจะแตกต่างกันอย่างมาก ณ เวลาต่าง ๆ และใช้เวลาเกิดสภาวะคงที่ของฟลักซ์นานกว่าวัสดุพูนตัวที่ผลิตได้

#### 4.9.5 คุณสมบัติในการกักสาร

วัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเองและวัสดุพูนตัวทางการค้ามีค่าการกักสารเท่ากับ 89.7 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การที่วัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE มีค่าการกักกันสารสูงกว่า เนื่องจากวัสดุพูนตัวทางการค้านั้นมีการผลิตด้วยโครงสร้างแบบไม่สมมาตร นั่นคือ มีชั้นรองรับเพื่อเป็นโครงสร้างและทำการเคลือบผิวด้านในของท่อกลวงเพื่อใช้เป็นชั้นกรอง โดยจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคพบว่า ชั้นที่ทำการเคลือบไว้ด้านในของท่อกลวงมีขนาดรูพูนเล็กมาก ดังนั้น จึงเป็นส่วนที่สามารถดักจับสาหร่ายนอสตอกได้เป็นอย่างดี

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการผลิตวัสดุพอร์ซิวรูปแบบทอกลวงด้วยการขึ้นรูปแบบรีด โดยศึกษา ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูป ชนิดสารเติมแต่งที่ให้ลักษณะเนื้อส่วนผสมที่เหมาะสม ศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมินาและสารเติมแต่งที่มีต่อคุณสมบัติด้านความหนาแน่น ปริมาณรูพอร์ซิว ค่าเฉลี่ยขนาดรูพอร์ซิวและความทนต่อการตัด โคน้ำ รวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติด้านการกรองบางประการของวัสดุพอร์ซิวที่ผลิตขึ้นเปรียบเทียบกับวัสดุพอร์ซิวทางการค้า มีข้อสรุปงานวิจัยดังนี้

1. สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส สามารถนวดเข้ากับผงอะลูมินาได้ดี ลักษณะของเนื้อส่วนผสมสามารถนวดเข้าด้วยกันเป็นก้อนไม่ติดภาชนะผสม มีการยึดเกาะและความยืดหยุ่นตัว สามารถขึ้นรูปวัสดุพอร์ซิวด้วยเครื่องรีดแบบ มีลักษณะเป็นทอกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 เซนติเมตร, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.1 เซนติเมตรและมีความหนา 0.45 เซนติเมตร

2. ปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการขึ้นรูปแบบรีดแบบ เพื่อให้ได้วัสดุพอร์ซิวรูปแบบทอกลวงรูปได้ดี ปริมาณน้ำที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 25-28 โดยน้ำหนักอะลูมินา

3. การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคอะลูมินา พบว่า ขนาดอนุภาคมีผลต่อความหนาแน่น ปริมาณความพอร์ซิวและความทนต่อการตัด โคน้ำ เมื่อขนาดอนุภาคอะลูมินามีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานและความทนต่อการตัด โคน้ำจะลดลง ในทางกลับกันค่าปริมาณพอร์ซิวที่ได้จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า ขนาดอนุภาคอะลูมินามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยขนาดรูพอร์ซิวมากกว่าสารเติมแต่ง โดยการเพิ่มขนาดอนุภาคอะลูมินาจะส่งผลให้มีการกระจายตัวในช่วงขนาดรูพอร์ซิวใหญ่มากขึ้นและค่าเฉลี่ยขนาดรูพอร์ซิวมีขนาดใหญ่ขึ้น

4. การศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งพบว่า ชนิดและปริมาณสารเติมแต่งมีผลต่อความหนาแน่น ปริมาณความพอร์ซิวและความทนต่อการตัด โคน้ำ แต่มีผลต่อค่าเฉลี่ยขนาดรูพอร์ซิวเพียงเล็กน้อย โดยพบว่า สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสให้ค่าเฉลี่ยขนาดรูพอร์ซิวใหญ่ที่สุดและให้ปริมาณความพอร์ซิวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และโพลีเอทิลีนไกลคอลปริมาณเท่ากัน

5. การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาผนึก พบว่า อุณหภูมิการเผามีผลต่อค่าความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน ค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนและความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงาน โดยการเพิ่มอุณหภูมิการเผาส่งผลให้ปริมาณความหนาแน่น ความทนต่อการตัดโค้งของชิ้นงานสูงขึ้น ในทางกลับกันปริมาณรูพรุนของชิ้นงานลดลง นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกส่งผลให้การกระจายขนาดรูพรุนและค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนลดลง

6. การศึกษาอัตราเร็วของการเผา พบว่า การเพิ่มอัตราเร็วของการเผา ส่งผลให้ปริมาณความหนาแน่นลดลง ในทางกลับกันปริมาณรูพรุนของชิ้นงานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกส่งผลให้การกระจายขนาดรูพรุนและค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนลดลง

7. การศึกษาเวลาการเผาแช่ พบว่า การเพิ่มเวลาในการเผาแช่ส่งผลให้ปริมาณความหนาแน่น การกระจายขนาดรูพรุนและค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนลดลง ในทางกลับกันปริมาณความพรุนตัวสูงขึ้น

8. เพื่อทดสอบการใช้งานของวัสดุพูนตัวที่ผลิตได้ จึงเลือกวัสดุพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาด 0.7 ไมครอนผสมกับ 5 ไมครอน ปริมาณชนิดละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ใช้สารเติมแต่งชนิดคาร์บอกซิเมทิล เซลลูโลส ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1500°C เวลาการเผาแช่ 1 ชั่วโมง นำไปทดสอบการใช้งานด้านการกรองเบื้องต้นพบว่า ฟลักซ์น้ำจะแปรผันตรงกับความดัน โดยที่ความดัน 1 บาร์ ฟลักซ์น้ำของวัสดุพูนตัวเท่ากับ 2.69 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร × ชั่วโมง ค่าความสามารถในการยอมให้สารไหลผ่าน เท่ากับ 2.26 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร × ชั่วโมง × บาร์และประสิทธิภาพในการกักกันเท่ากับ 89.7 เปอร์เซ็นต์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงและพัฒนาขั้นต่อไปได้ดังนี้

1. ในงานวิจัยนี้เป็นการผลิตวัสดุพูนตัวรูปแบบท่อกลวงโครงสร้างสมมาตร ควรจะมีขนาดรูพรุนสม่ำเสมอตลอดชิ้นงาน แต่ในการวิจัยพบว่า วัสดุพูนตัวที่ผลิตได้มีค่าการกระจายขนาดรูพรุนค่อนข้างกว้าง ดังนั้น การเคลือบผิวของวัสดุพูนตัวอีกชั้นด้วยอนุภาคอะลูมินาขนาดเล็กกว่าด้วยวิธีจุ่มแบบ หรือเลือกผลิตวัสดุพูนตัวโครงสร้างไม่สมมาตร นั่นคือ มีชั้นรองรับและชั้นกรอง จะช่วยให้คุณสมบัติในการใช้งานด้านการกรองสมบูรณ์มากขึ้น

2. การเลือกขนาดอนุภาคอะลูมินาที่หลากหลายมากกว่างานวิจัยนี้ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อหาค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนที่หลากหลายและสามารถเลือกใช้งานได้มากขึ้น

3. อาจเลือกศึกษาสารเติมแต่งชนิดอื่นหรือศึกษาคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส ชนิดความหนืดปานกลาง (Medium viscosity) เพื่อพิจารณาปริมาณความพรุนตัวและค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนที่ให้



ว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างไร เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการผลิตวัสดุพอรันตัว เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในงานวิจัยนี้เป็นแบบ ความหนืดสูง (High viscosity) ซึ่งมีราคาแพง

4. หากต้องการค่าเฉลี่ยขนาดพอรันที่มีขนาดเล็ก การศึกษาเรื่องการบดลดขนาดอนุภาคอะลูมินา อาจเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะช่วยทำให้ลดต้นทุนในการผลิตวัสดุพอรันตัว

