



ผลของขนาดและกระบวนการเตรียมต่อสมบัติทางกายภาพ

และทางกลของวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส

THE EFFECT OF PARTICLE SIZE AND PROCESS ON THE PHYSICAL AND  
MECHANICAL PROPERTIES OF DENTAL MATERIALS FROM FLUE GAS  
DESULFURIZATION(FGD) GYPSUM

นางสาวกนกภรณ์ เทียนบุตร รหัสนิสิต 58365880  
นางสาวณิชฐา มหาชน รหัสนิสิต 58365910

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2561



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของขนาดและกระบวนการเตรียมต่อสมบัติทางกายภาพและทางกล  
ของวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูอิดส์

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวกนกภรณ์ เทียนบุตร รหัส 58365880  
นางสาวชนิษฐา มหาชน รหัส 58365910

ที่ปรึกษาโครงการ ดร. นพวรรณ ไม้ทอง

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2561

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ดร. นพวรรณ ไม้ทอง)

.....กรรมการ  
(ดร. วัฒนชัย เยาวรัตน์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปณัฐพงศ์ บุญนวล)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ผลของขนาดและกระบวนการเตรียมต่อสมบัติทางกายภาพและทางกล ของวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูออไรด์
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวกนกภรณ์ เทียนบุตร รหัส 58365880 นางสาวชนิษฐา มหาชน รหัส 58365910
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร. นพวรรณ ไม้ทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคและกระบวนการเตรียมต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูออไรด์ โดยผลของสมบัติทางกายภาพจะทำการศึกษาการเรียงตัวของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์ปริมาณวัฏภาคของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ผลของสมบัติทางกลทำการทดสอบความแข็งแรงต่อการทนแรงอัดของวัสดุ โดยนำไปสังเคราะห์เป็นยิปซัมทางทันตกรรม 3 รูปแบบคือ ชนิดปูนปลาสเตอร์ ชนิดเดนทัลสโตน และชนิดเดนทัลสโตนความแข็งแรงสูง จากผลการศึกษาผลของขนาดต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ โดยใช้ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร และแบบไม่แยกขนาด พบว่าการแตกตัวของผลึกแตกตัวเป็นรูปเข็มแต่ทั้งสองขนาดมีค่าการทนแรงอัดที่ต่ำ จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการเตรียมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล พบว่าการสังเคราะห์ชนิดเดนทัลสโตนมีค่าการทนแรงอัดที่มากกว่าการสังเคราะห์ในแบบอื่น เนื่องจากการเรียงตัวกันของผลึกใกล้ชิดกันมากกว่า แต่ชนิดเดนทัลสโตนความแข็งแรงสูงไม่สามารถขึ้นรูปได้ จึงเพิ่มกระบวนการสังเคราะห์โดยนำไปเผาที่บรรยากาศปกติแล้วพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ และได้เพิ่มการทดลองโดยใช้ขนาดอนุภาค 0.25-0.4 และ 0.045-0.1 มิลลิเมตร เมื่อศึกษาผลของขนาดต่อสมบัติทางกล พบว่าชนิดปูนปลาสเตอร์จะมีค่าเฉลี่ยการทนแรงอัดอยู่ที่ 1.48 และ 4.65 เมกะปาสคาล และชนิดเดนทัลสโตนจะมีค่าเฉลี่ยการทนแรงอัดอยู่ที่ 3.84 และ 5.98 เมกะปาสคาล ซึ่งพบว่าขนาดอนุภาค 0.045-0.1 มิลลิเมตร มีค่าการทนแรงอัดสูงสุด เมื่อศึกษาผลของขนาดต่อสมบัติทางกายภาพ โดยนำไปวิเคราะห์ปริมาณวัฏภาคของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตมี วัฏภาคเบต้า 33.2 เปอร์เซ็นต์ และมีวัฏภาคแอลฟา 58 เปอร์เซ็นต์ และชนิดเดนทัลสโตนมีปริมาณวัฏภาคเบต้า 34.8 เปอร์เซ็นต์ และมีวัฏภาคแอลฟา 65.2 เปอร์เซ็นต์ พบว่าชนิดเดนทัลสโตนมีปริมาณวัฏภาคแอลฟามากกว่า จึงทำให้มีค่าการทนแรงอัดมากกว่าชนิดปูนปลาสเตอร์ และอนุภาคขนาดใหญ่จะให้ความแข็งแรงได้น้อยกว่าอนุภาคขนาดเล็ก

Project Title The Effect Of Particle Size And Process On The Physical And  
Machanical Properties Of Dental Materials From Flue Gas  
Desulfurization (FGD) Gypsum

Provider Miss Kanokporn Tianboot ID no. 58365880  
Miss Kanitta Mahachon ID no. 58365910

Adviser Dr. Noppawan Motong

Major Chemical Engineering

Department Industrial Engineering

Year 2018

---

### Abstract

This project is studied about the effect of particle size and process on the physical and mechanical properties of dental materials from flue gas desulfurization (FGD) gypsum. The effect of physical properties is studied on the crystal alignment by electron microscope and calcium sulfate hemihydrate is analyzed by x-ray diffraction. The effect of mechanical properties is studied about compressive strength of the materials by synthesizing three types of dental gypsum including Plaster, Dental stone and high-strength dental stone. The results of the effect size on mechanical and physical properties by using particle size greater than 0.4 mm and non-separated study found that the crystals disintegrate like a needle, but both sizes of crystal are low compressive strength. Then, there was study the effect of the process on physical and mechanical properties and found that dental stone synthesis has more compressive strength than other synthesizers because the alignment of the crystals more closely together but high-strength dental stone type is not forming. So, there is increasing synthetic process to burn and found that it can be forming and expand the experiments by using the particle sizes from 0.25 to 0.4 and 0.045 to 0.1 mm. Studying the effect of the size of the mechanical properties found that plaster has an average compressive strength at 1.48 and 4.65 MPa and dental stone has an average compressive strength at 3.84 and 5.98 MPa which found that the maximum compressive strength particle size is 0.045 to 0.1 mm. when studying the effect of size on physical properties by analyzing quantitative phase of calcium sulfate hemihydrate found that the plaster type has beta phase 33.2 percent, and alpha phase 58 percent, and the dental stone has beta phase 34.8 percent, and alpha phase 65.2 percent which found that dental stones had more alpha phase quality. As a result, the compressive strength is higher than plaster type and large particles will give the strength less than small particles.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่ายโดยเฉพาะ ดร. นพวรรณ โหม่ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และนั้ฐกร มั่นภักดี พี่ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนะนำวิธีแก้ไข้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ทุกขั้นตอนเพื่อให้การเขียนโครงการปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากที่สุด และต้องขอขอบคุณ คณะกรรมการปริญญาานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปณั้ฐพงศ์ บุญนวล และ ดร. วัฒนชัย เยาวรัตน์ ที่กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไข้ข้อบกพร่องของปริญญาานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมเคมีและห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมวัสดุที่คอยให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการเข้าใช้สถานที่และเครื่องมือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา ตลอดจนผู้มีส่วนช่วยเหลือสนับสนุนด้านต่างๆทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย ผู้ดำเนินโครงการหวังว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจด้านการผลิตวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูออไรด์ไม่มากนักน้อย

ผู้ดำเนินโครงการ

นางสาวกนกภรณ์ เทียนบุตร

นางสาวชนิษฐา มหาชน

พฤษภาคม 2562

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตในการดำเนินงาน.....	2
1.3.1 สถานะการเตรียมวัสดุทางทันตกรรม.....	2
1.4 สถานที่ในการดำเนินการทำโครงการ.....	3
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินการทำโครงการ.....	3
1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.2.1 ยิปซัมสังเคราะห์.....	18
2.2.2 วัสดุจากยิปซัมทางทันตกรรม.....	21
2.2.3 การเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตกับน้ำ.....	28
2.2.4 การล้างยิปซัมฟลูแก๊ส.....	29
2.2.5 การอบแห้งยิปซัมฟลูแก๊ส.....	29
2.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรง (Indian Dental Academy, 2557).....	29
2.2.7 การทดสอบผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรม.....	30

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	37
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี .....	37
3.1.1 สารเคมี.....	37
3.1.2 อุปกรณ์ .....	37
3.2 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส.....	38
3.3 แผนผังการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส.....	39
3.4 แผนการทดลอง .....	40
3.4.1 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส ชนิดปูนพลาสติก.....	40
3.4.2 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส ชนิดเด็นทัลสโตน .....	41
3.4.3 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส ชนิดเด็นทัลสโตนความแข็งแรงสูง .....	42
3.5 ขั้นตอนการทดลอง .....	43
3.5.1 การกำหนดขนาดยิปซัม .....	43
3.5.2 การล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส.....	43
3.5.3 การกำหนดขนาดของอนุภาคที่เหมาะสม .....	43
3.5.4 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติก.....	43
3.5.5 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตน .....	44
3.5.6 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง .....	44
3.5.7 การทดลองเพิ่มเติม .....	44
3.6 ทดสอบสมบัติของชิ้นงาน .....	44
3.6.1 วิเคราะห์หาวัฏภาคแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต .....	44
3.6.2 การทดสอบความทนแรงอัด.....	45
3.6.3 การศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน.....	45
3.6.4 วิเคราะห์หาวัฏภาคของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	46

4.1	ศึกษาผลของขนาดของยิปซัมฟลูแก๊สที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกล.....	46
4.1.1	ขนาดผลึกของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการขึ้นรูป.....	48
4.1.2	ผลของขนาดต่อการเรียงตัวของผลึกหลังขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊ส.....	49
4.1.3	ผลของขนาดต่อค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้จากยิปซัมทางทันตกรรม.....	50
4.2	ศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละรูปแบบที่มีผลต่อ คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลจากยิปซัมฟลูแก๊ส.....	52
4.2.1	กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรม.....	52
4.3	การปรับปรุงคุณสมบัติยิปซัมทางทันตกรรม.....	57
4.3.1	ปรับปรุงคุณสมบัติยิปซัมทางทันตกรรมที่ได้จากการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3.....	57
4.3.2	ทดลองเพิ่มเติมโดยการลดขนาดอนุภาคของยิปซัม.....	60
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	62
5.1.1	ศึกษาผลของขนาดของยิปซัมฟลูแก๊สที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและ คุณสมบัติทางกล.....	62
5.2	ศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละรูปแบบที่มีผลต่อ คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลจากยิปซัมฟลูแก๊ส.....	62
5.2.1	กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมทั้งสามรูปแบบ.....	62
5.3	การปรับปรุงคุณสมบัติยิปซัมทางทันตกรรม.....	63
5.3.1	ปรับปรุงคุณสมบัติยิปซัมทางทันตกรรมที่ได้จากการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3.....	63
5.3.2	ทดลองเพิ่มเติมโดยการเพิ่มขนาดของยิปซัมอีก 2 ขนาด.....	63
5.4	ข้อเสนอแนะ.....	64
	เอกสารอ้างอิง.....	65
	ภาคผนวก ก.....	68
	ภาคผนวก ข.....	70
	ภาคผนวก ค.....	74
	ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....	78



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างยิปซัมและกรดซัลฟิวริกที่มีผลต่อองค์ประกอบ ลักษณะและอัตราส่วนของการเปลี่ยนไปของยิปซัมดีไฮเดรชัน .....	6
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติและองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในยิปซัมธรรมชาติและยิปซัม ฟลูก้าซที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก .....	7
ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนปลาสเตอร์ก่อนและหลังการเก็บรักษาที่สภาวะต่างๆ .....	9
ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนการผสมน้ำต่อยิปซัมที่เหมาะสมต่อการขยายตัวของยิปซัมทาง ทันตกรรมแต่ละประเภท.....	14
ตารางที่ 2.5 ค่าการทนแรงอัดของยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภทโดยใช้ การสังเคราะห์สองวิธี .....	15
ตารางที่ 2.6 คุณลักษณะของยิปซัมสังเคราะห์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง.....	20
ตารางที่ 2.7 คุณลักษณะที่ต้องการของยิปซัมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ยิปซัมเลขที่มอก.595-2528 .....	21
ตารางที่ 2.8 ข้อแตกต่างปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟาและเบต้า.....	25
ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของยิปซัมทางทันตกรรม 5 ประเภท .....	28
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตที่ผ่านกระบวนการ การสังเคราะห์ทั้งหมดของยิปซัมทางทันตกรรม.....	47
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตที่ผ่านกระบวนการ การสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 ของยิปซัมทางทันตกรรม.....	57

## สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	กราฟการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ได้จากยิปซัมฮีโมไฮเดรตต่อการผสมยิปซัมต่อ	5
รูปที่ 2.2	กราฟการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ได้จากยิปซัมฮีโมไฮเดรตต่อการผสมยิปซัม	6
รูปที่ 2.3	กราฟการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ได้จากยิปซัมฮีโมไฮเดรตต่อการผสมยิปซัม	6
รูปที่ 2.4	การเรียงตัวของผลึกยิปซั่มก่อนล้างด้วยกรดซัลฟิวริก	8
รูปที่ 2.5	การเรียงตัวของผลึกยิปซั่มหลังการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก	8
รูปที่ 2.6	การเรียงตัวของผลึกยิปซั่ม DH-L ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	10
รูปที่ 2.7	การเรียงตัวของผลึกยิปซั่ม DH-M ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	10
รูปที่ 2.8	การเรียงตัวของผลึกยิปซั่ม DH-S ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	10
รูปที่ 2.9	เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงไดไฮเดรตเป็นฮีโมไฮเดรตของอนุภาค DH-L	11
รูปที่ 2.10	เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงไดไฮเดรตเป็นฮีโมไฮเดรตของอนุภาค DH-M	11
รูปที่ 2.11	เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงไดไฮเดรตเป็นฮีโมไฮเดรตของอนุภาค DH-S	12
รูปที่ 2.12	กราฟผล XRD	12
รูปที่ 2.13	ผลของปริมาณซิลิกาออกไซด์ที่มีผลต่อค่าการทนแรงอัดของชิ้นงาน	15
รูปที่ 2.14	เส้นแนวโน้ม้มการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ (รูปแบบที่ 1)	16
รูปที่ 2.15	เส้นแนวโน้ม้มการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ (รูปแบบที่ 2)	17
รูปที่ 2.16	การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ชนิดเปียก (wet type FGD)	19
รูปที่ 2.17	แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (Calcium Sulfate Dihydrate) ชนิดต่างๆ	23
รูปที่ 2.18	แอลฟาแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรต	24
รูปที่ 2.19	เบต้าแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรต	25
รูปที่ 2.20	กราฟระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อผงยิปซัม ความพรุนและค่าความทนแรงอัด	30
รูปที่ 2.21	กราฟระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อผงยิปซั่มกับค่าความทนแรงอัด	30
รูปที่ 2.22	เครื่องทดสอบความทนแรงอัด (Universal Testing Machine)	31
รูปที่ 2.23	ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM	31
รูปที่ 2.24	การเตรียมเอกสาร EVA	35
รูปที่ 2.25	การปรับค่าพารามิเตอร์	35
รูปที่ 2.26	การตรวจสอบผลการคำนวณด้วยรูปกราฟ	36
รูปที่ 2.27	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	36
รูปที่ 4.1	ลักษณะผลึกยิปซั่มฟลูแก๊สก่อนขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1	48
รูปที่ 4.2	ลักษณะผลึกยิปซั่มฟลูแก๊สก่อนขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2	48
รูปที่ 4.3	ลักษณะของผลึกหลังขึ้นรูปในการสังเคราะห์ยิปซั่มรูปแบบที่ 1	49
รูปที่ 4.4	ลักษณะของผลึกหลังขึ้นรูปในการสังเคราะห์ยิปซั่มรูปแบบที่ 1	50

รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าการทวนแรงอัดในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 .....	51
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่าการทวนแรงอัดในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 .....	51
รูปที่ 4.7 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูออไรด์ก่อนขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัม .....	52
รูปที่ 4.8 ลักษณะของผลึกหลังขึ้นรูปในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัม .....	53
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าการทวนแรงอัดในการสังเคราะห์ยิปซัมแต่ละประเภท .....	54
รูปที่ 4.10 ผล X-Ray Diffraction ของยิปซัมฟลูออไรด์ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ .....	54
รูปที่ 4.11 ผลของ X-Ray Diffraction ที่นำพื้นที่ได้กราฟไปหาปริมาณมวลภาคของ ยิปซัมฟลูออไรด์ .....	55
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ปริมาณมวลภาคของยิปซัมทางพันธุกรรมที่ยังไม่ผ่านการสังเคราะห์ .....	55
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ปริมาณมวลภาคของยิปซัมทางพันธุกรรมที่ผ่านการสังเคราะห์ รูปแบบที่ 1 .....	56
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ปริมาณมวลภาคของยิปซัมทางพันธุกรรมที่ผ่านการสังเคราะห์ รูปแบบที่ 2 .....	56
รูปที่ 4.15 ลักษณะยิปซัมฟลูออไรด์ก่อนขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3.....	58
รูปที่ 4.16 ลักษณะของผลึกหลังขึ้นรูปในการสังเคราะห์ยิปซัมรูปแบบที่ 3.....	59
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าการทวนแรงอัดในการสังเคราะห์ยิปซัมทางพันธุกรรม .....	59
รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าการทวนแรงอัดในการสังเคราะห์ยิปซัมของทั้ง 3 รูปแบบ.....	60
รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าการทวนแรงอัดของการทดลองเพิ่มเติม .....	61

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญที่อำนวยความสะดวกสบายในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางใช้ถ่านหินลิกไนต์ในการผลิตไฟฟ้า โรงไฟฟ้าแม่เมาะนำพลังงานความร้อนจากถ่านหินลิกไนต์เป็นพลังงานเชื้อเพลิง ด้วยการแปรสภาพพลังงานสะสมของถ่านหินลิกไนต์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในการเผาถ่านหินถ่านลิกไนต์นั้นส่งผลให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide) ซึ่งเป็นก๊าซที่อันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ จึงจำเป็นต้องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศทำได้โดยใช้กระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization, FGD) โดยที่กระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะใช้หินปูน (Calcium Carbonate) เป็นตัวดูดซับ และได้ยิปซัม (Gypsum) หรือเรียกอีกอย่างว่ายิปซัมฟลูแก๊สเป็นผลผลิตซึ่งยิปซัมมีปริมาณมากถึง 2 ล้านตันต่อปี (พจนีย์ ไพศาลตันติวงศ์, 2552) ยิปซัมที่ได้จากกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นี้นำไปใช้ประโยชน์ได้ไม่มากนัก เนื่องจากยิปซัมที่ได้จากกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์ที่ต่ำกว่ายิปซัมที่ได้จากธรรมชาติและไม่ขาว แต่มีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำยิปซัมฟลูแก๊สมาใช้ในการทำพลาสติกโปรเจกชันหรือพลาสติกออบนึ่ง เพื่อใช้ตกแต่งภายในอาคารแทนการทาสี การนำมาใช้แทนสีทาบ้านต้องนำยิปซัมมาผ่านกระบวนการหลายอย่าง เช่น มีการใช้อุณหภูมิในการเผาที่ค่อนข้างสูงซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นจึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้ทดแทน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) และยังมีงานวิจัยที่นำยิปซัมฟลูแก๊สไปใช้ทำวัสดุทางทันตกรรมเพื่อช่วยเหลือผู้ป่วยที่มีปัญหาทางด้านฟัน ซึ่งการทำวิจัยนี้ไม่สามารถทราบถึงปริมาณของแต่ละภูมิภาคได้ (Kostic-Pulek A. และคณะ, 2547)

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงขนาดของอนุภาคของยิปซัมฟลูแก๊สที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลอีกทั้งยังศึกษากระบวนการในการทำวัสดุทางทันตกรรมแต่ละประเภทและหาปริมาณภูมิภาค (Phase) ในวัสดุทางทันตกรรมแต่ละประเภทเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและปริมาณภูมิภาค เพื่อสามารถนำเอายิปซัมฟลูแก๊สไปใช้ในการทำวัสดุทางทันตกรรมได้และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยิปซัมฟลูแก๊สและสนับสนุนให้มีการนำยิปซัมฟลูแก๊สไปใช้ประโยชน์มากขึ้น

วัสดุทางทันตกรรมเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับรักษาความบกพร่องภายในช่องปาก ซึ่งวัสดุทางทันตกรรมมีอยู่หลายชนิดและหนึ่งในนั้นมียิปซัม ซึ่งถูกนำมาใช้ในการหล่อแบบฟันของผู้ป่วย ซึ่งผลิตภัณฑ์ของวัสดุทางทันตกรรมมีอยู่ 5 ประเภท แต่ที่นิยมนำมาใช้มีอยู่ 3 ประเภท คือ 1.) เคนทัลชนิดปูนพลาสติก (Impression Plaster) ใช้ในการตกแต่งประกอบแบบจำลองฟันในส่วนที่ไม่ใช่ตัวรากฟัน 2.) เคนทัลสโตน (Dental Stone) ใช้พิมพ์ตัวฟันหลังจากได้พิมพ์ปากออกมาแล้ว 3.) เคนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง (Dental Stone of High-Strength) ใช้ในการทำแบบจำลองฟัน

ขั้นสุดท้ายหลังจากตกแต่งฟัน ซึ่งในกรณีรักษาผู้ป่วยที่มีข้อบกพร่องทางด้านนี้จำเป็นอย่างมากที่จะต้องได้รับการรักษา เพื่อให้เกิดความมั่นใจและมีบุคลิกภาพที่ดีและสามารถดำเนินชีวิตประจำวันได้เป็นปกติ

ในประเทศไทยมีประชากรวัยกลางคนและผู้สูงอายุจำนวนมากประมาณร้อยละ 16 ของประชากรทั้งหมดมีข้อบกพร่องเกี่ยวกับช่องปากจึงจำเป็นต้องได้รับการรักษา (กรมอนามัย) โดยการรักษานั้นต้องมีการหล่อแบบพิมพ์ฟันเพื่อใช้ในการศึกษาการจัดเรียงของฟัน และหากมีข้อบกพร่องทางด้านใดจะได้รับการรักษาอย่างถูกต้อง

โดยทั่วไปแล้วยิปซัมทางทันตกรรมที่ใช้อยู่ผลิตมาจากยิปซัมทางธรรมชาติ แต่เมื่อนำยิปซัมทางธรรมชาติมาเปรียบเทียบกับยิปซัมที่ได้จากกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่ามีองค์ประกอบและโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน ผู้ทำการทดลองเล็งเห็นถึงความสำคัญจึงศึกษากระบวนการของยิปซัมและขนาดของยิปซัมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทางทันตกรรม เพื่อเพิ่มมูลค่าและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้ โดยงานวิจัยนี้ได้นำยิปซัมฟลูออไรด์มาผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาด จึงนำยิปซัมฟลูออไรด์ไปผ่านกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภท โดยศึกษาขนาดของอนุภาค แล้วนำไปทดสอบความทนแรงอัด การศึกษาการเรียงตัวของผลึก ศึกษาปริมาณวัฏภาค (Phase) แต่ละชนิด การศึกษาทั้งหมดนี้เพื่อเปรียบเทียบว่ายิปซัมสังเคราะห์สามารถนำมาใช้ในงานทางทันตกรรมตามมาตรฐานยิปซัมทางทันตกรรมได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินโครงการ

- 1.) เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคและกระบวนการสังเคราะห์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การเรียงตัวของผลึก ปริมาณวัฏภาคของวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูออไรด์
- 2.) เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคและกระบวนการสังเคราะห์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล ได้แก่ การทนแรงอัดของวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูออไรด์

## 1.3 ขอบเขตในการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคและกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมฟลูออไรด์แต่ละชนิดว่ามีผลทางสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุทางทันตกรรมที่ได้ยิปซัมฟลูออไรด์ โดยยิปซัมฟลูออไรด์ที่ได้เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

### 1.3.1 สภาวะการเตรียมวัสดุทางทันตกรรม

อนุภาคจะแบ่งเป็น 2 ขนาด คือ ขนาดอนุภาคของยิปซัมที่มากกว่า 0.4 มิลลิเมตร และไม่แยกขนาด โดยใน 100 กรัม มีสัดส่วนขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร 14.7 กรัม, ขนาดอนุภาค 0.25-0.4 มิลลิเมตร 6.6 กรัม, ขนาดอนุภาค 0.1-0.25 มิลลิเมตร 7.7 กรัม และขนาดอนุภาค 0.1-0.045 มิลลิเมตร 71 กรัม

## 1.) ตัวแปรต้น

- ขนาดของอนุภาค
- กระบวนการการสังเคราะห์ยิปซัม

## 2.) ตัวแปรตาม

- สมบัติทางกล ได้แก่ ความทนแรงอัด
- สมบัติทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวของผลึก, ปริมาณวัฏภาค

## 3.) ตัวแปรควบคุม

ชนิดที่ 1 ปูนปลาสเตอร์

- ให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เริ่มจากที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสไปยัง 120 องศาเซลเซียสจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 165 องศาเซลเซียส รวมเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 30 นาที

- ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการล้าง
- แหล่งที่มาของยิปซัมฟลูแก๊ส

ชนิดที่ 2 เเดนทัลสโตน (Dental stone)

- กระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการใช้หม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ เวลา 1 ชั่วโมง

- ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการล้าง
- แหล่งที่มาของยิปซัมฟลูแก๊ส

ชนิดที่ 3 เเดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง (Dental stone of high-strength)

- แคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต้มที่เวลา 1 ชม. 30 นาที
- ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการล้าง
- แหล่งที่มาของยิปซัมฟลูแก๊ส

**1.4 สถานที่ในการดำเนินการทำโครงการ**

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

**1.5 ระยะเวลาในการดำเนินการทำโครงการ**

ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2561 ถึงพฤษภาคม 2562



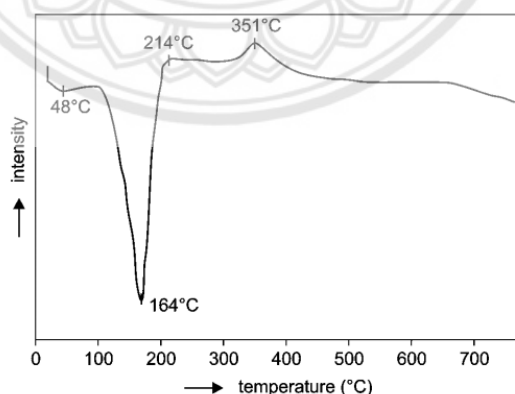
## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำยิปซัมฟลูแก๊สมาใช้ประโยชน์นั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติก่อนจะนำยิปซัมฟลูแก๊สไปทำการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมในแต่ละประเภท ได้มีการอ้างอิงมาจากงานวิจัยต่างๆดังนี้

Aleksandra Kostic-Pulek และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาล้างทำความสะอาดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความใกล้เคียงกับยิปซัมธรรมชาติ โดยจะนำยิปซัมฟลูแก๊สมาทำให้บริสุทธิ์โดยการทำความสะอาดซึ่งจะผสมยิปซั่มกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยน้ำหนักปริมาณยิปซั่มต่อกรดซัลฟิวริก ได้แก่ 0.125, 0.250, 0.500 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy) เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential Thermal Analysis) โดยจะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงวิภาคของสารนั้น และในการทดลองพบว่าอัตราส่วนของการผสมยิปซั่มต่อสารละลายกรดส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (164 , 166 และ 169 องศาเซลเซียส) ในแต่ละอัตราส่วนของยิปซั่มต่อกรดซัลฟิวริก ดังแสดงในรูปที่ 2.1-2.3 จากนั้นวิเคราะห์หาลูกประกอบโดยใช้วิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Driffracton) ในการทดลองพบว่าอัตราส่วน ยิปซั่มต่อกรดซัลฟิวริกมีผลต่ออัตราการเพิ่มขององค์ประกอบยิปซั่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