## รายการอ้างอิง

- เจริญพงษ์ สุขสวัสดิ์, โหมยิต พุกะทรัพย์ และ ยงค์ บำรุงวงศ์ดี. (2536). เครื่องขึ้นรูปเซรามิก. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.**
- ฉัตรชัย ปรีชา. (2007). **Plantonology** [On-line]. Available: <http://web.nkc.kku.ac.th>
- ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. (2527). **เคมีโพลีเมอร์พื้นฐาน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- เชิดชัย ตั้งอมรสฤษดิ์. (2537). การศึกษาเยื่อแผ่นไดนามิกบนเยื่อแผ่นอนินทรีย์แบบไมโครฟิลเตรชันในการกรองน้ำสัปะรด. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.**
- ณัฐพล ทรงประเสริฐ. (2536). การผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกโดยวิธี โซล-เจลเทคนิค. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.**
- ธิดารัตน์ น้อยรักษา. (2543). **มาูู้จักเพลงคั่ตอนฟัซที่เป็นอันตราย** [On-line]. Available: <http://www.bims.bbu.ac.th>
- ปฎิมา เทพายน. (2542). การผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกชนิดไมโครฟิลเตรชันโดยใช้อะลูมินา. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.**
- สุธรรม ศรีหล่มสัก. (2542). เอกสารประกอบการสอนวิชา **506206 Ceramic Fabrication** **สำนักวิชาวิศวกรรมเซรามิก : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**
- Alain, A., and Jacques, G. (1988). **US. Patent.** 4,724,078.
- American Society for Testing and Material (ASTM). (1991). Standard Test Method for water Absorption, Bulk density, Apparent Porosity, and Specific Gravity for Fired Whiteware Products. **ASTM C373-88.** New York:ASTM.
- American Society for Testing and Material (ASTM). (1996). Standard Test Method for Flexural Strength of Advance Ceramic at Ambient Temperature. **ASTM C1161-94.** New York : ASTM.
- Ananthkumar, S., Manobar, P., and Warriar, K.G.K. (2004). Effect of Boehmite and organic binders on extrusion of alumina. **Ceramics International.** 30: 837-842.

- Attaxx. (2005). **Product Membrane Specification** [On-line]. Available: <http://www.attaxx.com>
- Benito, J.M., Conesa, A., Rubio, F., and Rodriguez, M.A. (2004). Preparation and characterization of tubular ceramic membranes for treatment of oil emulsions. **Journal of The European Ceramics Society**. 25: 1895-1903.
- Chen, A.Y., Cawley, J.D. (1992). Extrusion of  $\alpha$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  – boehmite mixture. **The journal of American Ceramic Society**. 75 (3): 575-579.
- Crull. A.(1991). Prospect for the Inorganic Membrane Business. **Key Engineering Materials**. 61-61: 279-288
- Dynamic Ceramic. (2007). **Processing>Slip casting** [On-line]. Available : <http://www.dynacer.com>
- Ismail, A.F., Hassan, A.R. and Cheer, N.B. (2002). Effect of shear rate on the performance of microfiltration membrane for water desalination. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**. 24:1-11
- Isobe, T., Tomota, T., Kameshima, Y., Nakajima, A., and Okada, K. (2006). Preparation and properties alumina ceramics with oriented cylindrical pores produced by an extrusion method. **Journal of The European Ceramics Society**. 26: 957-960
- José Luis Amorós Albaro. (2000). **Uniaxial Pressing** [On-line]. Available : [http://www.euroceram.org/en/news/news\\_8\\_1.cfm](http://www.euroceram.org/en/news/news_8_1.cfm)
- Jumblez. (2007). **Extrusion** [On-line]. Available: <http://www.jumblez.com>
- Kang, S., Yu, J.S., Krunk, M. and Jaronlec, M. (2002, June). Synthesis of an ordered macroporous carbon with 62 nm spherical pores that exhibit unique gas absorption properties. [9 paragraphs]. **The Royal Society of Chemistry** [On –line serial]. Available: <http://www.rsc.org/chemcom>
- Kawamura, K., and Endo, H. (1996). Preparation of porous alumina and its bending strength. **Journal of The Ceramic Society of Japan**. 104:719-722.
- Kingery.W.D. (1960). **Introduction to Ceramics** (1st ed.). New York: Wiley
- Koch Membrane System. (2006). **Microfiltration Overview** [On-line]. Available: <http://www.kochmembrane.com>
- Kondo, Y., Hashisuka, Y., Nakahara, M. and Yokoda, K. (1993). Slip Casting of Alumina Using Porous Alumina Mold. **Journal of the ceramic Society of Japan**. 101(8): 904-906