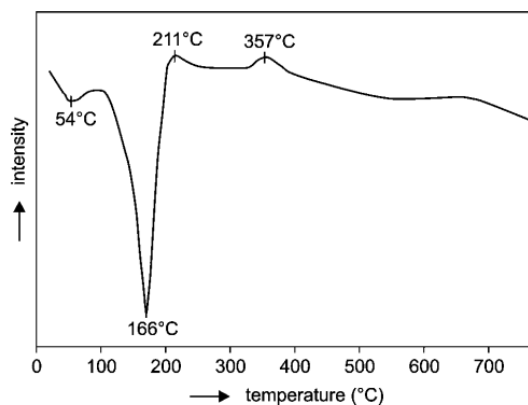


รูปที่ 2.1 กราฟการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ได้จากยิปซั่มเอมิไฮเดรตต่อการผสมยิปซั่มต่อ

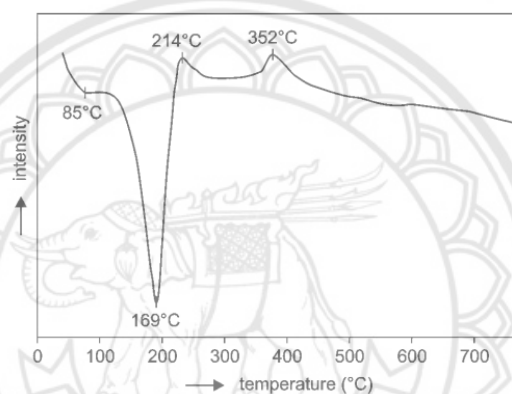
กรดซัลฟิวริก 0.125 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

(ที่มา: Kostic-Pulek A. และคณะ, 2547)





รูปที่ 2.2 กราฟการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ได้จากยิปซัมเอมิไฮเดรตต่อการผสมยิปซัม  
ต่อกรดซัลฟิวริก 0.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
(ที่มา: Kostic-Pulek A. และคณะ, 2547)



รูปที่ 2.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ได้จากยิปซัมเอมิไฮเดรตต่อการผสมยิปซัม  
ต่อกรดซัลฟิวริก 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร  
(ที่มา: Kostic-Pulek A. และคณะ, 2547)

ตารางที่ 2.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างยิปซัมและกรดซัลฟิวริกที่มีผลต่อองค์ประกอบลักษณะและ  
อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของยิปซัมดีไฮเดรชัน (ที่มา: Kostic-Pulek A. และคณะ, 2547)

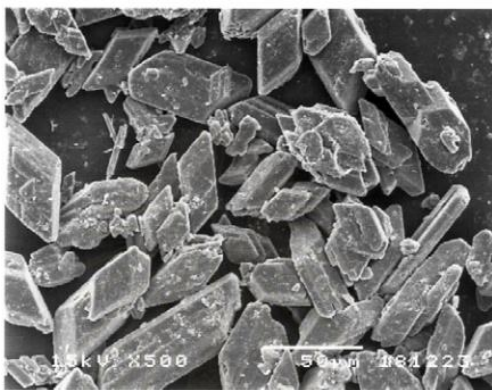
Exp.No	Gypsum/acid solution mixing ratio (g/cm <sup>3</sup> )	Compositio n of the product	Alpha form in the product (Vol%)	Average length of particles (µm)		Rate of gypsum dehydration (g/min)
				Alpha form	Bata form	
1	0.125	H.H.	9	8.5	0.072	0.29
2	0.250	H.H.	78	11.20	0.062	1.00
3	0.5	H.H.	88	15.00	0.058	2.50
4	0.75	D.H.+H.H.	-	-	-	-

\*H.H.=Hemihydrate ; D.H.=Dihydrate

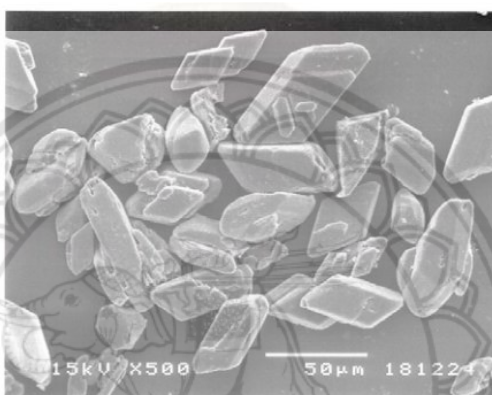
วิทยา พันธุ์พา (2545) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำเดนทัลสโตนจากยิปซัมฟลูแก๊ส โดยการนำ ยิปซัมฟลูแก๊สผ่านกระบวนการทำให้ยิปซัมบริสุทธิ์ขึ้น 2 วิธี โดยวิธีแรกจะทำการล้างยิปซัมด้วย กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 95-97 เปอร์เซ็นต์ นำปริมาณยิปซัมฟลูแก๊ส 100 กรัม กรดซัลฟิวริก 100 ลูก บากค์เซนติเมตร และน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องแม่เหล็ก คนสารประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปกรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารโดยใช้วิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Driffraction) อีกวิธีหนึ่งคือการใช้วิธีอัลตราโซนิค (Ultrasonicing) โดยจะนำยิปซัมฟลูแก๊สปริมาณ 100 กรัม น้ำ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นนำไปสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำไปกรองแล้วปรับค่า pH ด้วยน้ำกลั่นจนกว่าค่า pH จะคงที่ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 5.5-6 แล้ว นำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนำยิปซัมฟลูแก๊สผ่านกระบวนการ ทำให้บริสุทธิ์ทั้งสองวิธีแล้วนั้น พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สจะมีความบริสุทธิ์ 97 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.2 และเมื่อล้างด้วยกรดซัลฟิวริกจะมีสีที่อ่อนลงเนื่องจากสิ่งปนเปื้อนส่วนใหญ่เป็นเถ้า ละเอียดและเหล็กออกไซด์ได้ถูกกำจัดออกไป และเมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่าอนุภาคหลังล้างจะมีอนุภาคที่เรียบขึ้นเนื่องจากอนุภาคของเถ้า ละเอียดได้ถูกกำจัดออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.4-2.5

**ตารางที่ 2.2** คุณสมบัติและองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในยิปซัมธรรมชาติและยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่าน กระบวนการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก (ที่มา: วิทยา พันธุ์พา, 2545)

Chemical compositions (%)	FGD Gypsum	Natural Gypsum
Combined water	19.21	19.87
Insoluble + SiO <sub>2</sub>	1.63	0.36
Aluminum and Iron oxide (R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.92	0.28
Calcium oxide (CaO)	32.01	32.51
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	43.98	45.7
Phase (%)	FGD Gypsum	Natural Gypsum
Gypsum Hydrate (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	90.02	94.94
Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	0.48	2.63
Calcium carbonate (CaCO <sub>3</sub> )	2.14	0.9
pH	6.65±0.38	7.13±0.10
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	2.32±0.01	2.33±0.05
Color	reddish-brown	white



รูปที่ 2.4 การเรียงตัวของผลึกยิปซัมก่อนล้างด้วยกรดซัลฟิวริก  
(ที่มา: วิทยา พันธุ์พา, 2545)



รูปที่ 2.5 การเรียงตัวของผลึกยิปซัมหลังการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก  
(ที่มา: วิทยา พันธุ์พา, 2545)

โดยยิปซัมที่ผ่านการล้างทำความสะอาดแล้วจะนำไปสังเคราะห์เป็นยิปซัมประเภท เดนทัลสโตนผ่านการอัดความดัน 1.25 บาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วย หม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) จากนั้นเพิ่มความดันที่ 6 บาร์ อุณหภูมิไปที่ 163 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 1 ชั่วโมง และนำไปผ่านกระบวนการทดสอบค่าทางกายภาพ เช่น ค่าการทนแรงอัด ค่าการ ขยายตัว ค่าเวลาในการก่อตัว ซึ่งค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับยิปซัมธรรมชาติที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

จรรยา ชื่นอารมณ์ (2554) ได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาผงยิปซัมพลาสติกต่อสมบัติเชิงกล ของแบบหล่อปูนพลาสติก นำผงยิปซัมไปผสมกับน้ำที่อัตราส่วน 10:7 เพื่อทดสอบระยะเวลาการก่อ ตัว และหล่อเป็นชิ้นเพื่อทดสอบแรงอัด และนำผงยิปซัมมาทำการเก็บในภาชนะเปิดกับปิด เพื่อ ทดสอบระยะเวลาที่ใช้ในการก่อตัวและทดสอบแรงอัด จากการทดสอบพบว่า การเก็บผงยิปซัมใน ภาชนะเปิดเป็นเวลา 60 วัน มีผลทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวช้าลง และค่าแรงกดอัดลดลงด้วย เนื่องจากในอากาศมีความชื้นสูง และมีไอน้ำมาจับตัวกับแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตด้วย ทำให้ปูน เหลวมีการก่อตัวเร็วขึ้น และการเก็บผงยิปซัมพลาสติกไว้ในถุงปิดสนิทเป็นเวลานานจะส่งผลให้การ

ก่อตัวช้าลง ซึ่งเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการก่อตัวจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาและสภาวะอากาศในการเก็บรักษา ดังแสดงในตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** ระยะเวลาการก่อตัวของปูนปลาสเตอร์ก่อนและหลังการเก็บรักษาที่สภาวะต่างๆ

(OB=Open box, CB=Close box, CB-S=Close box with silica gel)

(ที่มา: จรรยา ชื่นอารมณ, 2554)

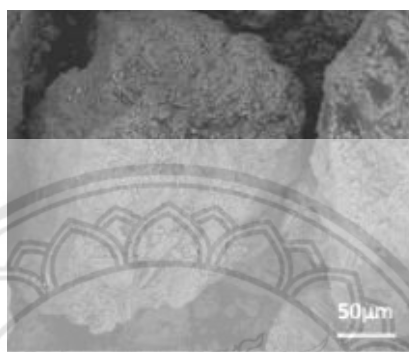
Storage time	Setting time(min)	
	0 day (Reference)	60 days
OB	10	10
CB	10	13
CB-S	10	13

ผลทดสอบแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแบบหล่อปูนหลังจากก่อตัวแข็งครบ 7 วัน พบว่าค่าแรงอัดของแบบหล่อปูนที่เตรียมจากผงยิปซัมปลาสเตอร์ที่เก็บในภาชนะที่ปิดฝาไม่สนิท (OB) เป็นเวลา 60 วันมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบหล่อปูนที่เตรียมจากผงยิปซัมปลาสเตอร์ที่เปิดถุงใช้ในตอนเริ่มต้น ความแข็งแรงของแบบหล่อปูนที่เตรียมจากผงยิปซัมปลาสเตอร์ที่เก็บในภาชนะที่ปิดและใส่ซิลิกาเจล (CB-S) มีค่าแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุด แสดงให้เห็นว่าการทำให้สภาพแวดล้อมของผงยิปซัมปลาสเตอร์ที่มีความชื้นน้อยจะทำให้ค่าแรงอัดสูงหรือเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับแบบหล่อปูนได้ เนื่องจากถ้าไม่มีไอน้ำในอากาศ เอมิไฮเดรตก็จะไม่เปลี่ยนเป็นไดไฮเดรต และไม่มีการสะสมของนิวเคลียสในการก่อตัวเริ่มต้นในผงยิปซัม ทำให้โครงสร้างผลึกรูปเข็มที่เรียงไขว้เกาะกันมีความแข็งแรงกว่าแบบหล่อปูนที่แห้งเร็วจึงสามารถรับแรงกดอัดได้มากกว่า

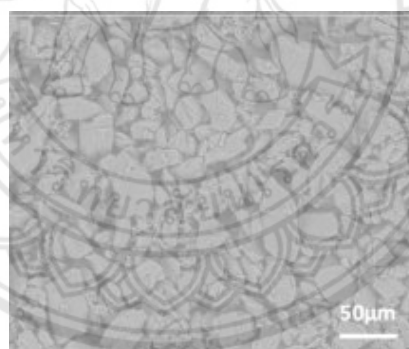
Shereen S. Azer และคณะ (2551) ได้ศึกษาผลของวิธีการผสมยิปซัมทางทันตกรรมต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ได้มีการนำยิปซัมทันตกรรมมา 4 ชนิด คือ Handimix, Snap-Stone, Die Keen, Silky-Rock มาทำการผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกันซึ่งแบ่งออกเป็น 3 วิธี วิธีแรกจะเป็นการผสมยิปซัมที่สภาวะปกติ วิธีที่สองเป็นการผสมยิปซัมที่สภาวะสุญญากาศ และวิธีสุดท้ายเป็นการผสมยิปซัมโดยใช้การเขย่า และจากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การทนแรงอัด เวลาที่ใช้ในการก่อตัวและแรงเฉือน ซึ่งจากการทดลองพบว่าการผสมกันในแต่ละวิธีไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของยิปซัมทันตกรรม

Le Fu และคณะ (2560) ได้ศึกษาการเตรียมแคลเซียมเอมิไฮเดรตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล เพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์ปริมาณแอลฟาเอมิไฮเดรตสูง ในการทดลองได้มีการนำเอาขนาดของยิปซัมที่แตกต่างกันเป็นผลึกไดไฮเดรตมาสามขนาด มีขนาด 946.7, 162.4, 62.4 ไมโครเมตร โดยกำหนดให้ชื่อ DH-L, DH-M, DH-S ตามลำดับ จากนั้นนำไปทดลองในเครื่องปฏิกรณ์รูปทรงกระบอก และจะใช้คอนเดนเซอร์ในการควบแน่นไอน้ำ โดยควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 105 องศาเซลเซียส และภายในถังอุณหภูมิ

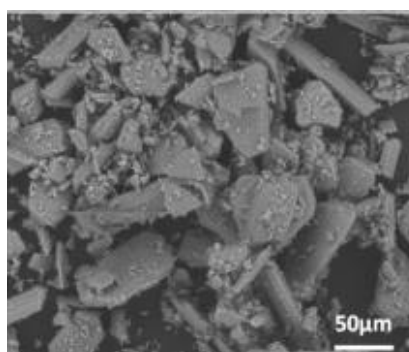
ไม่ควรเกินบวกลบ 5 องศาเซลเซียส ในการทดลองแต่ละครั้งให้เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ปริมาณ 500 มิลลิลิตร จากนั้นใส่แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต 50 กรัมลงไป แล้วทำการกวนด้วยความเร็ว 270 รอบต่อนาที นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำเดือดเพื่อกำจัดแคลเซียมคลอไรด์ที่ตกค้างจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อนำไปทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนจะเห็นว่าขนาดอนุภาคของ DH-L มีขนาดผลึกขนาดใหญ่กว่าและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน DH-M และ DH-S จะมีรูปร่างคล้ายๆกัน แต่ DH-M จะมีพื้นที่ผิวของอนุภาคเรียบกว่าอนุภาคของ DH-S ดังแสดงในรูปที่ 2.6-2.8



รูปที่ 2.6 การเรียงตัวของผลึกยิปซัม DH-L ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (ที่มา: Le Fu และคณะ, 2560)

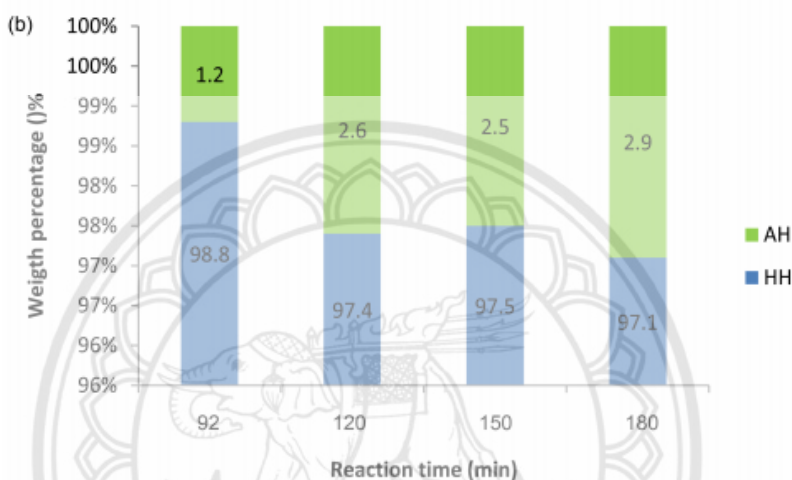


รูปที่ 2.7 การเรียงตัวของผลึกยิปซัม DH-M ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (ที่มา: Le Fu และคณะ, 2560)

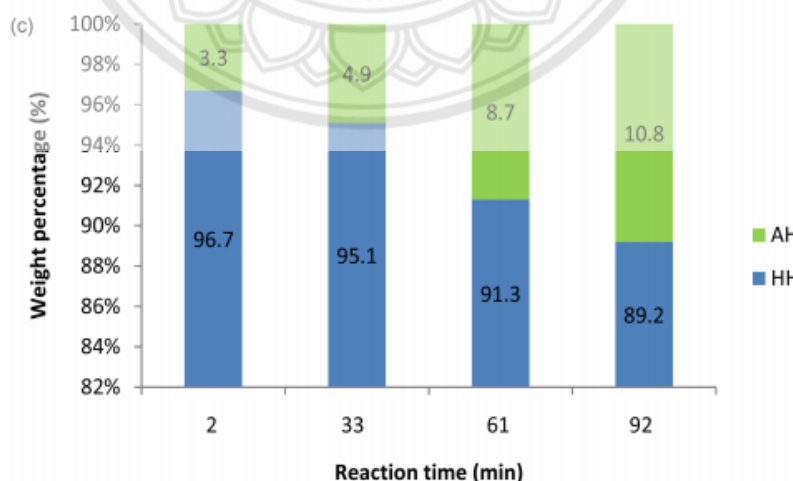


รูปที่ 2.8 การเรียงตัวของผลึกยิปซัม DH-S ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (ที่มา: Le Fu และคณะ, 2560)

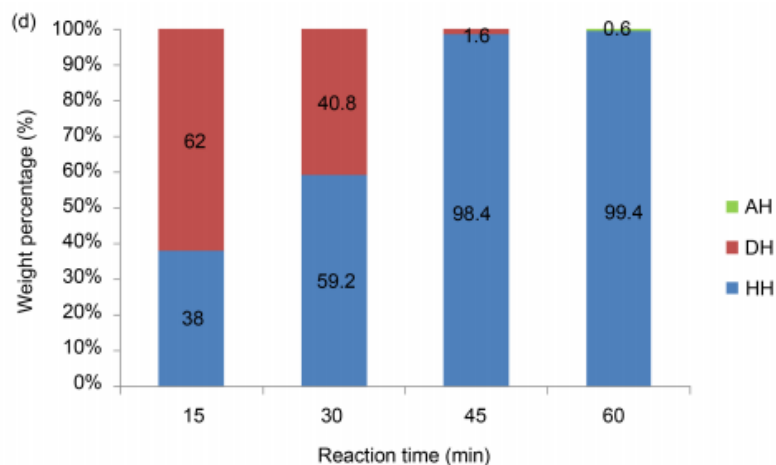
วัตถุประสงค์ในการหาการเปลี่ยนแปลงไดไฮเดรตไปเป็นเฮมิไฮเดรตคือเวลา โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงเวลาเพื่อที่จะทำให้มีเปอร์เซ็นต์แอลฟาเฮมิไฮเดรตมากที่สุด เมื่อนำไปทำการตรวจ XRD (X-Ray Driffraction) และทำผลออกมาเป็นแผนภูมิแท่งพบว่าอนุภาค DH-L ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ที่เวลา 90 นาทีที่มีปริมาณเฮมิไฮเดรต 98.8 เปอร์เซ็นต์ อนุภาค DH-M ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 นาทีที่มีปริมาณเฮมิไฮเดรต 95.1 เปอร์เซ็นต์ อนุภาค DH-S ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45 นาทีที่มีปริมาณเฮมิไฮเดรต 98.4 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของ DH-M, DH-S จะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า DH-L เนื่องจาก DH-L มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่จึงใช้เวลานานในการทำให้เกิดการแทนที่ของเฮมิไฮเดรต ดังแสดงในรูปที่ 2.9-2.11



รูปที่ 2.9 เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงไดไฮเดรตเป็นเฮมิไฮเดรตของอนุภาค DH-L (ที่มา: Le Fu และคณะ, 2560)

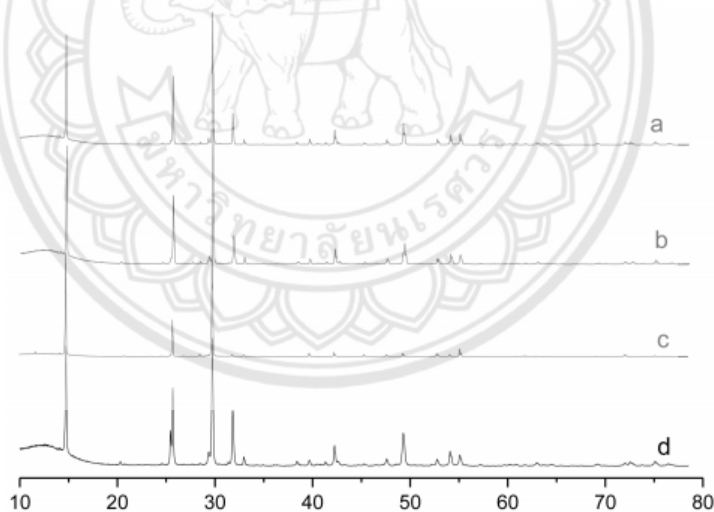


รูปที่ 2.10 เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงไดไฮเดรตเป็นเฮมิไฮเดรตของอนุภาค DH-M (ที่มา: Le Fu และคณะ, 2560)



รูปที่ 2.11 เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงไดไฮเดรตเป็นเอมิไฮเดรตของอนุภาค DH-S (ที่มา: Le Fu และคณะ, 2560)

จากการวิเคราะห์ปริมาณวัฏภาคเอมิไฮเดรตโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) สามารถยืนยันได้ว่าเอมิไฮเดรตที่สังเคราะห์ได้เป็นแบบแอลฟาเอมิไฮเดรตหรือเบต้าเอมิไฮเดรต โดยดูจากพีคของกราฟ XRD โดยที่เบต้าเอมิไฮเดรตจะแสดงจุดสูงสุดซ้อนทับกันที่ 25 องศา ในขณะที่แอลฟาเอมิไฮเดรตจะมีจุดสูงสุดแค่จุดเดียว ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟผล XRD

โดยที่ a) แอลฟาเอมิไฮเดรต (DH-L) b) แอลฟาเอมิไฮเดรต (DH-M)  
c) แอลฟาเอมิไฮเดรต (DH-S) d) เบต้าเอมิไฮเดรต

(ที่มา: Le Fu และคณะ, 2560)

Baohong Guan และคณะ (2554) ได้ศึกษาการทดสอบการทนแรงอัดของแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตจาก FGD ยิปซั่มในสารละลายเกลือ โดยจะใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, โพแทสเซียมคลอไรด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมคลอไรด์ 1

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการทดลองโดยผสมสารละลายเกลือทั้งสามตัวลงในยิปซัมฟลูแก๊สใช้ความดันที่ 0.8 บาร์ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วในการกวน 80 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการทำ การทดลอง 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองแล้วนำไปต้มกับน้ำแล้วล้างด้วยกรดอะซิติกและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อนำไปทดสอบการทนแรงอัดพบว่าค่าการทนแรงอัดจะอยู่ที่ 15.7-25.3 เมกะปาสคาลเนื่องจากความเข้มข้นของไอออนสารละลายเกลือมีผลทำให้เกิดการเติบโตของผลึกและเพิ่มการคายน้ำแล้วเปลี่ยนวิฏภาคเป็นเฮมิไฮเดรตจนทำให้ผลึกมีค่าการทนแรงอัดที่สูง

สุธารี เกียรติมัน (2544) ได้พิสูจน์กลไกการเกิดยิปซัมโดยผ่านสารละลายและศึกษาผลของ ไอออนของเกลือต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของยิปซัมที่เป็นผลิตภัณฑ์รองด้วยกระบวนการแบบเปียก แอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตได้ผลิตโดยใช้ผลิตภัณฑ์รองที่ได้จากโรงงานกระดาษสหไทยเป็น วัตถุดิบ โดยการศึกษาผลกระทบของสารละลายเกลือกระทำโดยการดีไฮเดรชันของยิปซัมที่เป็น ผลิตภัณฑ์รองในความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ 3 โมลาร์ และ 4 โมลาร์ ของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยวิธีการดังต่อไปนี้

- 1.) ต้มยิปซัมที่เป็นผลิตภัณฑ์รองกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในความดันบรรยากาศในระหว่างต้มจะทำการกวนทุกๆครึ่งชั่วโมง
- 2.) วัดค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และ ไอออนซัลเฟตในวิฏภาคของเหลว
- 3.) กรองสารละลาย
- 4.) นำของยิปซัมที่กรองได้ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อบจนน้ำหนักของยิปซัมคงที่
- 5.) ตรวจสอบการสูญเสียน้ำหนักของยิปซัมและคำนวณหาอัตราการคายน้ำ
- 6.) ทำซ้ำที่แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 2.5 และ 4 โมลาร์

สรุปจากผลการทดลองได้ว่าอัตราการเกิดของกระบวนการดีไฮเดรชันเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อทำในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูง จะทำให้ผลึกของแอลฟาแคลเซียมซัลเฟต เฮมิไฮเดรตมีขนาดเล็ก ไอออนที่เกิดจากแคลเซียมคลอไรด์จะช่วยดึงดูโมเลกุลของน้ำเพื่อยับยั้งการ เกิดพันธะน้ำในโครงสร้างผลึกของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตและการตกผลึกของแคลเซียมซัลเฟต เฮมิไฮเดรตอาจถูกยับยั้งได้หากมีไอออนมากเกินไป การดีไฮเดรชันในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นสูง (4 โมลาร์) จะทำให้มีคุณภาพต่ำคือ เวลาก่อตัวนาน ความแข็งแรงต่ำ ความหนืดสูง อย่างไรก็ตามแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้คุณสมบัติทางกายภาพต่ำเมื่อเตรียม เป็น พลาสติก ดังนั้นผลิตภัณฑ์รองที่ได้จากอุตสาหกรรมกระดาษนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้เตรียมแอล ฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตโดยกระบวนการแบบเปียก

Carsten Vellmer (2557) ได้ศึกษาผลของกรดคาร์บอกซิลิกในปฏิกิริยาไฮเดรชันของ แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต การแข็งตัวของเฮมิไฮเดรตที่มีกรดคาร์บอกซิลิกอยู่จะสามารถทดสอบ การคายความร้อนและอัตราการเกิดความร้อน (Heat Evolution Rate) โดยจะวัดโดยใช้เครื่อง TAM Air Isothermal Conduction Calorimeter ซึ่งเป็นเครื่องมือศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสาร



โดยจะเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเกิดความร้อนซึ่งวัดได้จากเส้นโค้งที่สัมพันธ์กับการก่อตัวของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตในแบบแท่งปริซึมรูปเข็ม กับกลุ่มตัวอย่างของแคลเซียมไดไฮเดรตแบบไม่มีกรดคาร์บอกซิลิก พบว่ากรดคาร์บอกซิลิกมีผลต่อการเกิดนิวเคลียสยิปซัม และชะลอการเจริญเติบโตของผลึก

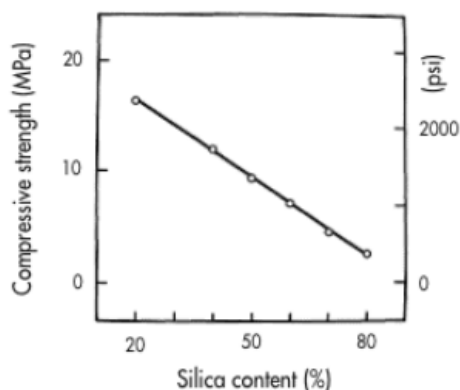
Aleksey Eremin และคณะ (2559) ได้ศึกษาการหาแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตโดยการประยุกต์ใช้วิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction) วัฏภาคของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตมีสองรูปแบบ คือเบต้าและแอลฟา การหาปริมาณจะสามารถหาได้โดยใช้การประยุกต์ใช้ XRD แล้วนำไปสร้างกราฟ Williamson-Hall และจะสามารถหาปริมาณของวัฏภาคได้ โดยใช้ความชันของกราฟในการหาสามารถวัดได้จากค่าไมโครสเตรส (Microstress) พบว่าแอลฟาเอมิไฮเดรตได้รับค่าไมโครสเตรสเท่ากับ 0.00011-0.00044 และเบต้าเอมิไฮเดรตมีค่าไมโครสเตรสเท่ากับ 0.001

William J O'Brien และคณะ (2545) ได้ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อยิปซัมที่เหมาะสมต่อการขยายตัวของยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภทโดยที่ W/P คืออัตราส่วนการผสมน้ำต่อยิปซัม ดังแสดงในตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** อัตราส่วนการผสมน้ำต่อยิปซัมที่เหมาะสมต่อการขยายตัวของยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภท (ที่มา: William J O'Brien และคณะ, 2545)

Type	W/P ratio	Setting expression (%)
Impression plaster	0.60	0.13
Plaster	0.50	0.30
Stone	0.30	0.15
Stone, high-strength, low expression	0.20	0.10
Stone, high strength, high expression	0.19	0.26

ศึกษาผลของปริมาณซิลิกาออกไซด์ที่มีผลต่อค่าการทนแรงอัดโดยใช้วิธีการแบบเปียกใช้เวลาหลังจากการผสม 2 ชั่วโมง พบว่ายิปซัมทางทันตกรรมแต่ละชนิดมีความต้องการน้ำที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีความแตกต่างทางความหนาแน่นของผงยิปซัมดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลของปริมาณซิลิกาออกไซด์ที่มีผลต่อค่าการทนแรงอัดของซีเมนต์  
(ที่มา: William J O'Brien และคณะ, 2545)

ศึกษาการทนแรงอัดโดยเปรียบเทียบสองวิธีในการสังเคราะห์ยิปซัมคือแบบเปียกคือจะให้ความร้อนแก่ยิปซัมอยู่ที่อุณหภูมิ 130-150 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะบรรยากาศ อีกวิธีหนึ่งคือแบบเปียกจะให้ความร้อนของยิปซัมในหม้อหนึ่งแรงดันที่อุณหภูมิ 110-160 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าการทนแรงอัดของยิปซัมทางพันตรกรรมแต่ละประเภทโดยใช้การสังเคราะห์สองวิธี  
(ที่มา: William J O'Brien และคณะ, 2545)

Type	W/P ratio	Compressive strength (MPa)	
		Wet	Dry
Impression plaster	0.60	5.9	-
Plaster	0.50	12.4	24.9
Stone	0.30	25.5	63.4
Stone, high-strength, low expression	0.20	58.4	126.4
Stone, high strength, high expression	0.19	76.4	145.2

Chatree Thitianan (2498) ได้ศึกษาการนำสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการล้างยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่และทำให้เป็นกลางโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ทำได้โดยนำสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เหลือมาผสมกับน้ำและยิปซัมในอัตราส่วน 1:1:1 ทำการผสมให้เข้ากันจากเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้ตกตะกอน แล้วผสมกันอีก 15 นาทีซึ่งจะทำให้เป็นกลางในขั้นตอนนี้โดยเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปจากนั้นวัดค่า pH ทำซ้ำจนให้ค่า pH อยู่ระหว่าง 6-7 จากนั้นกรองยิปซัมออกแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติและลักษณะเฉพาะต่างๆโดยใช้เครื่องวิเคราะห์อะตอมมิกสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption

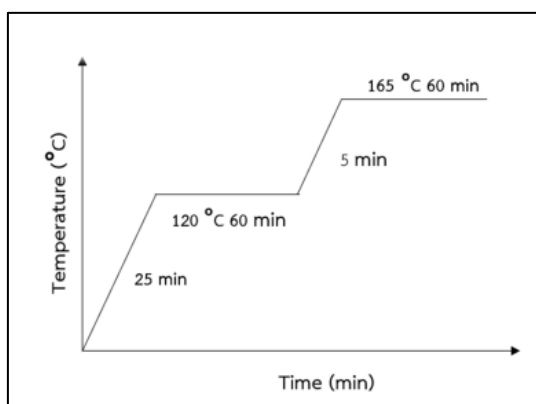
Spectrophotometer) พบว่าการนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่นั้นในการล้าง 4 ครั้งแรกจะมีสมบัติของสารเท่าเดิมเมื่อล้างเกิน 4 ครั้งสมบัติของสารจะน้อยลงจนถึงจุดคงที่

ภัทรวรรณ เฉยเจริญ (2549) การผลิตปูนปลาสเตอร์ในทางการค้าทำได้โดยให้ความร้อนแก่ผงแรียิปซั่มที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยน้ำจะระเหยออกจากแรียิปซั่มในกระบวนการนี้จะได้ปูนปลาสเตอร์ 2 แบบคือ แอลฟา กับ เบต้า และเมื่อทำการเติมน้ำในปูนปลาสเตอร์จะเกิดการตั้งน้ำกลับไปในโครงสร้างอีกครั้ง (Rehydrate) ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวเป็นผลึกยิปซั่มเมื่อปูนปลาสเตอร์เกิดการเซ็ทตัวน้ำที่อยู่ภายนอกโครงสร้างจะเกิดการระเหยออกไปทำให้ทั้งรูพรุนเปิดเอาไว้ในโครงสร้าง ดังนั้นการเติมน้ำมากขึ้นในการผสมปูนปลาสเตอร์จะทำให้หลังการแห้งตัวจะมีรูพรุนมากขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซึมของแม่พิมพ์ในระหว่างกระบวนการหล่อขึ้นงานมีมากขึ้นด้วย

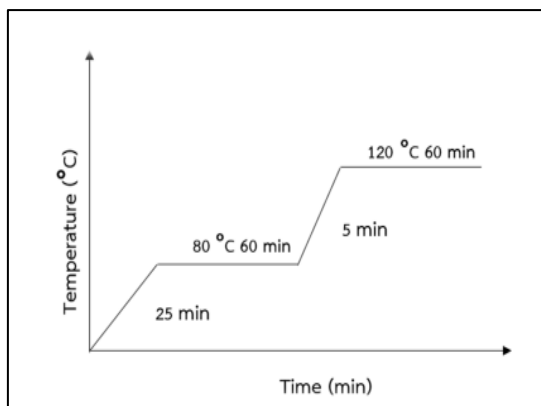
นายพรชัย อุดเถิน และนายรัฐกร มั่นภักดี (2560) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซั่มฟลูแก๊สได้ทำการทดลองดังนี้

1.) ศึกษาผลของระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดยิปซั่มฟลูแก๊ส จากการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซั่มฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกที่ระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที มีค่าความทนแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซั่มฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกจะให้ค่าความทนแรงอัดมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซั่มฟลูแก๊สที่ไม่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการล้างที่ระยะเวลา 15 นาที ก็เพียงพอที่จะทำให้คุณสมบัติของยิปซั่มฟลูแก๊สดีขึ้นและส่งผลให้ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

2.) การศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์ จากผลการทดสอบพบว่ายิปซั่มฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ และชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานยิปซั่มฟลูแก๊สของยิปซั่มทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์ ส่วนยิปซั่มฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ไม่สูงพอและระยะเวลาในการเผาไม่มากพอจึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต



รูปที่ 2.14 เส้นแนวโน้มการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ (รูปแบบที่ 1)  
(ที่มา: นายพรชัย อุดเถิน และนายรัฐกร มั่นภักดี, 2560)



รูปที่ 2.15 เส้นแนวโน้มการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ปูนพลาสติก (รูปแบบที่ 2)  
(ที่มา: นายพรชัย อุดเถิน และนายรัฐกร มั่นภักดี, 2560)

3.) การศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนจากผลการทดสอบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 ซึ่งรูปแบบที่หนึ่งคือ ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการทำความสะอาดจะถูกนำไปเผาในหม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) โดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป 120 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ ปล่อยให้วัสดุที่สถานะนี้ 1 ชั่วโมง รูปแบบที่สองคือยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการทำความสะอาดจะถูกนำไปเผาในหม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) โดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ ปล่อยให้วัสดุที่สถานะนี้ 1 ชั่วโมง เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ และชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 12.75 และ 13.12 MPa ตามลำดับ ค่าความทนแรงอัดที่ได้ยังไม่ผ่านมาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดนทัลสโตน แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบพบว่าค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 จะให้ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานมากกว่ากระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าความดันที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ยังไม่มากพอที่จะทำให้ผลึกมีความแข็งแรงและความหนาแน่นมากขึ้น รวมทั้งการเปลี่ยนวิภาคเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่ไม่มากพอ จึงทำให้ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

4.) การศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงจากผลการทดสอบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาทำการทดสอบการขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ อาจเป็นเพราะระยะเวลาที่ใช้ในการต้มไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการคายน้ำของผลึกแล้วเปลี่ยนวิภาคเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่มีผลึกมีขนาดเล็กและแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไปเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติกับเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อนึ่งแรงดัน เมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนวิภาคเป็นแคลเซียมเอมิไฮเดรตที่สูงขึ้น แต่ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้ก็ยังคงไม่ผ่านเกณฑ์

มาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วนำไปเผาในบรรยากาศปกติ กับเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อหนึ่งแรงดันมีค่าความทนแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 9.05 และ 8.01 MPa ตามลำดับ ส่วนยิปซัมฟลูแก๊สที่ต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไม่สามารถขึ้นรูปได้เช่นเดียวกัน แต่เมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตไปเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ กับเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอ น้ำ พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้สามารถนำไปขึ้นรูปได้ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ถูกเพิ่มขั้นตอนโดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ กับเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อหนึ่งแรงดันมีค่าความทนแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 7.95 และ 10.83 MPa ตามลำดับ

จากการทดลองนี้ทำให้ผู้ทำวิจัยสนใจที่จะศึกษาขนาดของอนุภาคในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมแต่ละชนิดว่ามีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุทางทันตกรรมที่ได้จากยิปซัมฟลูแก๊สอย่างไร โดยจะเลือกการทดลองที่ดีที่สุดจาก นายพรชัย อุดเถิน และนายรัฐกร มั่นภักดี มาทำการทดลองในครั้งนี้

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

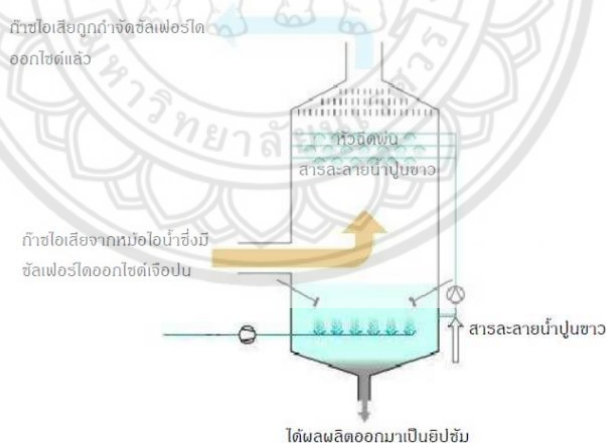
### 2.2.1 ยิปซัมสังเคราะห์

นอกจากแรียิปซัมที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแล้วยังมียิปซัมที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆที่เราเรียกว่า ยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic Gypsum) ซึ่งที่มาของยิปซัมพลอยได้นี้ มี 2 แหล่งคือ จากการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือ Flue Gas Desulfurization Gypsum และจากการผลิตปุ๋ยเคมีในรูปของกรดฟอสฟอริกจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างหินฟอสเฟต (phosphate rocks) กับกรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ ) หรือ Phosphogypsum ในที่นี้จะกล่าวถึงการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (พจนานุกรมวิทยาศาสตร์, 2552)

#### 1.) การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization Gypsum)

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซหนักกลิ่นฉุน มีกำมะถันหรือซัลเฟอร์เป็นธาตุองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และแร่นิวเคลียร์ ซึ่งแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องจักรเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเตา น้ำมันดีเซล และถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังความร้อนของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่แม่เมาะนี้ใช้ถ่านหินลิกไนต์ซึ่งมีองค์ประกอบของสารกำมะถัน (ซัลเฟอร์) เป็นจำนวนมากจึงต้องมีการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออก ถ้าแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ฟุ้งกระจายไปในบรรยากาศจะเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $SO_3$ ) รวมกับน้ำกลายเป็นกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ถูกฝนชะลงมากลายเป็นฝนกรดซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ในการลดปริมาณกำมะถันที่ปล่อยสู่บรรยากาศในขณะที่เกิดการเผาไหม้มีหลายวิธี ได้แก่ การผสมถ่านหินในอัตราส่วนที่ทำให้ปริมาณ

กำมะถันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และการใช้สารประกอบแอลคาไลน์-เอิร์ธ เพื่อเกิดเป็นสารประกอบซัลเฟต และเกิด self-desulfurization ซึ่งในระหว่างการเผาไหม้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบแอลคาไลน์เกิดเป็นสารประกอบแอลคาไลน์ซัลเฟต โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 800–900 องศาเซลเซียส (ภาคภูมิ ยินดีสิทธิ์ และ ดร.ภัทรวรรณ ประศาสน์สารกิจ, 2559) จากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้เป็นผลมาจากการเผาไหม้กำมะถันในถ่านหินด้วยการเติมน้ำปูนขาว (CaO) ซึ่งได้จากการเผาหินปูน (Calcium Carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) ที่ใช้เป็นตัวดูดซับ โดยปกติแล้วน้ำปูนขาว (Lime Slurries) จะมีคุณสมบัติเป็นด่างซึ่งจะมีค่าอยู่ใกล้ 12 pH ซึ่งสมบัติของหินปูนนั้นมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและหินปูน คือ การกระจายของขนาดอนุภาค ความเป็นรูพรุน และสารปนเปื้อนในหินปูน โดยหินปูนที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีนั้นต้องมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอย่างน้อย 95 เปอร์เซ็นต์ โดยจะใช้อุปกรณ์หอสครับ (Scrubber) ในการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization, FGD) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกจากแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันปนอยู่ในเชื้อเพลิง การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ใช้สำหรับโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ชนิดเปียก (Wet Type FGD) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงถึง 92-95% จะได้ผลผลิต (By Product) เป็นแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) โดยชื่อสามัญที่รู้จัก คือ ยิปซัม แต่จะเรียกยิปซัมที่ได้จากกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์นี้ว่า Flue Gas Desulfurization Gypsum



รูปที่ 2.16 การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ชนิดเปียก (wet type FGD)

(ที่มา: <http://www.thaiengineering.com>)

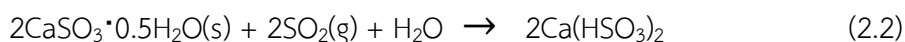
## 2.) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (วิชา ปรกยพ 2549)

กระบวนการที่เกิดขึ้นจะทำโดยอาศัยหลักการการสวนทางกันระหว่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่จะลอยขึ้นสู่บรรยากาศกับหินปูนผสมน้ำที่จะถูกป้อนเข้าหอสครับแล้วสเปย์ออกทางด้านบน หินปูนจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากนั้นจะเกิด

แคลเซียมซัลไฟต์ซึ่งไม่ละลายน้ำ ( $\text{CaCO}_3 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) มีสถานะเป็นของแข็ง ปฏิกริยานี้จะเกิดที่ค่า pH 7-8 ดังสมการ 2.1



ในขั้นตอนที่สองนี้จะปรับให้มีสถานะเป็นกรดโดยการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกให้มีค่า pH ต่ำกว่า 5 ซึ่งทำให้แคลเซียมซัลไฟต์ที่แขวนลอยอยู่เปลี่ยนเป็นแคลเซียมไบซัลไฟต์ที่ละลายน้ำได้ ( $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ ) ดังสมการ 2.2



แคลเซียมไบซัลไฟต์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการข้างต้นจะเกิดการออกซิไดซ์ได้ง่ายด้วยก๊าซออกซิเจนในชั้นบรรยากาศเกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ ) หรือยิปซั่มที่เรียกว่า “Flue-gas gypsum” ดังสมการ 2.3



กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) จากกระบวนการในขั้นตอนที่สามจะทำปฏิกิริยากับหินปูนที่เหลืออยู่ทำให้ได้ยิปซั่มเพิ่มมากขึ้น ดังสมการ 2.4



**ตารางที่ 2.6** คุณลักษณะของยิปซั่มสังเคราะห์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (ที่มา: วิชา ปรภษพพ, 2549)

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	32.21
สารที่ไม่ละลาย + ซิลิกา (insoluble + $\text{SiO}_2$ )	0.72
เฟอร์ริกออกไซด์ + อะลูมินา ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ )	0.42
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ )	44.79
ความชื้น (free water)	16.22
อนุของน้ำในเนื้อแร่ (Combined water, $\text{H}_2\text{O}^+$ )	19.78
ยิปซั่ม (gypsum)	94.51
คลอไรด์ (Cl)	0.0173

ในการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของยิปซั่มพลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะดังตารางที่ 2.6 พบว่ากระบวนการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกและตกตะกอนสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์และสามารถทำให้ยิปซั่มพลูแก๊สมีสีที่อ่อนลงได้ แต่กระบวนการดังกล่าวยังคงมีข้อบกพร่องอยู่บางประการ คือ ในการล้างแต่ละครั้งจะต้องใช้สารละลายปริมาณมาก ปริมาณยิปซั่มที่ได้กลับคืนมาค่อนข้างต่ำเนื่องจากมียิปซั่มบางส่วนสูญเสียในระหว่างการล้าง รวมทั้งสารละลายที่ถูกทิ้งหลังจากผ่านกระบวนการล้างแล้ว ยังคงมีความเป็นกรดอยู่สูงมาก ทำให้เกิดปัญหาในการบำบัดตามมา

ยิปซัมฟลูแก๊สสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์โดยไม่ต้องล้างแล้ว ยิปซัมฟลูแก๊สที่มีคุณภาพสูงยังสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมแทนการใช้ยิปซัมธรรมชาติได้ เช่น นำมาใช้ผลิตเป็นปูนปลาสเตอร์ เป็นต้น และหากสามารถทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีสีที่ค่อนข้างขาวได้แล้ว ยังสามารถนำยิปซัมฟลูแก๊สมาผลิตเป็นพลาสติกฉาบผนัง ซึ่งใช้ฉาบตกแต่งภายในอาคารแทนการทาสีหรือนำไปสังเคราะห์เป็นแอนไฮไดรต์ เพื่อใช้เป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี และอุตสาหกรรมพลาสติก ยิปซัมฟลูแก๊สนอกจากจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมได้แล้ว ในด้านการเกษตรยังสามารถนำไปใช้ในการควบคุมความเป็นกรดของดินและด้านทางทันตกรรมยังสามารถนำไปใช้ทำแบบพิมพ์ฟันได้อีกด้วย

### 3.) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม เลขที่ มอก. 595-2528 (ชาติรี ฐิตอนันท์, 2498)

โดยปกติยิปซัมจะกำหนดมาตรฐานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัม เลขที่ มอก. 595-2528 ดังตารางที่ 2.7 ได้จัดไว้ว่ามาตรฐานยิปซัมชั้นคุณภาพที่หนึ่งนั้นต้องมีเกณฑ์ของยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอนไดออกไซด์และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ เกณฑ์คุณภาพที่สองต้องมีเกณฑ์ของยิปซัมมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกอนไดออกไซด์และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ น้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.7 คุณลักษณะที่ต้องการของยิปซัมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยิปซัมเลขที่มอก. 595-2528 (ที่มา: ชาติรี ฐิตอนันท์, 2498)

รายการ ที่	คุณลักษณะ(%)	เกณฑ์ที่กำหนดสำหรับชั้นคุณภาพ (%)			
		1	2	3	4
1	ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	> 95	> 90	> 80	> 70
2	ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และสารที่ไม่ละลายอื่นๆ	< 1	< 3	-	-
3	แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )	< 0.3	< 0.3	-	-
4	อัลคาไลที่ละลายน้ำได้ (เทียบเป็น $\text{Na}_2\text{O}$ )	< 0.2	< 0.2	-	-
5	คลอไรด์ (เทียบเป็น $\text{NaCl}$ )	< 0.2	< 0.2	-	-

#### 2.2.2 วัสดุจากยิปซัมทางทันตกรรม

##### 1.) วัสดุทางทันตกรรม

ฟันของมนุษย์เรามีด้วยกัน 2 ชุด คือ ฟันน้ำนมและฟันแท้ เมื่อฟันน้ำนมหลุดออกไปก็จะมีฟันแท้ขึ้นมาแทนที่ แต่หลังจากฟันแท้แล้ว หากฟันของเราเกิดปัญหาขึ้นไม่ว่าจะเป็นฟันผุ อุบัติเหตุ หรือการเสื่อมสภาพไปตามอายุก็ไม่สามารถงอกขึ้นมาใหม่ได้อีก ดังนั้นเราจึงต้องมีการนำวัสดุหรืออุปกรณ์การแพทย์เข้ามาช่วยในการรักษา เสริมสร้างหรือทดแทนส่วนที่สูญเสียไป ตัวอย่างของวัสดุการแพทย์ในงานทางด้านนี้ ได้แก่ ฟันปลอม ครอบฟัน รากฟันเทียม วัสดุอุดฟัน วัสดุเคลือบ



หลุมร่องฟัน และลวดตัดฟัน ซึ่งวัสดุที่สามารถนำมาใช้งานทางทันตกรรม มีทั้งเซรามิก โลหะ พอลิเมอร์และคอมโพสิต แต่โดยที่หน้าที่ของฟันคือการบดเคี้ยวอาหารต่างๆ ดังนั้นวัสดุที่สามารถนำมาใช้งานได้จึงต้องมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมีและป้องกันการสึกหรอได้ดี ตัวอย่างของวัสดุทางทันตกรรมที่พบเห็นกันทั่วไป ได้แก่ โลหะต่างๆ เช่น ทองคำ เงิน แพลทินัม นอกจากนี้ก็ยังมีอะมัลกัม ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างเงิน พรอท ทองแดง สังกะสีและดีบุกสำหรับใช้เป็นวัสดุอุดฟัน ไทเทเนียม สำหรับผลิตรากฟันเทียม เซรามิกประเภทพอร์ซเลนและคอมโพสิตเรซินสำหรับครอบฟัน พลาสติกประเภทอะคริลิกสำหรับทำฐานฟันปลอม

## 2.) แร่ยิปซัมและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยิปซัม (วิชา ปรกษยพรรณ, 2549)

แร่ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยิปซัมคือ แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) และแคลเซียมซัลเฟตแอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$ ) ซึ่งได้มาจากการไล่น้ำผลึกออกไปจาก ยิปซัมนั้นมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างและใช้เป็นตัวหน่วงการเกิดปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ นอกจากนี้ยิปซัมและแคลเซียมซัลเฟตแอนไฮไดรต์ยังใช้เป็นตัวเติมในดิน เพื่อปรับปรุงความสามารถในการยอมให้ของเหลวผ่านของดินให้ดีขึ้นด้วยสำหรับ แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต จะใช้กันมากในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับปูนปลาสเตอร์ เช่น ในอุตสาหกรรมการทำเครื่องปั้นดินเผา ใช้ทำแม่แบบในทางการแพทย์ ทำแบบพิมพ์ฟันปลอมในทางด้านทันตกรรม

ปัจจุบันได้นำแร่ยิปซัมที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างกันอย่างกว้างขวางและนำมาใช้ประโยชน์อย่างอื่น ดังนี้

### 1.) ในรูปของแร่ยิปซัม

- ใช้ผสมปูนซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์เพื่อเป็นตัวควบคุมการแข็งตัวของซีเมนต์ชนิดต่างๆซึ่งต้องการการก่อตัวช้าหรือเร็วตามลักษณะการใช้งานของซีเมนต์
- แร่ยิปซัมเกรดสูงๆ ใช้ผสมในอุตสาหกรรมสี ยาฆ่าแมลง ซอล์ค กระจายอาหาร แป้ง เครื่องสำอางค์ สีนํ้าผ้า ซึ่งต้องการให้มํ้าหนักและมีผิวเป็นมันวาว
- แร่ยิปซัมเกรดต่ำ ๆ ใช้ทำปุ๋ย ทำความสะอาดแร่ดีบุก
- แร่ยิปซัมชนิดเนื้อแน่น ละเอียด ใช้ทำเครื่องประดับ และเครื่องตกแต่งภายในอาคารบ้านเรือน เพื่อความสวยงาม

2.) เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนยิปซัมหรือปูนปลาสเตอร์ (Plaster of Paris) ซึ่งนำมาใช้ทำวัสดุก่อสร้างต่างๆหลายประเภท ดังนี้

- ทางด้านศิลปะหัตถกรรม เช่น งานปั้นรูปต่างๆหรือสิ่งตกแต่งอื่นๆ เป็นต้น
- ทางด้านผลิตภัณฑ์เซรามิก ใช้ทำแบบพิมพ์ต่างๆ เช่น Casting Mold เป็นต้น
- ทางด้านก่อสร้าง ใช้ทำยิปซัมบอร์ด สำหรับฝ้าผนัง ฝ้าเพดานและปูนฉาบผนัง
- ทางทันตกรรม ใช้ทำแบบพิมพ์ฟัน

- ทางกายภาพ ใช้ในการทำเยื่อกระดาษ
- ทางด้านการเรียนการสอน ใช้ทำวัสดุประกอบการศึกษาต่างๆ

### 3.) ผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรม

ยิปซัมเป็นแร่ที่มีประโยชน์ที่ค่อนข้างหลากหลาย มีการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุอื่นๆ และหนึ่งในนั้นคือใช้เป็นวัสดุทางทันตกรรม ซึ่งนำไปใช้ในการหล่อแบบจำลองช่องปาก เพื่อใช้ในการศึกษาโครงสร้างในช่องปากและฟันกราม อีกทั้งใช้เป็นวัสดุเสริมในการปฏิบัติทางทันตกรรมจากข้อมูลของยิปซัมจากธรรมชาติ และยิปซัมจากการสังเคราะห์พบว่ายิปซัมทั้งสองมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ซึ่งซิลิกาทำให้ทนต่อความร้อนมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับความชื้นและสารเคมีได้ดี เนื่องจากมีความเป็นรูพรุนสูง จึงนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และนิเกิล ซึ่งมีประโยชน์ต่อการนำไปสร้างแม่พิมพ์สำหรับการหล่อเกี่ยวกับกายวิภาคทางทันตกรรม

### 4.) คุณสมบัติทางเคมี

แคลเซียมซัลเฟตแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (Calcium Sulfate Dihydrate), แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (Calcium Sulfate Hemihydrate), แคลเซียมซัลเฟตแอนไฮไดรต์ (Calcium Sulfate Anhydrite) (Sandeep Kumar, 2558)

1.) แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (Calcium Sulfate Dihydrate) หรือแร่อยิปซัม จะมีน้ำรวมอยู่ด้วยในโครงสร้างผลึกจะมีน้ำ 2 หน่วยต่อแคลเซียมซัลเฟต 1 หน่วย ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ซาติน สปาร์ (Satin Spar) เป็นแร่อยิปซัมชนิดหนึ่งที่มีเนื้อเป็นเศษเล็กๆ ปลายแหลมเหมือนหนาม มีความวาวคล้ายใยไหม, ซิลิไนท์ (Selenite) เป็นแร่อยิปซัมชนิดที่ไม่มีสี มีเนื้อเป็นแผ่นบางโปร่งใส นำมาตัดหรือแกะสลักหรือขัดทำเป็นเครื่องประดับ และอะลาบาสเตอร์ (Alabaster) เป็นแร่อยิปซัมที่มีเนื้อเป็นมวลเมล็ดอัดแน่นกัน มีสีขาวขุ่น มีความแข็งน้อยมาก แร่ที่พบในประเทศไทยจะเป็นแบบอะลาบาสเตอร์ใช้ในการทำปูนปลาสเตอร์ (Yotsawat S, 2557) โดยประกอบด้วยซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) 46.5 เปอร์เซ็นต์ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) 32.6 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 20.9 เปอร์เซ็นต์ (รัชดาภรณ์ ปันทะรส, 2555)



(a) ซาติน สปาร์ (Satin Spar)



(b) ซิลิไนท์ (Selenite)



(c) อะลาบาสเตอร์ (Alabaster)

รูปที่ 2.17 แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (Calcium Sulfate Dihydrate) ชนิดต่างๆ

(ที่มา: Yotsawat S, 2557)