- Lahiere, R.J. and Goodboy, K.P. (1993). Ceramic Membrane Treatment of Petrochemical Wastewater. **Environmental Progress**. 12(2): 86-96.
- Maeda, M., Suzuki, M., and Shibasaki, Y. (1997). Extrusion forming of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . **Journal of the Ceramic Society of Japan**. 105: 1249-1252.
- Michaels, S.L. (1989). Crossflow Microfiltration: The Ins and Outs. **Chemical Engineering**. 96(1): 84-91.
- Nooijen, W.F.J.M. and Muilwijk, B. (1994). Water Separate by Ceramic Micro filtration. **Filtration and Separation**. 31(3): 227-229.
- NBRP. (2005). **Algae-Resources Database** [On-line]. Available : <http://www.shigen.lab.nig.ac.jp/algae>
- Onada, G.Y., Jr. and Hench, L.L. (1978). **Ceramic Processing Before Firing**. New York : John wiley & Sons.
- Pall Corporation. (2007). **Membralox Ceramic Membrane Products** [On-line]. Available: <http://www.pall.com>
- Rahaman, M.N. (1995). **Ceramic Processing and Sintering**. New york: Marcel Dekker.
- Reed, J.S. (1995). **Principles of Ceramic Processing**. Singapore: John wily & Sons.
- Salamone, A.L., and Reed, J.S. (1979). Extrusion behavior and microstructure development in Alumina. **American Ceramic Society Bulletin**. 58 (12) : 1175-1178.
- Schuetz, J.E. (1986). Methylcellulose polymer as binders for extrusion of ceramics. **American Ceramic Society Bulletin**. 65 (12): 1556-1559.
- Shrim Zone. (2003). **Phytoplankton** [On-line]. Available: <http://www.se-ed.net/shrim>
- Sugiura, I., Nomura, H., Shinohara, N., and TSubaki, J. (1993). Effect of preparation condition on properties of green and sintered body in alumina. **Journal of The Ceramic Society of Japan**. 101 : 911-915.
- Terpastra, R.A., Bonekamp, B.C., and Vergina, H.J. (1988). Preparation, Characterization and some Properties of tubular alfa alumina ceramic membrane for microfiltration and as support for ultrafiltration and gas separation membranes. **Desalination**. 70: (395-404).
- Tiller, F.M., and Tsai, C.D. (1986). Theory of filtration of ceramics: I, slip casting. **Journal of American Ceramic Society**. 69 (12): 822-877.
- Zheng, J., Reed, J.S., and Verma. S.K. (1994). Ceramic extrusion with PEG. **American Ceramic Society Bulletin**. 73 (12): 61-66.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลทดสอบการกรอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองค่าฟลักซ์น้ำกับเวลาของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเอง  
ทดสอบที่ความดัน 1 บาร์

เวลา (นาทื)	เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่การ กรอง (ตาราง เมตร)	V (ml)	V(m <sup>3</sup> )	flux
1	0.017	0.000126	6	0.000006	2.810041
2	0.017	0.000126	6	0.000006	2.810041
3	0.017	0.000126	6	0.000006	2.810041
4	0.017	0.000126	6	0.000006	2.810041
5	0.017	0.000126	6	0.000006	2.810041
10	0.083	0.000126	29	0.000029	2.781828
15	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903
20	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903
25	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903
30	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903
35	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903
40	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903
45	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903
50	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903
55	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903
60	0.083	0.000126	28	0.000028	2.685903

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองค่าฟลักซ์น้ำกับเวลาของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเอง  
ทดสอบที่ความดัน 2 บาร์