2.) แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (Calcium Sulfate Hemihydrate) หรือปูนปลาสเตอร์ ได้จากการให้ความร้อนแก่แร่ยิปซัม จะได้ปูนปลาสเตอร์ที่อยู่ในรูปของผลึกมีชื่อว่า Bassanite ปูนปลาสเตอร์มีอยู่ 2 วัฏภาค คือ แอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ( $\alpha$ -Calcium Sulfate Hemihydrate) และเบต้าแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ( $\beta$ -Calcium Sulfate Hemihydrate)

2.1) แอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ( $\alpha$ - Calcium Sulfate Hemihydrate) หรือ Gypsum Cement มีการจัดเรียงตัวเป็นโมโนคลินิก (Monoclinic) ซึ่งผลิตได้จากการนำแร่ยิปซัมมาผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 120 - 170 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นหรือมีแรงดันไอน้ำ มักผลิตออกมาให้มีสีฟ้าหรือสีเขียว เนื้อปูนเป็นผงที่มีความละเอียดสูง ดูนํ้าต่ำ ต้องการน้ำในการผสมน้อย ทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์มีความพรุนน้อย ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูง ไม่แตกหักง่าย แต่มีน้ำหนักมากกว่าเบต้าแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตและมีราคาที่สูงกว่า



รูปที่ 2.18 แอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต

(ที่มา: <https://www.slideshare.net/indiandentalacademy/gypsum-products>)

2.2) เบต้าแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ( $\beta$ - Calcium Sulfate Hemihydrate) หรือ Plaster of Paris มีการจัดเรียงตัวเป็นไตรโกนอล (Trigonal) ซึ่งผลิตได้จากการนำแร่ยิปซัมมาเผาหรือผ่านการให้ความร้อนภายใต้สภาวะแห้งหรือไม่มีไอน้ำ ซึ่งจะเผาตั้งแต่ระดับอุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีราคาที่ถูกกว่าปูนชนิดแรก เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะมีความพรุนสูง ดูดซึมน้ำได้มาก และต้องการน้ำในการผสมมากกว่าปูนปลาสเตอร์ชนิดแรกถึง 2-3 เท่า ทำให้มีความความแข็งแรงต่ำ แตกหักง่าย (Siamchemi, 2560)



รูปที่ 2.19 เบต้าแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต

(ที่มา: <https://www.slideshare.net/indiandentalacademy/gypsum-products>)

แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตในโครงผลึกจะมีน้ำเพียง 1 หน่วยต่อแคลเซียมซัลเฟต 2 หน่วย ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังสมการ 2.5 เมื่อนำปูนปลาสเตอร์ไปผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับพร้อมปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา เกิดเป็นผลึกรูปเข็มของยิปซัมและกลายเป็นก้อนแข็งอีกครั้ง



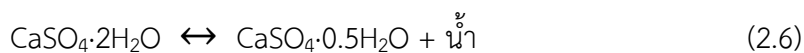
ตารางที่ 2.8 ข้อแตกต่างปูนปลาสเตอร์ชนิดแอลฟาและเบต้า (ที่มา: Siamchemi, 2560)

คุณสมบัติ	แอลฟาปลาสเตอร์	เบต้าปลาสเตอร์
ราคา	แพง	ถูก
ความละเอียดของเนื้อปูนปลาสเตอร์	ละเอียดมาก	ละเอียดน้อย
การดูดน้ำหรือปริมาตรที่ใช้ในการผสม	ดูดซึมน้ำได้น้อยหรือใช้น้ำน้อย	ดูดซึมน้ำได้มากหรือใช้น้ำมาก
ความเหนียวขณะเปียกน้ำ	เหนียวน้อย	เหนียวมาก
ความเร็วในการแข็งตัว	แข็งตัวช้า	แข็งตัวเร็ว
ความพรุน	มีความพรุนน้อย	มีความพรุนมาก
ความแข็งแรง	แข็งแรงมาก	แข็งแรงน้อย
น้ำหนัก	น้ำหนักมาก	น้ำหนักเบา
ลักษณะผิวผลิตภัณฑ์	ผิวเรียบลื่นเป็นมัน	ผิวหยาบ

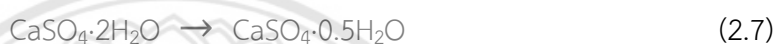
3.) แคลเซียมซัลเฟตแอนไฮไดรต์ (Calcium Sulfate Anhydrite) แคลเซียมซัลเฟตที่ไม่มีน้ำ มีสูตรเคมีคือ  $\text{CaSO}_4$  ประกอบด้วย  $\text{SO}_3$  58.8% และ  $\text{CaO}$  41.2% มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ แคลเซียมซัลเฟตแอนไฮไดรต์ที่สามารถละลายน้ำได้ (Soluble Calcium Sulfate Anhydrite,  $\alpha$ -

CaSO<sub>4</sub>) และแคลเซียมซัลเฟตแอนไฮไดรต์ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ (Insoluble Calcium Sulfate Anhydrite,  $\beta$ -CaSO<sub>4</sub>) (Sandeep Kumar, 2558)

3.1) แคลเซียมซัลเฟตแอนไฮไดรต์ที่สามารถละลายน้ำได้ (Soluble Calcium Sulfate Anhydrite,  $\alpha$ -CaSO<sub>4</sub>) เป็นแคลเซียมซัลเฟตที่มีผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal Calcium Sulfate) จะเกิดที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส สามารถคืนรูปกลับมาเป็นแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตที่อุณหภูมิห้องที่ความชื้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ดังสมการ 2.6



3.2) แคลเซียมซัลเฟตแอนไฮไดรต์ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ (Insoluble Calcium Sulfate Anhydrite,  $\beta$ -CaSO<sub>4</sub>) เป็นแคลเซียมซัลเฟตที่มีผลึกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Orthorhombic Calcium Sulfate) จะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 300-400 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ผันกลับ เมื่อผสมน้ำแล้วจะไม่สามารถคืนรูปได้ ดังสมการ 2.7



## 5.) ประเภทวัสดุทางด้านทันตกรรมจากยิปซัม (ปรินทร ศตเมธ และคณะ, 2557)

ผลิตภัณฑ์ของยิปซัมใช้กันอย่างกว้างขวางในทางทันตกรรม โดยจะอยู่ในรูปของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตแบ่งเป็น 5 ประเภท ตามมาตรฐานการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรมเบอร์ 25 ของทันตแพทยสมาคมอเมริกา (American Dental Association Specification No.25; ADA) ดังนี้

### ประเภทที่ 1 ปูนพลาสติกอิมเพรสชันแบบ (Impression Plaster)

เป็นปูนพลาสติกอิมเพรสชันแบบดั้งเดิมนี้ได้มาจากการเผาแห้งของยิปซัมในภาวะเปิดที่อุณหภูมิในช่วง 120 - 180 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ไม่มีน้ำในกระบวนการเผานั้นจะส่งผลให้โครงสร้างพื้นฐานของผลึกไม่มีโอกาสที่จะเปลี่ยนแปลง ดังนั้นแม้ว่าสุดท้ายโครงสร้างคริสตัลของผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับอากาศก็ยังคงเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ที่มีอนุภาคของผงยิปซัมแบบดั้งเดิมที่มีรูปร่างหยาบไม่สม่ำเสมอ มีการขยายตัว 0.3 - 0.6 เปอร์เซ็นต์ การสูญเสียน้ำภายใต้สภาวะแห้งจะทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ในอนุภาคเหล่านี้ ดังนั้นปูนพลาสติกอิมเพรสชันที่ผลิตขึ้นโดยการเผาแบบแห้งจะมีลักษณะเป็นผงที่มีความหนาแน่นต่ำ ความสามารถในการยึดแน่นไม่ดี

### ประเภทที่ 2 ปูนพลาสติกหล่อแบบ (Plaster Model)

มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเบต้าแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ( $\beta$ -Calcium Sulfate Hemihydrate) ซึ่งอนุภาคมีรูปร่างขรุขระ และมีขนาดไม่แน่นอน สำหรับพลาสติกหล่อแบบนี้จะได้จากกระบวนการเช่นเดียวกับปูนพลาสติกอิมเพรสชันแบบ โดยจะใช้ในการจำลองเกี่ยวกับฟันปลอม เนื่องจากพลาสติกหล่อแบบมีคุณสมบัติการขยายตัวต่ำ

### ประเภทที่ 3 เดนทัลสโตน (Dental Stone)

มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ( $\alpha$ -Calcium Sulfate Hemihydrate) ซึ่งอนุภาคมีความละเอียด มีผลึกหน้าสมบุรณ์ (Idiomorphic) ที่โปร่งใส มีขนาดสม่ำเสมอ และมีขอบผลึกคมชัด เมื่อนำไปผสมกับน้ำจะได้ยิปซัมทางทันตกรรม (แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต) ที่มีกำลังความแข็งแรง (Strength) และความแข็งผิว (Surface Hardness) สูงกว่าชนิดปูนพลาสติกหล่อแบบ แต่มีการขยายตัวน้อยกว่าเนื่องจากมีรูพรุนน้อยและรวมตัวกันแน่นกว่า ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดนทัลสโตนผลิตโดยเผา ยิปซัมในหม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) โดยไอน้ำจะเป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวด (Superheated Steam) ซึ่งมีความดันไอร้อนในอุณหภูมิระหว่าง 120-130 องศาเซลเซียส หรือทำให้น้ำในผลึกของยิปซัมแห้ง โดยใส่โซเดียมซัคซิเนต (Sodium Succinate) ไม่เกินร้อยละ 0.5 ในหม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) ผลิตยิปซัมที่ได้เป็นประเภทไฮดรอล (Hydrocal)

### ประเภทที่ 4 เดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง (Dental Stone, High Strength)

มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ( $\alpha$ -Calcium Sulfate Hemihydrate) ซึ่งอนุภาคมีความละเอียด มีผลึกหน้าสมบุรณ์ (Idiomorphic) ที่โปร่งใส มีขนาดสม่ำเสมอ และมีขอบผลึกคมชัด เมื่อนำไปผสมกับน้ำจะได้ยิปซัมทางทันตกรรม (แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต) ที่มีกำลังความแข็งแรง (Strength) และความแข็งผิว (Surface Hardness) สูงกว่าชนิดปูนพลาสติกหล่อแบบ แต่มีการขยายตัวน้อยกว่าเนื่องจากมีรูพรุนน้อยและรวมตัวกันแน่นเหมือนชนิดเดนทัลสโตน แต่ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง จะเหมือนอนุภาคละเอียดกว่าชนิดเดนทัลสโตน มีการดัดแปลงคุณสมบัติ โดยนำมาต้มในหม้อที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride) ที่ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ผสมเพื่อให้ก่อตัวจึงใช้น้อยกว่า และมีกำลังแข็งแรงสูงกว่ายิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดนทัลสโตน

### ประเภทที่ 5 เดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงและขยายตัวสูง (Dental Stone, High Strength And High Expansion)

ปูนพลาสติกที่มีมวลแข็งนั้นจะผลิตโดยการเผาแบบเปียก การที่มีน้ำในกระบวนการจะเป็นวิธีการที่ช่วยให้มีการเปลี่ยนของโครงสร้าง ดังนั้นเฮกซะโกนอลแคลเซียมซัลเฟต จะเปลี่ยนแปลงทำให้ได้ผลึกรูปทรงปริซึมที่หนาแน่น และเมื่อเย็นตัวในอากาศ น้ำจากความชื้นของอากาศจะสามารถกลับมาในผลึกได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนวิญญากาศเป็นเฮมิไฮเดรต แต่จะไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกี่ยวกับจำนวน ขนาด รูปร่าง การเรียงตัวของผลึกได้ สุดท้ายแล้วผงอนุภาคจะเป็นซูโดออพติก (Pseudo Orphic) และมีผลึกมอนอคลินิก (Monoclinic) ในโครงสร้างจากเฮมิไฮเดรต แต่เฮกซะโกนอลของแอนไฮดรัสแคลเซียมซัลเฟต (Anhydrous Calcium Sulfate) ที่เกิดก่อนจะรักษารูปร่างลักษณะของผลึกไว้

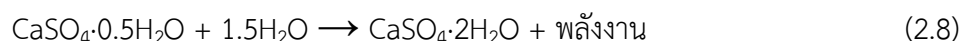
มาตรฐานการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรมเบอร์ 25 ของทันตแพทย์สมาคมอเมริกา (American Dental Association Specification No.25 ; ADA) จำแนกโดยการวัดค่าต่างๆเช่น เวลาในการแข็งตัว , เวลาในการขยายตัว , กำลังรับแรงอัด (ค่าความแข็ง) เป็นต้น ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของยิปซัมทางทันตกรรม 5 ประเภท (ปริญทร ศตเมธ และคณะ, 2557)

ชนิด	เวลาในการแข็งตัว (min)	เวลาในการขยายตัว ที่ 2 ชม.		กำลังรับแรงอัด (MPa)	อัตราส่วนผงยิปซัมต่อน้ำ
		Min%	Max%		
ปูนปลาสเตอร์พิมพ์แบบ (impression plaster)	4±1	0	0.15	4	0.4-0.75
ปูนปลาสเตอร์หล่อแบบ (plaster model)	12±4	0	0.3	9	0.45-0.5
เดนทัลสโตน (dental stone)	12±4	0	0.2	21	0.28-0.3
เดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง (dental stone, high strength)	12±4	0	0.1	35	0.22-0.24
เดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงและขยายตัวสูง (dental stone, high strength and high expansion)	12±4	0.01	0.3	49	0.18-0.22

2.2.3 การเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตกับน้ำ (ปริญทร ศตเมธ และคณะ, 2557)

โดยโครงสร้างทางเคมีของยิปซัมที่ก่อตัวแล้วเป็นผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต เกิดจากการทำปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างผงแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตกับน้ำ ดังสมการ 2.8



เมื่อผสมผงแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตกับน้ำ สารละลายจะอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไอออน (Calcium Ion) กระทั่งถึงจุดอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturation) จากนั้นผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตจะเกิดการก่อตัวและเติบโต โดยผลึกของยิปซัมจะเกิดขึ้นของแคลเซียมไอออนและซัลเฟตไอออน (Sulfate Ion) ยึดกันด้วยพันธะไอออน (Ionic Bond) รวมกันเป็นโกรทสไลซ์ (Growth Slice) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการตกผลึก กลสมบัติของยิปซัมที่ก่อตัวแล้วเกิดจาก โครงสร้างเกี่ยวยึดและอันตรกิริยาระหว่างผลึก ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างจากผลึกของยิปซัม หมู่ฟังก์ชันทำหน้าที่ (Functional Group) คุณสมบัติความเป็นกรดตามสัมพรรคภาพการดูดซับ (Affinity for Adsorption) บนผลึกยิปซัมที่กำลังก่อตัว

#### 2.2.4 การล้างยิปซัมฟลูแก๊ส (ชาตรี รัฐอนันท์, 2498)

จากการศึกษาพบว่า การล้างยิปซัมฟลูแก๊สสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การใช้ไฮโดรโซโคลน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถทำการล้างได้ในลักษณะต่อเนื่องและล้างได้ปริมาณมาก ส่วนอีกวิธีคือการล้างโดยใช้กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid,  $H_2SO_4$ ) ซึ่งกรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate,  $CaCO_3$ ) ที่ปนมากับยิปซัมฟลูแก๊สให้เปลี่ยนเป็นยิปซัมมากขึ้น และเพื่อละลายเอาเหล็กออกจากแร่ที่ปะปนมาในลักษณะต่างๆ โดยเฉพาะพวกที่เป็นคอลลอยด์ซึ่งไม่สามารถแยกออกได้ด้วยเครื่องแยกแม่เหล็ก จากนั้นจึงนำไปตกตะกอนเพื่อแยกยิปซัมออก ยิปซัมที่ผ่านการล้างแล้วจะมีความบริสุทธิ์และสะอาดมากขึ้น การล้างโดยวิธีนี้เป็นเพียงการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น

#### 2.2.5 การอบแห้งยิปซัมฟลูแก๊ส (ชาตรี รัฐอนันท์, 2498)

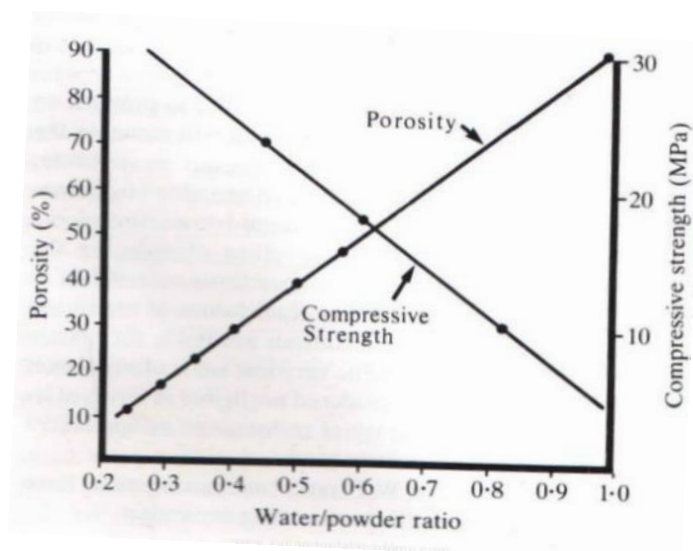
ยิปซัมฟลูแก๊สโดยทั่วไปจะมีความชื้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากการที่มีน้ำถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาค นอกจากความชื้นแล้วในยิปซัมเองก็ยังมีน้ำอยู่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยเป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้าง (Crystal Water) โดยทั่วไปน้ำที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวสามารถไล่ออกไปได้โดยการให้ความร้อน แต่การให้ความร้อนที่มากเกินไปและนานเกินไปจะทำให้ น้ำที่อยู่ในโครงสร้างออกไปด้วย ดังนั้นกระบวนการในการให้ความร้อนแก่ยิปซัมจึงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการอบแห้ง ซึ่งเป็นการให้ความร้อนเพียงเพื่อกำจัดความชื้นออกไปเท่านั้น ส่วนในขั้นตอนที่สองจะเป็นการให้ความร้อนเพื่อบดน้ำที่อยู่ในโครงสร้างออกมาซึ่งเรียกว่า การแคลไซน์ (การเผาเพื่อไล่น้ำ) ซึ่งอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้ง และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ยิปซัมจะเริ่มสูญเสียน้ำในโครงสร้าง

#### 2.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรง (Indian Dental Academy, 2557)

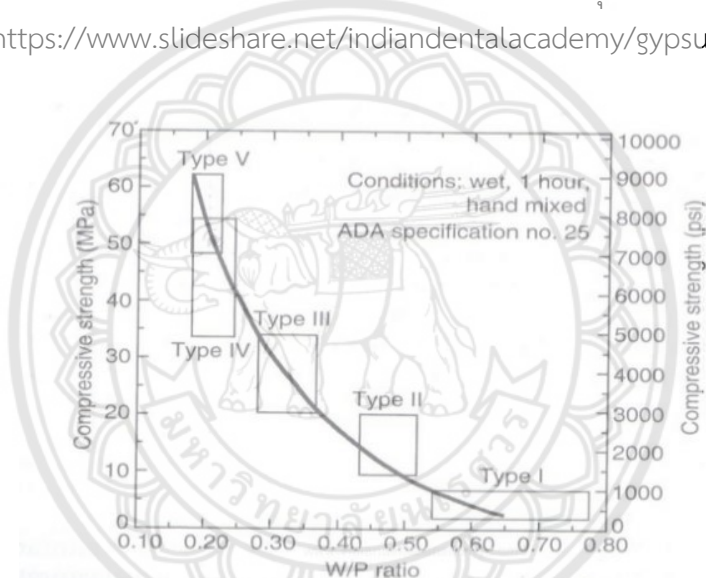
- อัตราส่วนของน้ำต่อผงยิปซัม คุณสมบัติความแข็งแรงมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราส่วนของน้ำต่อผงยิปซัมและจำนวนของความพรุนทั้งหมด คือ ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อผงยิปซัมและจำนวนของความพรุนทั้งหมดมาก ความแข็งแรงของยิปซัมนั้นจะน้อย แต่ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อผงยิปซัมและจำนวนของความพรุนทั้งหมดน้อย ความแข็งแรงของยิปซัมนั้นจะมาก แต่ส่วนผสมจะมีความหนืด ทำให้เทใส่ลงแบบพิมพ์ได้ยากและแข็งตัวเร็ว ดังรูปที่ 2.20

- การผสมยิปซัมกับน้ำ ถ้าใช้เวลาในการผสมเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงก็จะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.21 แต่การเพิ่มขึ้นนี้จะเห็นได้ไม่เกิน 10 นาที หากผสมกันนานเกินไป ยิปซัมจะแตกหักและขึ้นรูปไม่ได้





รูปที่ 2.20 กราฟระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อผงยิปซัม ความพรุนและค่าความทนแรงอัด (ที่มา: <https://www.slideshare.net/indiandentalacademy/gypsum-products>)



รูปที่ 2.21 กราฟระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อผงยิปซัมกับค่าความทนแรงอัด (ที่มา: <https://www.slideshare.net/indiandentalacademy/gypsum-products>)

## 2.2.7 การทดสอบผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรม

### 1.) การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงอัดของวัสดุ (นิรนาม, 2558)

เป็นความสามารถของวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรงอัด (Compress) หรือการบีบ (Squeezing) ทำให้เกิดแรงอัด ( $\sigma_c$ ) จนวัสดุหักยุบตัวไปตามแนวแรง

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงที่กดลงบนวัสดุทดสอบ (N)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบ ( $m^2$ )

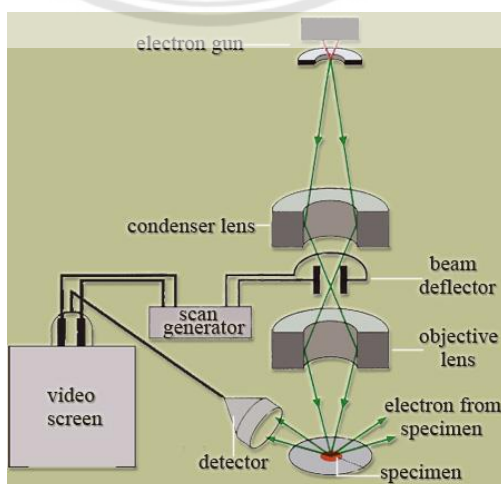
$\sigma_c$  คือ แรงอัดที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ( $N/m^2$ )



รูปที่ 2.22 เครื่องทดสอบความทนแรงอัด (Universal Testing Machine)  
(ที่มา: <http://www.calservethailand.com>)

## 2.) การเรียงตัวของผลึกและความพรุน (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุที่ระดับจุลภาค ภาพที่ได้เกิดจากการตรวจวัดด้วยอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดจะมีลักษณะเป็น 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวตัวอย่าง โดยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำแสงอิเล็กตรอนสามารถปรับให้ขนาดของลำแสงอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หลังจากลำแสงอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์แล้วจึงถูกนำไปสร้างเป็นภาพ



รูปที่ 2.23 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM  
(ที่มา: <https://il.mahidol.ac.th>)

3.) การหาปริมาณร้อยละของยิปซั่มแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) (ชาตรี ฐิตอนันต์, 2498)

ผงยิปซั่มฟลูแก๊สหลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์จะถูกเอาความชื้นออกอีกรอบที่ อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำผงยิปซั่มฟลูแก๊สประมาณ 1 กรัม ใส่ลง กระจกนาฬิกาแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องใช้ 4 ตำแหน่ง เตรียมทั้งหมด 4 ตัวอย่าง โดยค่าน้ำหนักที่ชั่งได้คือค่า a

1.) คำนวณหา Soluble Anhydrite (Anhydrite III) นำ Ethyl Alcohol เข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมลงในกระจกนาฬิกาใบที่ 1 ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น (Desiccator) และนำไปชั่งน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักที่ชั่งได้คือค่า b

$$\% All = \left( \frac{93.8}{6.2} \right) \times \left( \frac{b-a}{a} \right) \times 100 \quad (2.10)$$

2.) คำนวณหา Hemihydrate (HH,  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในกระจกนาฬิกาใบที่ 2 ผสมและปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักที่ชั่งได้คือค่า C

$$\% HH = \left( \frac{145.15}{27} \right) \times \left( \frac{c-4b+3a}{a} \right) \times 100 \quad (2.11)$$

3.) คำนวณหา Insoluble Anhydrite (Anhydrite II) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในกระจกนาฬิกาใบที่ 3 ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปเก็บในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกมาอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักที่ชั่งได้คือค่า d

$$\% All = \left( \frac{136.14}{36} \right) \times \left( \frac{d-c}{a} \right) \times 100 \quad (2.12)$$

4.) คำนวณหา Calcium Sulfate Dihydrate (DH,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) นำกระจกนาฬิกา ใบที่ 4 ไปเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น และนำไปชั่งน้ำหนัก ค่าน้ำหนักที่ชั่งได้คือค่า e

$$\% DH = \left( \frac{172.17}{36} \right) \times \left( \frac{4b-c-3e}{3} \right) \times 100 \quad (2.13)$$

#### 4.) การวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

(Tiphanya, 2554)

เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดชนิดหนึ่งในงานวิเคราะห์ทางวัสดุศาสตร์ ส่วนใหญ่แล้วจะถูกนำไปใช้วิเคราะห์เพื่อตรวจสอบว่าวัสดุที่เราสนใจประกอบไปด้วยวัฏภาคอะไรบ้าง และใช้วิเคราะห์รายละเอียดเกี่ยวกับเซลล์ของผลึกที่เราสนใจว่ามีโครงสร้างผลึกแบบใด ขนาดเท่าใด ส่วนใหญ่จะไปใช้อยู่สองอย่างคือ 1.) ใช้ทำคุณภาพวิเคราะห์ (Quantitative Analysis) 2.) ใช้วิเคราะห์รายละเอียดเกี่ยวกับหน่วยเซลล์ (Unit Cell) ความจริงแล้วเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันสามารถนำไปทำปริมาณวิเคราะห์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัฏภาคต่างๆซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่เราไม่รู้ การทำปริมาณวิเคราะห์โดยใช้เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันอาจทำได้ 3 วิธี ดังนี้

1.) ปริมาณวิเคราะห์เชิงโดยไม่ใช้สารมาตรฐาน (Analysis Without the Use of a Standard) เป็นวิธีที่ใช้วิเคราะห์สารที่เราไม่รู้ที่ประกอบด้วยผลึกที่มีองค์ประกอบเคมีเหมือนกันแต่มีวัฏภาคต่างกัน ข้อจำกัดของการวิเคราะห์แบบนี้คือใช้วิเคราะห์สารที่ไม่รู้ที่มีสูตรเคมีเหมือนกันเท่านั้น

2.) ปริมาณวิเคราะห์เชิงโดยใช้สารมาตรฐานภายใน (Analysis Using an Internal Standard) เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ต้องใช้สารเคมีพิเศษตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสารมาตรฐานภายในเติมลงในสารที่เราไม่รู้ที่จะทำการวิเคราะห์สารเคมีพิเศษตัวนี้ต้องมีคุณสมบัติพิเศษหลายๆอย่าง เช่น มีความเสถียรสูง มีความบริสุทธิ์ และไม่ทำปฏิกิริยากับวัฏภาคที่จะทำการวิเคราะห์

3.) ปริมาณวิเคราะห์เชิงโดยใช้สารมาตรฐานภายนอก (Analysis Using an External Standard) เป็นวิธีการวิเคราะห์โดยผสมของผสมชุดใหม่ขึ้นมาชุดหนึ่งจากวัฏภาคของสารที่เราสนใจได้เป็นสารที่เรารู้แล้วนำไปวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันเทียบกับผลของผสมที่ต้องการวิเคราะห์ นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟแล้วจะสามารถบอกได้สารที่เราไม่รู้ประกอบด้วยวัฏภาคใดอย่างละกี่เปอร์เซ็นต์

ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีปริมาณวิเคราะห์เชิงโดยไม่ใช้สารมาตรฐาน (Analysis Without the Use of a Standard) โดยใช้โปรแกรม Diffract<sup>plus</sup> Basic Evaluation Package EVA12 (Tiphanya, 2554) ในการสร้างแบบจำลองรูปร่างของพีคจาก Pattern แล้วปรับให้พอดีกับรูปร่างของพีคที่ได้จากการวัด ในการสร้างแบบจำลองจาก Pattern ของสารประกอบแต่ละชนิดในฐานข้อมูลจะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และความกว้างของพีค เพื่อให้แบบจำลองมีความแตกต่างกับผลการทดลองน้อยที่สุด หลังจากนั้นโปรแกรมจะรายงานผลการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆรวมทั้งปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิด และขนาดของจุดผลึกของสารตัวอย่างด้วย

**การจำลองรูปร่างพีค (FPM Model)** เป็นขั้นตอนแรกของการปรับ Pattern ให้เข้ากับผลการวัด ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

## 1.) การเตรียมเอกสาร EVA

- อิมพอร์ตข้อมูล RAW ของสารตัวอย่าง
- อิมพอร์ตPatternที่ต้องการ
- ในกล่องเครื่องมือหลักให้เลือก FPM Model
- เลือกแพทเทิร์นที่เกี่ยวข้อง
- คลิกปุ่ม Properties ที่อยู่ด้านข้างของกล่องเครื่องมือหลัก
- บนกล่อง Pattern Properties คลิกช่องสี่เหลี่ยมหน้าพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับค่า
- คลิก OK

## 2.) การปรับค่าพารามิเตอร์

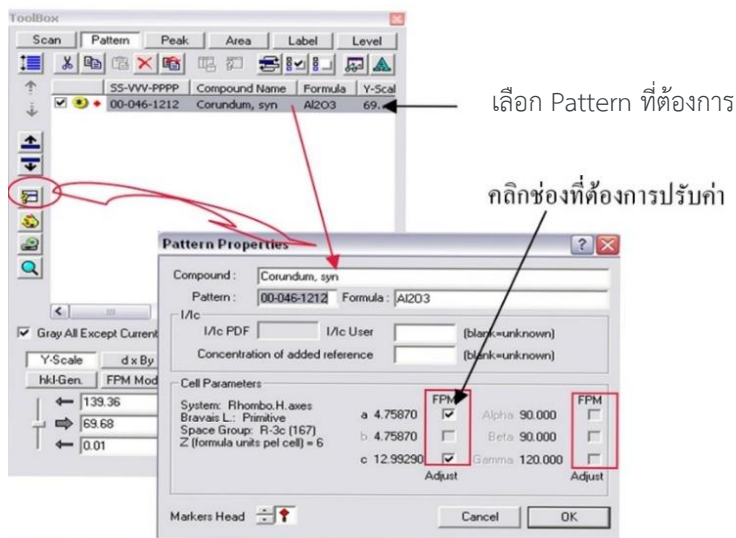
- คลิก Fit Parameter จะปรากฏกล่องโต้ตอบเลือก Model Parameter บนกล่องนี้ ผู้ใช้งานจะสามารถกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ต่างๆ (ถ้าต้องการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ค่าเริ่มต้น ให้คลิกที่ Reset)

- คลิก OK เพื่อเริ่มการคำนวณ
- หลังจากนั้นผลการคำนวณจะแสดงขึ้น

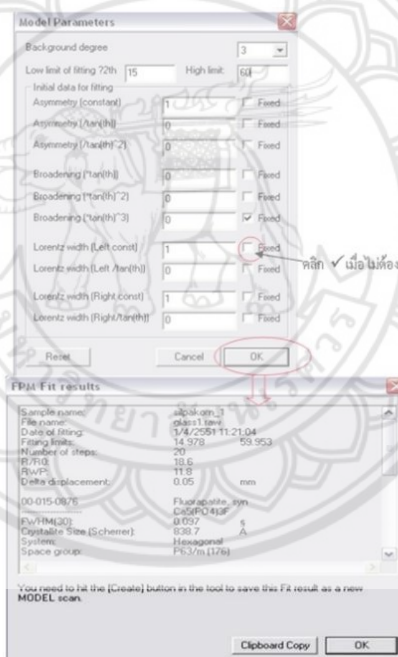
รายละเอียดของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ใน Model Parameter Dialog Box แสดง

ดังนี้

- Background Degree เพื่อสร้างแบบจำลองของเส้นแบคกราวนด์ ซึ่งมีค่าให้เลือก ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ค่าที่แนะนำควรเลือก 2 หรือ 3
- Low/High Limit of Fitting ช่วงของมุมที่ต้องการปรับค่า ค่าที่แนะนำควรเลือกไม่เกิน 60 องศา
- Asymmetry การปรับค่าต่างๆ ของอสมมาตรในแบบจำลอง
- Broadening การปรับค่าความกว้างของพีค ในแบบจำลอง
- Lorentz Width การปรับค่าต่างๆ ของความกว้างลอเรนซ์ในแบบจำลอง



รูปที่ 2.24 การเตรียมเอกสาร EVA  
(ที่มา: Tiphanya, 2554)



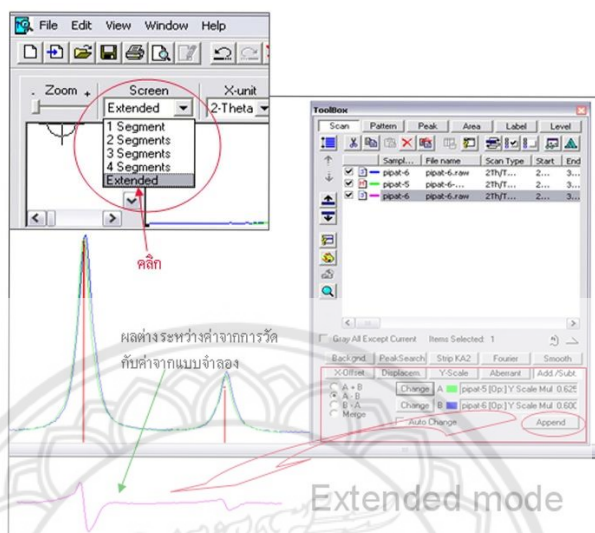
รูปที่ 2.25 การปรับค่าพารามิเตอร์  
(ที่มา: Tiphanya, 2554)

### 3.) การตรวจสอบผลการคำนวณด้วยรูปภาพ

- คลิกที่ปุ่ม Create หรือ Update เพื่อเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำ เมื่อกดปุ่มนี้ โปรแกรมจะสร้างสแกนจำลองขึ้นมาบนกล่องเครื่องมือหลัก โดยมีไอคอนกำกับเป็นตัวอักษร M ใหญ่ สีแดง ในขณะที่สแกนที่ได้จากการวัดตัวอย่างจะมีหมายเลขกำกับ

การสร้างเส้นกราฟแสดงความแตกต่างระหว่างค่าความเข้มจากการวัดและค่าจำลอง สามารถดำเนินการดังนี้

- เมื่อเลือก Extended ที่ได้แถบเครื่องมือบริเวณ Working Pane จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามแนวนอน
- คลิกที่ Add/Subt. บนกล่องเครื่องมือหลัก แล้วเลือกไฟล์ข้อมูลที่ต้องการ
- คลิกที่ Append จะปรากฏเส้นผลต่างระหว่างความเข้มที่ได้จากการวัดและจากแบบจำลองบนหน้าต่างที่เพิ่มขึ้นมา



รูปที่ 2.26 การตรวจสอบผลการคำนวณด้วยรูปภาพ  
(ที่มา: Tiphanya, 2554)



รูปที่ 2.27 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)  
(ที่มา: <https://www.slri.or.th>)

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุทางทันตกรรมด้วยยิปซัมฟลูออไรด์ที่ได้มาจากกระบวนการลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เพื่อศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูออไรด์ อีกทั้งยังศึกษาผลของขนาดที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล โดยคณะผู้จัดทำจะทำการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูออไรด์เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ติดมากับยิปซัมฟลูออไรด์ ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะทำให้คุณสมบัติของยิปซัมฟลูออไรด์ต่ำลง จากนั้นนำยิปซัมฟลูออไรด์ที่ผ่านการล้างมาทำการสังเคราะห์ซึ่งก็จะแตกต่างกันไปตามประเภทของยิปซัมที่นำไปทำวัสดุทางทันตกรรม ยิปซัมฟลูออไรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วนั้นจะนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางกล ได้แก่ การทนแรงอัด และนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การเรียงตัวของผลึก ปริมาณวัฏภาคของวัสดุทางทันตกรรม

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 สารเคมี

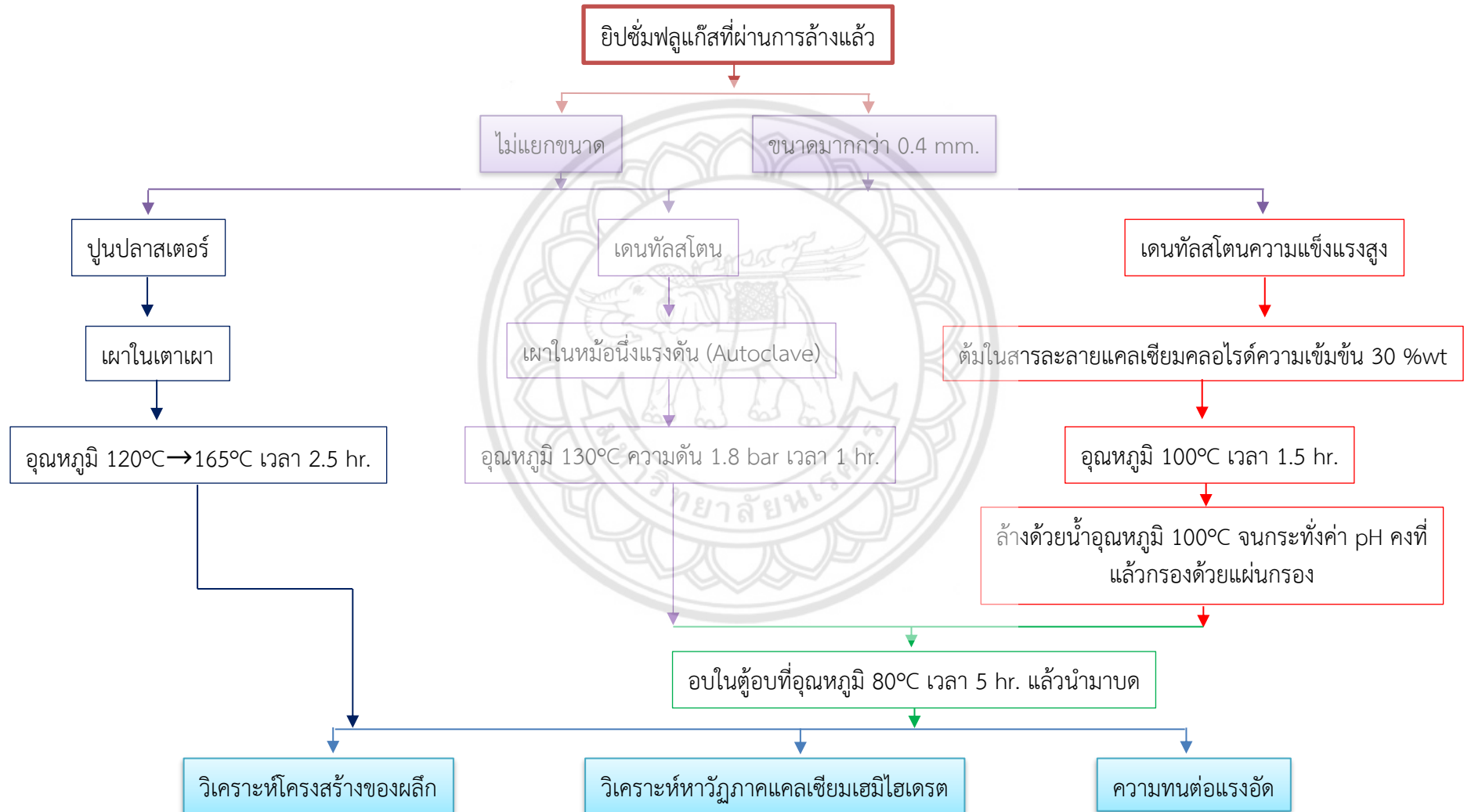
- 1.) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 โมลาร์
- 2.) แคลเซียมคลอไรด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

##### 3.1.2 อุปกรณ์

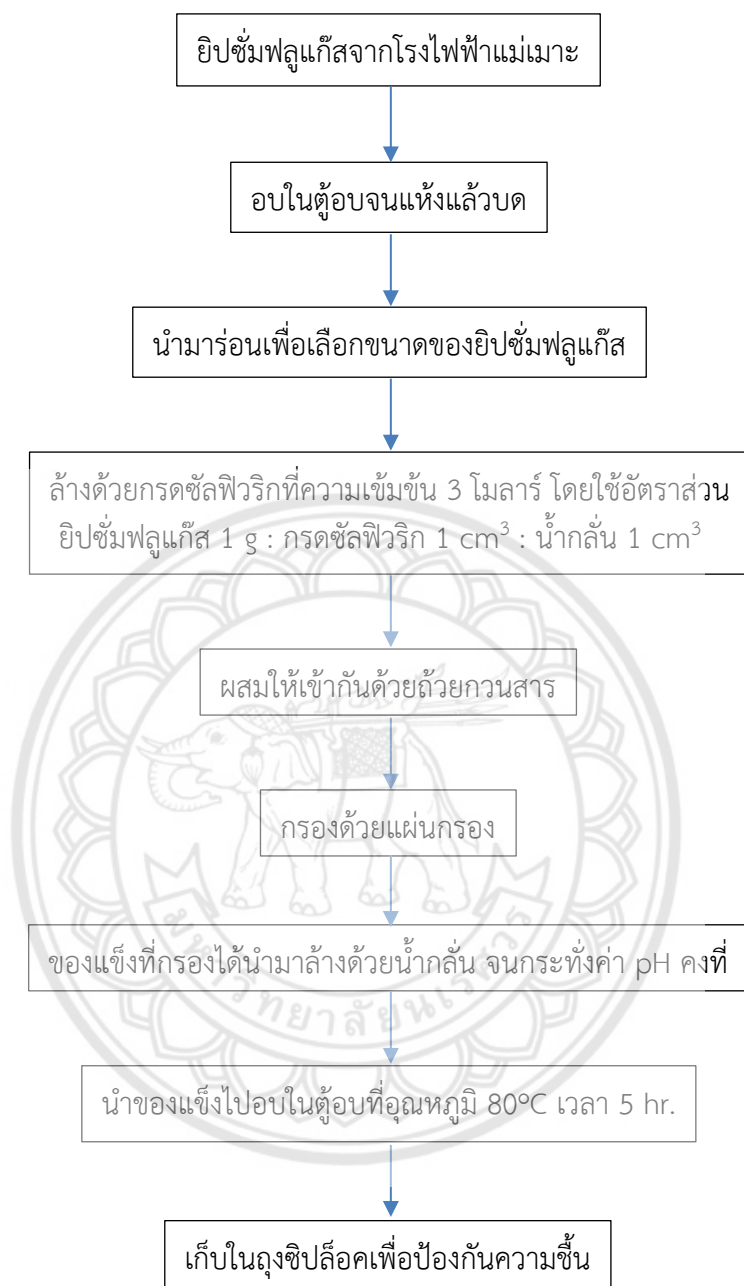
- 1) เครื่องกวนสาร รุ่น C-MAG HS7
- 2) เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น SI-4002
- 3) หม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave)
- 4) เตาเผา รุ่น Nabertherm GmbH
- 5) ตู้อบ รุ่น OP 100
- 6) กระจกชิลิคอนคาร์ไบด์ 600 และ 1200 กริท
- 7) กล้องบรรจุสารดูความขึ้นที่มีฝาปิดมิดชิด
- 8) ที่บดสาร
- 9) ปีกเกอร์
- 10) หม้อต้ม
- 11) กระจกกรอง



### 3.2 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางพันธุกรรมจากยิปซัมฟลูออไรด์

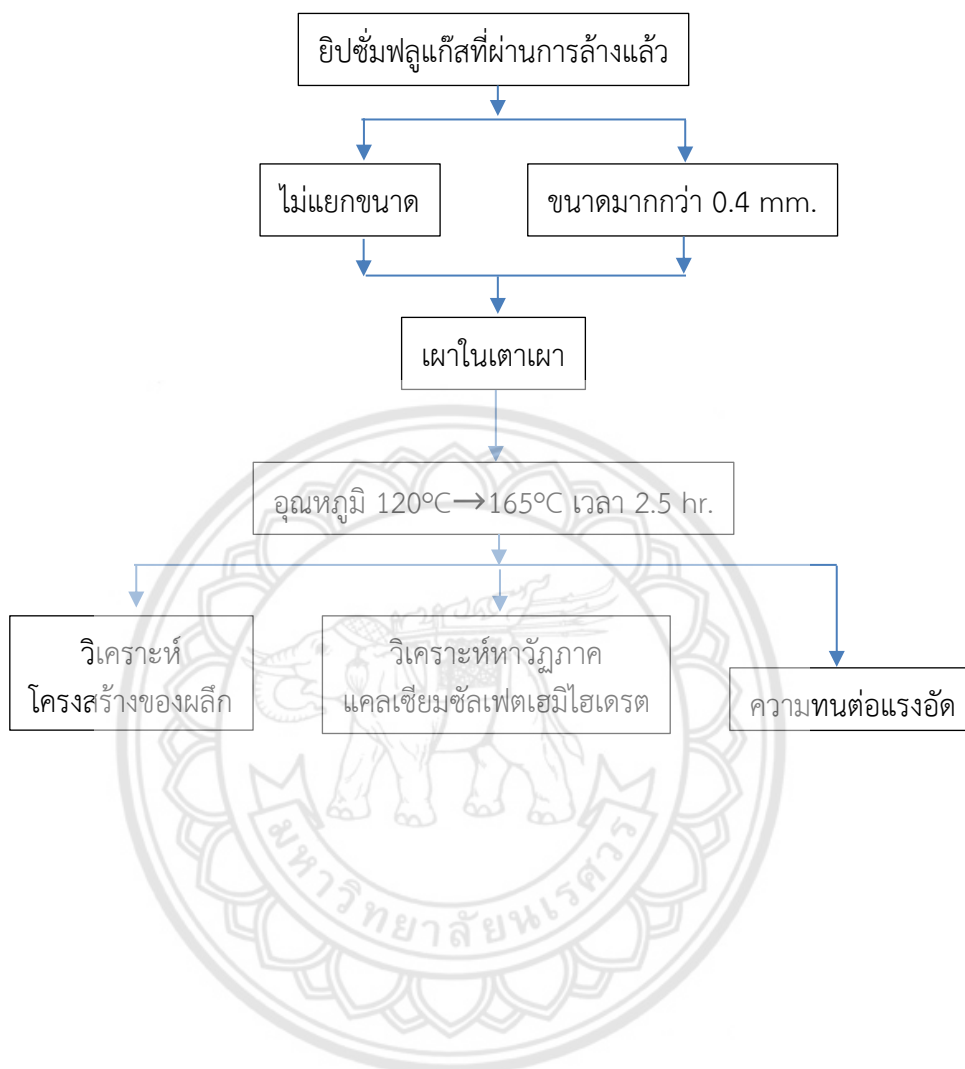


### 3.3 แผนผังการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส

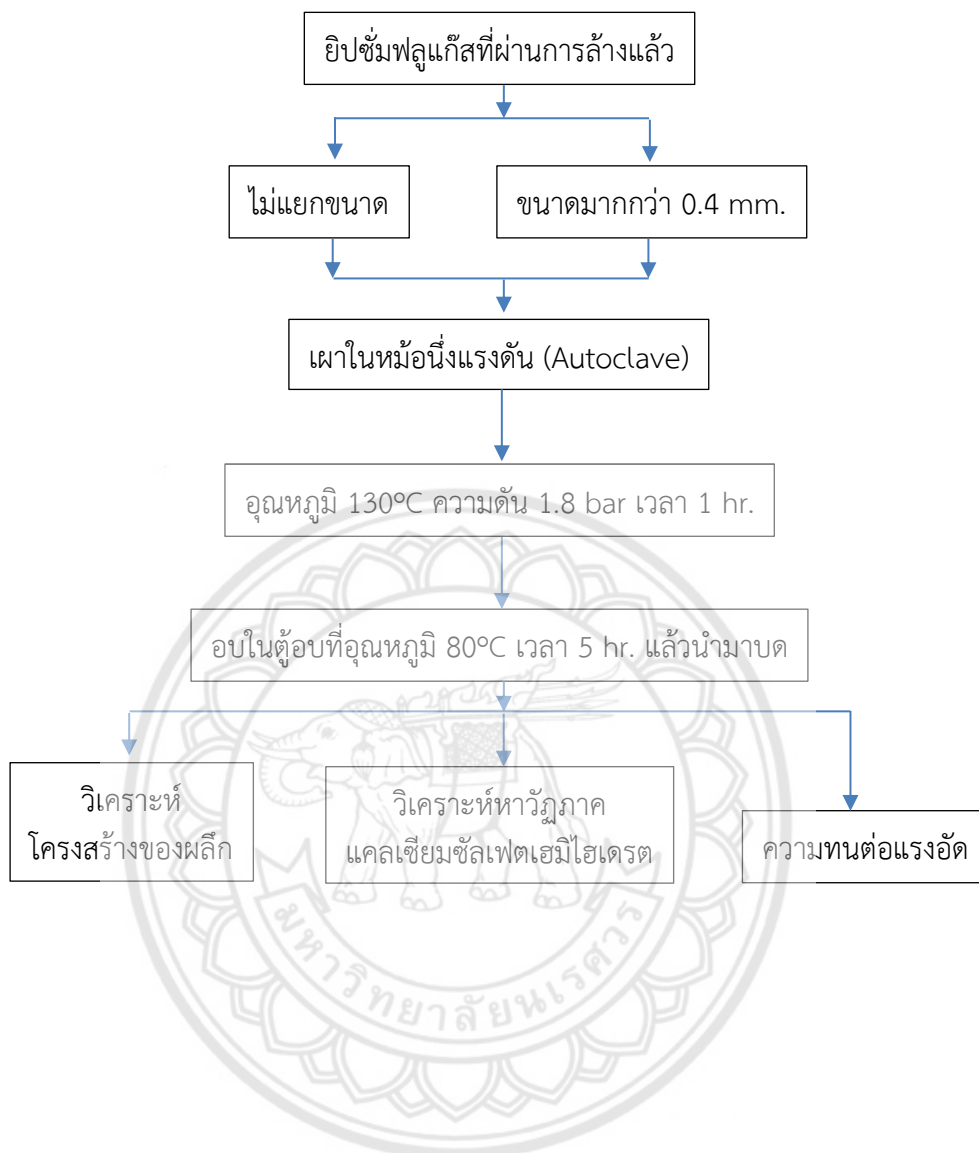


### 3.4 แผนการทดลอง

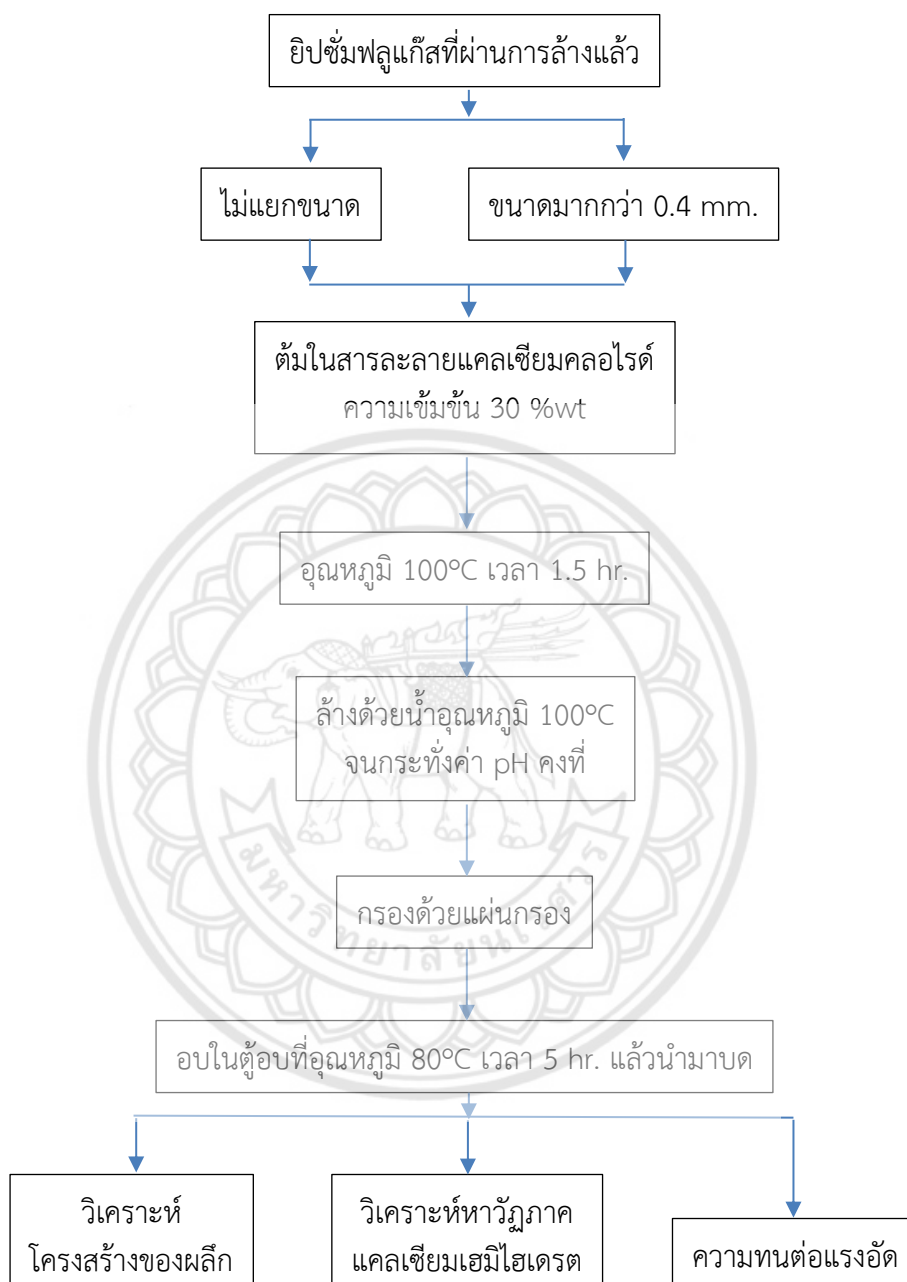
#### 3.4.1 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊สชนิดปูนปลาสเตอร์



## 3.4.2 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊สชนิดเดนทัลสโตน



### 3.4.3 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูออไรด์ชนิดเดนทัลสโตนความแข็งแรงสูง



### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.5.1 การกำหนดขนาดยิปซัม

นำยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะใส่ในถาด แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อเอาความชื้นออก จากนั้นนำยิปซัมฟลูแก๊สที่อบแล้วมาร้อนผ่านตะแกรง เพื่อเป็นการคัดแยกขนาดของยิปซัมฟลูแก๊ส ใช้ทำการทดลอง การร่อนยิปซัมผ่านตะแกรงจะเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกที่หยาบออกไปด้วย

#### 3.5.2 การล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส

การล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊สด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งกรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) ที่ปนมากับยิปซัมฟลูแก๊สให้เปลี่ยนเป็นยิปซัมมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุทางทันตกรรมมีความทนแรงอัดมากขึ้น การขยายตัวน้อยลง การล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊สด้วยกรดซัลฟิวริก จะใช้อัตราส่วนผสมยิปซัมฟลูแก๊ส 100 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร และกรดซัลฟิวริกเจือจาง (3 โมลาร์) 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนผสมจะถูกคนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Stirring capacity) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปกรองผ่านแผ่นกรอง ของแข็งที่ติดอยู่แผ่นกรองจะนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น ล้างจนกระทั่งมีค่า pH คงที่ แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

#### 3.5.3 การกำหนดขนาดของอนุภาคที่เหมาะสม

ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละชนิดมีความแข็งแรงที่ต่างกันและขนาดอนุภาคที่ต่างกันส่งผลให้ความแข็งแรงของยิปซัมทางทันตกรรมเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยผู้ทดลองจะทำการทดสอบความแข็งแรงโดยการนำยิปซัมที่ได้จากการล้างทำความสะอาดแล้ว นำไปขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมเป็น 1.8 กรัม ต่อ 2.5 กรัม โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแล้วนำส่วนผสมที่ได้ไปขึ้นรูปในหลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร สูง 1.6 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่ จากนั้นนำไปทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และวิเคราะห์หาวิญภาคของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