เวลา (นาทื)	เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่การ กรอง (ตาราง เมตร)	V (ml)	V(m <sup>3</sup> )	flux
1	0.017	0.000126	12	0.000012	5.620082
2	0.017	0.000126	12	0.000012	5.620082
3	0.017	0.000126	12	0.000012	5.620082
4	0.017	0.000126	12	0.000012	5.620082
5	0.017	0.000126	12	0.000012	5.620082
10	0.083	0.000126	54	0.000054	5.179955
15	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403
20	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403
25	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403
30	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403
35	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403
40	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403
45	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403
50	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403
55	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403
60	0.083	0.000126	53	0.000053	5.08403

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองค่าฟลักซ์น้ำกับเวลาของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้นเอง  
ทดสอบที่ความดัน 3 บาร์

เวลา (นาทื)	เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่การ กรอง (ตาราง เมตร)	V (ml)	V(m <sup>3</sup> )	flux
1	0.017	0.000126	16	0.000016	7.493443
2	0.017	0.000126	16	0.000016	7.493443
3	0.017	0.000126	16	0.000016	7.493443
4	0.017	0.000126	16	0.000016	7.493443
5	0.017	0.000126	16	0.000016	7.493443
10	0.083	0.000126	78	0.000078	7.482158
15	0.083	0.000126	77	0.000077	7.386233
20	0.083	0.000126	76	0.000076	7.290308
25	0.083	0.000126	75	0.000075	7.194383
30	0.083	0.000126	75	0.000075	7.194383
35	0.083	0.000126	75	0.000075	7.194383
40	0.083	0.000126	75	0.000075	7.194383
45	0.083	0.000126	75	0.000075	7.194383
50	0.083	0.000126	75	0.000075	7.194383
55	0.083	0.000126	75	0.000075	7.194383
60	0.083	0.000126	75	0.000075	7.194383



ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองค่าเพอมีเอทฟลักซ์กับเวลาของวัสดุพูนตัวที่ผลิตขึ้น เมื่อใช้สำหรับายนอสตอกความเข้มข้น 1.87 กรัม/ลิตร ทดสอบที่ความดัน 1 บาร์

เวลา (นาทึ)	เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่การกรอง (ตารางเมตร)	V (ml)	V(m <sup>3</sup> )	flux
1	0.017	0.000126	5.5	5.5E-06	2.575871
2	0.017	0.000126	5.5	5.5E-06	2.575871
3	0.017	0.000126	5.5	5.5E-06	2.575871
4	0.017	0.000126	5.5	5.5E-06	2.575871
5	0.017	0.000126	5.5	5.5E-06	2.575871
10	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
15	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
20	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
25	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
30	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
35	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
40	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
45	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
50	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
55	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053
60	0.083	0.000126	26	0.000026	2.494053

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองค่าฟลักซ์น้ำกับเวลา ของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE  
ทดสอบที่ความดัน 1 บาร์

เวลา (นาทื)	เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่การ กรอง (ตาราง เมตร)	V (ml)	V(m <sup>3</sup> )	flux
1	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
2	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
3	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
4	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
5	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
10	0.083	0.0000628	56	0.000056	10.74361
15	0.083	0.0000628	53	0.000053	10.16806
20	0.083	0.0000628	48	0.000048	9.20881
25	0.083	0.0000628	44	0.000044	8.441409
30	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008
35	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008
40	0.083	0.0000628	37	0.000037	7.098458
45	0.083	0.0000628	35	0.000035	6.714757
50	0.083	0.0000628	35	0.000035	6.714757
55	0.083	0.0000628	35	0.000035	6.714757
60	0.083	0.0000628	35	0.000035	6.714757

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองค่าฟลักซ์น้ำกับเวลา ของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE  
ทดสอบที่ความดัน 2 บาร์

เวลา (นาทื)	เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่การ กรอง (ตาราง เมตร)	V (ml)	V(m <sup>3</sup> )	flux
1	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
2	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
3	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
4	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
5	0.017	0.0000628	13	0.000013	12.17685
10	0.083	0.0000628	58	0.000058	11.12731
15	0.083	0.0000628	53	0.000053	10.16806
20	0.083	0.0000628	47	0.000047	9.01696
25	0.083	0.0000628	43	0.000043	8.249559
30	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008
35	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008
40	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008
45	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008
50	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008
55	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008
60	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองค่าฟลักซ์น้ำกับเวลา ของวัสดุพรมตัวทางการค้าจากบริษัท LPE  
ทดสอบที่ความดัน 1 บาร์