#### 3.5.4 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนปลาสเตอร์

นำยิปซัมที่ได้จากการล้างทำความสะอาดแล้ว นำไปเผาในเตาเผา โดยให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกจะเริ่มจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ช่วงที่สองจะเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 30 นาที หลังจากเผาเสร็จปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศ แล้วจึงนำไปบดด้วยที่บดสาร

### 3.5.5 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดินทาลสโตน

นำยิปซัมที่ได้จากการล้างทำความสะอาดแล้ว นำไปนึ่งในหม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) โดยจะเริ่มนึ่งที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปที 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ ปลอยทิ้งไว้ที่สภาวะนี้ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้แห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปบดด้วยที่บดสาร

### 3.5.6 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดินทาลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง

นำยิปซัมที่ได้จากการล้างทำความสะอาดแล้ว นำไปต้มในหม้อที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากต้มเสร็จปลอยทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปกรองผ่านแผ่นกรอง เพื่อแยกของแข็งออก ของแข็งที่กรองได้จะนำมาล้างด้วยน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปบดด้วยที่บดสาร

### 3.5.7 การทดลองเพิ่มเติม

การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดินทาลสโตนเมื่อนำไปขึ้นรูป โดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมเป็น 1.8 กรัม ต่อ 2.5 กรัม โดยน้ำหนัก พบว่ามีปริมาณน้ำที่ไม่ผสมกันกับผงยิปซัม จึงได้ทำการลดปริมาณน้ำเป็น 1.7 กรัม ต่อผงยิปซัม 2.5 กรัม

การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดินทาลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อนำไปขึ้นรูปแล้วไม่สามารถขึ้นรูปได้ จึงนำไปเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ โดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ปลอยทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

เมื่อนำยิปซัมทางทันตกรรมทั้ง 3 ชนิด ไปทดสอบการทนแรงอัดพบว่าการทนแรงอัดที่ได้มีค่าน้อย จึงเพิ่มขั้นตอนการทดลอง โดยจะใช้ขนาดอนุภาค 0.25-0.4 และ 0.045-0.1 มิลลิเมตร มาทำการทดลองเหมือนดังขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

## 3.6 ทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

### 3.6.1 วิเคราะห์หาวัฏภาคแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต

ผงยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์จะถูกเอาความชื้นออกที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำผงยิปซัมประมาณ 1 กรัม ใส่ลงกระจกนาฬิกาแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องใช้ 4 ตำแหน่ง เตรียมทั้งหมด 4 ตัวอย่าง โดยค่าน้ำหนักที่ชั่งได้คือค่า a

1.) คำนวณหา soluble anhydrite (Anhydrite III) นำ ethyl alcohol เข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมลงในกระจกนาฬิกาใบที่ 1 ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นปลอยให้เย็นในโถดูดความชื้น (desiccator) และนำไปชั่งน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักที่ได้คือค่า b จากนั้นนำไปคำนวณในสมการที่ 2.10

2.) คำนวณหา hemihydrate (HH,  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 1 ลูกบาศก์ เซนติเมตร ลงในกระจกนาฬิกาใบที่ 2 ผสมและปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักที่ชั่งได้คือค่า C จากนั้นนำไปคำนวณในสมการที่ 2.11

3.) คำนวณหา insoluble anhydrite (Anhydrite II) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 1 ลูกบาศก์ เซนติเมตร ลงในกระจกนาฬิกาใบที่ 3 ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปเก็บในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกมาอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักที่ได้คือค่า d จากนั้นนำไปคำนวณในสมการที่ 2.12

4.) คำนวณหา calcium sulfate dihydrate (DH,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) นำกระจกนาฬิกาใบที่ 4 ไปเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น และนำไปชั่งน้ำหนัก ค่าน้ำหนักที่ได้คือค่า e จากนั้นนำไปคำนวณในสมการที่ 2.13

### 3.6.2 การทดสอบความทนแรงอัด

นำยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์มาผสมกับน้ำ ส่วนผสมที่ได้จะนำไปขึ้นรูปในแบบหล่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรสูง 16 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง รอสวนผสมก่อตัวเต็มที่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วแกะตัวอย่างออกมาจากแบบหล่อเอาออกมาขัดผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษซิลิโคนคาร์ไบด์ เก็บตัวอย่างไว้ในกล่องบรรจุสารดูดความชื้นที่มีฝาปิดมิดชิด นำชิ้นตัวอย่างมาทดสอบความทนแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ที่มีอัตราให้แรง (load rate) 5000 นิวตัน/นาที ให้แรงจนชิ้นตัวอย่างแตกและบันทึกค่าแรงที่ได้หน่วยเป็นนิวตัน แล้วคำนวณเป็นแรงต่อพื้นที่ (เมกะปาสคาล)

### 3.6.3 การศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน

ในการศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนจะศึกษาก่อนขึ้นรูปและหลังขึ้นรูป โดยก่อนขึ้นรูปจะนำผงยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ จะเก็บผงยิปซัมไว้ในถุงซิปล็อคที่มีสารดูดความชื้น ส่วนหลังขึ้นรูปจะนำยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์มาผสมกับน้ำ ส่วนผสมที่ได้จะนำไปขึ้นรูปในแบบหล่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรสูง 16 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง รอสวนผสมก่อตัวเต็มที่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วแกะตัวอย่างออกมาจากแบบหล่อ เก็บตัวอย่างไว้ในกล่องบรรจุสารดูดความชื้นที่มีฝาปิดมิดชิด นำตัวอย่างมาหักแบ่งครึ่งความสูง จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยผงทอง แล้วศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

### 3.6.4 วิเคราะห์หาวัฏภาคของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต

โดยจะนำผงยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์ เก็บไว้ในถุงซิปล็อคที่มีสารดูดความชื้น จากนั้นจะนำผงยิปซัมใส่ในงานสำหรับเตรียมตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของขนาดและกระบวนการในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากกระบวนการลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เพื่อนำยิปซัมที่ได้ไปใช้ในวัสดุทางทันตกรรม ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของยิปซัมขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร และไม่แยกขนาด รวมไปถึงศึกษาการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรม 3 ประเภทคือ 1.ปูนปลาสเตอร์ (Plaster) 2.เดนทัลสโตน (Dental Stone) 3.เดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง (Dental Stone, High Strength) ซึ่งในขั้นตอนแรกนำยิปซัมที่ได้จากโรงงานมาคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร และไม่คัดแยกขนาด จากนั้นนำยิปซัมขนาดที่เราเลือกไปทำการล้างโดยใช้กรดซัลฟิวริก เมื่อผ่านการล้างนำไปทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ ตามกระบวนการของประเภทของยิปซัมแต่ละแบบ แล้วนำยิปซัมที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ จากนั้นนำไปขึ้นรูป และนำยิปซัมที่ขึ้นรูปไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางกล ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

#### 4.1 ศึกษาผลของขนาดของยิปซัมฟลูแก๊สที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล

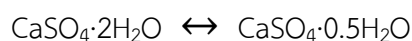
จากการทดสอบการขึ้นรูปของยิปซัมที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทต่างๆ พบว่าการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 แบบปูนปลาสเตอร์ โดยใช้การเผา ตามที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.4 สามารถขึ้นรูปได้ ในรูปแบบที่ 2 เดนทัลสโตนใช้หม้อนึ่งแรงดัน สามารถขึ้นรูปได้ รูปแบบที่ 3 เดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง ทำโดยการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ไม่สามารถขึ้นรูปได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทั้งหมดของยิปซั่มทางทันตกรรม

ชนิด	ประเภทของยิปซั่มทางทันตกรรม	กระบวนการสังเคราะห์	ผลการขึ้นรูป	เปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต
1	ปูนพลาสติก	เผา (120-165°C) ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร	ขึ้นรูปได้	79.25
		เผา (120-165°C) ไม่แยกขนาด	ขึ้นรูปได้	82.95
2	เดนทัลสโตน	Autoclave (130°C) ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร	ขึ้นรูปได้	85.02
		Autoclave (130°C) ไม่แยกขนาด	ขึ้นรูปได้	81.53
3	เดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง	ต้มในสารละลายแคลเซียม ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร	ขึ้นรูปไม่ได้	-
		ต้มในสารละลายแคลเซียม ไม่แยกขนาด	ขึ้นรูปไม่ได้	-

สาเหตุที่ไม่สามารถสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 ได้อาจมีสาเหตุจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ในการต้มมีความเข้มข้นที่สูงเกินไป ซึ่งไอออนที่เกิดจากแคลเซียมคลอไรด์จะช่วยดึงจุดโมเลกุลของน้ำและช่วยยับยั้งการเกิดพันธะในโครงสร้างผลึกเพื่อเปลี่ยนแปลงวัฏภาคจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตและการตกผลึกของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตอาจจะถูกยับยั้งถ้าหากมีไอออนมากเกินไปจึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ (สุจริ เกียรติมัน, 2544)

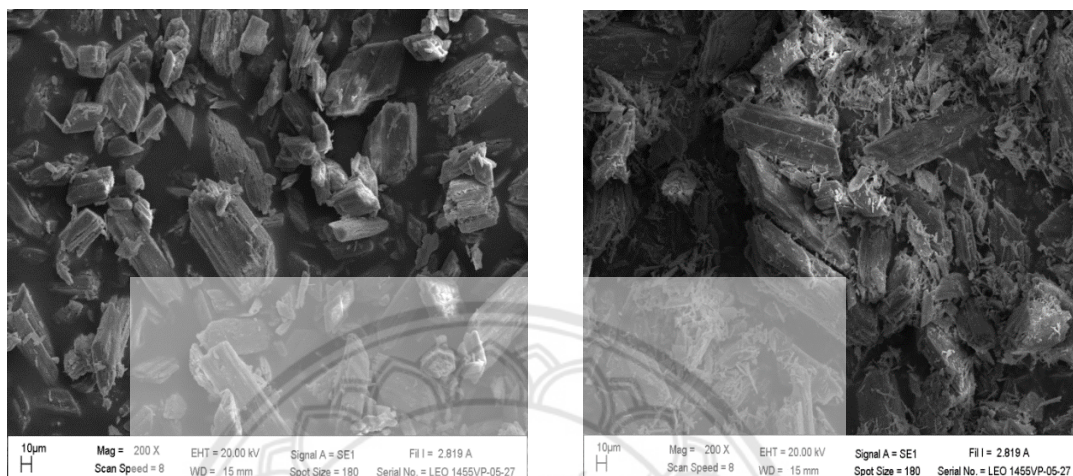
จากการตรวจหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตของยิปซั่มพลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์จะเห็นว่าผลึกของน้ำมีการระเหยไปจึงมีการเปลี่ยนแปลงจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตไปเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ดังแสดงในสมการปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



จากปฏิกิริยาจะเห็นได้ว่าแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตจะมีน้ำ 2 หน่วย เมื่อนำยิปซั่มมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์น้ำบางส่วนจะระเหยออกไปกลายเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตหรือเหลือน้ำเพียง 0.5 หน่วย และเมื่อนำไปผสมกับน้ำก็จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับและจะเกิดการจับตัวกันโดยส่วนที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากแคลเซียมไดไฮเดรตไปเป็นแคลเซียมเอมิไฮเดรตจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเอมิไฮเดรตถ้ามีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากพอก็จะทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้

#### 4.1.1 ขนาดผลึกของยิปซัมฟลูออไรด์ก่อนการขึ้นรูป

จากการทดลองพบว่าที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 แบบปูนปลาสเตอร์ ผลึกก่อนขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็นแท่งที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับอนุภาคแบบไม่แยกขนาดซึ่งผลึกที่ได้ของอนุภาคแบบไม่แยกขนาดจะมีทั้งลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ แท่งขนาดเล็ก และเป็นผงกระจายตัวอยู่ด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1

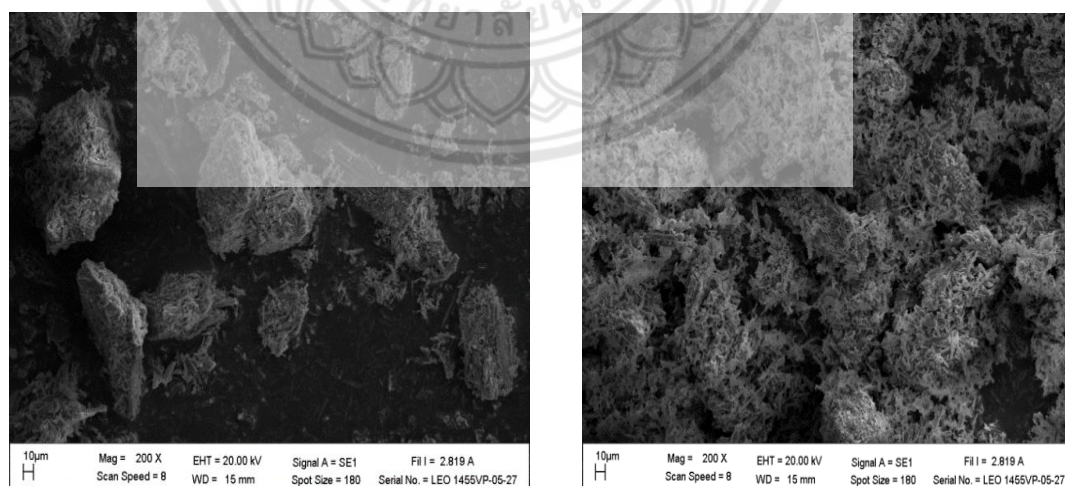


(ก) ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร

(ข) แบบไม่แยกขนาด

#### รูปที่ 4.1 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูออไรด์ก่อนขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1

และที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตรในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 แบบเดนทาลสตอน พบว่าผลึกก่อนขึ้นรูปจะมีการจับตัวกันเป็นก้อน แต่ที่แบบไม่แยกขนาดผลึกจะมีการกระจายตัวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



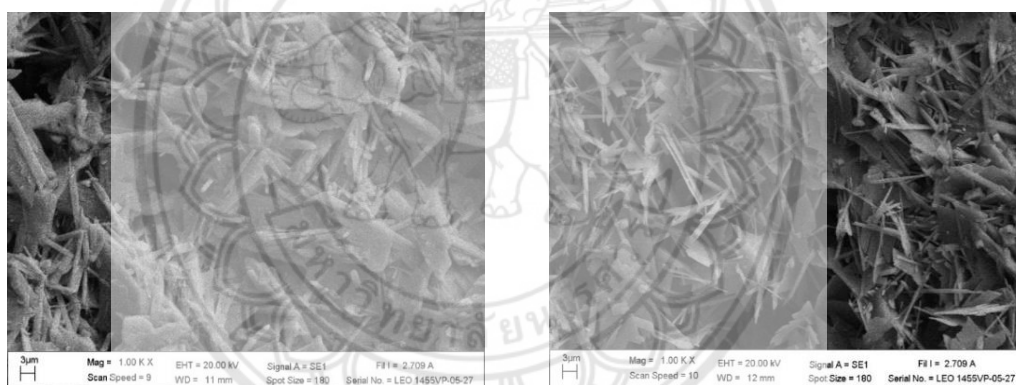
(ก) ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร

(ข) แบบไม่แยกขนาด

#### รูปที่ 4.2 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูออไรด์ก่อนขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2

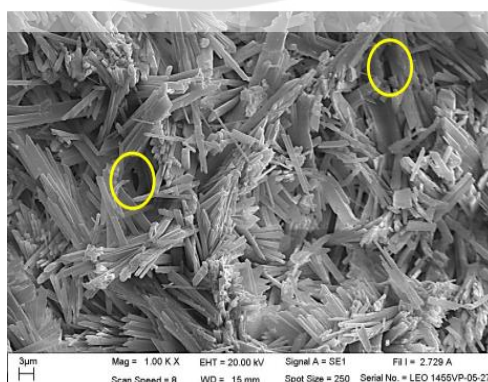
#### 4.1.2 ผลของขนาดต่อการเรียงตัวของผลึกหลังขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊ส

จากการนำยิปซัมที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 ไปทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อยิปซัมเท่ากับ 1.8 กรัม ต่อ 2.5 กรัม โดยน้ำหนัก นำมาผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานโดยมีขนาดความสูง 16 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร รอให้ยิปซัมแห้งตัวเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำไปศึกษาการเรียงตัวของผลึก โดยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแบบส่องกราด (SEM) พบว่าที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตรและแบบไม่แยกขนาดในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 จะมีการแตกตัวของผลึกเป็นรูปเข็มแต่ก็ยังมีบางส่วนที่ยังแตกตัวได้ไม่ดี ซึ่งที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร จะมีการแตกตัวได้น้อยกว่าและมีความใกล้ชิดกันของผลึกที่น้อยกว่าแบบไม่แยกขนาด และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของนายพรชัย อุดเถิน และนายณัฐกร มั่นภักดี ที่ทำการทดลองที่ขนาดอนุภาค 0.045-0.1 มิลลิเมตร พบว่าที่ขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะมีการแตกตัวได้ดีกว่า มีความใกล้ชิดกันของผลึกที่มากกว่าที่ขนาดอนุภาคขนาดใหญ่และแบบไม่แยกขนาด (พรชัย อุดเถิน และณัฐกร มั่นภักดี, 2560) เนื่องจากเมื่อทำการขึ้นรูปแล้วจะทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีการดึงน้ำกลับเข้าไปในโครงสร้างซึ่งทำให้เกิดการจับตัวกันของผลึกทำให้ผลึกที่ได้มีความใกล้ชิดกันมากขึ้นและลักษณะของผลึกจะแตกตัวเป็นแท่งเข็มมีโครงสร้างผลึกที่หนาแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4.3



(ก) แบบไม่แยกขนาด

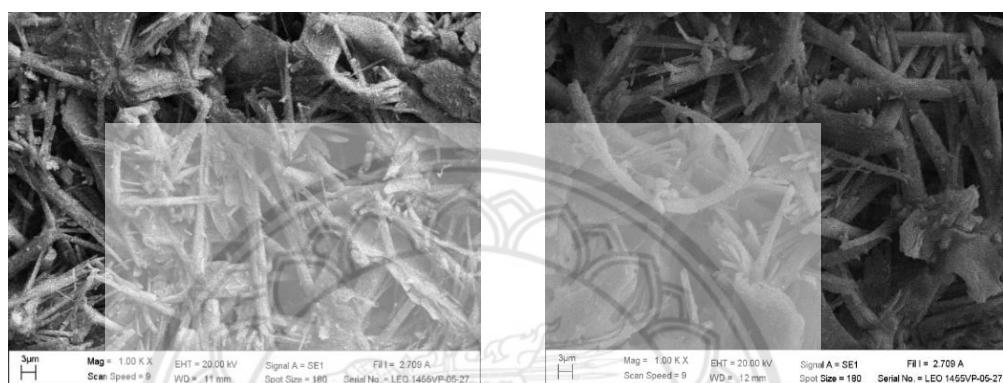
(ข) ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร



(ค) ขนาดอนุภาค 0.045-0.1 มิลลิเมตร

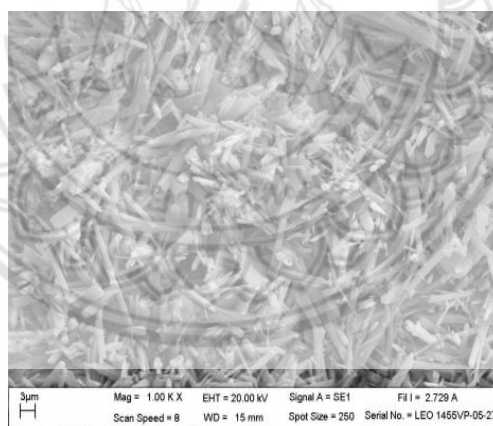
รูปที่ 4.3 ลักษณะของผลึกหลังขึ้นรูปในการสังเคราะห์ยิปซัมรูปแบบที่ 1

และที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตรและแบบไม่แยกขนาดในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 จะมีการแตกตัวของผลึกเป็นรูปเข็มแต่ก็ยังมีบางส่วนที่ยังแตกตัวได้ไม่ดี ซึ่งที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร จะมีการแตกตัวได้ดีกว่าและมีความใกล้ชิดกันของผลึกที่มากกว่าแบบไม่แยกขนาด และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของนายพรชัย อุดเถิน และนายรัฐกร มั่นภักดี ที่ทำการทดลองที่ขนาดอนุภาค 0.045-0.1 มิลลิเมตร พบว่าที่ขนาดอนุภาคขนาดเล็กนี้จะมีการแตกตัวได้ดีกว่าและมีความใกล้ชิดกันของผลึกที่มากกว่าที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตรและแบบไม่แยกขนาด (พรชัย อุดเถิน และรัฐกร มั่นภักดี, 2560) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่งผลถึงสมบัติทางกลด้านการทนแรงอัดตั้งที่จะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป



(ก) แบบไม่แยกขนาด

(ข) ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร



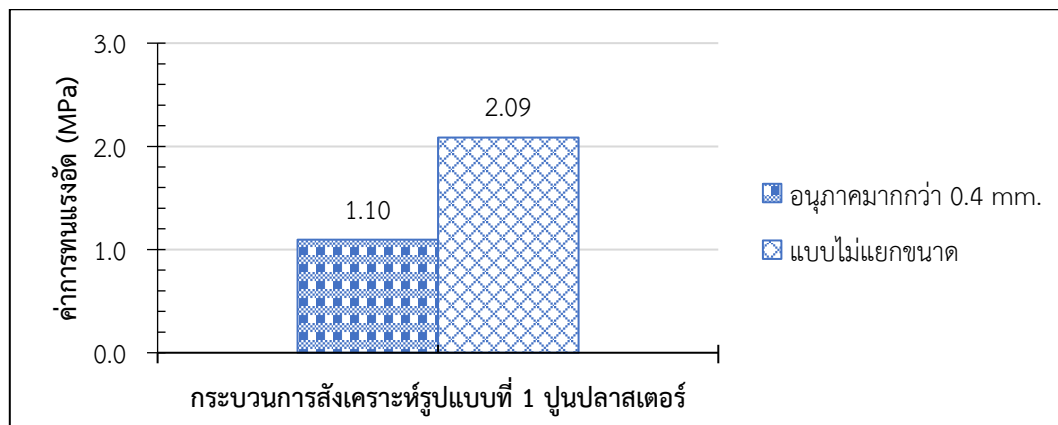
(ค) ขนาดอนุภาค 0.045-0.1 มิลลิเมตร

#### รูปที่ 4.4 ลักษณะของผลึกหลังขึ้นรูปในการสังเคราะห์ยิปซัมรูปแบบที่ 2

##### 4.1.3 ผลของขนาดต่อค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้จากยิปซัมทางทันตกรรม

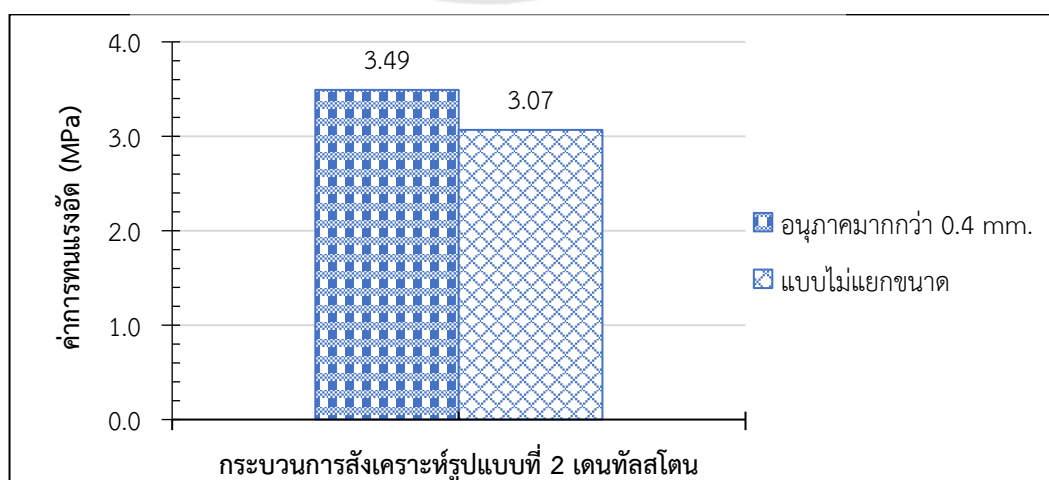
จากการทดสอบค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตรของกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 จะมีค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าแบบไม่แยกขนาด เนื่องจากอนุภาคแบบไม่แยกขนาดจะมีปริมาณสัดส่วนของอนุภาคขนาดเล็กที่มากกว่าส่งผลให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาในการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคได้เร็วกว่าที่ขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ (Le Fu และ Wei xia, 2560) และเมื่อเทียบกับผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต พบว่าที่อนุภาคแบบไม่แยกขนาด

จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนวัสดุภาคเป็นแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตได้มากกว่าที่ขนาดอนุภาคใหญ่ จึงส่งผลให้ค่าการทนแรงอัดที่ได้มีค่าที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ของอนุภาคขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร กับแบบไม่แยกขนาด

และที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร ของกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 จะมีค่ากำลังอัดที่มากกว่าแบบไม่แยกขนาด เนื่องจากอนุภาคแบบไม่แยกขนาดจะมีปริมาณสัดส่วนของอนุภาคขนาดเล็กที่มากกว่า เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกจะเกิดการระเหยได้ดีกว่า เมื่อน้ำระเหยไปแล้วจะมีอนุภาคบางส่วนทำปฏิกิริยากับไอน้ำภายในหม้อหนึ่งแรงดัน จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงวัสดุภาคเป็นแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตกลับไปเป็นวัสดุภาคแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเมื่อทำการขึ้นรูป อนุภาคที่เกิดการเปลี่ยนแปลงวัสดุภาคเป็นแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีกและเมื่อเทียบกับผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต พบว่าที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนวัสดุภาคเป็นแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตได้มากกว่าแบบไม่แยกขนาด จึงส่งผลให้ค่าการทนแรงอัดของแบบไม่แยกขนาดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.6

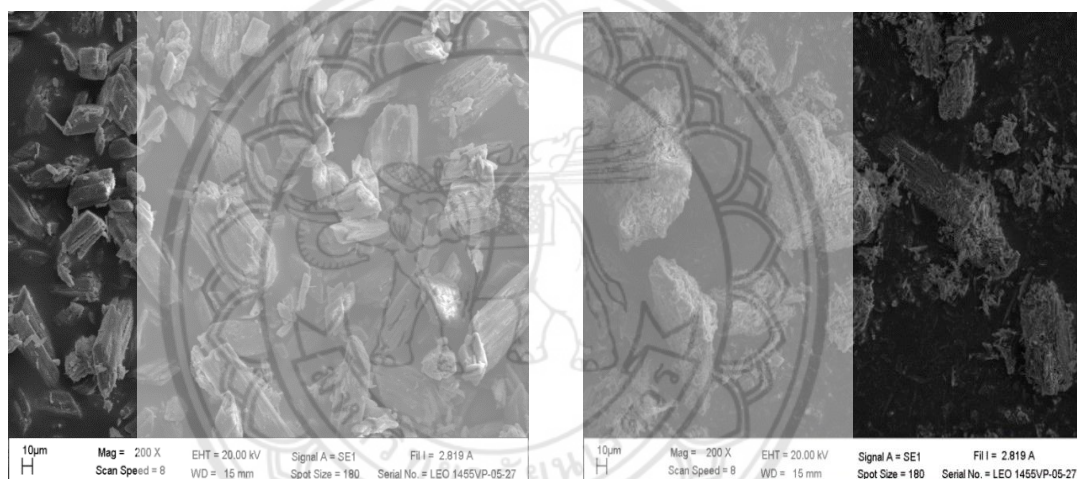


รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ของอนุภาคขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร กับแบบไม่แยกขนาด