เวลา (นาทื)	เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่การ กรอง (ตาราง เมตร)	V (ml)	V(m <sup>3</sup> )	flux
1	0.017	0.0000628	15	0.000015	14.05021
2	0.017	0.0000628	15	0.000015	14.05021
3	0.017	0.0000628	15	0.000015	14.05021
4	0.017	0.0000628	15	0.000015	14.05021
5	0.017	0.0000628	15	0.000015	14.05021
10	0.083	0.0000628	65	0.000065	12.47026
15	0.083	0.0000628	56	0.000056	10.74361
20	0.083	0.0000628	53	0.000053	10.16806
25	0.083	0.0000628	50	0.00005	9.59251
30	0.083	0.0000628	48	0.000048	9.20881
35	0.083	0.0000628	45	0.000045	8.633259
40	0.083	0.0000628	45	0.000045	8.633259
45	0.083	0.0000628	45	0.000045	8.633259
50	0.083	0.0000628	45	0.000045	8.633259
55	0.083	0.0000628	45	0.000045	8.633259
60	0.083	0.0000628	45	0.000045	8.633259

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบเพอมีเอทฟลักซ์ของวัสดุพูนตัวทางการค้าจากบริษัท LPE เมื่อใช้  
สำหรับนอสตอกความเข้มข้น 1.87 กรัม/ลิตร ทดสอบที่ความดัน 1 บาร์

เวลา (นาทีก)	เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่การ กรอง (ตาราง เมตร)	V (ml)	V(m <sup>3</sup> )	flux
1	0.017	0.0000628	11	0.000011	10.30348
2	0.017	0.0000628	11	0.000011	10.30348
3	0.017	0.0000628	11	0.000011	10.30348
4	0.017	0.0000628	11	0.000011	10.30348
5	0.017	0.0000628	11	0.000011	10.30348
10	0.083	0.0000628	53	0.000053	10.16806
15	0.083	0.0000628	50	0.00005	9.59251
20	0.083	0.0000628	45	0.000045	8.633259
25	0.083	0.0000628	40	0.00004	7.674008
30	0.083	0.0000628	37	0.000037	7.098458
35	0.083	0.0000628	37	0.000037	7.098458
40	0.083	0.0000628	35	0.000035	6.714757
45	0.083	0.0000628	32	0.000032	6.139207
50	0.083	0.0000628	32	0.000032	6.139207
55	0.083	0.0000628	32	0.000032	6.139207
60	0.083	0.0000628	32	0.000032	6.139207

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

- ธณิกานต์ ชงชัย (2549). ผลของสารเติมแต่งและขนาดอนุภาคต่อความพรุนตัวของอะลูมินา. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32., E\_E0049
- ธณิกานต์ ชงชัย (2550). **Effect of additives and particle size on extrusion porous alumina body.** Mining, Materials and Petroleum Engineering, The frontiers of technology 2007., หน้า 204-207

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวธณิกานต์ ธงชัย เกิดเมื่อวันที่ 9 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดแพร่ เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนเมธังกราวาส ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนนารีรัตน์ จังหวัดแพร่ และสำเร็จระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2547 และในปีเดียวกันได้รับทุนผู้มีผลการเรียนดีเด่น จากสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและได้รับทุนภาคิบัณฑิต จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เพื่อทำวิจัยในเรื่อง ผลของสารเติมแต่ง และขนาดอนุภาคต่อเนื้ออะลูมินาพูนตัวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีรีด

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32 เรื่อง ผลของสารเติมแต่งและขนาดอนุภาคต่อความพูนตัวของอะลูมินา และการประชุมวิชาการ Mining, Materials and Petroleum Engineering, The frontiers of technology 2007 เรื่อง Effect of additives and particle size on extrusion porous alumina body