## 4.2 ศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละรูปแบบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลจากยิปซัมฟลูแก๊ส

### 4.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรม

จากการทดลองพบว่าในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 แบบปูนพลาสติกนำมาเผาที่อุณหภูมิ 120-165 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที และในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 แบบเดนทัลสโตน จะนั่งในหม้อหนึ่งแรงดันที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ จากนั้นนำมาศึกษาผลึกก่อนขึ้นรูปโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (SEM) พบว่าในกระบวนการสังเคราะห์ในรูปแบบที่ 1 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแท่งที่มีขนาดใหญ่ และในกระบวนการสังเคราะห์ในรูปแบบที่ 2 ผลึกก่อนขึ้นรูปจะมีการจับตัวกันเป็นก้อน เนื่องจากกระบวนการที่มีความดันเข้ามาเกี่ยวข้องจะทำให้ผลึกที่ได้มีการจับตัวกันไม่แตกตัวเหมือนในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.7



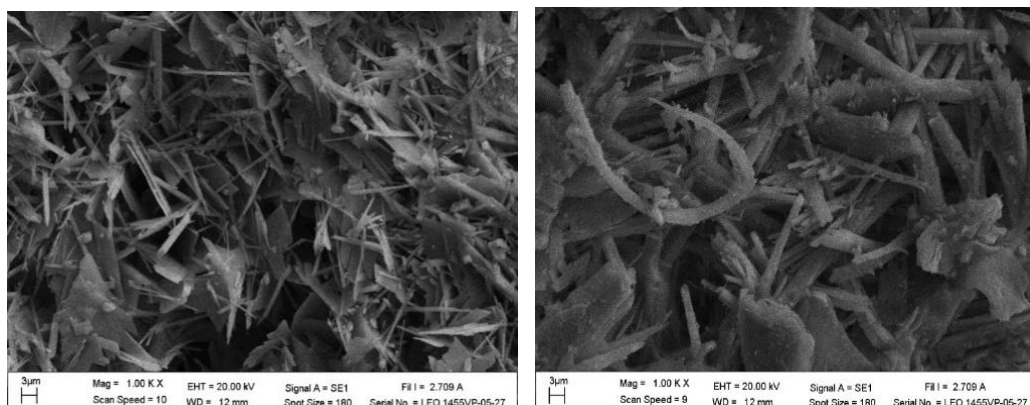
(ก) กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1

(ข) กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2

รูปที่ 4.7 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สก่อนขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัม

จากการนำยิปซัมที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 ไปทำการขึ้นรูป เพื่อดูการเรียงตัวของผลึกหลังขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อยิปซัมเท่ากับ 1.8 กรัม ต่อ 2.5 กรัม โดยนำหนักนำมาผสมให้เข้ากันแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานโดยมีขนาดความสูง 16 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร รอให้ยิปซัมแข็งตัวเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำไปศึกษาการเรียงตัวของผลึก โดยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแบบส่องกราด (SEM) พบว่า การสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 จะมีการแตกตัวของผลึกเป็นรูปเข็มแต่ก็ยังมีบางส่วนที่ยังแตกตัวได้ไม่ดี และที่กระบวนการสังเคราะห์ในรูปแบบที่ 2 จะมีการแตกตัวของผลึกเป็นรูปเข็มเช่นเดียวกันแต่มีความใกล้ชิดกันของผลึกที่มากกว่า การสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากเมื่อทำการขึ้นรูปแล้วจะทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีการดึงน้ำกลับเข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งทำให้เกิดการจับตัวกันของผลึกทำให้ผลึกที่ได้มีความใกล้ชิดกันมากขึ้นและลักษณะของผลึกจะแตกตัวเป็นแท่งเข็มมีโครงสร้างผลึกที่หนาแน่น ส่งผลทำให้ค่าการทน

แรงอัดของชิ้นงานที่กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มีค่าการทนแรงอัดที่น้อยกว่าในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.9



(ก) กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1

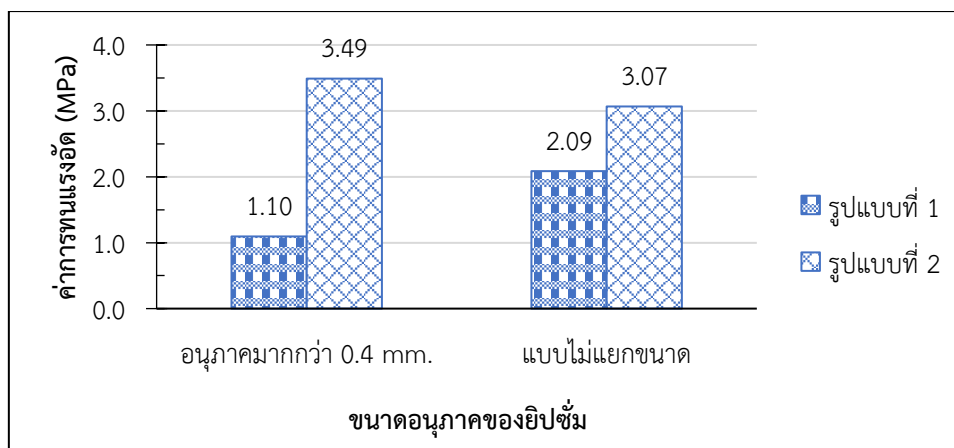
(ข) กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2

#### รูปที่ 4.8 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัม

จากการทดลองพบว่าในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 ทำโดยการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้วัฏภาคแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่มีขนาดเล็ก จากการทดลองพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ต้มอาจมีความเข้มข้นที่สูงเกินไป ทำให้เวลาในการก่อตัวนาน ซึ่งไอออนที่เกิดจากแคลเซียมคลอไรด์จะช่วยดึงดูดโมเลกุลของน้ำช่วยยับยั้งการเกิดพันธะในโครงสร้างผลึกเพื่อเปลี่ยนแปลงวัฏภาคจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตและการตกผลึกของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตอาจจะถูกยับยั้งถ้าหากมีไอออนมากเกินไปจึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ (สุธารี เกียรติมัน, 2544) จึงส่งผลทำให้ไม่สามารถที่จะคำนวณเปอร์เซ็นต์ของการเกิดแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตได้

เมื่อเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของทั้งสองกระบวนการพบว่ากระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มีค่ากำลังอัดที่น้อยกว่ากระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 เนื่องจากมีการเรียงตัวของผลึกที่ใกล้ชิดกันมากกว่าและเมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตของการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนวัฏภาคแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตได้ดีกว่าการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 จึงส่งผลให้ค่าการทนแรงอัดที่ได้มีค่าที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.9

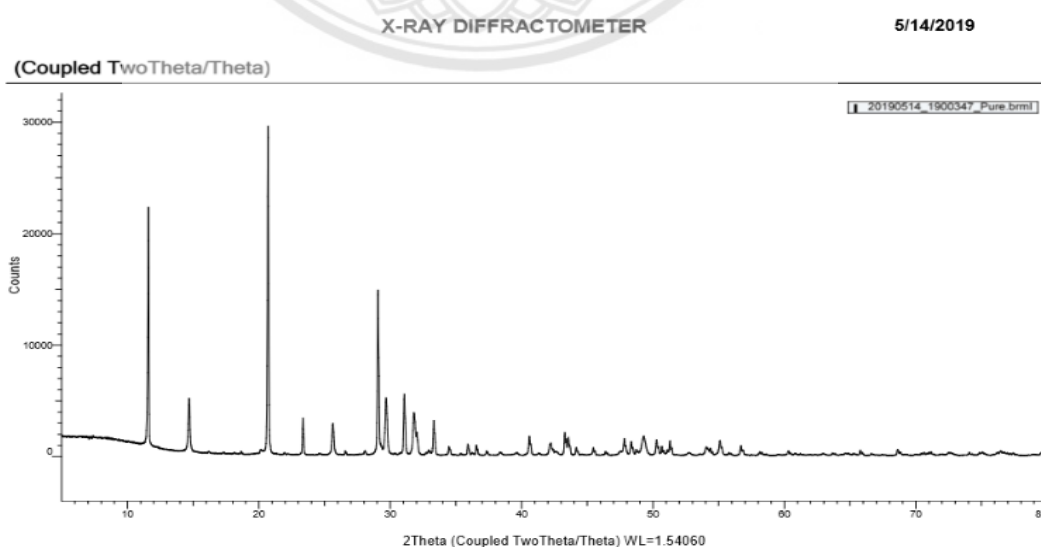




รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดในการสังเคราะห์ยิปซั่มแต่ละประเภท

พบว่าค่าการทนแรงอัดที่ได้จากการสังเคราะห์ทั้งสองรูปแบบมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำต่อยิปซั่มแต่ละประเภทมีความไม่เหมาะสมในการขึ้นรูป อีกทั้งระยะเวลาในการเก็บของยิปซั่มก็มีผล เพราะมีความชื้นเข้าไปทำให้ค่าการทนแรงอัดนั้นลดลง (จรรยา ชื่นอารมณ, 2554)

จากการเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดที่ได้พบว่าการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มีค่าการทนแรงอัดที่น้อยกว่าการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 จึงได้นำยิปซั่มที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทั้ง 2 รูปแบบและยิปซั่มที่ยังไม่ผ่านการสังเคราะห์ไปทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ X-ray Diffraction (XRD) เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณของวัฏภาคของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตในกระบวนการสังเคราะห์แต่ละ โดยการวิเคราะห์ค่า X-Ray Diffraction ผลที่ออกมาจะเป็นกราฟ ดังรูปที่ 4.10 แล้วนำพื้นที่ใต้กราฟของพีคไปหาปริมาณวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ผลที่ได้ สีแดงคือแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต สีเขียวคือแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต และสีน้ำเงินคือเบต้าแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต

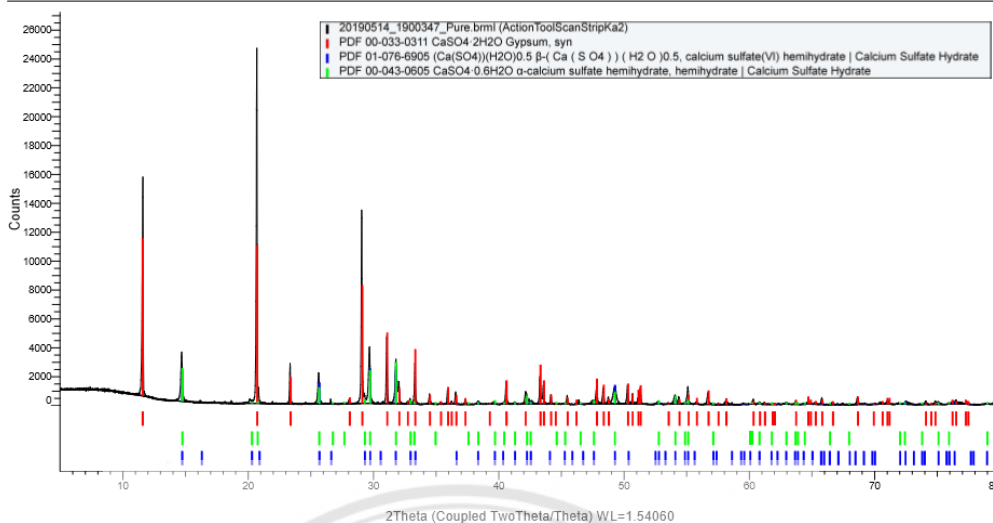


รูปที่ 4.10 ผล X-Ray Diffraction ของยิปซั่มฟลูแก๊สที่ยังไม่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ของขนาดอนุภาค 0.25-0.4 มิลลิเมตร

## X-RAY DIFFRACTOMETER

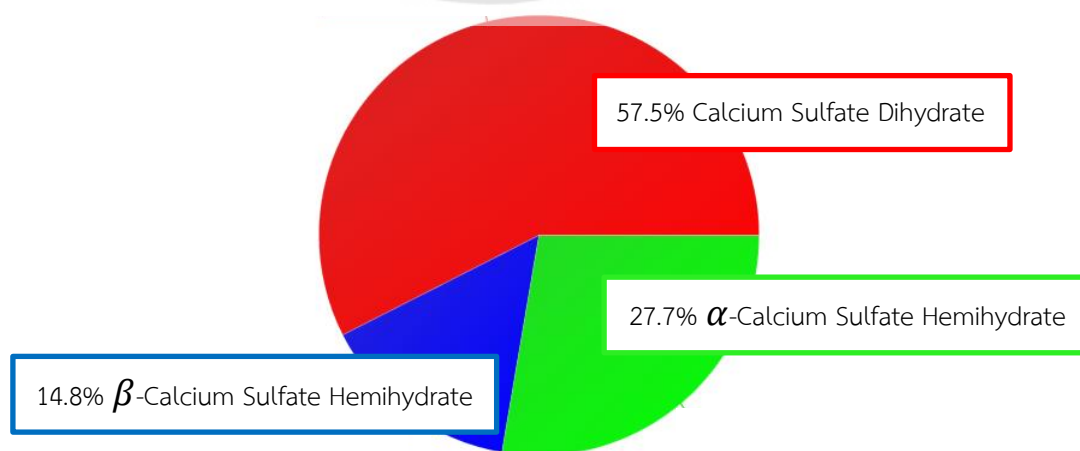
5/14/2019

(Coupled TwoTheta/Theta)

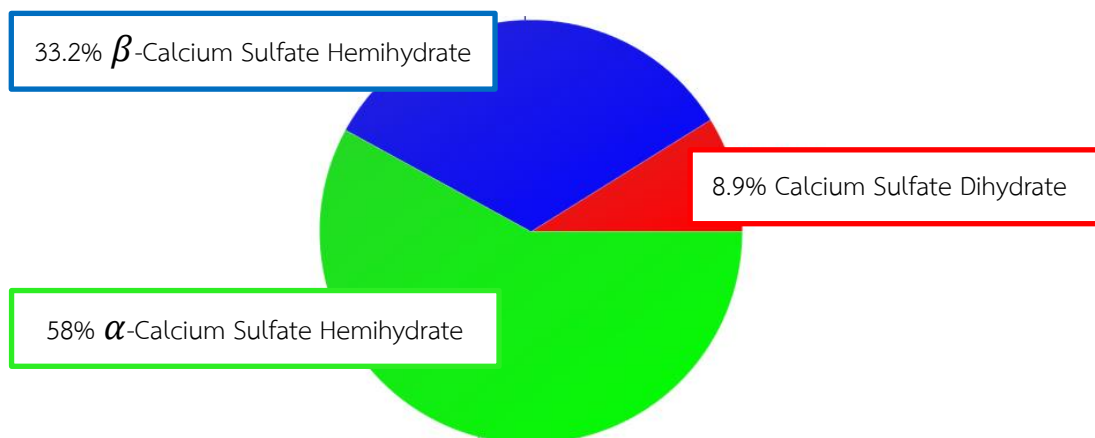


รูปที่ 4.11 ผลของ X-Ray Diffraction ที่นำพื้นที่ได้กราฟไปหาปริมาณร้อยละของยิปซัมฟลูแก๊สที่ยังไม่ผ่านการสังเคราะห์ของขนาดอนุภาค 0.25-0.4 มิลลิเมตร

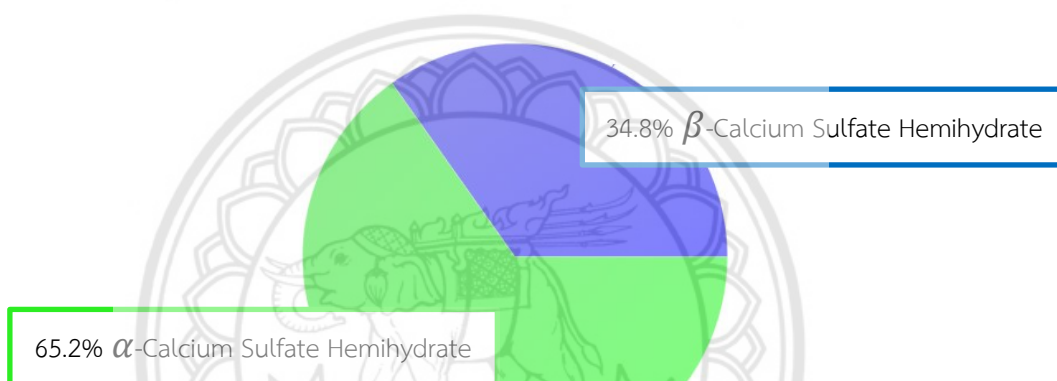
พบว่ายิปซัมที่ยังไม่ผ่านการสังเคราะห์จะมีปริมาณของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต 57.5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเบต้าแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต 14.8 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต 27.7 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมรูปแบบที่ 1 มีปริมาณร้อยละของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต 8.9 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเบต้าแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต 33.2 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต 58 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ในการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมรูปแบบที่ 2 มีปริมาณร้อยละของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต 34.8 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต 65.2 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ปริมาณร้อยละของยิปซัมทางทันตกรรมที่ยังไม่ผ่านการสังเคราะห์



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ปริมาณวัฏภาคของยิปซัมทางทันตกรรมที่ผ่านการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ปริมาณวัฏภาคของยิปซัมทางทันตกรรมที่ผ่านการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2

การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมรูปแบบที่ 2 สามารถขึ้นรูปได้ พบว่ามีปริมาณวัฏภาคแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตมากกว่า จึงทำให้มีค่าการทนแรงอัดมากกว่าในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และแบบที่ยังไม่ผ่านการสังเคราะห์ เนื่องจากวัฏภาคแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตจะมีรูปผลึกเป็นแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งจะมีความแข็งแรงมากกว่าวัฏภาคเบต้าแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่มีรูปผลึกเป็นแบบที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Amorphous) ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณวัฏภาคเอมิไฮเดรตโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของยิปซัมที่ยังไม่ผ่านการสังเคราะห์จะมีปริมาณแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต 42.5 เปอร์เซ็นต์ ในการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมทั้ง 2 รูปแบบ พบว่าในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มีปริมาณแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต 91.2 เปอร์เซ็นต์ และการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 มีปริมาณแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าการทนแรงอัดของการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมรูปแบบที่ 2 มีค่ามากกว่ารูปแบบที่ 1 อาจจะเป็นเพราะในการเปลี่ยนไปเป็นเอมิไฮเดรตในรูปแบบที่ 2 มีปริมาณวัฏภาคของแอลฟาเอมิไฮเดรตมากกว่าจึงส่งผลทำให้ค่าการทนแรงอัดมีค่ามากกว่า

### 4.3 การปรับปรุงคุณสมบัติยิปซัมทางทันตกรรม

#### 4.3.1 ปรับปรุงคุณสมบัติยิปซัมทางทันตกรรมที่ได้จากการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3

จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 ที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ตั้มมีความเข้มข้นที่สูงเกินไป ทำให้เวลาในการก่อตัวนาน ซึ่งไอออนที่เกิดจากแคลเซียมคลอไรด์จะช่วยดึงดูดโมเลกุลของน้ำช่วยยับยั้งการเกิดพันธะในโครงสร้างผลึกเพื่อเปลี่ยนแปลงวิฤภาคจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตและการตกผลึกของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตอาจจะถูกยับยั้งถ้าหากมีไอออนมากเกินไปจึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ (สุธารี เกียรติมัน, 2544) จึงได้นำไปเพิ่มกระบวนการโดยการเผาที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ดังตารางที่ 4.2

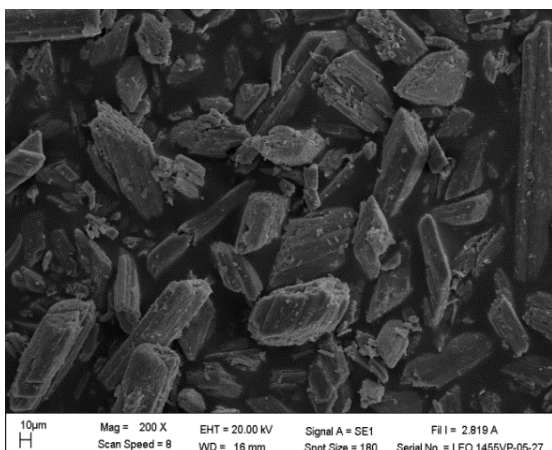
**ตารางที่ 4.2** ตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 ของยิปซัมทางทันตกรรม

ชนิด	ประเภทของยิปซัมทางทันตกรรม	กระบวนการสังเคราะห์	ผลการขึ้นรูป	เปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต
1	เดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง	ตั้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และเผาที่ 165°C ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร	ขึ้นรูปได้	89.56
		ตั้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และเผาที่ 165°C ไม่แยกขนาด	ขึ้นรูปได้	87.45

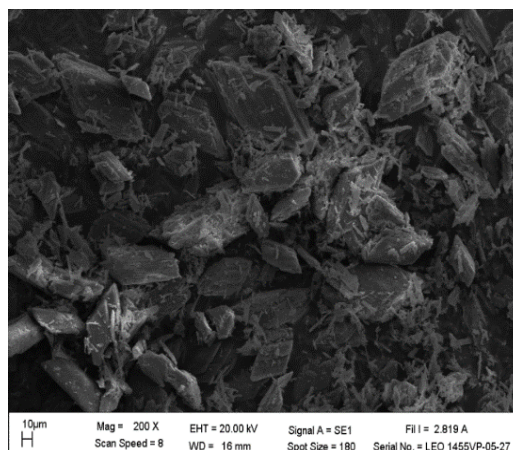
เมื่อขึ้นรูปได้แล้วจึงได้นำยิปซัมทางทันตกรรมที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยรูปแบบนี้ไปศึกษาโดยมีหัวข้อดังนี้

#### 1.) ขนาดผลึกของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการขึ้นรูป

จากการส่องดูลักษณะผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (SEM) พบว่า ผลึกที่มีขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร จะมีลักษณะผลึกเป็นแบบแท่งขนาดใหญ่ แต่ที่แบบไม่แยกขนาดผลึกจะมีทั้งแบบแท่งที่มีขนาดใหญ่ แบบแท่งเล็กและแบบผงอยู่ปนกัน ซึ่งเกิดจากอนุภาคที่ใช้มีความหลากหลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.15



(ก) ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร

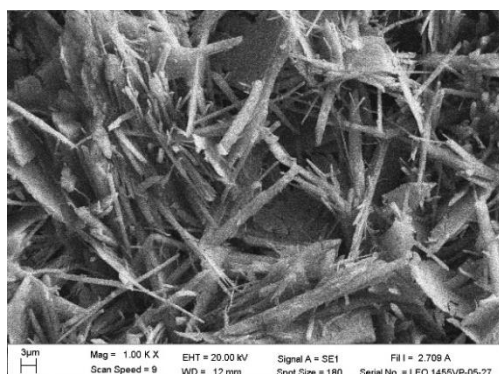


(ข) แบบไม่แยกขนาด

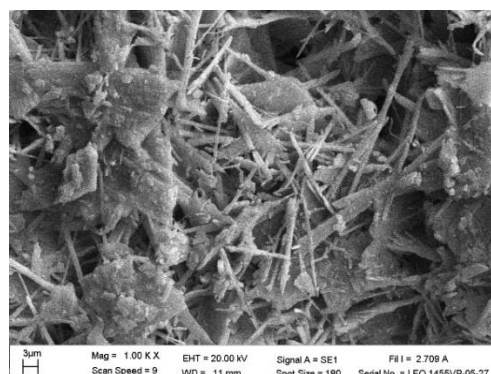
รูปที่ 4.15 ลักษณะยิปซัมฟลูแก๊สก่อนขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3

## 2.) ผลของขนาดต่อเรียงตัวของผลึกหลังขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊ส

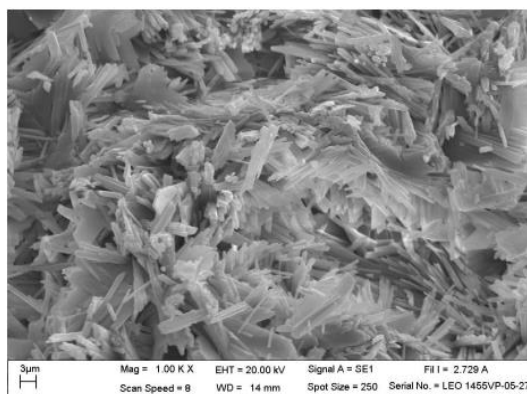
จากการนำยิปซัมที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 ไปทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อยิปซัมเท่ากับ 1.8 กรัม ต่อ 2.5 กรัม โดยนำหนักนำมาผสมให้เข้ากันแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานโดยมีขนาดความสูง 16 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร รอให้ยิปซัมแข็งตัวเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำไปศึกษาการเรียงตัวของผลึก โดยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแบบส่องกราด (SEM) พบว่าที่อนุภาคที่มากกว่า 0.4 มิลลิเมตรและแบบไม่แยกขนาดในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 จะมีการแตกตัวของผลึกเป็นรูปเข็มแต่ก็ยังมีบางส่วนที่ยังแตกตัวได้ไม่ดี ซึ่งที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร จะมีการแตกตัวได้ดีกว่าและมีความใกล้ชิดกันของผลึกที่มากกว่าแบบไม่แยกขนาด และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของนายพรชัย อุดเถิน และนายณัฐกร มั่นภักดี ที่ทำการทดลองที่ขนาดอนุภาค 0.045-0.1 มิลลิเมตร พบว่าที่ขนาดอนุภาคขนาดเล็กนี้จะมีการแตกตัวได้ดีกว่าและมีความใกล้ชิดกันของผลึกที่มากกว่าที่ขนาดอนุภาคขนาดใหญ่และแบบไม่แยกขนาด (พรชัย อุดเถิน และณัฐกร มั่นภักดี, 2560) เนื่องจากเมื่อทำการขึ้นรูปแล้วจะทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีการดึงน้ำกลับเข้าไปในโครงสร้างซึ่งทำให้เกิดการจับตัวกันของผลึกทำให้ผลึกที่ได้มีความใกล้ชิดกันมากขึ้นและลักษณะของผลึกจะแตกตัวเป็นแท่งเข็มมีโครงสร้างผลึกที่หนาแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4.16



(ก) แบบไม่แยกขนาด



(ข) อนุภาคขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร

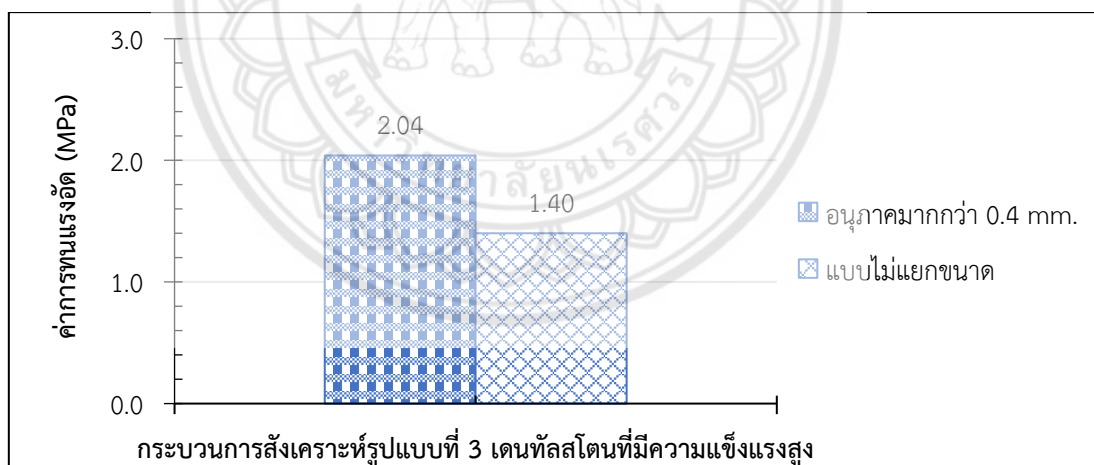


(ค) อนุภาคขนาด 0.045-0.1 มิลลิเมตร

## รูปที่ 4.16 ลักษณะของผลึกหลังขึ้นรูปในการสังเคราะห์ยิปซั่มรูปแบบที่ 3

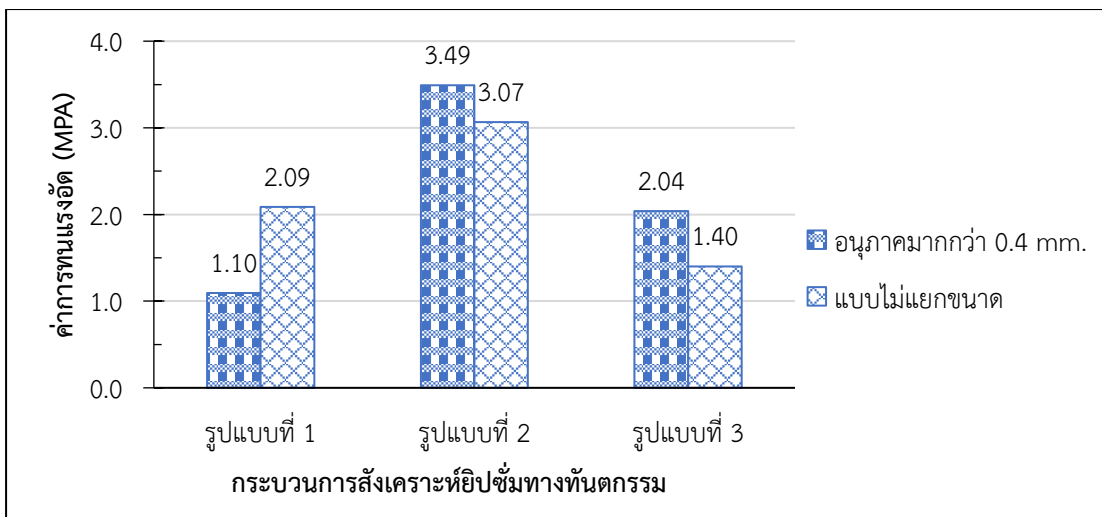
## 3.) ผลของขนาดต่อค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้จากยิปซั่มทางทันตกรรม

จากการทำการทดลองพบว่าค่าการทนแรงอัดของขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่าที่แบบไม่แยกขนาด อาจจะเป็นผลมาจากที่ขนาดอนุภาคไม่แยกขนาดอาจจะมีการแตกตัวได้ไม่ดีเท่ากับที่ขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ส่งผลให้ค่าการทนแรงอัดที่ได้มีค่าน้อยกว่าที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร และจากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตพบว่าที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่าแบบไม่แยกขนาด จึงส่งผลทำให้ค่าการทนแรงอัดที่ได้ของแบบไม่แยกขนาดมีค่าต่ำกว่าที่ขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดในการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมรูปแบบที่ 3 อนุภาคขนาดมากกว่า 0.4 กับแบบไม่แยกขนาด

จากการเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดพบว่ากระบวนการในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 ที่ได้มีการทดลองเพิ่มเติม มีค่าการทนแรงอัดที่มากกว่ากระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 แต่มีค่าน้อยกว่าในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.18

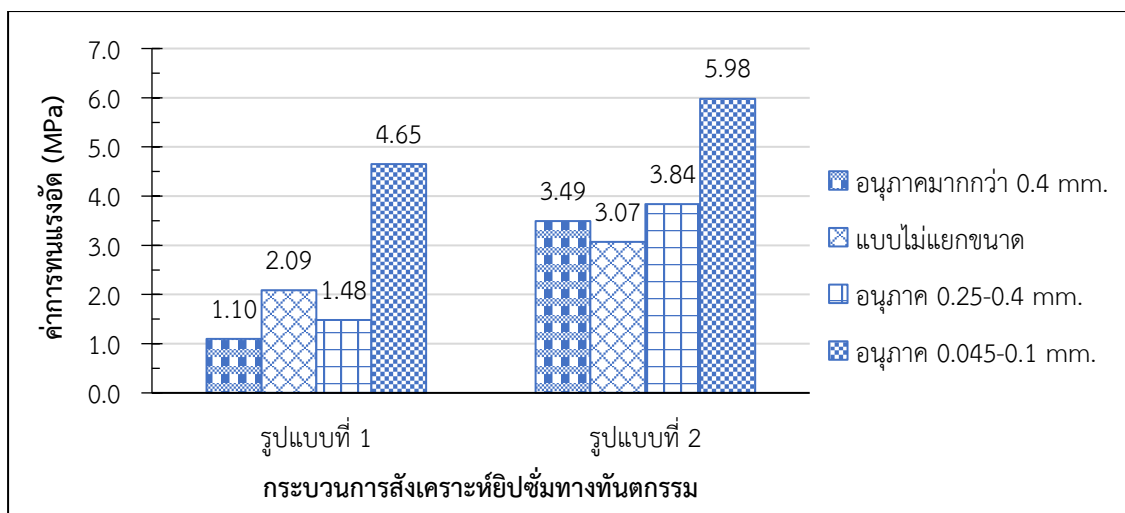


รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดในการสังเคราะห์ยิปซั่มของทั้ง 3 รูปแบบ

จากค่าการทนแรงอัดของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมแต่ละประเภทจะพบว่า ค่าการทนแรงอัดที่ได้ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานยิปซั่มทางทันตกรรมในแต่ละรูปแบบ ผู้ทดลองจึงได้เพิ่มการทดลองโดยใช้ขนาดของยิปซั่ม 2 ขนาด ได้แก่ ขนาด 0.25-0.4 มิลลิเมตร และ 0.045-0.1 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และ 2 เท่านั้น ดังจะแสดงในหัวข้อต่อไป ดังนี้

#### 4.3.2 ทดลองเพิ่มเติมโดยการลดขนาดอนุภาคของยิปซั่ม

จากการทดลองใช้ขนาดอนุภาคของยิปซั่มที่ขนาด 0.25-0.4 มิลลิเมตร และ 0.045-0.1 มิลลิเมตร มาทำการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกและนำไปสังเคราะห์ให้เป็นยิปซั่มทางทันตกรรม 2 รูปแบบ คือ แบบปูนพลาสติก และแบบเดนทัลสโตน เมื่อสังเคราะห์เสร็จแล้วนำไปทดสอบค่าการทนแรงอัด ในการสังเคราะห์แบบปูนพลาสติก ทำโดยการเผาที่อุณหภูมิ 120-165 องศาเซลเซียส พบว่าที่ขนาดอนุภาค 0.25-0.4 มิลลิเมตร มีค่าการทนแรงอัด 1.48 เมกะปาสคาล และขนาด 0.045-0.1 มิลลิเมตร มีค่าการทนแรงอัด 4.98 เมกะปาสคาล ในการสังเคราะห์แบบเดนทัลสโตน ทำโดยการนึ่งโดยใช้แรงดันที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ พบว่าที่ขนาดอนุภาค 0.25-0.4 มิลลิเมตร มีค่าการทนแรงอัด 3.84 เมกะปาสคาล และที่ขนาดอนุภาค 0.045-0.1 มิลลิเมตร มีค่าการทนแรงอัด 5.65 เมกะปาสคาล จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาค 0.045-0.1 มิลลิเมตร มีค่าการทนแรงอัดมากกว่า เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กเมื่อทำการขึ้นรูปแล้วผลึกที่ได้จะเป็นแบบเข็มและมีความหนาแน่นมาก จึงทำให้ไม่ค่อยเกิดช่องว่างระหว่างผลึกทำให้มีค่าการทนแรงอัดที่สูงกว่าขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และที่ขนาดใหญ่จะใช้เวลานานในการเปลี่ยนวิภาคจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตไปเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดของการทดลองเพิ่มเติม  
ในการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมทั้ง 2 รูปแบบ

จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคและกระบวนการเตรียมที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลพบว่าที่อนุภาคขนาดเล็กในกระบวนการสังเคราะห์ทั้งสองรูปแบบจะมีค่าการทนแรงอัดที่สูงกว่าขนาดอื่น ดังนั้นขนาดที่เหมาะสมในการนำมาสังเคราะห์คือที่ขนาด 0.045-0.1 มิลลิเมตร และกระบวนการสังเคราะห์ที่ให้ค่าการทนแรงอัดที่สูงคือกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบเดนทัลสโตน



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 ศึกษาผลของขนาดของยิปซัมฟลูแก๊สที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล

###### 1.) ขนาดผลึกของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการขึ้นรูป

จากการทดลองพบว่าที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 แบบปูนปลาสเตอร์ ผลึกก่อนขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็นแท่งที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับอนุภาคแบบไม่แยกขนาด ซึ่งผลึกที่ได้ของอนุภาคแบบไม่แยกขนาดจะมีทั้งลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ แท่งขนาดเล็ก และเป็นผงกระจายตัวอยู่ด้วยกัน ส่วนขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 แบบเดนทัลสโตน พบว่าผลึกก่อนขึ้นรูปจะมีการจับตัวกันเป็นก้อน แต่ที่แบบไม่แยกขนาดผลึกจะมีการกระจายตัวกัน

###### 2.) ผลของขนาดต่อการเรียงตัวของผลึกหลังขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊ส

จากการทดลองพบว่าที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มีการแตกตัวเป็นรูปเข็มได้น้อยกว่าและมีความใกล้ชิดกันของผลึกที่น้อยกว่าแบบไม่แยกขนาด และที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตรและแบบไม่แยกขนาดในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 มีการแตกตัวของผลึกเป็นรูปเข็มแต่ก็ยังมีบางส่วนที่ยังแตกตัวได้ไม่ดี ซึ่งที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร จะมีการแตกตัวได้ดีกว่าและมีความใกล้ชิดกันของผลึกที่มากกว่าแบบไม่แยกขนาด

###### 3.) ผลของขนาดต่อค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้จากยิปซัมทางทันตกรรม

จากการทดสอบค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร ของกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มีค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าแบบไม่แยกขนาด และที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร ของกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 มีค่ากำลังอัดที่มากกว่าแบบไม่แยกขนาด

#### 5.2 ศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละรูปแบบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลจากยิปซัมฟลูแก๊ส

##### 5.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมทั้งสามรูปแบบ

จากการทดลองพบว่าในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ผลึกก่อนขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่ ส่วนในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ผลึกก่อนขึ้นรูปจะมีการจับตัวกันเป็นก้อน และเมื่อนำไปขึ้นรูปวิเคราะห์การเรียงตัวของผลึก พบว่าในกระบวนการสังเคราะห์ในรูปแบบที่ 1 และ 2 มีการแตกตัวของผลึกเป็นรูปเข็มแต่ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 จะมีความใกล้ชิด

กันของผลึกที่มากกว่าการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ส่งผลทำให้ค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานที่กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มีค่าการทนแรงอัดที่น้อยกว่าในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ส่วนในกระบวนการสังเคราะห์ในรูปแบบที่ 3 พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้

จากการเปรียบเทียบค่าการทนแรงอัดที่ได้พบว่าการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มีค่าการทนแรงอัดที่น้อยกว่าการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 จึงได้นำยิปซัมที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ทั้ง 2 รูปแบบและยิปซัมที่ยังไม่ผ่านการสังเคราะห์ไปทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ X-ray Diffraction (XRD) เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณของวัฏภาคของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตของยิปซัมที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1, 2 และยิปซัมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ พบว่ามีปริมาณวัฏภาคแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต 65.2, 58 และ 27.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีปริมาณเบต้าแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตเท่ากับ 34.8, 33.2 และ 14.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

### 5.3 การปรับปรุงคุณสมบัติยิปซัมทางทันตกรรม

#### 5.3.1 ปรับปรุงคุณสมบัติยิปซัมทางทันตกรรมที่ได้จากการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3

จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 ที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้นำไปเพิ่มกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จึงสามารถขึ้นรูปได้ จากนั้นนำยิปซัมทางทันตกรรมที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยรูปแบบนี้ไปศึกษาโดยมีหัวข้อดังนี้

##### 1.) ขนาดผลึกของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการขึ้นรูป

จากการทดลองพบว่าผลึกที่มีขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร จะมีลักษณะผลึกเป็นแบบแท่งขนาดใหญ่ แต่ที่แบบไม่แยกขนาดผลึกจะมีทั้งแบบแท่งที่มีขนาดใหญ่ แบบแท่งเล็กและแบบผงกรายอยู่ปนกัน

##### 2.) ผลของขนาดต่อเรียงตัวของผลึกหลังขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊ส

จากการทดลองพบว่าที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตรและแบบไม่แยกขนาดในการสังเคราะห์รูปแบบที่ 3 จะมีการแตกตัวของผลึกเป็นรูปเข็มแต่ก็ยังมีบางส่วนที่ยังแตกตัวได้ไม่ดี ซึ่งที่ขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตรจะมีการแตกตัวได้ดีกว่าและมีความใกล้ชิดกันของผลึกที่มากกว่าแบบไม่แยกขนาด

##### 3.) ผลของขนาดต่อค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้จากยิปซัมทางทันตกรรม

จากการทำการทดลองพบว่าค่าการทนแรงอัดของขนาดอนุภาคมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่าที่แบบไม่แยกขนาด

#### 5.3.2 ทดลองเพิ่มเติมโดยการเพิ่มขนาดของยิปซัมอีก 2 ขนาด

จากการทดลองใช้ขนาดอนุภาคของยิปซัมที่ขนาดอนุภาค 0.25-0.4 มิลลิเมตร และ 0.045-0.1 มิลลิเมตร มาทดสอบค่าการทนแรงอัด พบว่าที่ขนาดอนุภาค 0.045-0.1 มิลลิเมตร จะมีค่าการทนแรงอัดมากกว่าขนาดอนุภาคอื่นๆของกระบวนการสังเคราะห์ทั้ง 2 รูปแบบ แต่ใน

กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 จะมีค่าการทนแรงอัดที่มากกว่า ดังนั้นขนาดที่เหมาะสมในการนำมาสังเคราะห์คือที่ขนาด 0.045-0.1 มิลลิเมตร

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ในการขึ้นรูปชิ้นงานควรหาอัตราส่วนน้ำตอยิปซัมที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แต่ละกระบวนการ และหาเวลาในการแข็งตัวที่เหมาะสมก่อนนำไปทดสอบการทนแรงอัด ซึ่งจากการทดลองได้เก็บชิ้นงานก่อนไปทดสอบเป็นเวลา 2 วัน ทำให้ความแข็งของชิ้นงานยังไม่ดีพอ

5.4.2 ในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง ควรหาปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์และเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ยิปซัมที่สังเคราะห์แล้วขึ้นรูปได้ จากการทดลองขึ้นรูปไม่ได้คาดว่าเพราะความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์มากเกินไป

5.4.3. ในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดนทัลสโตนควรเพิ่มความดัน เพราะจากการทดลองพบว่าความดันมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่ทำให้ผลึกมีความแข็งแรงและหนาแน่นมากยิ่งขึ้น

5.4.4. การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานไปทดสอบ ควรเตรียมอย่างถูกวิธี ระวังระวัง เช่น ในการนำไปส่อง SEM ไม่ให้ชิ้นงานจมหรือแน่นมากเกินไปบนแท่นคาร์บอนและไม่จับผิวหน้าของชิ้นงาน, ชิ้นงานที่นำไปทดสอบการทนแรงอัดควรมีขนาดที่เท่ากัน, ชิ้นงานหรือผงยิปซัมที่ใช้ในการทดสอบควรอยู่ในถุงหรือกล่องปิดมิดชิดที่มีซิกลีกาตลอด เพื่อดูความชื้น

## เอกสารอ้างอิง

- พจนีย์ ไทศาลตันติววงศ์ (2552), แรยิปซั่มและยิปซั่มสังเคราะห์สำหรับงานอุตสาหกรรม. ฝ่ายวิเคราะห์แร่และหินกองวิเคราะห์กรมทรัพยากรธรณี 2539
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, โรงไฟฟ้าแม่เมาะ. สืบค้นวันที่ 12 กันยายน 2561, จาก [www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2494](http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2494)
- Kostic-Pulek A., Marinkovic S., Popov S., Djuricic M. & Djinovic J. (2547), **The treatment of gypsum as a product of the flue gas desulphurization process.** *Ceramics Silikáty* 49 (2): 115-111
- วิทยา พันธุ์พา (2545), **Production of dental stone from flue-gas gypsum.** วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์
- จรรยา ชื่นอารมณ์ (2554), **ผลของการเก็บรักษาผงยิปซั่มพลาสติกต่อสมบัติเชิงกลของแบบหล่อปูนพลาสติก.** วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ 14(3) : 152-159
- Shereen S. Azer และ Kerby R.E. & Knobloch L.A. (2551), **Effect of mixing methods on the physical properties of dental stones.** *Journal of Dentistry.* journal of dentistry 36: 736-744
- Le Fu และ Wei xia (2560), **Preparation of high percentage alpha calcium sulfat hemihydrate via a hydrothermal method.** *journal of biomaterials and nanobiotechnology* 8: 35-49
- Baohong Guan, Liuchun Yang, Zhongbiao Wu (2554), **Preparation compressive strength of alpha sulfate hemihydrate from FGD gypsum in salt concentration.** *Journal fuel* 7: 1286-1293
- สุธารี เกียรติมัน (2544), **ศึกษาผลของไอออนของเกลือต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของยิปซั่มที่เป็นผลิตภัณฑ์รอง.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- Carsten Vellmer (2557), **Effect of Carboxylic Acids on the Hydration of Calcium Sulfate Hemihydrate Pastes.** TA Instruments, 109 Lukens Drive, New Castle, DE 19720, USA
- Aleksey Eremin, Andrey Pustovgar (2559), **Determination of calcium sulfate hemihydrate Modification by X-ray diffraction analysis.** *journal of procedia engineering* 165: 1343-1347
- William J O'Brien (2545), **Dental materials and their selection.** 3rd Ed. Ann Arbor, Michigan
- Chatree Thitianan (2498), **ศึกษาการนำสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เหลือจากการล้างยิปซั่มนำกลับมาใช้ใหม่และทำให้เป็นกลางโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์

- ภัทรวรรณ เฉยเจริญ (2549), **ปูนปลาสเตอร์ (Plaster of Paris)**. สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2516, จาก [www2.mtec.or.th/th/special/cdm/articles4.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/cdm/articles4.html)
- พรชัย อุดเถิน และนัฐกร มั่นภักดี (2560), **การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส**. ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- ภาคภูมิ ยินดีสิทธิ์ และ ดร.ภัทรวรรณ ประศาสน์สารกิจ (2559), **ฟลูแก๊สดีซัลเฟอไรเซชันโดยใช้หินปูนระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- วิชา ประกายพรรณ (2549), **การปรับปรุงคุณภาพยิปซัมฟลูแก๊สแหล่งแม่เกาะโดยใช้เทคนิคกาแต่งแร่**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์
- ชาติรี ฐิตอนันท์ (2498), **การผลิตพลาสเตอร์โปรเจกชันจากยิปซัมฟลูแก๊ส**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์
- Sandeep Kumar (2558), **Laborary scale study of calcium sulfate hydration forms**. สืบค้นวันที่ 1 ตุลาคม 2561, จาก [www.Laboratory-Scale-Study-of-Calcium-Sulfate-Hydration-Forms](http://www.Laboratory-Scale-Study-of-Calcium-Sulfate-Hydration-Forms)
- Yotsawat S (2557), **วัสดุยิปซัม (Gypsum materials)**. สืบค้นวันที่ 2 ตุลาคม 2561, จาก [www.thinkofliving.com/2014/11/06/วัสดุgypsum](http://www.thinkofliving.com/2014/11/06/วัสดุgypsum)
- รัชดาภรณ์ ปันทะรส (2555), **การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของโมลด์ปลาสเตอร์ที่ใช้แล้วเพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับ**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- Siamchemi (2560), **ปูนปลาสเตอร์ (Plaster)**. สืบค้นวันที่ 30 กันยายน 2561, จาก [www.siamchemi.com/ปูนปลาสเตอร์/](http://www.siamchemi.com/ปูนปลาสเตอร์/)
- ปรีนทร ศตเมธ และคณะ (2557), **ความแข็งแรงและการขยายขณะก่อตัวของแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ที่เสริมแรงด้วยผงแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตจากยิปซัมทันตกรรมชนิดที่สี่**. งานวิจัยภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- M.Sabohi, N.Khodaeian (2552), **Comparson of physical properties of an Iranian and a german dental stone type IV according to ADA specification**. Journal of dentistry
- นิรนาม (2558), **ความแข็งแรงในการดึง, การอัดและการเนียน**. สืบค้นวันที่ 10 ตุลาคม 2561, จาก [www.tpa.or.th/writer/read\\_this\\_book\\_topic.php](http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php)
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, **กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscrope)**. สืบค้นวันที่ 15 ตุลาคม 2561, จาก [www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html)
- สุธรรม ศรีหล่มสัก และคณะ (2552), **ปริมาณวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน**. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ฉบับที่ 2
- กรมอนามัย, **ปัญหาสุขภาพฟันของผู้สูงอายุ**. สืบค้นวันที่ 10 พฤศจิกายน 2561, จาก [www.anamai.moph.go.th](http://www.anamai.moph.go.th)

Tipthanya (2554), ปริมาณวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันโดยใช้โปรแกรม. สืบค้นวันที่ 15 พฤศจิกายน 2561, จาก [www.nuc2011.wordpress.com/2011/04/26/xrd-analysis-full-pattern-matchingfpm/](http://www.nuc2011.wordpress.com/2011/04/26/xrd-analysis-full-pattern-matchingfpm/)

Indian dental academy (2557), **Gypsum Product**. สืบค้นวันที่ 20 พฤษภาคม 2562 จาก <https://www.slideshare.net/indiandentalacademy/gypsum-products>



ภาคผนวก ก

กระบวนการล้างยิปซัมพลูแก๊สด้วยกรดซัลฟิวริกที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ



การศึกษาลักษณะของยิปซัมฟลูแก๊สโดยทำการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 15 นาที จะเห็นว่าสีของยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อผ่านกระบวนการล้างแล้วยิปซัมที่ได้นั้นจะมีสีที่ขาวขึ้น ดังแสดงในรูปที่ ก.1



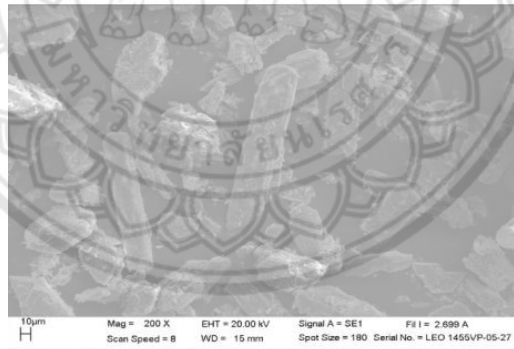
(ก)



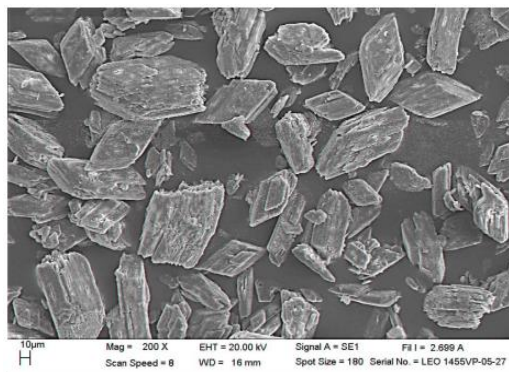
(ข)

รูปที่ ก.1 ลักษณะสีของยิปซัมฟลูแก๊ส (ก) ยิปซัมฟลูแก๊สที่ยังไม่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก  
(ข) ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก

หลังจากนั้นได้นำยิปซัมก่อนล้างและหลังล้างด้วยกรดซัลฟิวริกไปส่องดูผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โครงสร้างผลึกมีลักษณะเป็นแท่งซึ่งก่อนล้างและหลังล้างด้วยกรดซัลฟิวริกไม่มีความแตกต่างกัน แต่หลังล้างด้วยกรดซัลฟิวริกจะส่งผลให้พื้นผิวของยิปซัมฟลูแก๊สมีความขรุขระเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการล้าง ดังรูปที่ ก.2 และ รูปที่ ก.3



รูปที่ ก.2 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ยังไม่ผ่านการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟิวริก



รูปที่ ก.3 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟิวริก



ภาคผนวก ข  
ผลการทดสอบค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของวัสดุทางทันตกรรม



**ตารางที่ ข.1** ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์ที่ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
18.1	2.6	0.8496
35.1	2.14	1.1916
46.1	3.67	1.244
33.10	2.80	1.10

**ตารางที่ ข.2** ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์แบบไม่แยกขนาด

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
75.1	3.55	2.5825
49.8	3.18	1.9637
94.6	2.63	2.4985
34	3.03	1.303
63.38	3.10	2.09

**ตารางที่ ข.3** ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์ที่ขนาด 0.25-0.4 มิลลิเมตร

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
47.1	3.14	1.2024
48.8	2.43	1.7619
46.7	2.89	1.4886
47.53	2.82	1.48

**ตารางที่ ข.4** ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์ที่ขนาด 0.045 มิลลิเมตร

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
191	2.52	5.8205
149	3.07	5.1898
147	2.02	3.9273
162.33	2.54	4.98

**ตารางที่ ข.5** ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนที่ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
101	3.93	3.6208
111	3.13	3.1941
86	3.59	3.657
99.33	3.55	3.49

**ตารางที่ ข.6** ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนแบบไม่แยกขนาด

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
44.6	2.07	3.3157
69.8	2.16	2.7972
115	2.7	3.2322
101	2.36	2.9663
95	2.97	3.0275
85.08	2.45	3.07

**ตารางที่ ข.7** ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนที่ขนาด 0.25-0.4 มิลลิเมตร

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
130	2.63	4.7723
148.8	2.67	3.2513
206	2.92	3.4819
161.60	2.74	3.84

**ตารางที่ ข.8** ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนที่ขนาด 0.045 มิลลิเมตร

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
342	3.25	5.3476
211	2.61	4.6763
420	2.09	6.9331
324.33	2.65	5.65

ตารางที่ ข.9 ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงที่ขนาดมากกว่า 0.4 มิลลิเมตร

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
75.9	2.95	2.0187
79.5	2.73	1.9743
74.4	2.01	2.1098
90.6	3.06	2.0619
80.10	2.69	2.04

ตารางที่ ข.10 ตารางแสดงค่าการทนแรงอัดของชิ้นงานของการสังเคราะห์ยิปซั่มทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงแบบไม่แยกขนาด

แรงที่กดลงมา(N)	(mm)	แรงกด(MPa)
50.4	3.49	1.3194
53.4	2.81	1.476
56.8	3.5	1.4061
51.3	3.97	1.4
52.98	3.44	1.40



ภาคผนวก ค

รูปภาพการดำเนินงาน



รูปที่ ค.1 การร่อนขนาดอนุภาค



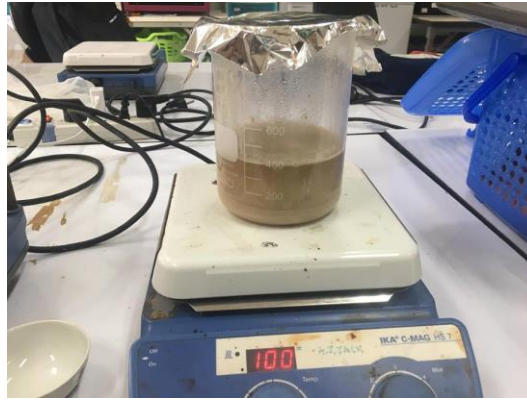
รูปที่ ค.2 การล้างยับซึ่มด้วยกรดซัลฟิวริก



รูปที่ ค.3 กระบวนการสังเคราะห์ยับซึ่มทางทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์โดยการเผา



รูปที่ ค.4 กระบวนการสังเคราะห์ยับซึ่มทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนโดยการอัดไครฟ



รูปที่ ค.5 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเดนทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงโดยการต้มกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



รูปที่ ค.6 กระบวนการขึ้นรูปยิปซัมทางทันตกรรม



รูปที่ ค.7 นำยิปซัมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปไปทำการส่องดูสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ค.8 นำยิปซัมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปไปแกะออกจากหลอดและใส่ในซิลิกาเจล



รูปที่ ค.9 นำยิปซัมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปไปแกะออกจากหลอดและนำไปทดสอบค่าการทนแรงอัด



รูปที่ ค.10 เครื่องวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD)