



การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส
A STUDY ON THE OPTIMUM CONDITIONS OF DENTAL MATERIALS
PRODUCT FROM FLUE-GAS GYPSUM

นาย นัฐกร มั่นภักดี รหัส 57365669

นาย พรชัย อุดเถิน รหัส 57365737

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2560

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุทางทันตกรรม จากยิปซัมฟลูแก๊ส		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายรัฐกร	มันักดี	รหัส 57365669
	นายพรชัย	อุตเถิน	รหัส 57365737
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร.นพวรรณ	ไม้ทอง	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2560		

บทคัดย่อ

ยิปซัมฟลูแก๊สที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษาครั้งนี้เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำมาผ่านกระบวนการล้างโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3 โมลาร์ พบว่าการล้างที่ระยะเวลา 15 นาที เหมาะสมที่สุด ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างจะนำไปสังเคราะห์เป็นยิปซัมทางทันตกรรม 3 ประเภท ประเภทแรก ปูนพลาสติก โดยจะนำยิปซัมฟลูแก๊สไปเผาในบรรยากาศปกติ รูปแบบที่ 1 จะเผาที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมง พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ รูปแบบที่ 2 จะเผาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมง พบว่ายิปซัมฟลูแก๊ส ที่ได้สามารถขึ้นรูปได้ และชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 9.45 MPa ประเภทที่สอง เติ้นทิลสโตน โดยจะนำยิปซัมฟลูแก๊สไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อนึ่งไอน้ำ รูปแบบที่ 1 ที่ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ รูปแบบที่ 2 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากการทดลองทั้งสองการทดลองสามารถขึ้นรูปได้ ซึ่งชิ้นงานที่ได้ จากยิปซัมฟลูแก๊สในรูปแบบที่ 2 มีค่าความทนแรงอัดสูงที่สุดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 13.12 MPa ประเภทที่ สาม เติ้นทิลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง โดยจะนำยิปซัมฟลูแก๊สไปต้มกับสารละลายเคมี เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สารเคมีชนิดแรกที่ศึกษาได้แก่แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อนำ ยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไปขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ จึงได้เพิ่มขั้นตอนการทดลองโดยนำยิปซัมฟลู แก๊สที่ได้จากการต้มในสารละลายเคมีไปเผาในบรรยากาศปกติ ก็นำไปเผาในสภาวะที่มีความดันใน หม้อนึ่งไอน้ำ พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้สามารถไปขึ้นรูปได้ และชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 9.05 และ 8.01 MPa ตามลำดับ สารเคมีชนิดที่สองคือ โซเดียมซัคซิเนตเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไม่สามารถขึ้นรูปได้เช่นเดียวกัน จึงเพิ่มขั้นตอนการทดลองโดยนำ ยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตไปเผาในบรรยากาศปกติ ก็นำไปเผาใน สภาวะที่มีความดันในหม้อนึ่งไอน้ำ พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้สามารถขึ้นรูปได้ และชิ้นงานมีค่าความ ทนแรงอัดอยู่ที่ 7.95 และ 10.83 MPa ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ อาจารย์นพวรรณ โหม่ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนะนำวิธีแก้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอด และขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา



ผู้ดำเนินโครงการ
นัฐกร มั่นภักดี
พรชัย อุดเถิน
กรกฎาคม 2561

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของการดำเนินโครงการ.....	2
1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.2.1 กระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าถ่านหิน.....	15
2.2.1.1 กระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	15
2.2.1.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	16
2.2.2 วัสดุยิปซัมทันตกรรม.....	16
2.2.2.1 วัสดุทางทันตกรรม.....	16
2.2.2.2 ผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรม.....	17
2.2.2.3 คุณสมบัติทางเคมี.....	17
2.2.2.4 ประเภทและการผลิตยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภท.....	19
2.2.2.4.1 ปูนพลาสติก.....	21
2.2.2.4.2 ปูนพลาสติกหล่อแบบ.....	22
2.2.2.4.3 เติ้นทึลสโตน.....	22
2.2.2.4.4 เติ้นทึลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง.....	22
2.2.2.4.5 เติ้นทึลสโตนที่มีความแข็งแรงและการขยายตัวสูง.....	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.3 การเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตกับน้ำ	24
2.2.4 การทดสอบผลิตภัณฑ์ยับยั้งทางทันตกรรม	24
2.2.4.1 การทดสอบความทนแรงอัด	24
2.2.4.2 การศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน	25
2.2.5 การวิเคราะห์หาเฟสของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต	26
บทที่ 3 แผนการทดลอง	27
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	27
3.1.1 สารเคมี	27
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	27
3.2 แผนผังการล้างทำความสะอาดยับยั้งฟลูออไรด์	28
3.3 แผนการทดลอง	29
3.3.1 แผนภาพการกำหนดระยะเวลาในการล้างที่เหมาะสม	29
3.3.2 แผนภาพกระบวนการสังเคราะห์ยับยั้งทางทันตกรรมจากยับยั้งฟลูออไรด์	30
3.3.3 แผนภาพการทดลองเพิ่มเติม	31
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	32
3.4.1 การกำหนดขนาดยับยั้งฟลูออไรด์	32
3.4.2 การล้างทำความสะอาดยับยั้งฟลูออไรด์	32
3.4.3 การกำหนดระยะเวลาการล้างที่เหมาะสม	32
3.4.4 การสังเคราะห์ยับยั้งทางทันตกรรมชนิด ปูนพลาสติก	32
3.4.5 การสังเคราะห์ยับยั้งทางทันตกรรมชนิด เด็นทัลสโตน	33
3.4.6 การสังเคราะห์ยับยั้งทางทันตกรรมชนิด เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง	33
3.4.7 การทดลองเพิ่มเติม	34
3.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน	34
3.5.1 การทดสอบความทนแรงอัด	34
3.5.2 การศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน	34
3.5.3 การวิเคราะห์หาเฟสของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	39
4.1 ผลของระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดยับยั้งฟลูออไรด์	39
4.1.1 ผลของระยะเวลาในการล้างที่ส่งผลต่อสีของยับยั้งฟลูออไรด์	39
4.1.2 ผลของระยะเวลาในการล้างที่ส่งผลต่อลักษณะของผลึกยับยั้งฟลูออไรด์	40
4.1.3 ผลของระยะเวลาในการล้างที่ส่งผลต่อความทนแรงอัด	41

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.4	ศึกษาองค์ประกอบของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนและหลังล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ ระยะเวลา 15 นาที.....	43
4.2	ศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส.....	45
4.2.1	ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทที่ 1 ปูนพลาสติกอร์ ศึกษาผลของรูปแบบการ ให้ความร้อนสองรูปแบบ.....	48
4.2.1.1	กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 C(120-165°C).....	51
4.2.1.2	กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 C(80-120°C).....	53
4.2.2	ยิปซัมทันตกรรมประเภทที่ 2 เด็นทัลสโตน ศึกษาผลของความดันและ อุณหภูมิใช้ในการเผา 2 รูปแบบ.....	52
4.2.2.1	กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar).....	52
4.2.2.2	กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 A(130°C,1.8bar).....	52
4.2.3	ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทที่ 3 เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง ศึกษาผล ของสารเคมีที่ใช้ในการต้ม 2 ชนิด.....	60
4.2.3.1	ต้มในสารละลายเคมีชนิดที่ 1 แคลเซียมคลอไรด์.....	60
4.2.3.2	ต้มในสารละลายเคมีชนิดที่ 2 โซเดียมซัคซิเนต.....	71
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง.....	76
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	
5.1.1	การศึกษาผลของระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส.....	76
5.1.2	การศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภท ปูนพลาสติกอร์.....	76
5.1.3	การศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภท เด็นทัลสโตน.....	76
5.1.4	การศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภท เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง.....	77
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	77
	เอกสารอ้างอิง.....	78
	ภาคผนวก ก ผลทดสอบความทนแรงอัดของชิ้นงานและเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ..	81
	ภาคผนวก ข ต้นทุนในการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภท.....	94
	ภาคผนวก ค รูปภาพการดำเนินงาน.....	96

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน	4
ตารางที่ 2.1	แสดงผลของอัตราส่วนการผสมยิปซัมต่อกรดซัลฟูริกต่อองค์ประกอบและอัตรา การเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ยิปซัมดีไฮเดรชัน	6
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติและองค์ประกอบระหว่างยิปซัมธรรมชาติและยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระ บวนการล้างด้วยวิธีการสันด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง และล้างด้วยกรดซัลฟูริก	8
ตารางที่ 2.3	ระยะเวลาก่อตัวของปูนปลาสเตอร์ ก่อนและหลังการเก็บรักษาที่สภาวะต่างๆ	9
ตารางที่ 2.4	แสดงอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมของเด็นทัลสโตนแต่ละประเภท	12
ตารางที่ 2.5	แสดงคุณสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์	13
ตารางที่ 2.6	พารามิเตอร์ของยูนิทเซลล์, ปริมาตร, ความหนาแน่นของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ที่ความดันต่างๆ	14
ตารางที่ 2.7	การเปลี่ยนเป็น hemi-hydrate และ Anhydrite ของยิปซัมที่อุณหภูมิต่างๆในการ เผาต่าง ๆ	19
ตารางที่ 2.8	คุณสมบัติของยิปซัมทางทันตกรรม 5 ประเภท	20
ตารางที่ 4.1	ลักษณะสีของยิปซัมที่เปลี่ยนไปหลังการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริก	39
ตารางที่ 4.2	แสดงผลการขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการล้างเคราะห์	45
ตารางที่ 4.3	แสดงผลการขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการ ล้างเคราะห์	46
ตารางที่ 4.4	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตทั้งหมดของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการ ล้างเคราะห์	46
ตารางที่ ก.1	ตารางแสดงความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการ ล้างเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์ (รูปแบบที่ 1)	82
ตารางที่ ก.2	ความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการล้างเคราะห์ ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตนที่อัตราส่วน การผสมต่าง ๆ (รูปแบบที่ 1)	82
ตารางที่ ก.3	ความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการล้างเคราะห์ ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตน (รูปแบบที่ 2) .	83
ตารางที่ ก.4	ความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากการทดลองเพิ่มเติม (สารเคมีชนิด แคลเซียมคลอไรด์)	83

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ก.5 ความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากการทดลองเพิ่ม เติม (สารเคมีชนิด เดียมซัคซิเนต).....	84
ตารางที่ ก.6 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ C(80-120°C).....	84
ตารางที่ ก.7 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ C(120-165°C)	84
ตารางที่ ก.8 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ A(120°C,1bar)	84
ตารางที่ ก.9 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ A(130°C,1.8bar)	85
ตารางที่ ก.10 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ B(Cl).....	85
ตารางที่ ก.11 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ B(Cl)>C(120-165°C)	85
ตารางที่ ก.12 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ B(Cl)>A(130°C,1.8bar)	85
ตารางที่ ก.13 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ B(S)	86
ตารางที่ ก.14 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ B(S) >C(120-165°C).....	86
ตารางที่ ก.15 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ B(S)>A(130°C,1.8bar).....	86
ตารางที่ ก.16 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของปูนปลาสเตอร์ รูปแบบที่ 1 C(120-165°C) ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ	87
ตารางที่ ก.17 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของเด็นทัลสโตน รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar)ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ.....	88
ตารางที่ ก.18 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของเด็นทัลสโตน รูปแบบที่ 1 A(130°C,1.8bar) ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ.....	89
ตารางที่ ก.19 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของเด็นทัลสโตนที่มีความ แข็งแรงสูง สารเคมีชนิด แคลเซียมคลอไรด์ B(Cl)>C(120-165°C)ที่วัดจาก โปรแกรม ImageJ.....	90
ตารางที่ ก.20 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของเด็นทัลสโตนที่มีความ แข็งแรงสูง สารเคมีชนิด แคลเซียมคลอไรด์ B(Cl)>A(130°C,1.8bar) ที่วัดจาก โปรแกรม ImageJ.....	91
ตารางที่ ก.21 ขนาดของผลึกหลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์ รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar) ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ	92
ตารางที่ ก.22 ขนาดของผลึกหลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์ รูปแบบที่ 2 A(130°C,1.8bar) ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ	93
ตารางที่ ข.1 ต้นทุนในการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภท	95

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนสำหรับยิปซัมเอมิไฮเดรตที่ได้จากการผสมยิปซัม ต่อกรดซัลฟิวริก 0.125 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร.....	5
รูปที่ 2.2 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนสำหรับยิปซัมเอมิไฮเดรตที่ได้จากการผสมยิปซัม ต่อกรดซัลฟิวริก 0.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร.....	6
รูปที่ 2.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนสำหรับยิปซัมเอมิไฮเดรตที่ได้จากการผสมยิปซัม ต่อกรดซัลฟิวริก 0.500 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	6
รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการล้างทำความสะอาด.....	7
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของยิปซัมฟลูแก๊สหลังการล้างทำความสะอาด	7
รูปที่ 2.6 ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากการคายนํ้าในสายละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 โมลาร์ เวลา 1 ชั่วโมง.....	11
รูปที่ 2.7 ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากการคายนํ้าในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 โมลาร์ เวลา 1.5 ชั่วโมง	11
รูปที่ 2.8 ผลของปริมาณซิลิกอนออกไซด์ต่อความทนแรงอัดของชิ้นงาน	12
รูปที่ 2.9 กระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยหินปูน	15
รูปที่ 2.10 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างของเบตาแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตจากกล้อง จุลทรรศน์.....	21
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างของแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตจากกล้อง จุลทรรศน์.....	21
รูปที่ 2.12 คริสตัลของยิปซัมที่ผ่านการเผาแบบเปียกก่อนบด.....	23
รูปที่ 2.13 อนุภาคของหินทันตกรรมที่มีความแข็งแรงสูง.....	23
รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบความทนแรงอัด.....	25
รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	25
รูปที่ 3.1 แผนภาพการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส.....	28
รูปที่ 3.2 แผนภาพการทดลองการกำหนดระยะเวลาในการล้างที่เหมาะสม.....	29
รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส.....	30
รูปที่ 3.4 การเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางตกรรมประเภทเด็นทัลสโตนที่มี ความแข็งแรงสูง.....	31
รูปที่ 3.5 เส้นแนวโน้มการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ (รูปแบบที่ 1).....	36
รูปที่ 3.6 เส้นแนวโน้มการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ (รูปแบบที่ 2).....	36
รูปที่ 4.1 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สก่อนล้างด้วยกรดซัลฟิวริก	40
รูปที่ 4.2 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกที่เวลา 15 นาที	40
รูปที่ 4.3 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกที่เวลา 30 นาที	41

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกที่เวลา 60 นาที	41
รูปที่ 4.5 แสดงค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที.....	43
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงองค์ประกอบของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนและหลังล้างด้วยกรดซัลฟิวริก	44
รูปที่ 4.7 ผลการขึ้นรูปยิปซัมจากฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 C(80-120°C)	47
รูปที่ 4.8 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1.....	49
รูปที่ 4.9 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างที่ขึ้นรูปจากยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติกในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1	50
รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะของน้ำที่อยู่ภายนอกโครงสร้าง	50
รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังขึ้นรูป C(120-165°C).....	51
รูปที่ 4.12 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 C(80-120°C).....	52
รูปที่ 4.13 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ รูปแบบที่ 2 (A(130°C,1.8bar)	53
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะโครงสร้างยิปซัม.....	53
รูปที่ 4.15 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar).....	55
รูปที่ 4.17 แสดงค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้จากการปรับอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊ส.....	56
รูปที่ 4.18 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 A(130°C,1.8bar)	57
รูปที่ 4.19 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างที่ขึ้นรูปจากยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2.....	58
รูปที่ 4.20 ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากการขึ้นรูป A(130°C,1.8bar)	59
รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่1 และรูปแบบที่ 2	60
รูปที่ 4.22 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ B(CI)61....	61
รูปที่ 4.23 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สหลังการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ โดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ B(CI) >C(120-165°C).....	62
รูปที่ 4.24 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สหลังการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อน้ำ B(CI) >A(130°C,1.8bar)	63

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.25	ผงยับยั้งฟลูแก๊สที่จับตัวกันเป็นก้อน	63
รูปที่ 4.26	แสดงการดึงดูดโมเลกุลของน้ำจากไอออนของแคลเซียมคลอไรด์	64
รูปที่ 4.27	ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยับยั้งฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำไปเพิ่มขึ้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(Cl) > C(120-165^{\circ}C)$...	66
รูปที่ 4.28	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยับยั้งฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยับยั้งทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติก $C(120-165^{\circ}C)$ รูป(ก) และยับยั้งทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งสูง $B(Cl) > C(120-165^{\circ}C)$ รูป(ข).....	66
รูปที่ 4.29	ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากขึ้นรูปด้วยยับยั้งฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำไปเพิ่มขึ้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(Cl) > C(120-165^{\circ}C)$	67
รูปที่ 4.30	ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยับยั้งฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำไปเพิ่มขึ้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อนึ่งไอน้ำ $B(Cl) > A(130^{\circ}C, 1.8bar)$	68
รูปที่ 4.31	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยับยั้งฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยับยั้งทางทันตกรรมทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตน $A(130^{\circ}C, 1.8bar)$ รูป(ค) และยับยั้งทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งสูง $B(Cl) > A(130^{\circ}C, 1.8bar)$ รูป(ง)	68
รูปที่ 4.32	ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากขึ้นรูปด้วยยับยั้งฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และนำไปเพิ่มขึ้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(Cl) > C(120-165^{\circ}C)$	69
รูปที่ 4.33	แสดงค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยับยั้งฟลูแก๊สที่ผ่านการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยโดยการไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(Cl) > C(120-165^{\circ}C)$ กับเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อนึ่งไอน้ำ $B(Cl) > A(130^{\circ}C, 1.8bar)$	70
รูปที่ 4.34	ลักษณะผลึกยับยั้งฟลูแก๊สก่อนการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ $B(S)$	72
รูปที่ 4.35	ลักษณะผลึกยับยั้งฟลูแก๊สหลังการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อนึ่งไอน้ำ $B(S) > A(130^{\circ}C, 1.8bar)$	72

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.36 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตและนำไปเพิ่มขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ $B(S) > C(120-165^{\circ}C)$	73
รูปที่ 4.37 ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากขึ้นรูปด้วยยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตและนำไปเพิ่มขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(S) > C(120-165^{\circ}C)$	74
รูปที่ 4.38 แสดงค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(S) > C(120-165^{\circ}C)$ กับเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ $B(S) > A(130^{\circ}C, 1.8bar)$	75
รูปที่ ค.1 เตาเผาสำหรับเผายิปซัมฟลูแก๊สในบรรยากาศปกติ	97
รูปที่ ค.2 เตาอบ	97
รูปที่ ค.3 โถดูดความชื้นสำหรับใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์.....	98
รูปที่ ค.4 เครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง.....	98
รูปที่ ค.5 ที่บดสาร	99
รูปที่ ค.6 เครื่องกรองสูญญากาศ.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้วัตถุดิบตั้งต้นเป็นถ่านหินลิกไนต์ โดยดำเนินการผลิตมาแล้ว 28 ปี โดยกระบวนการผลิตไฟฟ้านั้น จะนำวัตถุดิบตั้งต้นซึ่งได้แก่ ถ่านหินลิกไนต์มาเผาเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำในหม้อต้ม จากนั้นน้ำในหม้อต้มก็จะกลายเป็นไอน้ำที่มีความร้อนสูงถึงประมาณ 540 องศาเซลเซียส และมีความดันอยู่ที่ 160 บาร์ ไอน้ำจะไปหมุนใบพัด (Turbine) ที่ติดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) จากนั้นจึงเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าออกมา [1] โดยจากการเผาไหม้ถ่านหินนั้นจะเกิดแก๊สที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหนึ่งในนั้นได้แก่ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจของสิ่งมีชีวิต และน้ำฝนที่ตกลงมาหากมีการปนเปื้อนของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มากนั้นจะทำให้ฝนมีคุณสมบัติเป็นกรดทำลายสิ่งแวดล้อม อีกทั้งก่อกร่อนตัวอาคาร [2] ดังนั้นแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินจำเป็นต้องผ่านกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะใช้ตัวหินปูนทำปฏิกิริยา จากนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น ยิปซัม ซึ่งมีปริมาณมากถึง 2 ล้านตันต่อปี แต่มีการนำไปใช้ประโยชน์ที่ไม่มากนัก เนื่องจากยิปซัมที่ได้จากกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นจะมีความบริสุทธิ์ที่ต่ำกว่ายิปซัมธรรมชาติ ในขณะที่ยิปซัมธรรมชาตินั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยหนึ่งในนั้นคือการนำมาใช้เป็นวัสดุทางทันตกรรม [3]

วัสดุทางทันตกรรมเป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการฟื้นฟูหรือป้องกันโรคเกี่ยวกับช่องปาก ซึ่งวัสดุทางทันตกรรมนั้นมีอยู่หลายชนิด หนึ่งในชนิดนั้นคือ ยิปซัม ซึ่งถูกนำไปใช้ในการหล่อแบบฟันของผู้ป่วยเพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของฟัน การบดเคี้ยว โดยผลิตภัณฑ์ยิปซัมในทางทันตกรรมนั้นแบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามมาตรฐานการประเมินคุณสมบัติของวัสดุพิมพ์ปาก ส่วนใหญ่ที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมี 3 ประเภท ประเภทที่ 1 ได้แก่ปูนปลาสเตอร์ (Impression plaster) ใช้ในการตกแต่งประกอบแบบจำลองฟันในส่วนที่ไม่ใช่ตัวฟัน ราคาจำหน่ายประมาณกิโลกรัมละ 28 บาท (ราคาขายส่ง 25 กิโลกรัม) ประเภทที่ 2 ได้แก่เด็นทัลสโตน (Dental stone) ใช้พิมพ์ตัวฟันหลังจากได้พิมพ์ปากออกมาแล้ว เป็นแบบจำลองฟันเบื้องต้น เพื่อใช้ในการวางแผนการรักษาเบื้องต้น ราคาจำหน่ายประมาณกิโลกรัมละ 65 บาท (ราคาขายส่ง 25 กิโลกรัม) และประเภทสุดท้าย ได้แก่ เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง ใช้ในการทำแบบจำลองฟันขั้นสุดท้ายหลังจากที่ได้กรอตกแต่งฟัน ถอนฟันหรือปรับมุมฟันต่าง ๆ แล้ว ราคาจำหน่ายประมาณกิโลกรัมละ 110 บาท (ราคาขายส่ง 25 กิโลกรัม) [4] โดยผู้ป่วยที่ต้องการรับการรักษาด้านการจัดฟัน และใส่ฟันปลอมนั้นจำเป็นต้องมีการพิมพ์ปากเพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของฟันก่อนที่จะทำการรักษา เพื่อไม่เกิดความผิดพลาด ด้านบุคลิกภาพ และการดำเนินชีวิตประจำวันเกี่ยวกับช่องปาก

เนื่องจากประเทศไทยกำลังเข้าสู่ยุคสังคมผู้สูงอายุ ยุคที่มีสัดส่วนของผู้สูงอายุมากกว่าวัยกลางคน และวัยรุ่น โดยผู้สูงอายุมีความจำเป็นจะต้องรักษาพยาบาลเกี่ยวกับช่องปาก เนื่องด้วยจาก

การสูญเสียฟัน หรือโรคที่เกี่ยวข้องกับช่องปาก จากข้อมูลกองทุนทางทันตกรรมนั้นมีผู้สูงอายุต้องการใส่ฟันปลอมเพิ่มขึ้นทุกปี [6] โดยขั้นตอนการใส่ฟันปลอมทันตแพทย์จะต้องทำการศึกษาจากการหล่อแบบพิมพ์ฟันเพื่อศึกษาการสบฟัน การจัดเรียงฟัน ก่อนที่จะนำฟันปลอมใส่เข้าไปในช่องปาก รวมไปถึงถึงฟันผู้ที่มีพฤติกรรมที่ส่งผลให้เกิดการสูญเสียฟัน อาทิเช่น การนอนกัดฟัน ฟันแตกหัก

โดยทั่วไปแล้วนั้นยิปซัมทางทันตกรรมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นผลิตขึ้นจากยิปซัมที่ได้จากธรรมชาติ แต่เมื่อเทียบกับยิปซัมพลูแก๊สที่ได้จากกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย โดยที่ขนาดของอนุภาคนยิปซัมพลูแก๊สมีขนาดที่พร้อมจะนำไปปรับคุณสมบัติโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการบด และมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกับยิปซัมทางธรรมชาติ รวมถึงผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญเกี่ยวกับแผนยุทธศาสตร์ด้านสาธารณสุข ดังนั้น การศึกษาการปรับคุณสมบัติของยิปซัมพลูแก๊สเพื่อใช้เป็นวัสดุทางทันตกรรมจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพื่อที่จะเพิ่มช่องทางในการนำยิปซัมพลูแก๊สไปใช้ประโยชน์ และเพิ่มมูลค่า โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการนำยิปซัมพลูแก๊สมาผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาด จากนั้นนำยิปซัมพลูแก๊สไปผ่านกระบวนการเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภท แล้วนำไปทดสอบความทนแรงอัด การขยายตัว การศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน การศึกษาทั้งหมดนี้เพื่อเปรียบเทียบว่ายิปซัมสังเคราะห์สามารถนำมาใช้ในงานทางทันตกรรมตามมาตรฐานยิปซัมทางทันตกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาการปรับคุณสมบัติของยิปซัมพลูแก๊สจากกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทางทันตกรรม
- 2) เพื่อศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านการปรับคุณสมบัติตามมาตรฐานยิปซัมทางทันตกรรม

1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.3.1 สภาวะการเตรียมวัสดุทางทันตกรรม

- 1) วัสดุทางทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์

ตัวแปรต้น

- 1.1) รูปแบบการให้ความร้อน 2 รูปแบบได้แก่

1.1.1) ให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เริ่มจากที่อุณหภูมิห้องไปยัง 120 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 165 องศาเซลเซียส รวมเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 30 นาที

1.1.2) ให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เริ่มจากที่อุณหภูมิห้องไปยัง 80 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 120 องศาเซลเซียส รวมเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 30 นาที

2) วัสดุทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตน

ตัวแปรต้น

2.1) รูปแบบของความดันและอุณหภูมิที่ใช้ 2 รูปแบบ ได้แก่

2.1.1) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ เวลา 1 ชั่วโมง

2.1.2) ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ เวลา 1 ชั่วโมง

3) วัสดุทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตน

ตัวแปรต้น

3.1) สารเคมีที่ใช้ในการเตรียม

3.1.1) โซเดียมซึกซิเนต ที่ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.1.2) แคลเซียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.3.2 ตัวแปรตาม

1) ความทนแรงอัด

2) การเรียงตัวของผลึกและความพรุน

1.3.3 ตัวแปรควบคุม

1) ขนาดของอนุภาคยิปซัมฟลูออไรด์อยู่ระหว่าง 0.045-0.1 มิลลิเมตร

2) ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูออไรด์ 3 โมลาร์

1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2560 ถึงเมษายน 2561

1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการงาน

	การดำเนินโครงการงาน	ช่วงเวลา								
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.6.1	รวบรวมข้อมูล	←	←	←	→					
1.6.2	วางแผนดำเนินงาน			←	→					
1.6.3	เตรียมอุปกรณ์เพื่อทำการทดลอง					←	→			
1.6.4	ขึ้นรูปชิ้นงาน						←	→		
1.6.5	ทดสอบชิ้นงาน						←	→		
1.6.6	วิเคราะห์ผลการทดลอง							←	→	
1.6.7	สรุปผลการทดลองและทำรายงานวิจัย								←	→



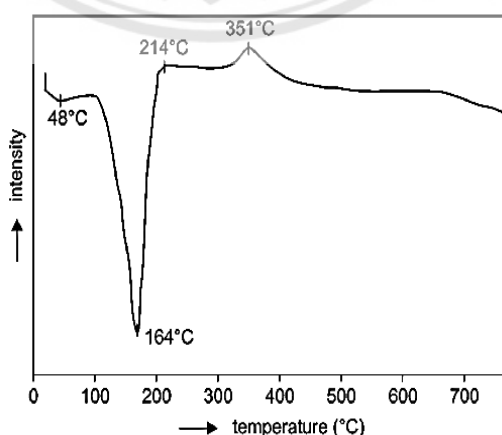
บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

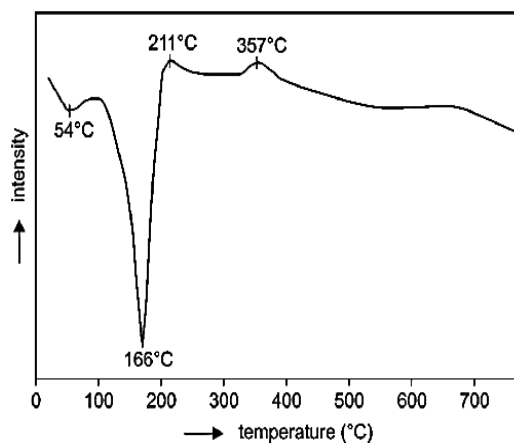
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำยิปซัมฟลูแก๊สมาใช้ประโยชน์นั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊สก่อนจะนำยิปซัมฟลูแก๊สไปทำการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติให้เคียงกับยิปซัมทางพันธุกรรมแต่ละประเภท ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์และการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊สจะมีผลต่อคุณสมบัติของยิปซัมฟลูแก๊สส่งผลทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางพันธุกรรมแต่ละประเภทตามมาตรฐาน ซึ่งยิปซัมทางพันธุกรรมในแต่ละประเภทนั้นจะถูกนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน ได้มีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดสิ่งที่ไม่เจือปนอยู่ในยิปซัม อีกทั้งเพิ่มคุณสมบัติแก่ยิปซัมดังนี้

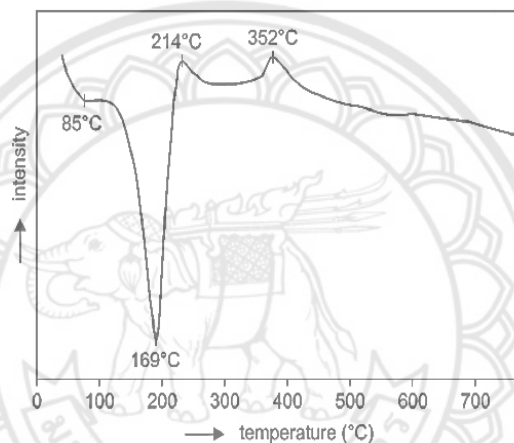
Aleksandra Kostic-Pulek และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำให้ยิปซัมที่ได้จากกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยการนำยิปซัมที่ได้จากกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาผสมด้วยกรดซัลฟูริกซึ่งมีความเข้มข้นอยู่ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในอัตราส่วนของยิปซัมต่อกรดซัลฟูริกซึ่งได้แก่ 0.125 0.250 0.500 และ 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy) เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential Thermal Analysis) โดยจะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารนั้น และในการทดลองพบว่าอัตราส่วนของการผสมยิปซัมต่อสารละลายกรดส่งผลอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (164 166 และ 169 องศาเซลเซียส) แต่ละอัตราส่วนการผสมยิปซัมต่อกรดซัลฟูริก ดังแสดงในรูปที่ 2.1-2.3 จากนั้นใช้วิธีการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบด้วยวิธีเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer) ในการทดลองพบว่าอัตราส่วนการผสมยิปซัมต่อกรดซัลฟูริกมีผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบยิปซัม และอัตราการระเหยของน้ำในยิปซัมฮีโมไฮเดรตของแคลเซียมซัลเฟต ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนสำหรับยิปซัมฮีโมไฮเดรตที่ได้จากการผสมยิปซัมต่อกรดซัลฟูริก 0.125 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [6]



รูปที่ 2.2 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนสำหรับยิปซัมไฮเดรตที่ได้จากการผสมยิปซัมต่อกรดซัลฟูริก 0.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [6]



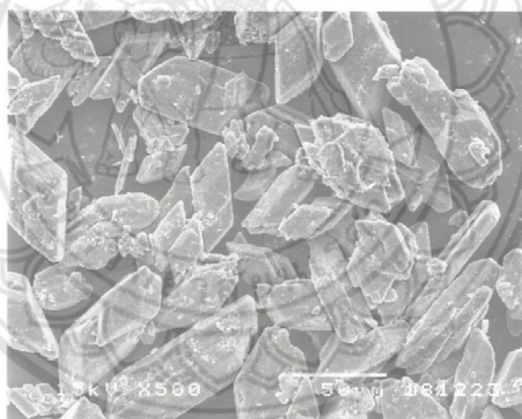
รูปที่ 2.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนสำหรับยิปซัมไฮเดรตที่ได้จากการผสมยิปซัมต่อกรดซัลฟูริก 0.500 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [6]

ตารางที่ 2.1 แสดงผลของอัตราส่วนของการผสมยิปซัมต่อกรดซัลฟูริกต่อองค์ประกอบ และอัตราการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ยิปซัมดีไฮเดรชัน (Gypsum Dehydration) [6]

Exp.No	gypsum/acid solution mixing ration (g/cm^3)	composition of the product	form in the product (vol.%)	average length of particles (μm)		rate of gypsum dehydration (g/min)
				α -form	β -form	
1	0.125	H.H.	9	8.5	0.072	0.29
2	0.250	H.H.	78	11.2	0.062	1.00
3	0.5	H.H.	88	15.0	0.058	2.50
4	0.75	D.H.+H.H.	-	-	-	-

*H.H.-hemihydrate; D.H.-dihydrate

วิทยา พันธุ์พา [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำเดนทัลสโตนจากยิปซัมฟลูแก๊ส โดยการนำ ยิปซัมที่ผ่านกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาผ่านกระบวนการทำให้ยิปซัมบริสุทธิ์ขึ้นด้วย 2 วิธีการ โดยวิธีแรกใช้วิธีการทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการสั่นด้วยวิธีอัลตราโซนิค (Ultrasonic) แล้วนำยิปซัมฟลูแก๊ส 100 กรัม ผสมกับน้ำ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นนำไปทำการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonicated) เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นกรองยิปซัมออกแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และอีกหนึ่งวิธี คือวิธีการล้างด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 95-97% Lab grade นำยิปซัมฟลูแก๊ส 100 กรัม ผสมกับน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร และผสมกับกรดซัลฟูริก 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนให้เข้ากันโดยใช้เครื่องแม่เหล็กคนสารประมาณ 15 นาที จากนั้นกรองและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยวิธีวิเคราะห์เอกซเรย์ ดิฟแฟรกชัน หลังจากผ่านกระบวนการทำให้ยิปซัมสังเคราะห์นั้นบริสุทธิ์ทั้งสองวิธีดังกล่าวแล้ว พบว่ายิปซัมจะมีค่าความบริสุทธิ์สูงกว่าในธรรมชาติดังแสดงในตารางที่ 2.2 เนื่องมาจากสารเจือปนส่วนใหญ่เป็นอนุภาคละเอียด อีกทั้งสีของยิปซัมฟลูแก๊สจะมีสีที่อ่อนลงเนื่องจากเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ละลายในกรดซัลฟูริก โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากวิธีที่ล้างด้วยกรดซัลฟูริก ซึ่งเกิดมาจากกรดซัลฟูริกที่ตกค้างอยู่ นั้นทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ที่ยังเหลืออยู่ จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าอนุภาคหลังจากการล้างแล้วมีลักษณะที่เรียบขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยที่ผสมอยู่ในอนุภาคนั้นได้ถูกกำจัดออกดังแสดงในรูปที่ 2.4-2.5



รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการล้างทำความสะอาด [7]



รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของยิปซัมฟลูแก๊สหลังการล้างทำความสะอาด [7]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติและองค์ประกอบระหว่างยิปซัมธรรมชาติและยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยวิธีการสันด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง และวิธีล้างด้วยกรดซัลฟูริก [7]

Chemical compositions (%)	Natural gypsum	Ultrasonicing	Acid leaching
Combined water (%)	19.87	20.41	20.63
Insoluble residue + SiO ₂	0.36	0.56	0.34
Aluminum and Iron oxide (R ₂ O ₃)	0.28	0.23	0.06
Calcium oxide (CaO)	32.51	32.57	32.64
Sulfur trioxide (SO ₃)	45.7	45.71	46.18
Phase (by calculation, %)	Natural gypsum	Ultrasonicing	Acid leaching
Gypsum (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	94.94	97.54	98.52
Anhydrite (CaSO ₄)	2.63	0.6	0.62
Calcium carbonate (CaCO ₃)	0.9	0.99	0.53
Mean particle size (Laser light scattering, μm)	-	49.12	45.54
Color	White	Light brown	Yellowish brown

จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการผลิตยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตนโดยการนำไปนึ่งในหม้อนึ่งไอน้ำเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 1.25 บาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิกับความดันเป็น 163 องศาเซลเซียสความดัน 6 บาร์ปล่อยให้อยู่ในสภาวะนี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำการทดสอบตามองค์การมาตรฐานสากล (International Organization for Standardization : ISO 6873) ซึ่งพบว่ายิปซัมทันตกรรมที่ผลิตขึ้นจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดทั้งสองวิธีและกระบวนการผลิตยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัล นั้นให้ค่าความทนแรงอัด ค่าการขยายตัว ค่าเวลาในการก่อตัว ที่ใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด

จรรยา ชื่นอารมณ์ [8] ได้ศึกษาผลของการเก็บรักษาผงยิปซัมพลาสติกต่อสมบัติเชิงกลของแบบหล่อปูนพลาสติกการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การเก็บผงยิปซัมพลาสติกในภาชนะที่ปิดฝาไม่สนิท เป็นเวลา 2 เดือนในสภาพอากาศ ความชื้นสูงของภาคใต้ ยังไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการก่อตัวของปูนพลาสติก อย่างไรก็ตามระยะเวลา ก่อตัวอาจลดลงได้ถ้ายังคงเก็บรักษาปูนในสภาพเดิมต่อเนื่องนานกว่า 2 เดือน เนื่องจากปูนพลาสติกที่อยู่ในสภาพ แวดล้อมที่มีความชื้นสูงเป็นเวลานาน จะมีไอน้ำในอากาศมาจับตัวกับแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตบางส่วนเกิดเป็น

ไดไฮเดรต ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสในการเติบโตของผลึก ทำให้ปูนเหลวก่อตัวเร็วขึ้น ขณะที่การเก็บปูนปลาสเตอร์ใน ภาชนะปิดสนิท (CB และ CB-S) เป็นเวลา 2 เดือน มีแนวโน้มทำให้ปูนก่อตัวช้ากว่าการเก็บในภาชนะที่ปิดฝาไม่สนิท การเปลี่ยนแปลงระยะเวลาก่อตัวของปูนปลาสเตอร์จึงขึ้นกับทั้งระยะเวลาและสภาวะในการเก็บรักษา

ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาก่อตัวของปูนปลาสเตอร์ ก่อนและหลังการเก็บรักษาที่สภาวะต่างๆ

(OB =Open box, CB = Close box, CB-S = Close box with silica gel) [8]

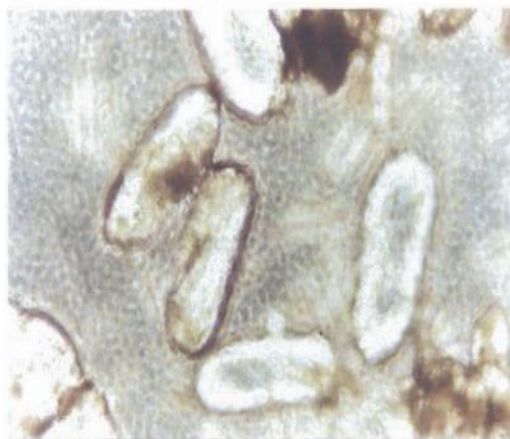
storage time	Setting time (min)	
	0 day (reference)	60 day
OB	10	10
CB	10	13
CB-S	10	13

ผลทดสอบแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแบบหล่อปูนหลังจากก่อตัวแข็งครบ 7 วัน พบว่าความแข็งแรงอัดของแบบหล่อปูนที่เตรียมจากผงยิปซัมปลาสเตอร์ที่เก็บในภาชนะที่ปิดฝาไม่สนิท (OB) เป็นเวลา 60 วัน มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบหล่อปูนที่เตรียมจากผงยิปซัมปลาสเตอร์ที่เปิดถุงใช้ในตอนเริ่มต้น (Reference) ความแข็งแรงอัดของแบบหล่อปูนที่เตรียมจากผงยิปซัมปลาสเตอร์ที่เก็บในภาชนะที่ปิดฝาสนิทและใส่ซิลิกาเจล (CB-S) มีความแข็งแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุด แสดงให้เห็นว่าการทำให้สภาพแวดล้อมของผงยิปซัมปลาสเตอร์มีความชื้น น้อยจะช่วยคงค่าความแข็งแรงอัดหรือเพิ่มความแข็งแรงอัดแก่แบบหล่อปูนได้ เพราะถ้าไม่มีไอน้ำในอากาศ เอมิไฮเดรตก็ไม่เปลี่ยนเป็นไดไฮเดรต และไม่มีการสะสมของนิวเคลียสก่ตัวเริ่มต้นในผงยิปซัมปลาสเตอร์ เมื่อผสมผงยิปซัม ปลาสเตอร์กับน้ำ นิวเคลียสเริ่มต้นจะขยายตัวเป็นผลึกช้ากว่า ทำให้โครงสร้างผลึกรูปเข็มที่เรียงไขว้เกาะกัน (Interlocking) มีความแข็งแรงกว่าแบบหล่อปูนที่แห้งเร็ว จึงสามารถรับแรงกดอัดได้มากกว่า

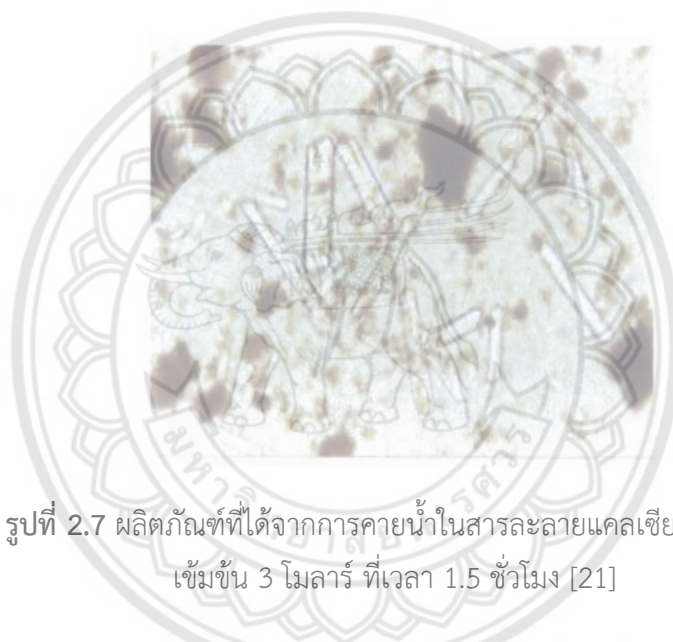
Shereen S. Azer และคณะ [9] ได้ศึกษาผลของวิธีการผสมยิปซัมทางทันตกรรมต่อคุณสมบัติทางกายภาพ โดยการนำยิปซัมทันตกรรมของแต่ละผู้ผลิตที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดได้แก่ Die keen, Silky-Rock, Snap-Stone, HandiMix มาทำการผสมด้วยวิธีที่ต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 3 วิธี วิธีแรกเป็นวิธีผสมยิปซัมที่สภาวะปกติ วิธีที่สองเป็นวิธีผสมยิปซัมที่สภาวะสุญญากาศ และวิธีที่สามเป็นวิธีที่ใช้ในการเขย่า จากนั้นนำไปทดสอบและการประเมินคุณสมบัติของวัสดุพิมพ์ปาก (American Dental Association Specification ;ADA) โดยทดสอบความทนแรงอัด และแรงเฉือน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าวิธีการผสมไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของยิปซัมทันตกรรม ถึงก่อนหน้านี้ได้มีการรายงานว่าการผสมด้วยสุญญากาศทำให้ส่วนผสมที่หนาแน่นและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น แต่จากการทดสอบนั้นไม่มีความแตกต่าง

Leonardo De Cesero และคณะ [10] ได้ศึกษาผลของการเติมอนุภาคซิลิกาต่อคุณสมบัติทางกลของเดนทัลสโตน โดยการเตรียมชิ้นงานทั้งหมด 180 ชิ้น โดยแบ่งเป็น 90 ชิ้นที่เตรียมจากยิปซัมทางทันตกรรมของผู้จัดจำหน่าย Durone และอีก 90 ชิ้นที่เตรียมจากยิปซัมทางทันตกรรมของผู้จัดจำหน่าย Fuji Rock โดยแบ่งกลุ่มทดลองออกเป็น 3 กลุ่ม สำหรับกลุ่มแรกนั้นจะไม่มีเติมอนุภาคซิลิกาเข้าไป สำหรับกลุ่มที่สองนั้นจะมีเติมอนุภาคซิลิกาที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสำหรับกลุ่มสุดท้ายจะมีการเติมอนุภาคซิลิกาที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปวัดความต้านทานแรงอัด ความต้านทานแรงดึง และความขรุขระ จากผลการทดลองพบว่าความขรุขระของผิวลดลงเมื่อเติมอนุภาคซิลิกาเข้าไป การเติมอนุภาคซิลิกาเข้าไปนั้นไม่ได้ส่งผลต่อความต้านทานแรงอัด ความต้านทานแรงดึง

สุจารี [21] ได้พิสูจน์กลไกการเกิดยิปซัมโดยผ่านสารละลาย ซึ่งได้ถูกเสนอไว้แล้วโดยสรายุทธวรพฤษ์จารุ และศึกษาผลของไอออนของเกลือต่อกระบวนการดีไฮเดรชันของยิปซัมที่เป็นผลิตภัณฑ์รอง ด้วยกระบวนการแบบเปียก โดยการศึกษาผลกระทบของสารละลายเกลือกระทำโดยการดีไฮเดรชันของยิปซัมที่เป็นผลิตภัณฑ์รองในความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ 3 โมลาร์ และ 4 โมลาร์ ของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยวิธีการดังต่อไปนี้ 1. ต้มยิปซัมที่เป็นผลิตภัณฑ์รองกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในความดันบรรยากาศ ในระหว่างต้มจะทำการกวนทุก ๆ ครั้งชั่วโมง 2. วัดค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า และ ไอออนซัลเฟตในเฟสของเหลว 3. กรองสารละลาย 4. นำของยิปซัมที่กรองได้ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อบจนน้ำหนักของยิปซัมคงที่ 5. ตรวจสอบการสูญเสียน้ำหนักของยิปซัมและคำนวณหาอัตราการคายน้ำ 6. ทำซ้ำที่แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 2.5 และ 4 โมลาร์ สรุปจากผลการทดลองได้ว่าอัตราการเกิดของกระบวนการดีไฮเดรชันเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อทำในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูง และคลอไรด์ไอออนที่เกิดจากแคลเซียมคลอไรด์จะช่วยดึงดูดโมเลกุลของน้ำเพื่อยับยั้งการเกิดพันธะน้ำในโครงร่างผลึก อย่างไรก็ตามก็ดีการดีไฮเดรชันในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูง จะทำให้ได้ผลึกของแอลฟาเอมิไฮเดรตแคลเซียมซัลเฟตขนาดเล็ก



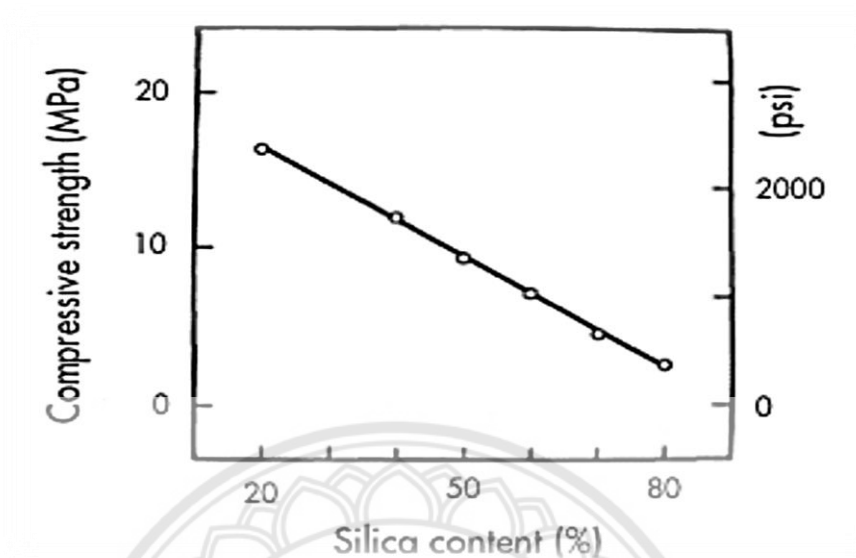
รูปที่ 2.6 ผลึกที่เกิดขึ้นจากการคายน้ำในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
เข้มข้น 3 โมลาร์ ที่เวลา 1 ชั่วโมง [21]



รูปที่ 2.7 ผลึกที่เกิดขึ้นจากการคายน้ำในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
เข้มข้น 3 โมลาร์ ที่เวลา 1.5 ชั่วโมง [21]

Carsten Vellmer [19] ได้ศึกษาผลของกรดคาร์บอกซิลิกต่อการไฮเดรชัน (hydration) ของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต การแข็งตัวของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตที่มีกรดคาร์บอกซิลิกอยู่จะถูกตรวจสอบโดยการวัดอัตราการเกิดความร้อน (heat evolution rate) และการคายความร้อนทั้งหมดที่เกิดจากการที่แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตทำปฏิกิริยากับน้ำโดยใช้ เครื่อง TAM Air isothermal conduction calorimeter ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสาร ซึ่งก็คือ การวัดความร้อนของปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยเปรียบเทียบเส้นโค้งอัตราการเกิดความร้อนที่สัมพันธ์กับการก่อตัวของแท่งปริซึมรูปเข็มของแคลเซียมซัลเฟต กับกลุ่มตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีกรดคาร์บอกซิลิก พบว่ากรดคาร์บอกซิลิกมีผลต่อการสร้างนิวเคลียสยิปซัม และชะลอการเจริญเติบโตของผลึก

William J. O'Brien และคณะ [13] ได้ศึกษาผลของปริมาณซิลิกอนออกไซด์ในยิปซัมต่อความทนแรงอัดของชิ้นงาน โดยทำการทดสอบหลังจากขึ้นรูป 2 ชั่วโมง และได้อธิบายว่าความต้องการน้ำที่แตกต่างกันของยิปซัมทางที่ตกกรรมแต่ละชนิดเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นผงยิปซัม



รูปที่ 2.8 แสดงผลของปริมาณซิลิกอนออกไซด์ต่อความทนแรงอัดของชิ้นงาน [13]

ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมของเดินท์สโตนแต่ละประเภท [13]

Type	W/P ration
Impression plaster	0.6
Plaster	0.5
Stone	0.3
Stone high-strength, low-expansion	0.2
Stone high-strength, high-expansion	0.19

Physical Properties of Calcium Chloride [22] จุดเดือดและจุดหลอมเหลวของแคลเซียมคลอไรด์จะลดลงเมื่อมีโมเลกุลของน้ำอยู่ในโครงสร้าง

ตาราง 2.5 แสดงคุณสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์ [22]

Property	CaCl ₂ ·6H ₂ O	CaCl ₂ ·4H ₂ O	CaCl ₂ ·2H ₂ O	CaCl ₂ ·H ₂ O	CaCl ₂
Composition (%CaCl ₂)	50.66	60.63	75.49	86.03	100
Molecular Weight	219.09	183.05	147.02	129	110.99
Melting Point (°C)	29.9	45.3	176	187	773
(°F)	85.8	113.5	349	369	1424
Boiling Point (°C)	-	-	174	183	1935
(°F)	-	-	345	361	3515
Density at 25°C (77°F).g/cm ³	1.71	1.83	1.85	2.24	2.16
Heat of Fusion (cal/g)	50	39	21	32	61.5
(BTU/lb)	90	70	38	58	110.6
Heat of Solution in H ₂ O (cal/g)	17.2	-14.2	-72.8	-96.8	-176.2
(to infinite dilution) (BTU/lb)	31.0	-25.6	-131.1	-174.3	-317.2
Heat of Formation at 25°C kcal/mole	-623.3	-480.3	-335.58	-265.49	-190.1
Heat of Capacity at 25°C cal/g°C or BTU/lb°F	0.34	0.32	0.28	0.2	0.16

ภัทรวรรณ เฉยเจริญ [17] อธิบายไว้ว่าเมื่อทำการเติมน้ำลงในปูนปลาสเตอร์ จะเกิดการดึงน้ำกลับเข้าไปในโครงสร้างอีกครั้ง (Rehydrate) ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวเป็นผลึกยิปซัมขึ้น เมื่อปูนปลาสเตอร์เกิดการแข็งตัวน้ำที่อยู่ภายนอกโครงสร้าง (Uncombined Water) จะเกิดการระเหยออกไป ทำให้ทั้งรูพรุนเปิด (Open Pore) เอาไว้ในโครงสร้าง ดังนั้นการเติมน้ำมากขึ้นในการผสมปูนปลาสเตอร์กับน้ำ ก็จะทำให้แม่พิมพ์หลังการแห้งตัวแล้วมีรูพรุนมากยิ่งขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซึมน้ำของแม่พิมพ์ในระหว่างกระบวนการหล่อชิ้นงานมากขึ้นตามไปด้วย

Paola Comodi และคณะ [16] บทความนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาลักษณะผลึกเดี่ยว (Single crystal) ของยิปซัมที่แรงดันสูงและมีจุดมุ่งหมายเพื่อหาค่าความสามารถในการอัดตัวตามแนวแกนและประเมินสมบัติแอนไอโซทรอปิก (anisotropy) ของแลตทิซ พารามิเตอร์ (lattice parameters) รวมทั้งโครงสร้างโดยรวมและเพื่อทดสอบปฏิกิริยาการคายน้ำที่เกิดจากแรงดัน พบว่าแรงดันไม่มีผลต่อการคายน้ำของผลึก แต่จะส่งผลให้ผลึกมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการบีบอัดบริเวณที่เป็นช่องว่างในผลึกซึ่งประกอบไปด้วยน้ำ

ตารางที่ 2.6 พารามิเตอร์ยูนิตเซลล์, ปริมาตร, ความหนาแน่นของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ที่ความดันต่างๆ [16]

Pressure (GPa)	$a_0(\text{Å})$	$b_0(\text{Å})$	$c_0(\text{Å})$	$\beta(^{\circ})$	$V_0(\text{Å}^3)$	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$
10^{-4}	6.277(2)	15.181(6)	5.672(2)	114.11(2)	493.36(35)	2.318
10^{-4*}	6.280(4)	15.194(10)	5.674(3)	114.08(4)	494.29(50)	2.313
0.25	6.282(4)	15.175(17)	5.673(3)	114.13(5)	493.48(70)	2.317
0.32	6.269(4)	15.140(35)	5.665(3)	114.10(5)	490.76(121)	2.33
0.56	6.263(4)	15.163(16)	5.662(3)	114.24(5)	490.19(66)	2.333
0.89	6.257(8)	15.125(26)	5.648(7)	114.35(1)	487.04(121)	2.348
1.01	6.241(7)	15.130(20)	5.645(4)	114.42(8)	485.37(176)	2.356
1.61	6.217(3)	15.052(20)	5.626(3)	114.77(5)	477.98(74)	2.392
2.03	6.200(4)	15.010(20)	5.610(2)	114.86(5)	473.75(76)	2.414
3.06	6.175(8)	14.983(25)	5.583(7)	115.29(12)	467.10(126)	2.448
3.15	6.162(3)	14.965(15)	5.580(2)	115.38(5)	464.90(58)	2.459
3.65	6.146(3)	14.960(20)	5.560(3)	115.63(5)	460.70(70)	2.482
3.85	6.154(7)	14.946(28)	5.560(6)	115.55(10)	461.39(119)	2.478
3.94	6.136(3)	14.912(20)	5.556(3)	115.73(5)	457.95(72)	2.497
4.06	6.175(8)	14.912(30)	5.545(6)	115.70(1)	456.51(117)	2.505
4.28	5.930(7)	15.087(40)	5.522(9)	115.76(15)	444.96(159)	2.57
4.63	5.910(4)	15.070(20)	5.533(3)	115.92(6)	443.40(81)	2.579
4.84	5.891(4)	15.020(20)	5.529(3)	115.83(6)	440.22(71)	2.597

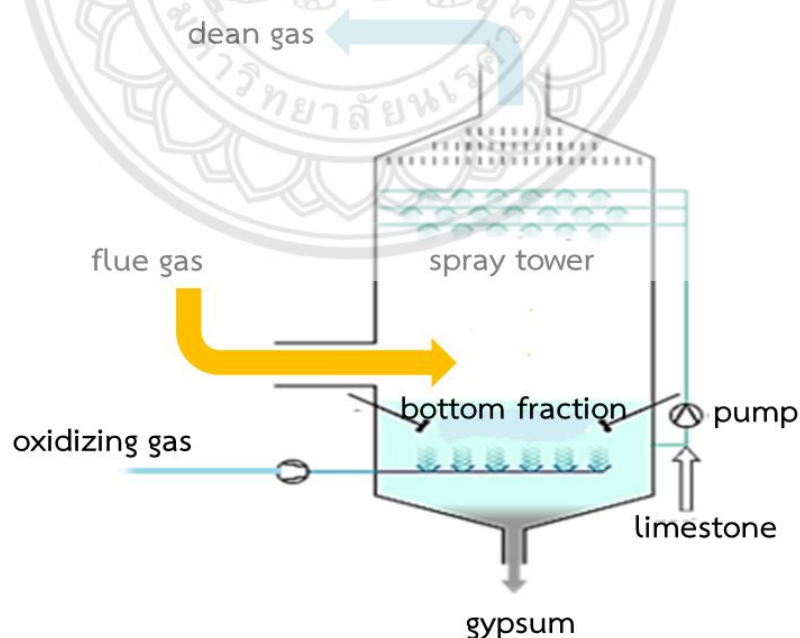
โดยความยาวด้านของหน่วยเซลล์ (Unit cell) ความยาวของขอบ a_0 b_0 และ c_0 (ตามแกนผลึก) วัดเป็นหน่วยอังสตรอม (Angstrom; Å) มุมระหว่างแกนวัดเป็นองศา มุมระหว่างด้าน b และ c เรียกว่ามุมแอลฟา (alpha : α) มุมระหว่างด้าน c และ a เรียกว่ามุมเบต้า (beta : β) และมุมระหว่างด้าน a และ b เรียกว่ามุมแกมมา (gamma : γ) ค่า V_0 คือปริมาตรของผลึก และ ρ_0 คือความหนาแน่นของผลึก

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าถ่านหิน

2.2.1.1 กระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ [10]

กำมะถัน (S) เป็นธาตุองค์ประกอบที่ปนเปื้อนอยู่ในเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งได้แก่น้ำมันดิบ แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นต้น และเมื่อนำเชื้อเพลิงฟอสซิลมาทำการเผาไหม้เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น การผลิตไฟฟ้าด้วยการเผาไหม้ถ่านหินที่ปนเปื้อนไปด้วยกำมะถันนั้นจะเกิดเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ซึ่งจำเป็นที่จะต้องลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า Flue Gas Desulfurization Process เป็นการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยการใช้หินปูน (CaCO_3) โดยสมบัติของหินปูนนั้นมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและหินปูน คือ การกระจายของขนาดอนุภาค ความเป็นรูพรุน และสารปนเปื้อนในหินปูน โดยหินปูนที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีนั้นต้องมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอย่างน้อย 95 เปอร์เซ็นต์ การผสมถ่านหินในอัตราส่วนที่ทำให้ปริมาณกำมะถันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด การใช้สารประกอบแอลคาไลน์-เอิร์ธ เพื่อเกิดเป็นสารประกอบซัลเฟต และเกิด self-desulfurization ซึ่งในระหว่างการเผาไหม้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบแอลคาไลน์เกิดเป็นสารประกอบแอลคาไลน์ซัลเฟต โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 800 – 900 องศาเซลเซียส จากแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เป็นผลมาจากการเผาไหม้กำมะถันในถ่านหินด้วยการเติมปูนขาว (CaO) ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อดักจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) โดยชื่อสามัญที่รู้จัก คือ ยิปซัม แต่ยิปซัมที่ได้จากกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์นี้เรียกว่า Flue Gas Desulfurization Gypsum



รูปที่ 2.9 กระบวนการลดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยหินปูน [11]

2.2.1.2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

กระบวนการที่เกิดขึ้นจะทำโดยอาศัยหลักการการสวนทางกันระหว่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่จะลอยขึ้นสู่บรรยากาศ และหินปูนผสมกับน้ำที่จะถูกป้อนเข้าแล้วปล่อยเข้าสู่ระบบทางด้านบน หินปูนจะทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากนั้นจะเกิดแคลเซียมซัลไฟต์ที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ($\text{CaCO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) มีสถานะเป็นของแข็ง โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่สภาวะปกติ โดยมีค่า pH อยู่ระหว่าง 7 ถึง 8



(Solid suspension)

ในขั้นตอนที่สองนี้จะปรับให้มีสภาวะเป็นกรดโดยการเติมกรดซัลฟูริก ให้มีค่า pH ต่ำกว่า 5 ซึ่งทำให้แคลเซียมซัลไฟต์ที่แขวนลอยอยู่จะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไบซัลไฟต์ที่ละลายน้ำได้ ($\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$)



(Solid suspension)

(Solution)

แคลเซียมไบซัลไฟต์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการข้างต้นจะเกิดการออกซิไดซ์กับออกซิเจนในชั้นบรรยากาศเกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หรือยิปซัมที่เรียกว่า “Flue-gas gypsum”



(Solution)

(Solid suspension)

กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) จากกระบวนการในขั้นตอนที่สองจะทำปฏิกิริยากับหินปูนที่เหลืออยู่ทำให้ได้ยิปซัมเพิ่มมากขึ้น



2.2.2 วัสดุยิปซัมทางทันตกรรม [12]

2.2.2.1 วัสดุทางทันตกรรม

ในอดีตนั้นได้มีการนำวัสดุหลากหลายประเภทมาใช้เป็นฟันเทียม และรากฟันเทียม ซึ่งประกอบด้วย ฟันของสัตว์ กระดูก งาสัตว์ เซรามิก และโลหะ วัสดุเหล่านี้ทำหน้าที่ทดแทนในส่วน of โครงสร้างที่หายไป

วัสดุทางทันตกรรมอาจจะเกิดขึ้นจากวัสดุต่อไปนี้ ได้แก่ โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และคอมโพสิต (Composites) โดยทั่วไปนั้น พอลิเมอร์ เซรามิก และคอมโพสิต ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการป้องกันโรคและฟื้นฟูอาการของโรคที่เกิดจากปัญหาด้านโครงสร้าง โดยวัสดุบางอย่างนี้สามารถที่จะรักษาอาการได้เป็นอย่างดี อาทิเช่น โรคฟันผุ ซึ่งวัสดุเหล่านี้สามารถจะรักษาฟันผุได้

วัสดุทางทันตกรรมอาจจะถูกจำแนกเป็น วัสดุที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโรค วัสดุในการฟื้นฟูรักษาโรค หรือเป็นวัสดุเติมแต่ง วัสดุที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโรคซึ่งรวมถึงหลุม รอยแตกในฟัน เป็นวัสดุที่ใช้ป้องกันการร้าวซึม อีกทั้งใช้สำหรับป้องกันแบคทีเรีย และใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม เช่น

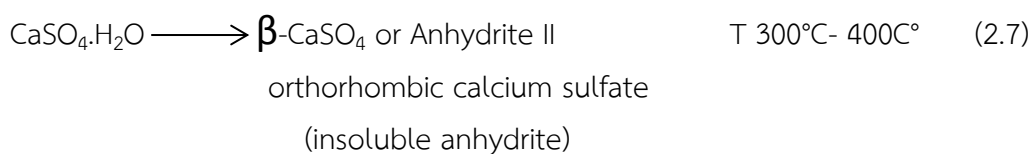
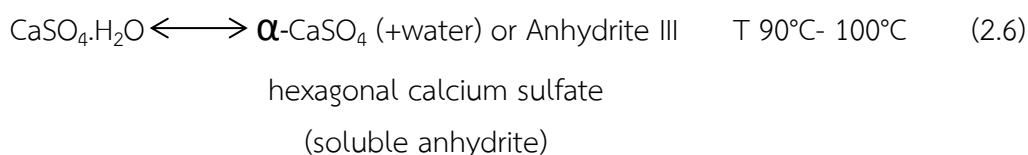
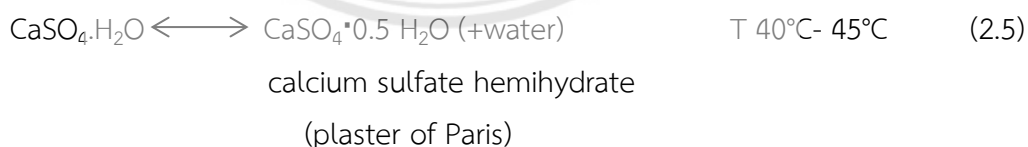
คอมโพเมอร์ ไอออนเมอร์ผสม และแก้วไอออนเมอร์ ซึ่งเป็นวัสดุพื้นฐานเพราะว่าสามารถยับยั้งสารที่ทำให้เกิดฟันผุ วัสดุในการฟื้นฟูรักษาโรคซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่ซับซ้อนสามารถที่จะฟื้นฟูหรือแทนที่โครงสร้างของฟัน ซึ่งประกอบด้วยไพโรเมอร์ ตัวเชื่อมระหว่างโครงสร้างของฟัน องค์ประกอบจากเรซิน คอมโพเมอร์ ไอออนเมอร์ผสม โลหะหล่อ โลหะเซรามิก เซรามิก และพอลิเมอร์ที่ใช้ทำฟันปลอม วัสดุบางอย่างเหล่านี้สามารถออกแบบ เช่นการควบคุมปริมาณการลดลงของสารที่เกี่ยวกับการรักษาโรค หรือการวินิจฉัย และสุดท้ายวัสดุเติมแต่ง เป็นสารที่ใช้ในกระบวนการผลิตรากฟันเทียม และอุปกรณ์ที่ใช้ในทางทันตกรรม ซึ่งวัสดุเติมแต่งเหล่านี้ประกอบไปด้วย สารละลายที่เป็นกรด วัสดุกัดอัด ยิปซัมหล่อ วัสดุจำลองแบบ แวกซ์ทันตกรรม เรซินสังเคราะห์ สำหรับการกัดอัด และการฟอกขาว และวัสดุเสริมอื่น ๆ ประกอบด้วย ผลิตภัณฑ์ทางทันตกรรมจาก ยิปซัม สารทางทันตกรรม และกัตตาเปอร์ชา (Gutta percha) ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการอุดคลองรากฟัน

2.2.2.2 ผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรม

ยิปซัมเป็นแร่ที่มีประโยชน์ที่ค่อนข้างหลากหลาย มีการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุอื่น ๆ และหนึ่งในนั้นคือ ใช้เป็นวัสดุทางทันตกรรม ซึ่งนำไปใช้ในการหล่อแบบจำลองช่องปาก เพื่อใช้ในการศึกษาโครงสร้างในช่องปาก และฟันกราม อีกทั้งใช้เป็นวัสดุเสริมในการปฏิบัติทางทันตกรรม ในการปฏิบัติทางทันตกรรมบางอย่างนั้นจะนำไปยิปซัมไปเติมด้วยสารเติมแต่ง อาทิเช่น ซิลิกา ซึ่งยิปซัมที่ได้เติมซิลิกาเข้าไปนี้จะมีคุณสมบัติที่ทนต่อความร้อนมากขึ้น ซึ่งมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างแม่พิมพ์ สำหรับการหล่อเกี่ยวกับกายวิภาคทางทันตกรรม

2.2.2.3 คุณสมบัติทางเคมี (Chemistry) [13]

ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20 องศาเซลเซียสถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความสำคัญในการปรับผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรม โดยมีการเปลี่ยนแปลงเฟสทั้งสามเฟสเกิดขึ้นในระบบที่โมโนเลกุลแคลเซียมซัลเฟตมีน้ำผสมอยู่ ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ในสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 จะแสดงถึงขั้นตอนของการคายน้ำออกของยิปซัม และในสมการที่ 2.7 ก็แสดงถึงแคลเซียมซัลเฟตที่ไม่มีน้ำอยู่ในโมเลกุล



การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นครั้งแรกในสมการที่ 2.5 นั้น จะเป็นการเปลี่ยนจากไดไฮเดรต (dehydrate) เป็นเฮมิไฮเดรต (hemihydrate) โดยวิธีการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่สูญเสียไปของ ตัวอย่างที่ถูกให้ความร้อนในอากาศแห้ง (dry air) เป็นเวลา 2.5 ปี (Andrews, 1951) ถึงจะได้ค่า สมดุล ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

การวัดสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนจากการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ สำหรับการเปลี่ยนแปลงจากแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต เป็นเฮกซโกนอลแคลเซียมซัลเฟตในสมการที่ 2.6 (hexagonal) พบว่าน้ำหนักของวัสดุจะคงที่ในระยะเวลาสูงสุดไม่เกิน 22 วัน (Khalil และ Weiser) ดังนั้นอุณหภูมิดุลยภาพที่แท้จริงสำหรับการเปลี่ยนแปลงนี้อาจน้อยกว่าที่แสดง Gay ได้วิเคราะห์เฮกซโกนอลแคลเซียมซัลเฟต โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเฮมิไฮเดรตที่ให้ความร้อนอยู่ในช่วง 75-105 องศาเซลเซียส พบว่าการเป็นเฮกซโกนอลแคลเซียมซัลเฟตไม่มีความเสถียรภาพถ้าให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส และถ้าตัวอย่างเย็นลงหรืออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส จะเกิดการรีไฮเดรต (rehydrates) อย่างรวดเร็ว จะเปลี่ยนจากเฮกซโกนอลซัลเฟต เป็นเฮมิไฮเดรต แม้ในสภาวะที่มีแรงดันไอ สำหรับการเปลี่ยนแปลงในสมการที่ 2.7 อุณหภูมิในช่วง 300 องศาเซลเซียสถึง 400 องศาเซลเซียส เฮกซโกนอลแคลเซียมซัลเฟตจะเปลี่ยนแปลงเป็นออทอโรอิมบิกแคลเซียมซัลเฟต (orthorhombic calcium sulfate) ซึ่งได้จากตัวอย่างที่ได้รับความร้อนในอัตรา 5 k/min ดังนั้นอุณหภูมิสมดุลที่แท้จริงสำหรับการเปลี่ยนแปลงนี้จะต่ำกว่าที่แสดง

จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ให้ไว้ส่วนก่อนหน้า จะเห็นได้ว่า การให้ความร้อนในช่วง 45 องศาเซลเซียสถึง 90 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิเหล่านี้ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างช้า ๆ ที่ความร้อน 90 องศาเซลเซียสการเปลี่ยนแปลงจะเสร็จสมบูรณ์จะต้องใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง (Khalil et al, 1971) ดังนั้นในเชิงพาณิชย์ กระบวนการผลิตที่ใช้อุณหภูมิที่สูงจะใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่สั้นกว่า ดังนั้นเริ่มต้นผลิตภัณฑ์ยิปซัมที่ได้จากการเผาจะเป็นยิปซัมที่ปราศจากน้ำบางส่วนหรือเกือบทั้งหมด ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ 45-90 องศาเซลเซียสจะทำให้เฟสคงที่เป็น hexagonal calcium sulfate อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียสและสัมผัสกับอากาศจะทำให้ hexagonal calcium sulfate มีความชื้นแล้วเปลี่ยนเป็น hemihydrate

ตารางที่ 2.7 การเปลี่ยนเป็น hemi-hydrate และ Anhydrite ของยิปซัม
ที่อุณหภูมิในการเผาต่างๆ [20]

Name	Calcining temperature
α -hemi-hydrate($\text{CaCO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)	80-180°C (saturated steam atmosphere)
β -hemi-hydrate($\text{CaCO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)	120-165°C (standard atmosphere)
α -Anhydrite III ($\text{CaSO}_4 \cdot 0, x\text{H}_2\text{O}$)	290°C (saturated steam atmosphere)
β -Anhydrite III (CaSO_4)	110°C (standard atmosphere)
Anhydrite II _s (CaSO_4)	300-500°C
Anhydrite II _u (CaSO_4)	300-500°C
Anhydrite I (CaSO_4)	>700°C

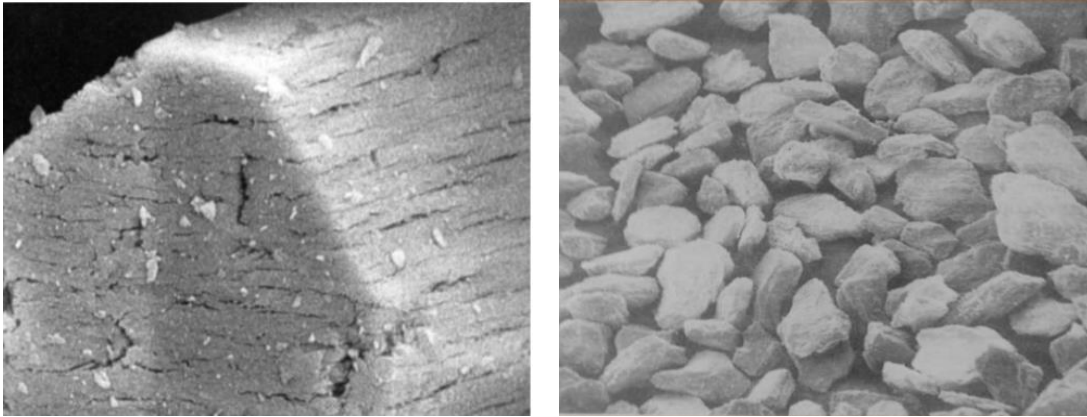
2.2.2.4 ประเภทและการผลิตยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภท

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ยิปซัมหมายถึงรูปแบบต่าง ๆ ของแคลเซียมซัลเฟต และการหายไปของน้ำที่ได้จากการเผาของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตซึ่งทำให้เกิดเป็นแร่อยิปซัม ผลิตภัณฑ์ยิปซัมที่ได้โดยการเผาหรือยิปซัมที่ได้ทางเคมีเช่นผลพลอยได้ของการผลิตกรดฟอสฟอรัส ซึ่งในอุตสาหกรรมวัสดุทั้งหมดเหล่านี้เรียกว่าเป็นยิปซัมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยิปซัมเป็นวัสดุเสริมที่สำคัญที่ใช้ในกระบวนการทางคลินิกและห้องปฏิบัติการแม้ว่าจะไม่ใช่โดยตรงในการรักษาฟัน ในทางการแพทย์จะนำผลิตภัณฑ์ยิปซัมมาใช้หล่อขึ้นรูปฟันเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ลักษณะฟัน การใช้และการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ยิปซัมที่ถูกต้องจะก่อให้เกิดความสำเร็จในกระบวนการเหล่านี้ โดยสามารถจำแนกตามผลิตภัณฑ์ยิปซัมได้เป็น 5 ประเภท ตามมาตรฐานการประเมินคุณสมบัติของวัสดุพิมพ์ปาก หมายเลข 25 (American Dental Association Specification No.25;ADA) จำแนกโดยการวัดค่าต่างๆ อาทิเช่น อัตราส่วนของน้ำต่อผง การวัดค่าความแข็งดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของยิปซัมทางทันตกรรม 5 ประเภท [12]

Type	W/P Ration	Setting Time (min)	Two-hour setting Expansion (%)		One-Hour Compressive Strength (MPa)
			Min	Max	
1.Plaster, impression	0.5-0.75	4	0	0.15	4
2.Plaster,model	0.45-0.50	12	0	0.3	9
3.Dental stone	0.28-0.30	12	0	0.2	20.7
4.Dental stone, high strength	0.22-0.25	12	0	0.1	34.5
5.Dental stone, high strength high expansion	0.18-0.22	12	0.1	0.3	48.3

ซึ่งผลิตภัณฑ์ยิปซัมแต่ละประเภทก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปโดยยิปซัมที่นิยมใช้ในการหล่อแบบจำลองทางทันตกรรม คือ ปูนพลาสติก ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยเบตาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (β -calcium sulfate hemihydrate) ซึ่งลักษณะของอนุภาคจะมีรูปร่างขรุขระ และมีขนาดไม่แน่นอนเป็นรูพรุนดังรูปที่ 2.10 ส่วนเด็นทัลสโตน และเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง โครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็นแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (α -calcium sulfate hemihydrate) ซึ่งอนุภาคมีความละเอียด มีผลึกหน้าสมบูรณ์ (idiomorphic) ที่โปร่งใส (transparent) มีขอบผลึกคมชัด มีขนาดสม่ำเสมอและหนาแน่น ดังรูปที่ 2.11 เมื่อนำไปผสมกับน้ำจะได้ยิปซัมทางทันตกรรม (แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต) ที่มีความแข็งของผิว (surface hardness) สูงกว่ายิปซัมทางทันตกรรมชนิดพลาสติก รวมทั้งมีการขยายตัวที่น้อยกว่า เนื่องจากมีรูพรุนน้อยและรวมตัวแน่นกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตน กับชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง แล้วพบว่ายิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงมีอนุภาคละเอียดกว่าชนิดเด็นทัลสโตน ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงและการขยายตัวสูงจะมีคุณสมบัติคล้ายกับเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงแต่จะต่างกันตรงที่การขยายตัวที่สูงมากกว่า



รูปที่ 2.10 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างของเบตาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตจากกล้องจุลทรรศน์ (ที่มา : [slideshare.net/ajeyaranganathan/gypsum-products-in-dentistry](https://www.slideshare.net/ajeyaranganathan/gypsum-products-in-dentistry))



รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างของแอลฟาแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตจากกล้องจุลทรรศน์ (ที่มา : [slideshare.net/ajeyaranganathan/gypsum-products-in-dentistry](https://www.slideshare.net/ajeyaranganathan/gypsum-products-in-dentistry))

2.2.2.4.1 ปูนปลาสเตอร์ (Impression plaster)

ปูนปลาสเตอร์เฮมิไฮเดรต แบบดั้งเดิมนี้ได้มาจากการเผาแห้งของ ยิปซัม ในภาวะเปิดที่อุณหภูมิในช่วง 120 องศาเซลเซียสถึง 180 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ไม่ใช่ของเหลวที่เป็นน้ำในกระบวนการเผานั้นจะส่งผลให้โครงสร้างสัณฐานวิทยาของคริสตัลไม่มีโอกาสที่จะเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นแม้ว่าสุดท้ายโครงสร้างคริสตัลของผลิตภัณฑ์จะสัมผัสกับอากาศก็ยังเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ที่มีอนุภาคของผงยิปซัมแบบดั้งเดิมที่มีรูปร่างหยาบไม่สม่ำเสมอ การสูญเสียน้ำภายใต้สภาวะแห้งจะทำให้เกิดช่องขนานในอนุภาคเหล่านี้ ดังนั้นปูนปลาสเตอร์เฮมิไฮเดรตที่ผลิตขึ้นโดยการเผาแบบแห้งจะมีลักษณะเป็นผงที่มีความหนาแน่นต่ำ ความสามารถในการยึดแน่นไม่ดี

2.2.2.4.2 ปูนปลาสเตอร์หล่อแบบ (Plaster model)

สำหรับปลาสเตอร์หล่อแบบนี้จะได้จากกระบวนการเช่นเดียวกับปูนปลาสเตอร์ โดยจะใช้ในการจำลองเกี่ยวกับการต้องการทำฟันปลอม เนื่องจากปลาสเตอร์หล่อแบบมีคุณสมบัติการขยายตัวต่ำ

2.2.2.4.3 เค้นท์สโตน (Dental stone)

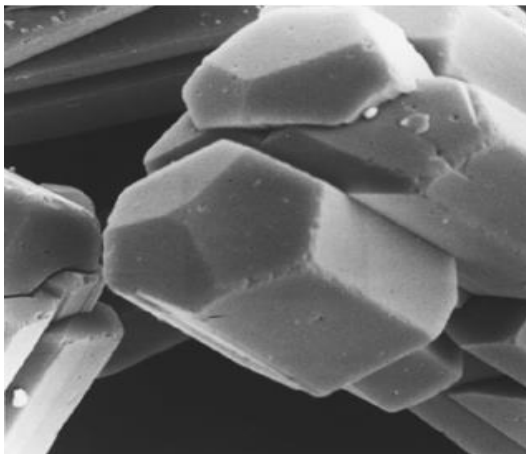
ผลิตภัณฑ์ยิปซัมประเภทไฮโดรคอล (Hydrocal) ผลิตขึ้นโดยการให้ความร้อนกับก้อนยิปซัมด้วยหม้อน้ำอัดไอน้ำโดยไอน้ำจะเป็นไอน้ำร้อนยิ่งยวด (Superheated steam) ที่ความดัน 117 กิโลปาสคัล อุณหภูมิ 123 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง หลังจากนั้นไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่านี้และนำมาบด ผงไฮโดรคอลที่ได้นั้นจะมีความแข็งแรงมากกว่าการเผาแบบแห้ง ในงานวิจัยของ วิทยา [7] ได้ผลิตเค้นท์สโตนโดยการให้อุณหภูมิ และความดันสองสเตป สเตปแรกให้ความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ เวลา 1 ชั่วโมง สเตปที่สองให้ความร้อน 163 องศาเซลเซียส ความดัน 6 บาร์ เป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมง

2.2.2.4.4 เค้นท์สโตนที่มีความแข็งแรงสูง (Dental stone, High strength)

การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตเป็นกระบวนการผลิตแบบเปียก จะทำให้ผลิตภัณฑ์จากผงไฮโดรคอลที่ได้ออกมา เมื่อนำไปขึ้นรูปจะมีความแข็งแรง กระบวนการเผาแบบเปียกในหม้อน้ำอัดไอน้ำจะส่งผลรูปร่างผลึกของยิปซัมมีการปรับเปลี่ยนไปทำให้ผลึกสั้นและหนาแน่นมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการต้มก้อนยิปซัมในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก งานวิจัยของ สุธารี [21] ใช้ความเข้มข้น 3 โมลาร์ หลังจากบดละเอียดแล้วก้อนยิปซัมที่ต้มเสร็จและผงยิปซัมที่ได้จะมีความหนาแน่นสูงขึ้นและทำให้เกิดมวลที่มีความแข็งแรงมากกว่าผลิตภัณฑ์ยิปซัมประเภทไฮโดรคอล

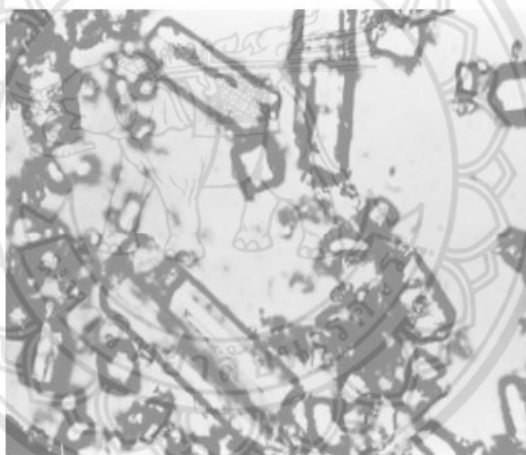
2.2.2.4.5 เค้นท์สโตนที่มีความแข็งแรงและการขยายตัวสูง (Dental stone, High strength, High expansion)

พลาสเตอร์ที่มีมวลแข็งนั้นจะผลิตโดยการเผาแบบเปียก การที่มีน้ำในกระบวนการจะเป็นวิธีการที่ช่วยให้มีการเปลี่ยนของโครงสร้าง ดังนั้นเฮกซโกนอลแคลเซียมซัลเฟตจะเปลี่ยนแปลงทำให้ได้คริสตัลรูปทรงปริซึมที่หนาแน่นดังแสดงในรูปที่ 2.12 และเมื่อเย็นตัวในอากาศน้ำจากความชื้นของอากาศจะสามารถกลับมาในผลิตภัณฑ์ได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นไฮโดรคอล แต่จะไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกี่ยวกับจำนวน ขนาด รูปร่าง การเรียงตัวของผลึกได้ สุดท้ายแล้วผงอนุภาคจะเป็นซูโดออปติก (Pseudo orphic) และมีผลึกมอนอคลินิก (Monoclinic) ในโครงสร้างจากไฮโดรคอล แต่เฮกซโกนอล ของแอนไฮดรัสแคลเซียมซัลเฟต (Anhydrous calcium sulfate) ที่เกิดก่อนจะรักษารูปร่างลักษณะของผลึกไว้



รูปที่ 2.12 คริสตัลของยิปซัมที่ผ่านการเผาแบบเปียกก่อนบด [13]

วิธีการเผาแบบเปียกจะทำให้ผงผลิตภัณฑ์เอมิไฮเดรตมีความหนาแน่นที่สูงขึ้นและมีพื้นที่ผิวสัมพัทธ์เล็กกว่าการเผาแบบแห้ง การควบคุมจำนวนรอบของการบดคริสตัลและสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.13 ทั้งสองวิธีนี้จะช่วยให้ผงคริสตัลมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



รูป 2.13 อนุภาคของหินทันตกรรมที่มีความแข็งแรงสูง [13]

2.2.3 การเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตกับน้ำ [18]

โดยโครงสร้างทางเคมีของยิปซัมที่ก่อตัวแล้วเป็นผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต เกิดจากการทำปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างผงแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตกับน้ำดังสมการ



เมื่อผสมผงแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตกับน้ำสารละลายจะอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไอออน (calcium ion) กระทั่งถึงจุดอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) จากนั้นผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตจะเกิดการก่อตัวและเติบโต โดยผลึกของยิปซัมจะเกิดชั้นของแคลเซียมไอออน และซัลเฟตไอออน (sulfate ion) ยึดกันด้วยพันธะไอออน (ionic bond) รวมกันเป็นโกรทสไลซ์ (growth slice) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการตกผลึก กลสมบัติของยิปซัมที่ก่อตัวแล้วเกิดจากโครงสร้างเกี่ยวยึดและอันตรกิริยาระหว่างผลึก ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างจากผลึกของยิปซัม หมู่ฟังก์ชันทำหน้าที่ (functional group) คุณสมบัติความเป็นกรดตามสัมพรรคภาพการดูดซับ (affinity for adsorption) บนผลึกยิปซัมที่กำลังก่อตัว

2.2.4 การทดสอบผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรม

2.2.4.1 การทดสอบความทนแรงอัด [14]

เป็นความสามารถของวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรงอัด (Compress) หรือการบีบ (Squeezing) ทำให้เกิดความเค้นอัด (σ_c) จนวัสดุหดยุบตัวไปตามแนวแรง แสดงในสมการที่ 8

$$\begin{aligned} \text{ความทนแรงอัด} &= \frac{\text{แรง}}{\text{พื้นที่หน้าตัด}} \\ &= \frac{F}{A} \quad (2.9) \end{aligned}$$

เมื่อ F คือ ค่าของแรงที่กดลงบนวัสดุทดสอบ

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบ

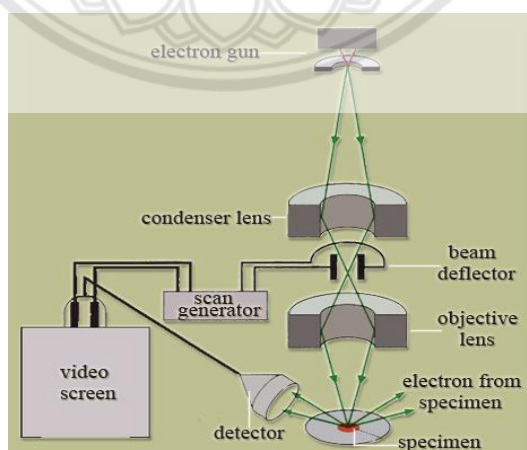
หน่วยของความทนแรงอัด คือ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)



รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบความทนแรงอัด (Universal Testing Machine)
(ที่มา : thai.iqualitrol.com)

2.2.4.2 การศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุที่ระดับจุลภาค ภาพที่ได้เกิดจากการตรวจวัดด้วยอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดจะมีลักษณะเป็น 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐาน และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวตัวอย่าง โดยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำแสงอิเล็กตรอน สามารถปรับให้ขนาดของลำแสงอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หลังจากลำแสงอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงสัญญาณทางอิเล็กตรอนิกส์ แล้วจึงถูกนำไปสร้างเป็นภาพ [15]



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด [15]

2.2.5 การวิเคราะห์หาเฟส Calcium sulfate hydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)

ผงยิปซัมฟลูแก๊สหลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์จะถูกเอาถูกเอาความชื้นออกอีก รอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำผงยิปซัมฟลูแก๊สประมาณ 1 กรัม ไปใส่ลงกระจกนาฬิกา แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องใช้ 4 ตำแหน่ง เตรียมทั้งหมด 4 ตัวอย่าง โดยค่าน้ำหนักที่ชั่งได้คือค่า a

1.) คำนวณหา soluble anhydrite (Anhydrite III)

นำethyl alcohol เข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมลงในกระจกนาฬิกาใบที่ 1 ผสมให้ เข้ากันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (desiccator) และนำไปชั่งน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักที่ได้คือค่า b

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

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

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

3.) คำนวณหา insoluble anhydrite (Anhydrite II)

เติมน้ำกลั่นปริมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในกระจกนาฬิกาใบที่ 3 ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปเก็บในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกมาอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยค่าน้ำหนักที่ได้คือค่า d

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

4.) คำนวณหา calcium sulfate dihydrate (DH, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

นำกระจกนาฬิกาใบที่ 4 ไปเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น และนำไปชั่งน้ำหนัก ค่าน้ำหนักที่ได้คือค่า e

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

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปวัสดุพิมพ์ปาก ด้วยยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากกระบวนการลดแก๊สซิลเฟอร์ไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับใช้ปรับปรุงคุณสมบัติยิปซัมฟลูแก๊สให้ตรงตามมาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภทที่มีวางขายตามท้องตลาด โดยคณะผู้จัดทำจะศึกษาการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊สก่อนเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่อยู่ในยิปซัมฟลูแก๊ส เพราะสิ่งเจือปนเหล่านี้จะทำให้วัสดุพิมพ์ปากที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยยิปซัมฟลูแก๊สมีคุณสมบัติต่ำลง จากนั้นจึงนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ล้างทำความสะอาดมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันออกไปตามประเภทของยิปซัमतันตกรรม ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติจะนำมาขึ้นรูปด้วยการผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วจึงนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ไปทดสอบความทนแรงอัด ศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

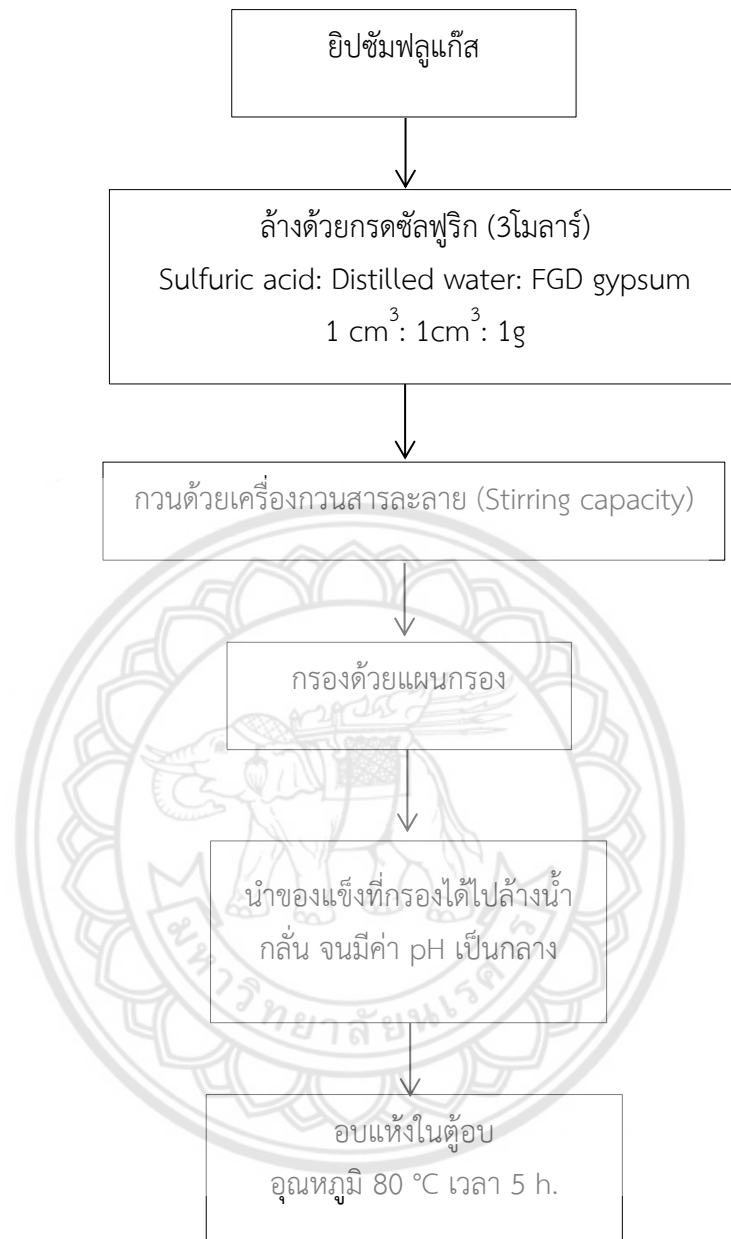
3.1.1 สารเคมี

- 1) กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3 โมลาร์
- 2) แคลเซียมคลอไรด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 3) โซเดียมซัคซิเนต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

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

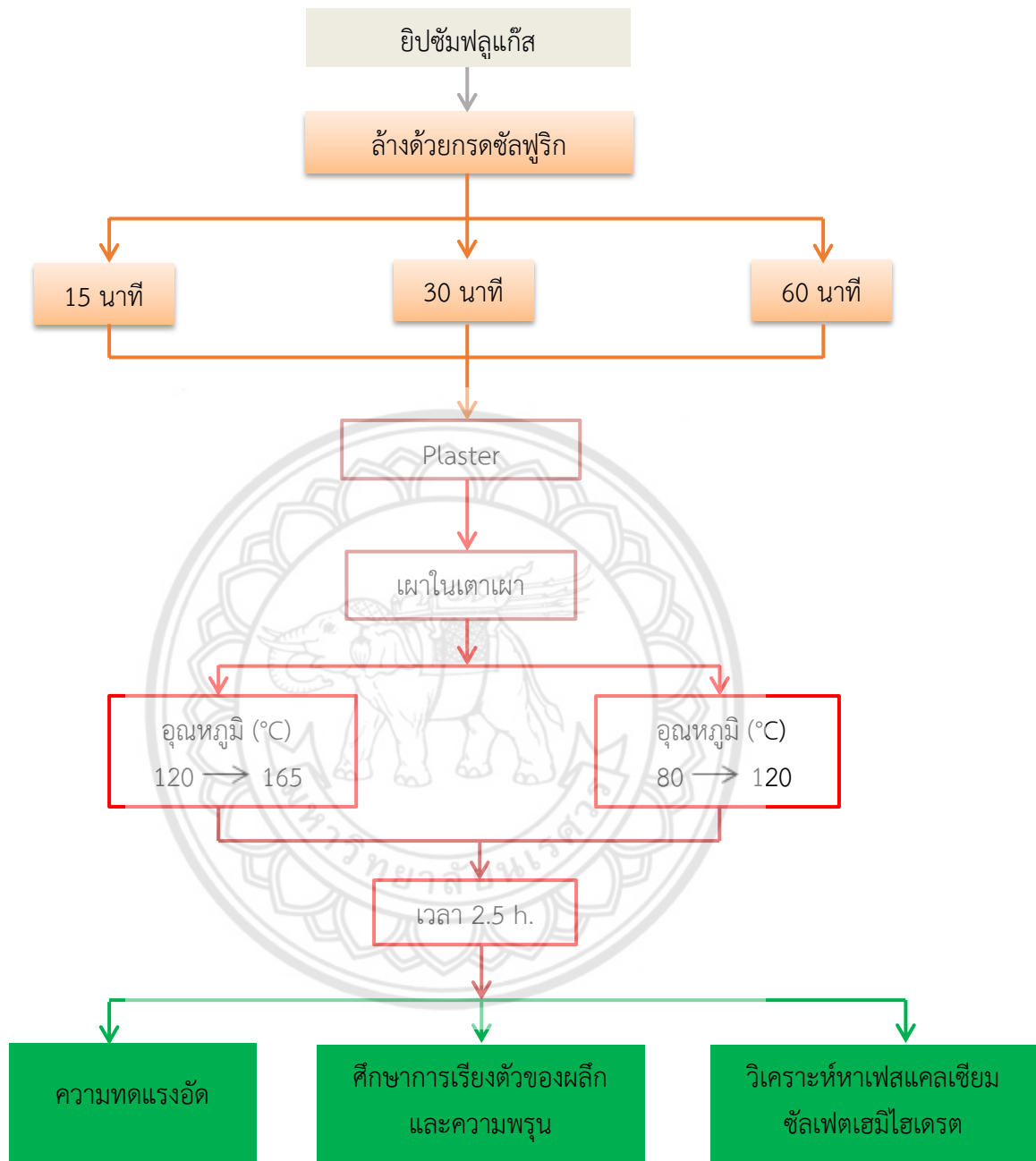
3.2 แผนผังการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส



รูปที่ 3.1 แผนภาพการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส

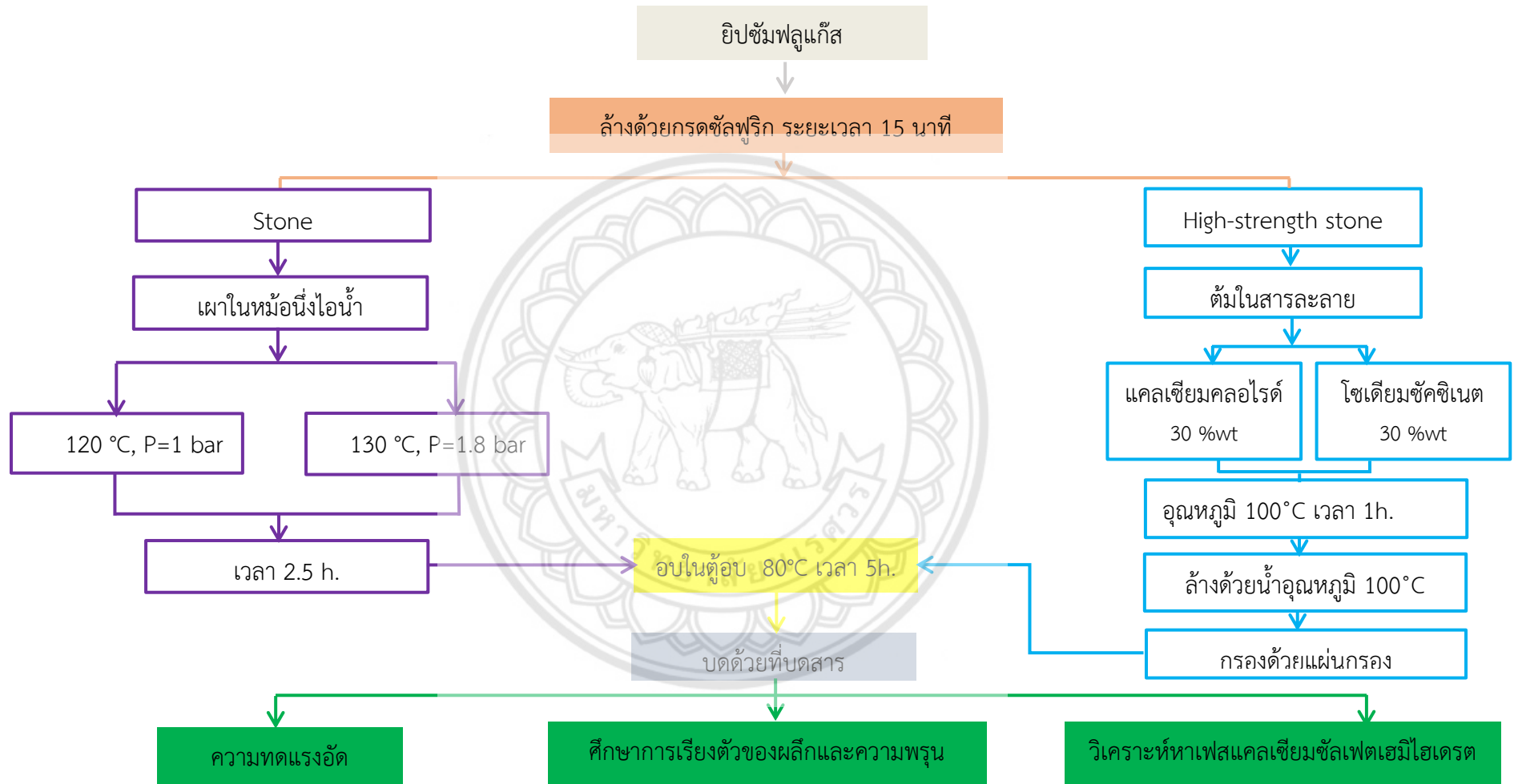
3.3 แผนการทดลอง

3.3.1 การกำหนดระยะเวลาในการล้างที่เหมาะสม



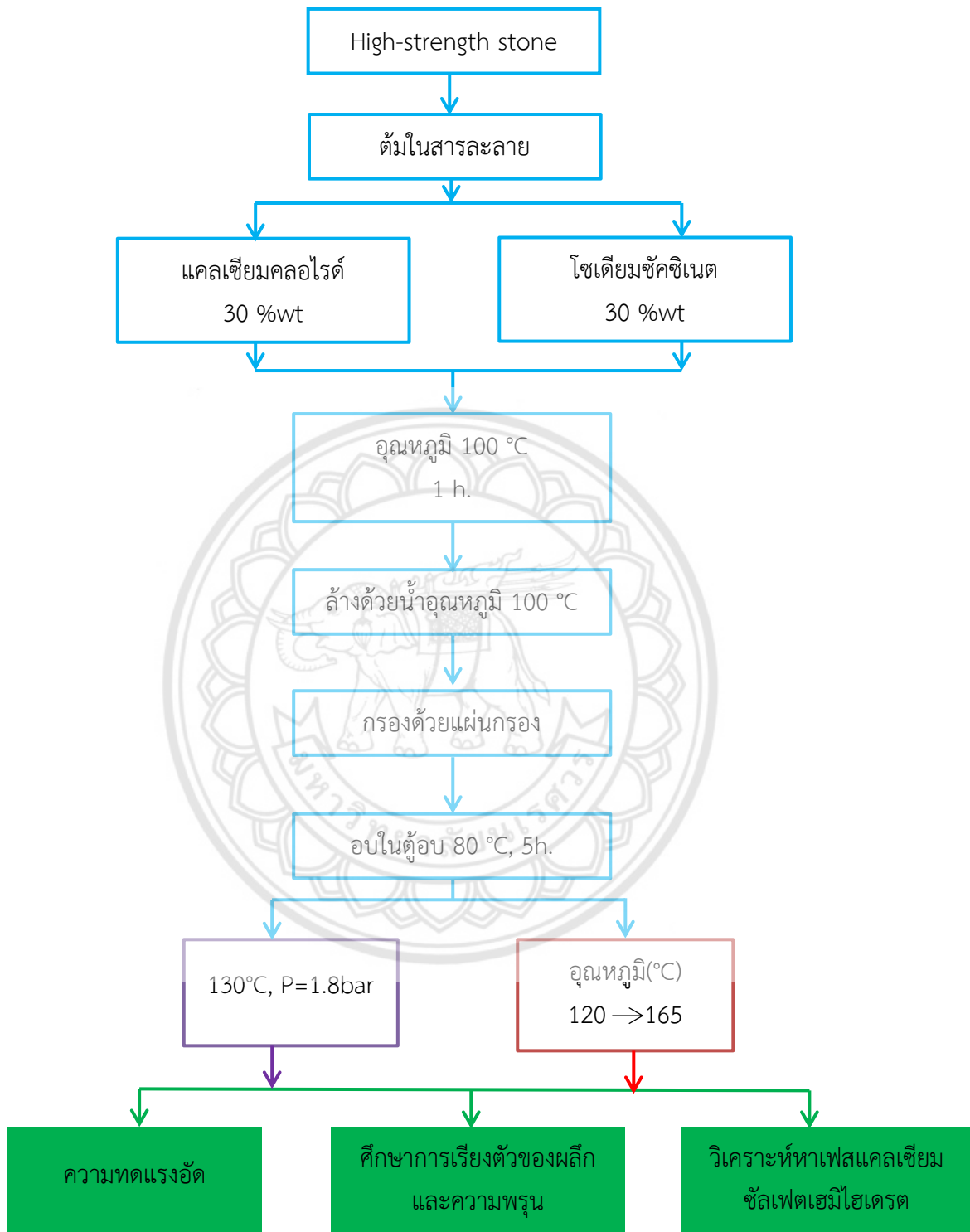
รูปที่ 3.2 แผนภาพการกำหนดระยะเวลาในการล้างที่เหมาะสม

3.3.2 กระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส



รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส

3.3.3 การทดลองเพิ่มเติม



รูปที่ 3.4 การเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางกรรม
ประเภทเดินทาส์โตนที่มีความแข็งแรงสูง (High-strength stone)

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การกำหนดขนาดยิปซัม

นำยิปซัมฟลูแก๊สใส่ในถ้วยครุชเชิล แล้วนำมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อเอาความชื้นออก จากนั้นนำยิปซัมฟลูแก๊สที่อบแล้วมาล่อนผ่านตะแกรง เพื่อเป็นการคัดแยกขนาดของยิปซัมฟลูแก๊ส แล้วเลือกยิปซัมที่มีขนาด 0.1-0.045 มิลลิเมตรมาใช้ทำการทดลอง การร่อนยิปซัมผ่านตะแกรงจะเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกที่หยาบออกไปด้วย

3.4.2 การล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส

การล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส ด้วยกรดซัลฟูริก จะทำให้องค์ประกอบของสารในยิปซัมฟลูแก๊สบางตัวลดลง ส่งผลให้วัสดุพิมพ์ปากมีความทนแรงอัดมากขึ้น การขยายตัวน้อยลง การล้างทำความสะอาด ยิปซัมฟลูแก๊สด้วยกรดซัลฟูริก จะใช้อัตราส่วนผสม ยิปซัมฟลูแก๊ส 100 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร และกรดซัลฟูริกเจือจาง (3 โมลาร์) 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนผสมจะถูกคนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Stirring capacity) เป็นเวลา 15 30 และ 60 นาที จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปกรองผ่านแผ่นกรอง ของแข็งที่ติดอยู่แผ่นกรองจะนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น ล้างจนกระทั่งมีค่า pH เป็นกลาง ของแข็งที่มี pH เป็นกลางถูกนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3.4.3 การกำหนดระยะเวลาการล้างที่เหมาะสม

นำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที มาสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทปูนพลาสติก จากนั้นนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไปขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1:1 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแล้วนำส่วนผสมที่ได้ไปขึ้นรูปในหลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร สูง 1.6 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่ จากนั้นนำไปทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่อง universal testing machine และศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.4.4 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิด ปูนพลาสติก

ยิปซัมทางทันตกรรมชนิด ปูนพลาสติก ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการเผาในเตาเผา ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นเบต้า-เฮมิไฮเดรต ในการทดลองการสังเคราะห์ เบต้า-เฮมิไฮเดรต ผู้ดำเนินโครงการจะศึกษาในเรื่องของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนเป็น เบต้า-เฮมิไฮเดรต ซึ่งจะแบ่งเป็นสองการทดลองและมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

รูปแบบที่หนึ่ง ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างทำความสะอาดจะถูกนำไปเผาในเตาเผาโดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปที่ 165 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปภาพที่ 3.5 หลังจากเผาเสร็จปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศ แล้วจึงนำไปบดด้วยที่บดสาร

รูปแบบที่สอง ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างทำความสะอาดจะถูกนำไปเผาในเตาเผาโดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป 120 องศาเซลเซียส ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปภาพที่ 3.6 หลังจากเผาเสร็จปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศ แล้วจึงนำไปบดด้วยที่บดสาร

3.4.5 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิด เด็นทัลสโตน

ยิปซัมทางทันตกรรมประเภท เด็นทัลสโตนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยหม้อนึ่งไอน้ำ ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นอัลฟา-เฮมิไฮเดรต ในการทดลองการสังเคราะห์ อัลฟา-เฮมิไฮเดรต ผู้ดำเนินโครงการจะศึกษาในเรื่องของความดันที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนเป็นอัลฟา-เฮมิไฮเดรต ซึ่งจะแบ่งเป็นสองการทดลอง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

รูปแบบที่หนึ่ง ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการทำความสะอาดจะถูกนำไปเผาในหม้อนึ่งไอน้ำ (autoclave) โดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป 120 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ ปล่อยทิ้งไว้ที่สภาวะนี้ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้แห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปบดด้วยที่บดสาร

รูปแบบที่สอง ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการทำความสะอาดจะถูกนำไปเผาในหม้อนึ่งไอน้ำ (autoclave) โดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ ปล่อยทิ้งไว้ที่สภาวะนี้ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้แห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปบดด้วยที่บดสาร

3.4.6 การสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิด เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง

ยิปซัมทางทันตกรรมประเภท เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยการต้มในหม้อ ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นอัลฟา-เฮมิไฮเดรต มากกว่าการเผาในหม้อนึ่งไอน้ำ ในการทดลองการสังเคราะห์อัลฟา-เฮมิไฮเดรต ผู้ดำเนินโครงการจะศึกษาผลของสารเคมีที่ใช้ต่อการเปลี่ยนเป็นอัลฟา-เฮมิไฮเดรต ซึ่งจะแบ่งเป็นสองการทดลอง การทดลองแรกโดยการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในหม้อที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ การทดลองที่สองโดยการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในหม้อที่มีสารละลายโซเดียมซัคซิเนต มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

สารเคมีชนิดแคลเซียมคลอไรด์ โดยยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการทำความสะอาดจะถูกนำไปต้มในหม้อที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากต้มเสร็จปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปกรองผ่านแผ่นกรองเพื่อแยกของแข็งออก ของแข็งที่กรองได้จะนำมาล้างด้วยน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปบดด้วยที่บดสาร

สารเคมีชนิดโซเดียมซัคซิเนต โดยยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการทำความสะอาดจะถูกนำไปต้มในหม้อที่มีสารละลายโซเดียมซัคซิเนตเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากต้มเสร็จปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปกรองผ่านแผ่นกรองเพื่อแยก

ของแข็งออก ของแข็งที่กรองได้จะนำมาล้างด้วยน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปบดด้วยที่บดสาร

3.4.7 การทดลองเพิ่มเติม

ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการต้มด้วยสารเคมีจะถูกนำไปเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ โดยการไปเผาในบรรยากาศปกติ ก็นำไปเผาในหม้อหนึ่งไอน้ำ ดังนี้

เผาในบรรยากาศปกติ โดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปที่ 165 องศาเซลเซียส ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เผาในหม้อหนึ่งไอน้ำ โดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปที่ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ ปล่อยทิ้งไว้ที่สภาวะนี้ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปทำให้แห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปบดด้วยที่บดสาร

3.5 ทดสอบสมบัติของซีเมนต์

3.5.1 การทดสอบความทนแรงอัด

นำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์มาผสมกับน้ำ ส่วนผสมที่ได้จะนำไปขึ้นรูปในแบบหล่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรสูง 16 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง รอส่วนผสมก่อตัวเต็มที่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อเอาออกมาขัดผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษซิลิคอนคาร์ไบด์ 600 และ 1200 กริท เก็บตัวอย่างไว้ในกล่องบรรจุสารดูดความชื้นที่มีฝาปิดมิดชิด นำขึ้นตัวอย่างมาทดสอบความทนแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบแรงแบบอเนกประสงค์ (universal) ที่มีอัตราให้แรง (load rate) 5000 นิวตัน/นาที ให้แรงจนขึ้นตัวอย่างแตกและบันทึกค่าแรงที่ได้หน่วยเป็นนิวตัน แล้วคำนวณเป็นแรงต่อพื้นที่ (เมกะปาสกาล)

3.5.2 การศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน

นำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์มาผสมกับน้ำ ส่วนผสมที่ได้จะนำไปขึ้นรูปในแบบหล่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรสูง 16 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง รอส่วนผสมก่อตัวเต็มที่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อ เก็บตัวอย่างไว้ในกล่องบรรจุสารดูดความชื้นที่มีฝาปิดมิดชิด นำตัวอย่างมาหั่นแบ่งครึ่งความสูงโดยบากรอยก่อนหั่น เพื่อศึกษาผิวด้านในของแต่ละตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างมาเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยผงทอง (SPI model Module, West Chester, PA, USA) แล้วศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

3.5.3 วิเคราะห์หาเฟสแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต

ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์จะถูกเอาความชื้นออกที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำผงยิปซัมฟลูแก๊ส ประมาณ 1 กรัม ใส่ลงบนถ้วยกระดาษฟีกา แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง โดยค่าน้ำหนักที่ได้คือค่า a

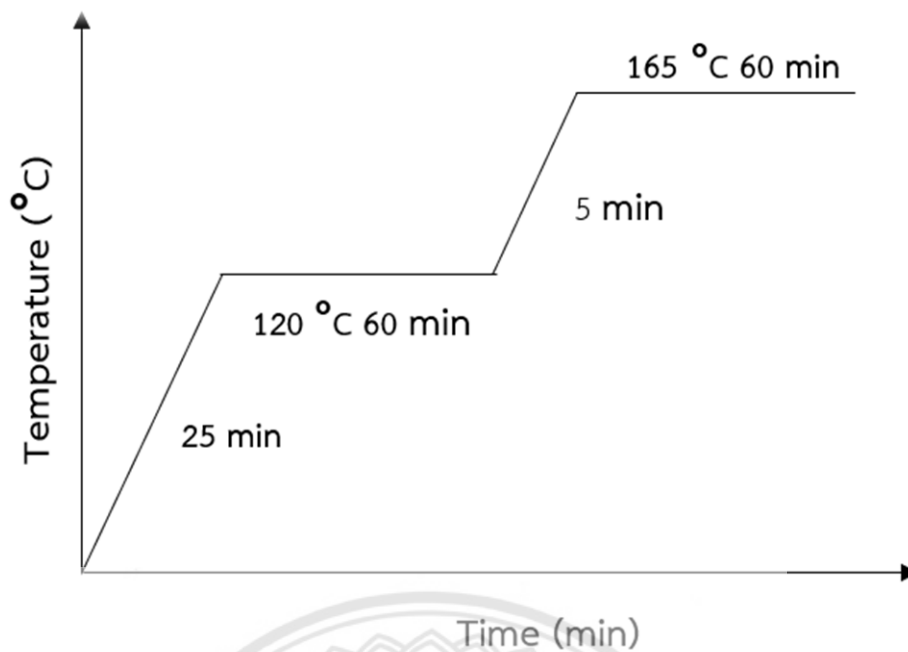
1.) คำนวณหา soluble anhydrite (Anhydrite III)

นำเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) เข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ประมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมลงในถ้วยกระดาษฟีกาใบที่ 1 ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (desiccator) และนำไปชั่งน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่ได้คือค่า b

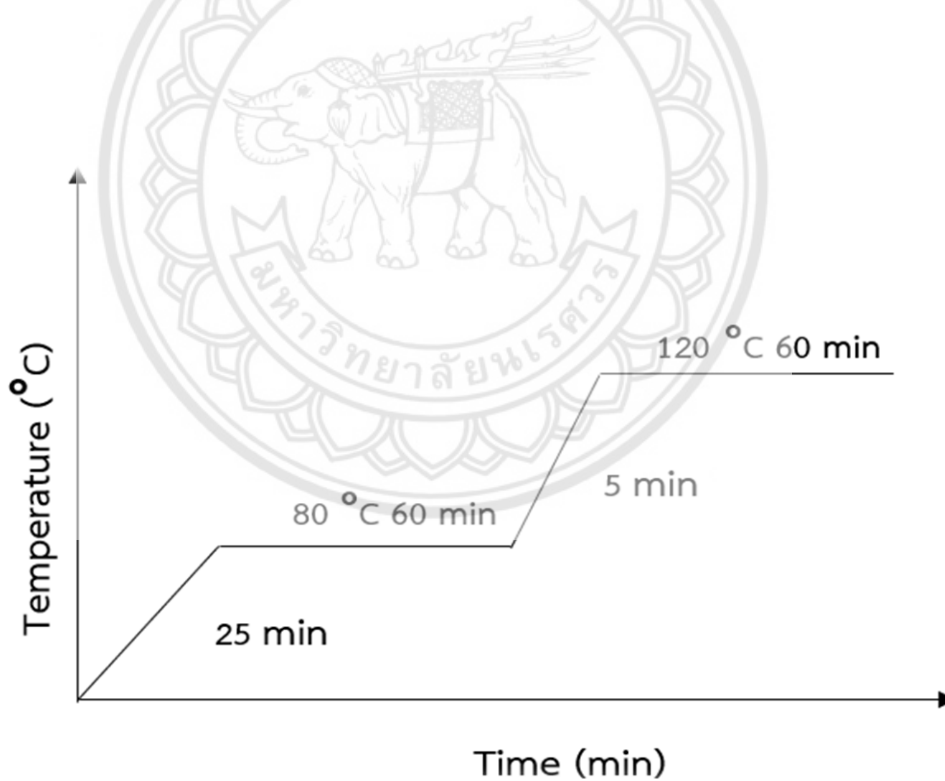
2.) คำนวณเฟสแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (HH, $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)

เติมน้ำกลั่นปริมาณ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในถ้วยกระดาษฟีกาใบที่ 2 ผสมและปล่อยให้แห้งที่ อุณหภูมิห้อง 30 นาที. จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ค่าน้ำหนักที่ได้คือค่า c โดยค่า a b และ c ที่ได้จากการทดลองจะนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตดังสมการที่ 2.11





รูปที่ 3.5 เส้นแนวโน้มการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ (รูปแบบที่ 1)



รูปที่ 3.6 เส้นแนวโน้มการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ปูนปลาสเตอร์ (รูปแบบที่ 2)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับคุณสมบัติของยิปซัมพลูแก๊สจากกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทางทันตกรรม โดยจะทำการคัดแยกขนาดยิปซัมพลูแก๊สด้วยการร่อนผ่านตะแกรง จากนั้นนำไปปรับคุณสมบัติโดยเริ่มจากการล้างทำความสะอาดยิปซัมพลูแก๊สด้วยกรดซัลฟูริก และสุดท้ายจะนำไปทำการสังเคราะห์เพื่อให้ยิปซัมพลูแก๊สมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรม โดยในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมทั้งหมด 3 ประเภทดังนี้ ประเภทที่หนึ่ง ปูนปลาสเตอร์ (Plaster) ประเภทที่สอง เด็นทัลสโตน (Stone) ประเภทที่สาม เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง (High strength stone) ด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันออกไปตามแต่ละประเภท จากนั้นจะนำยิปซัมพลูแก๊สทั้งสามประเภทที่ผ่านการสังเคราะห์ไปทำการขึ้นรูป แล้วนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติ โดยยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภท จะมีเกณฑ์คุณสมบัติที่ต่างกัน การศึกษาการปรับคุณสมบัติของยิปซัมพลูแก๊สในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาในส่วนของการล้างทำความสะอาดยิปซัมพลูแก๊สด้วยกรดซัลฟูริกและกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมทั้งสามประเภท

ตอนที่ 4.1 ศึกษาผลของระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดยิปซัมพลูแก๊ส

- เวลาที่ศึกษา 15 นาที 30 นาที และ 60 นาที

ตอนที่ 4.2 ศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมพลูแก๊ส

4.2.1 ยิปซัมทันตกรรมประเภทที่ 1 ปูนปลาสเตอร์ ศึกษาผลของรูปแบบการให้ความร้อน 2 รูปแบบได้แก่

-รูปแบบที่ 1 ให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เริ่มจากอุณหภูมิห้องไปยัง 120 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 165 องศาเซลเซียส รวมเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 30 นาที

-รูปแบบที่ 2 ให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เริ่มจากอุณหภูมิห้องไปยัง 80 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 120 องศาเซลเซียส รวมเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 30 นาที

4.2.2 ยิปซัมทันตกรรมประเภทที่ 2 เด็นทัลสโตน ศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการเผา 2 รูปแบบได้แก่

-รูปแบบที่ 1 ให้ความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

-รูปแบบที่ 2 ให้ความร้อนที่ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2.3 ยิปซัมทันตกรรมประเภทที่ 3 เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง ศึกษาสารเคมีที่ใช้ในการต้ม 2 ชนิดได้แก่

-ชนิดที่ 1 โซเดียมซัคซิเนต (Sodium succinate)

-ชนิดที่ 2 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)

เพื่อให้สะดวกต่อความเข้าใจการรายงานผลและการวิเคราะห์จะกำหนดใช้ตัวย่อแสดงถึงประเภทของยิปซัมทางทันตกรรม และกระบวนการสังเคราะห์ดังนี้

ยิปซัมทางทันตกรรม (ประเภท)	กระบวนการสังเคราะห์ (รูปแบบที่)	ตัวย่อที่ใช้
ปูนปลาสเตอร์	1	C(120-165°C)
	2	C(80-120°C)
เด็นทัลสโตน	1	A(120°C,1bar)
	2	A(130°C,1.8bar)
เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง	1	B(Cl)
	2	B(S)

*C=เผาในบรรยากาศปกติ *A=เผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อน้ำ *B=ต้มด้วยสารเคมี
*Cl=แคลเซียมคลอไรด์ *S=โซเดียมซัลไฟเนต

จากการทดลองข้างต้นได้มีการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ของยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง และได้ใช้ตัวย่อแสดงถึงประเภทของยิปซัมทางทันตกรรม และกระบวนการสังเคราะห์ดังนี้

ยิปซัมทางทันตกรรม (ประเภท)	กระบวนการสังเคราะห์ (รูปแบบที่)	ตัวย่อที่ใช้
เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง	1	B(Cl) >C(120-165°C)
		B(Cl) >A(130°C,1.8bar)
	2	B(S)>C(120-165°C)
		B(S)>A(130°C,1.8bar)

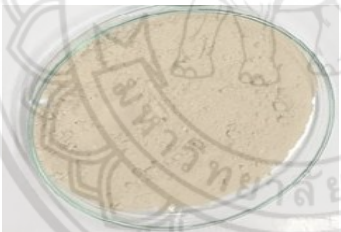





ตอนที่ 4.1 ผลของระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส

การศึกษาระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊สด้วยกรดซัลฟูริกเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการขจัดสิ่งเจือปนต่างๆ เช่นควอทซ์ ที่ติดอยู่ในยิปซัมฟลูแก๊ส ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะส่งผลทำให้คุณสมบัติของยิปซัมฟลูแก๊สต่ำลง ก่อนการล้างทำความสะอาดจะนำยิปซัมฟลูแก๊สไปคัดแยกขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรง จากนั้นจึงนำไปล้างด้วยกรดซัลฟูริกตามระยะเวลาที่กำหนด 15 30 และ 60 นาที โดยผลของการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกจะแสดงตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลของระยะเวลาในการล้างที่ส่งผลต่อสีของยิปซัมฟลูแก๊ส

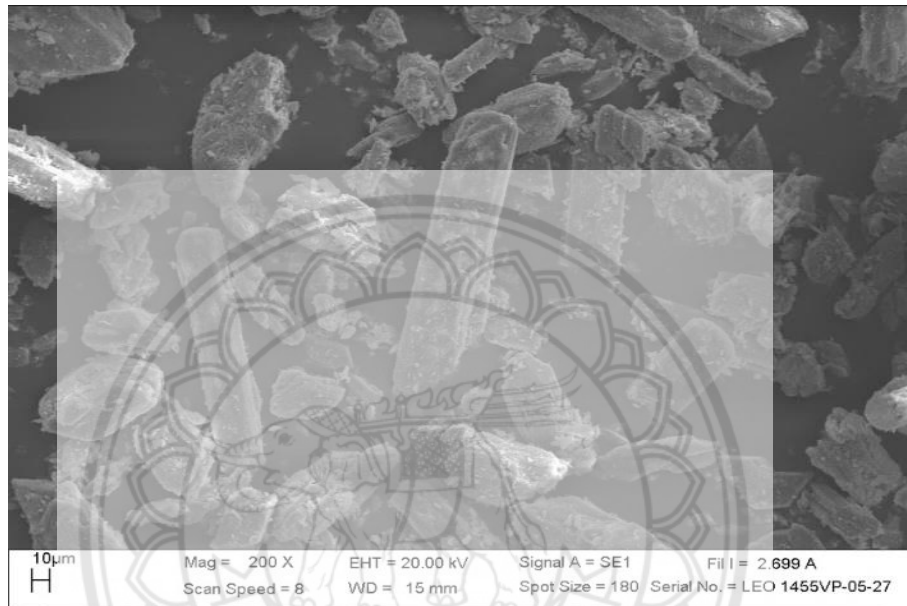
หลังจากล้างยิปซัมฟลูแก๊สตามระยะเวลาที่กำหนด 15 30 และ 60 นาที พบว่าสีของยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้มีสีอ่อนกว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ไม่ได้ทำการล้าง เนื่องจากการละลายของ Fe^{3+} ในกรดซัลฟูริกที่ใช้ล้าง [7] แต่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อใช้ระยะเวลาในการล้างเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสีของยิปซัมที่เปลี่ยนไปหลังการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริก

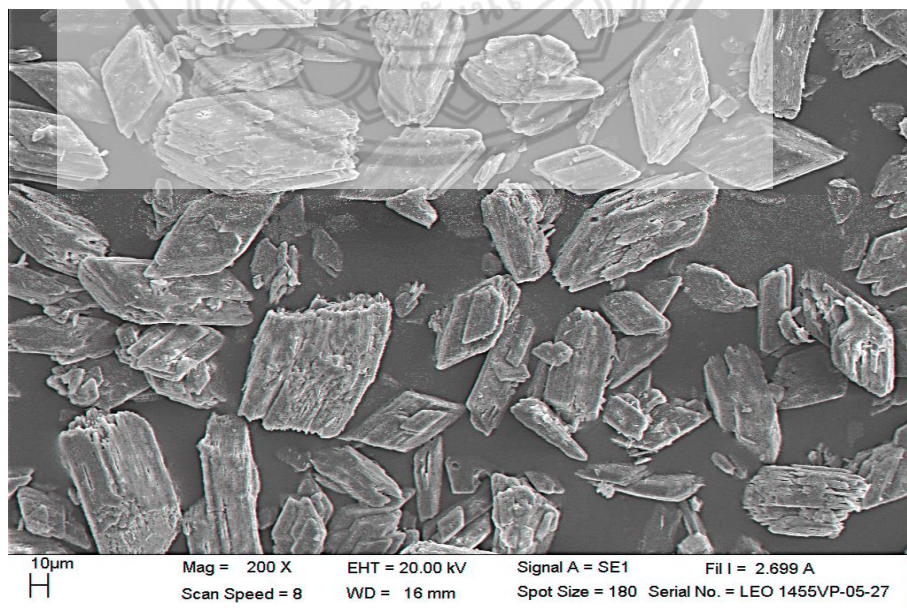
เวลา (นาที)	ก่อนล้าง	หลังล้าง
15		
30		
60		

4.1.2 ผลของระยะเวลาในการล้างที่ส่งผลต่อลักษณะของผลึกยิปซัมฟลูแก๊ส

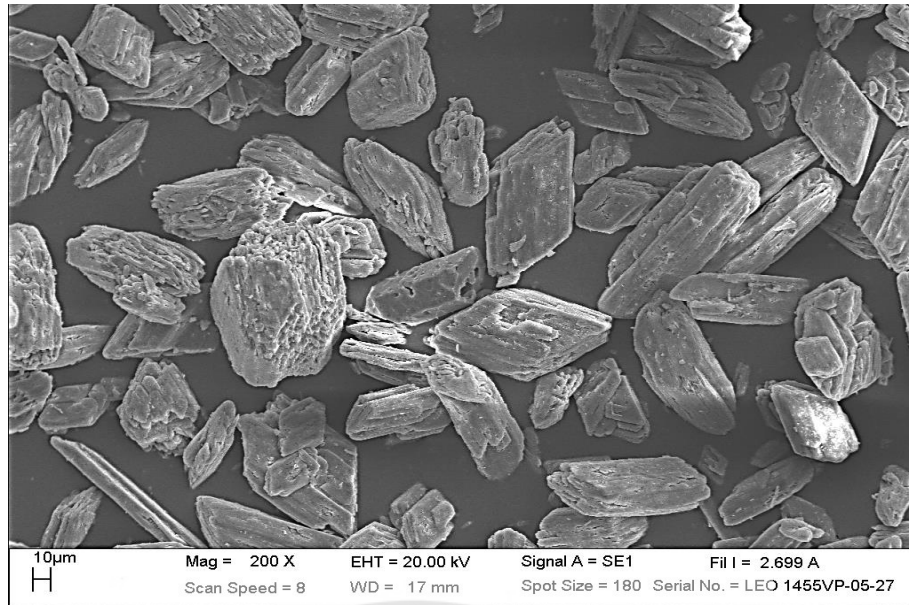
หลังจากผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที พบว่าสิ่งเจือปนที่ติดอยู่บนผิวของผลึกยิปซัมฟลูแก๊สถูกกำจัดออกไป แต่อย่างไรก็ตามการล้างที่ระยะเวลา 15 นาที ก็ยังสามารถที่จะกำจัดสิ่งเจือปนเหล่านี้ออกไปได้ ในส่วนลักษณะโครงสร้างผลึกของยิปซัมฟลูแก๊ส พบว่ายังคงมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมและมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงจากก่อนล้างทำความสะอาด และการล้างด้วยกรดซัลฟูริกยังส่งผลให้ผลึกมีลักษณะผิวที่ขรุขระเป็นรูพรุนเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่ใช้ล้าง ดังรูปที่ 4.2-4.3 และ 4.4



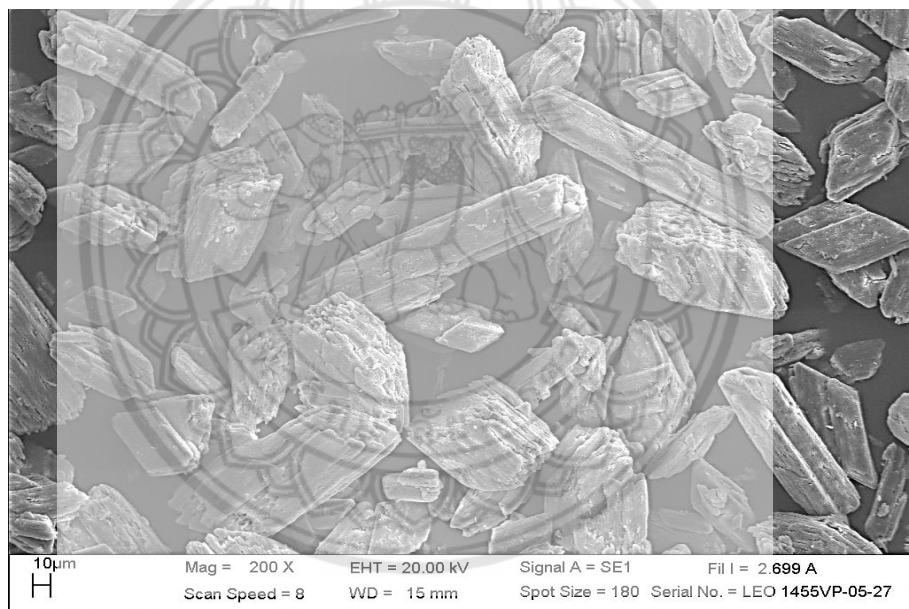
รูปที่ 4.1 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สก่อนล้างด้วยกรดซัลฟูริก



รูปที่ 4.2 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่เวลา 15 นาที



รูปที่ 4.3 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูออไรด์ที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่เวลา 30 นาที



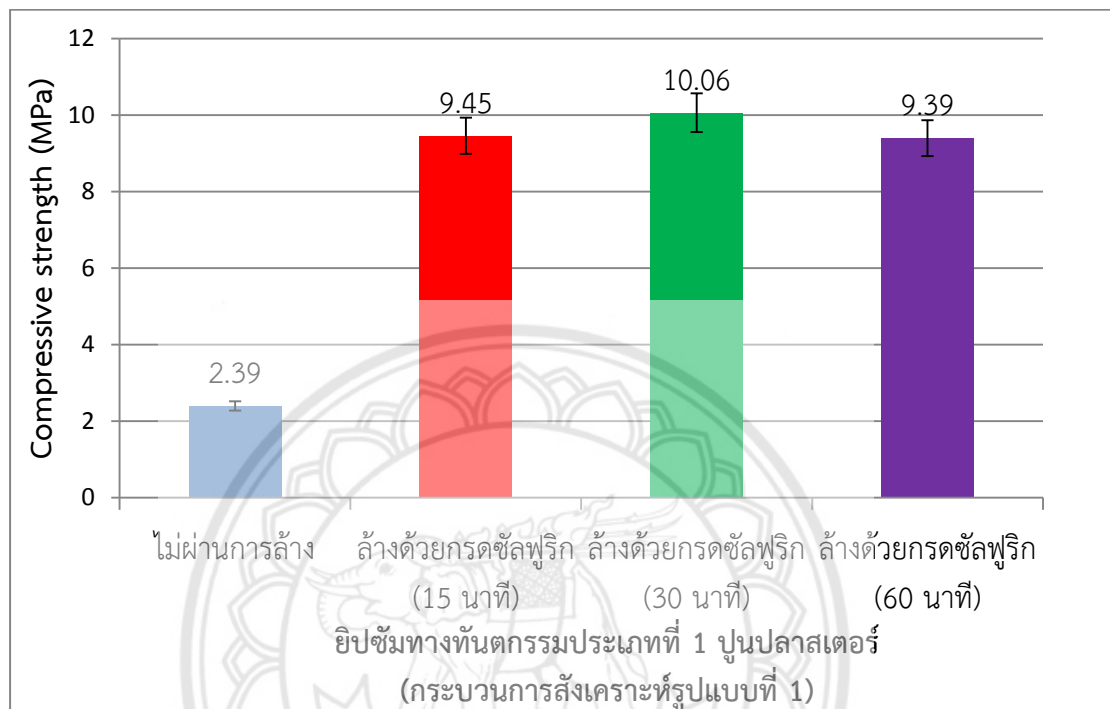
รูปที่ 4.4 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูออไรด์ที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่เวลา 60 นาที

4.1.3 ผลของระยะเวลาในการล้างที่ส่งผลต่อความทนแรงอัด

ผลจากภาพถ่ายลักษณะยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที ที่ได้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลที่ได้เป็นเพียงลักษณะทางกายภาพซึ่งไม่สามารถบอกถึงคุณสมบัติทางกลได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องทำการหาคุณสมบัติทางกล เพื่อใช้กำหนดระยะเวลาในการล้างที่เหมาะสมที่ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลที่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน และนำไปใช้ทำการทดลองในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทต่างๆต่อไป โดยได้เลือกกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทที่ 1 ปูนพลาสติกอร์มาทำการศึกษา

ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที และที่ไม่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริก จะถูกนำมาปรับคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับยิปซัมทันตกรรมประเภทปูนพลาสติกอร์ โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 C (120-165°C) หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์จะนำไปทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1:1 โดยน้ำหนักผสมให้เข้ากันแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่จากนั้นนำไปทำการทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่อง universal testing จากผลการทดสอบความทนแรงอัด พบว่าค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 9.45 10.06 และ 9.39 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ค่าความทนแรงอัดที่ได้ถือว่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมประเภทปูนพลาสติกอร์ที่กำหนดอยู่ที่ 9 MPa [12] และเนื่องจากค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที มีค่าใกล้เคียงกันและสูงกว่าค่าของมาตรฐานจึงแสดงได้ว่าผิวของผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่มีลักษณะขรุขระเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่เกิดขึ้นจากการล้างในช่วงระยะเวลา 15-60 นาที ไม่ส่งผลให้ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานต่ำกว่าค่ามาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมประเภทปูนพลาสติกอร์ เนื่องจากปูนพลาสติกอร์ส่วนใหญ่โครงสร้างจะประกอบไปด้วยเบตาแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งลักษณะของอนุภาคจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอเป็นรูพรุน [13] ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกับอนุภาคที่ได้ในการทดลอง ดังนั้นอนุภาคที่มีลักษณะดังกล่าวเมื่อนำไปขึ้นรูปจึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ แต่อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยยิปซัมฟลูแก๊สที่ไม่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกค่าความทนแรงอัดที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐานมากโดยมีค่าอยู่ที่ 2.15 MPa จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการล้างยิปซัมฟลูแก๊สด้วยกรดซัลฟูริกก่อนนำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์เป็นสิ่งสำคัญต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน จึงมีสมมุติฐานว่าการล้างด้วยกรดซัลฟูริก อาจจะทำให้สารบางชนิดในยิปซัมฟลูแก๊สที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานถูกกำจัดออกไป จึงได้ทำการศึกษาแล้วพบว่างานวิจัยของคุณวิทยา [7] ได้ทำการล้างยิปซัมฟลูแก๊สด้วยกรดซัลฟูริก แล้วพบว่าปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ลดลง ในงานวิจัยของ William J. O'Brien [13] ได้รายงานว่ามีซิลิกอนออกไซด์มีผลต่อความทนแรงอัด เมื่อปริมาณซิลิกอนออกไซด์มากขึ้นจะส่งผลให้ความทนแรงอัดของชิ้นงาน

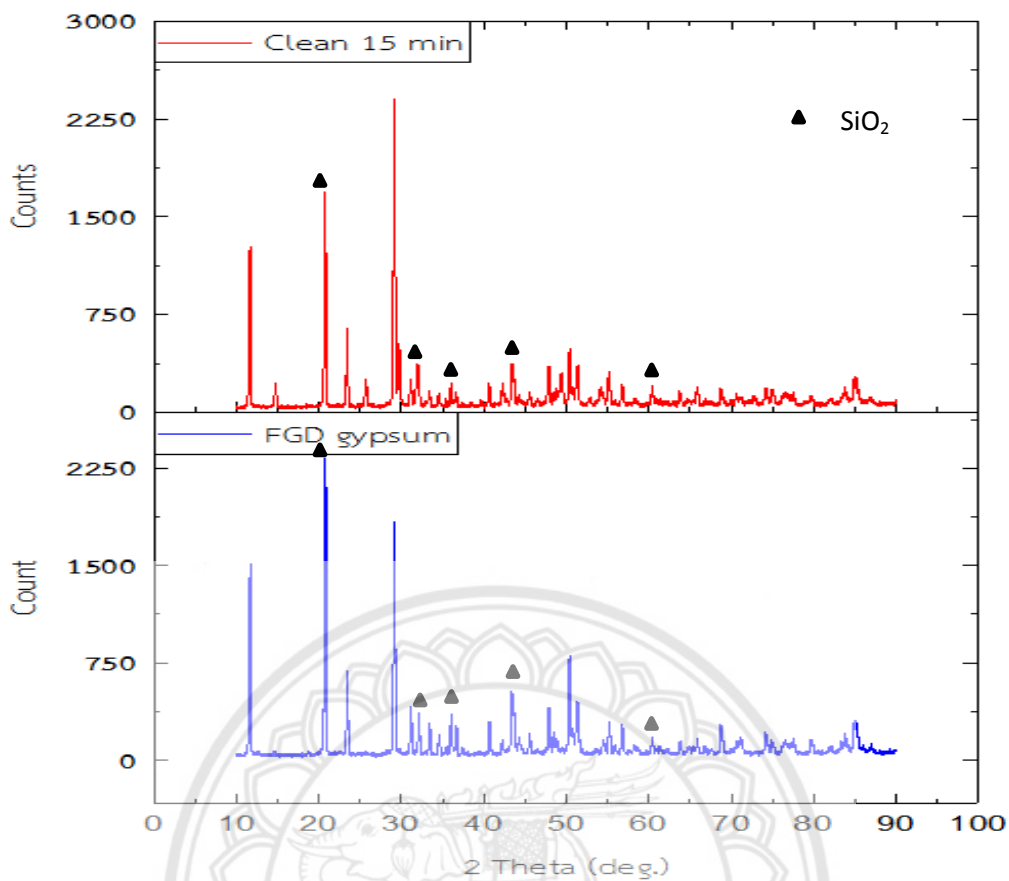
มีค่าลดลง เนื่องจากซิลิกอนไดออกไซด์เป็นสารที่ไม่สามารถละลายในน้ำ จึงเป็นตัวขัดขวางการเชื่อมต่อกันของผลึกยิปซัมที่กำลังโต ดังนั้นจึงได้นำยิปซัมพลูแก๊สก่อนและหลังการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที ไปวิเคราะห์หองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เพื่อศึกษาหองค์ประกอบของยิปซัมพลูแก๊สที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการล้างด้วยกรดซัลฟูริก



รูปที่ 4.5 แสดงค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที

4.1.4 ศึกษาองค์ประกอบของยิปซัมพลูแก๊สก่อนและหลังล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที

หลังจากวิเคราะห์องค์ประกอบของยิปซัมพลูแก๊สก่อนและหลังการล้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โดยทำการสแกนที่ 2θ ตั้งแต่ $10-90^\circ$ สเปกตรัมที่ได้เป็นการพล็อตระหว่าง Counts ในแกน y และค่ามุม 2-theta (deg.) ในแกน x มาทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบสเปกตรัมของยิปซัมพลูแก๊สก่อนล้างกับหลังล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที พบว่ายิปซัมพลูแก๊สที่ไม่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริก และที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที ปรากฏดิฟแฟร็กโตแกรมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) แต่อย่างไรก็ตามพีคของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปรากฏในยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที มีความสูงของพีคลดลงซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึกของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ลดลง แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์จะลดลง ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงองค์ประกอบของยิปซัมฟลูแก๊สก่อนและหลังล้างด้วยกรดซัลฟูริก

ตอนที่ 4.2 ศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมจากยิปซัมฟลูแก๊ส

จากผลทดสอบการขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละชนิด พบว่าการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนปลาสเตอร์ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เช่นเดียวกับยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 จึงทำการตรวจหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ซึ่งพบว่าสาเหตุที่ไม่สามารถขึ้นรูปได้อาจจะเกิดจากการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมฟอสเฟตเอมิไฮเดรตไม่มากพอ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อนำไปขึ้นรูปจึงไม่มีส่วนที่เกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำที่ผสมลงไป

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์

ชนิด	ประเภทยิปซัมทางทันตกรรม	กระบวนการสังเคราะห์	ผลการขึ้นรูป	HH%
1	ปูนปลาสเตอร์	รูปแบบที่ 1 C(120-165°C)	ขึ้นรูปได้	77.29
		รูปแบบที่ 2 C(80-120°C)	ขึ้นรูปไม่ได้	3.22
2	เด็นทัลสโตน	รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar)	ขึ้นรูปได้	9.34
		รูปแบบที่ 2 A(130°C,1.8bar)	ขึ้นรูปได้	23.59
3	เด็นทัลสโตนที่มี ความแข็งแรงสูง	รูปแบบที่ 1 B(C)	ขึ้นรูปไม่ได้	-
		รูปแบบที่ 2 B(S)	ขึ้นรูปไม่ได้	-

จากผลทดสอบการขึ้นรูปของยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนปลาสเตอร์ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ อาจจะเกิดจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาไม่มากพอที่จะทำให้ให้น้ำในโครงสร้างผลึกยิปซัมฟลูแก๊สระเหยออกไป จึงส่งผลให้ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ส่วนยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้เช่นเดียวกัน อาจจะเป็นไปได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในสารละลายเคมีที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไม่มากพอ จึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตเช่นเดียวกัน

ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติม โดยเพิ่มขั้นตอนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเดินทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 เพื่อต้องการให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต โดยวิธีการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการต้มในสารละลายสารเคมีไปเผาในบรรยากาศปกติ กับนำไปเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำ จากนั้นนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไปทดสอบการขึ้นรูปอีกครั้ง ซึ่งพบว่าหลังจากเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ส่งผลให้ยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้สามารถขึ้นรูปได้ จึงได้ทำการตรวจหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตอีกครั้ง พบว่ามีการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมเอมิไฮเดรตที่สูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยสามารถสรุปผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตทุกกระบวนการสังเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการขึ้นรูปของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์

ชนิด	ประเภทยิปซัมทางทันตกรรม	กระบวนการสังเคราะห์		ผลการขึ้นรูป	HH (%)
		ก่อนเพิ่มขั้นตอน	หลังเพิ่มขั้นตอน		
3	เดินทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง	รูปแบบที่ 1 B(Cl)	B(Cl)>C(120-165°C)	ขึ้นรูปได้	98.95
			B(Cl)>A(130°C,1.8bar)	ขึ้นรูปได้	88.98
		รูปแบบที่ 2 B(S)	B(S)>C(120-165°C)	ขึ้นรูปได้	92.33
			B(S)>A(130°C,1.8bar)	ขึ้นรูปได้	71.34

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตทั้งหมดของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์

ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ประเภทตัวอย่างที่วิเคราะห์	HH (%)
ประเภทที่ 1 ปูนปลาสเตอร์	C(80-120°C)	3.225
	C(120-165°C)	77.29
ประเภทที่ 2 เดินทัลสโตน	A(120°C,1bar)	9.34
	A(130°C,1.8bar)	23.59
ประเภทที่ 3 เดินทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง	B(Cl)	0
	B(CaCl ₂)>C(120-165°C)	98.95
	B(CaCl ₂)>A(130°C,1.8bar)	88.98
	B(S)	0
	B(S)>C(120-165°C)	92.33
	B(S)>A(130°C,1.8bar)	71.34

จากผลของการตรวจหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงยิปซัมหาทันตกรรมชนิดปูนพลาสติกในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตอยู่ที่ 3.225 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่มากพอที่จะทำให้โมเลกุลของน้ำในโครงสร้างผลึกยิปซัมฟลูแก๊สเกิดการระเหยออกไป จึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตได้ดีพอ อย่างไรก็ตามถ้าใช้ระยะเวลาในการเผามากขึ้นก็อาจจะทำให้มีการเปลี่ยนเฟสจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตได้มากขึ้น ดังแสดงในปฏิกิริยาดังนี้



จากปฏิกิริยาอธิบายได้ว่ายิปซัมฟลูแก๊สหรือแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ในโครงผลึกจะมีน้ำ 2 หน่วยต่อแคลเซียมซัลเฟต 1 หน่วย ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เมื่อนำยิปซัมมาเผา น้ำบางส่วนจะระเหยออกไปกลายเป็นปูนพลาสติก ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตในโครงผลึกจะมีน้ำเพียง 1 หน่วยต่อแคลเซียมซัลเฟต 2 หน่วย ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) เมื่อนำไปผสมกับน้ำส่วนที่เปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตจะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับพร้อมปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา เกิดเป็นผลึกรูปเข็มของยิปซัมและกลายเป็นก้อนแข็งอีกครั้ง [24] ดังนี้



โดยส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตจะไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำ ดังนั้นผลของการเปลี่ยนเฟสจากแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่ไม่มากพอจึงส่งผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลการขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 C(80-120°C)

จากข้อมูลการตรวจหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตของยิปซัมฟลูแก๊สทั้งหมดที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่สามารถขึ้นรูปได้จะมีเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่มากพอ ส่วนยิปซัมฟลูแก๊สที่ไม่สามารถนำขึ้นรูปได้ด้วยเช่น ยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 ไปทำการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ แล้วนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ และเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงช่วยยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่มากพอมีผลต่อการขึ้นรูป

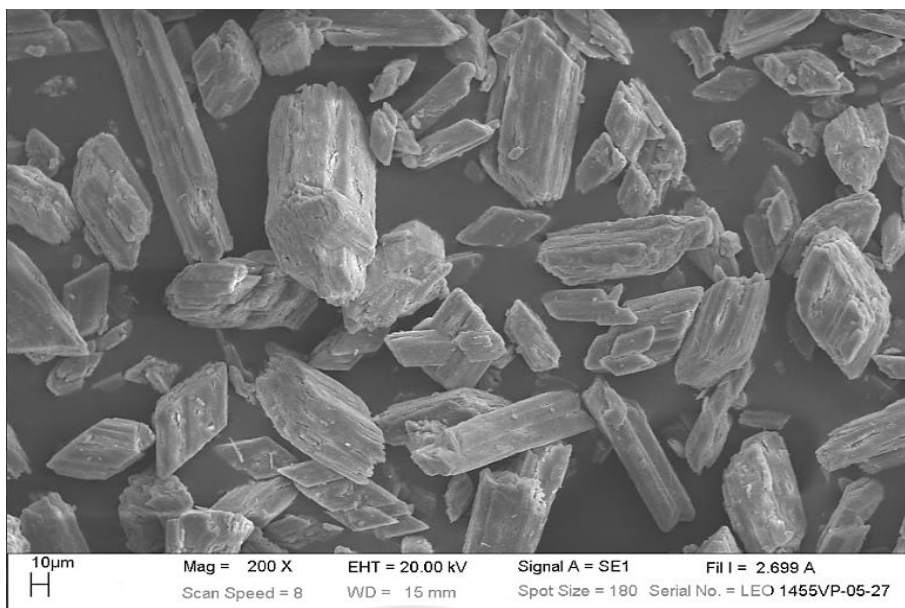
4.2.1 ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดที่ 1 ปูนพลาสติก คีตาผลของรูปแบบการให้ความร้อน 2 รูปแบบ

4.2.1.1 กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 C(120-165°C)

ให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เริ่มจากอุณหภูมิห้องไปยัง 120 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 165 องศาเซลเซียส รวมเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 30 นาที โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นดังนี้

1.) ศึกษาลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1

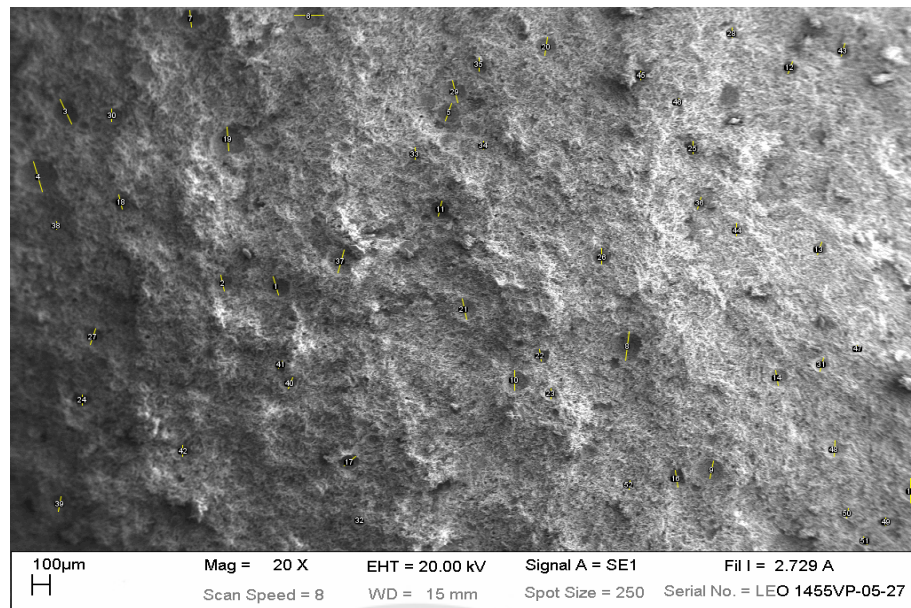
จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ากระบวนการสังเคราะห์รูปแบบ 1 ไม่ส่งผลให้ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูออไรด์ที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1

2.) ศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน

การศึกษาในหัวข้อนี้จะเริ่มจากนำยิปซัมฟลูออไรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยวิธีการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มาทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูออไรด์เป็น 1:1 โดยน้ำหนักผสมให้เข้ากันแล้วนำขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่ จากนั้นนำตัวอย่างหักแบ่งครึ่งความสูงโดยบากรอยก่อนหัก แล้วนำไปศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 43.176-220.899 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวของรูพรุนอย่างสม่ำเสมอ พื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานคือ 31370.93 ตารางไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.9 เนื่องจากเมื่อทำการผสมน้ำลงในยิปซัมฟลูออไรด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ตามขั้นตอนดังกล่าว จะเกิดการดึงน้ำกลับเข้าไปในโครงสร้างอีกครั้ง (Rehydrate) ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวและจับตัวกันของผลึก เมื่อยิปซัมฟลูออไรด์เกิดการเซ็ทตัวน้ำที่อยู่ภายนอกโครงสร้าง (Uncombined Water) ดังรูปที่ 4.10 จะเกิดการระเหยออกไป ทำให้ทั้งรูพรุนเปิด (Open Pore) เอาไว้ในโครงสร้าง ดังนั้นการใช้น้ำในการผสมที่มากขึ้น จะส่งผลให้ตัวอย่างหลังการแห้งตัวแล้วมีรูพรุนมากยิ่งขึ้น [17]

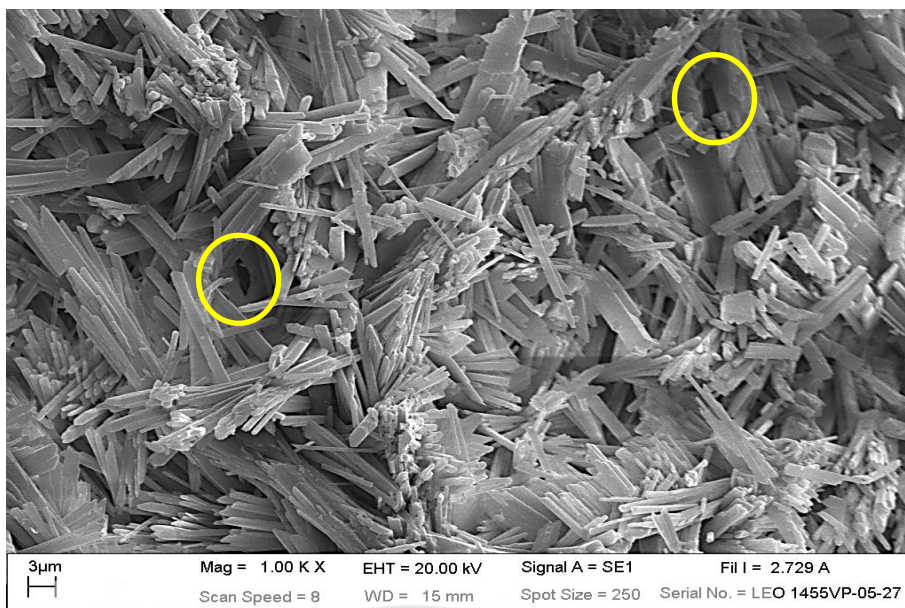


รูปที่ 4.9 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างที่ขึ้นรูปจากยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติก
ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1



รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะของน้ำที่อยู่ภายนอกโครงสร้าง [23]

ในส่วนลักษณะของผลึกหลังขึ้นรูปจากการสังเกตพบว่าผลึกมีขนาดเล็ก และมึลักษณะคล้ายเข็มที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซิลเฟตไฮเดรตกับน้ำที่ผสมลงไป ผลึกรูปเข็มที่เกิดมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และการมีเชื่อมต่อกันระหว่างผลึกไม่หนาแน่น เนื่องจากขนาดของผลึกยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติกในกระบวนการสังเคราะห์แบบที่ 1 มีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ ผลึกไม่รวมตัวอยู่กันอย่างหนาแน่น ดังรูปที่ 4.8 ดังนั้นจึงทำให้อยากต่อการเชื่อมต่อกับผลึกเวรรอบๆ ส่งผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึกขึ้น และเกิดผลึกรูปเข็มที่ไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังขึ้นรูป C(120-165°C)

3.) ความทนแรงอัดของชิ้นงาน

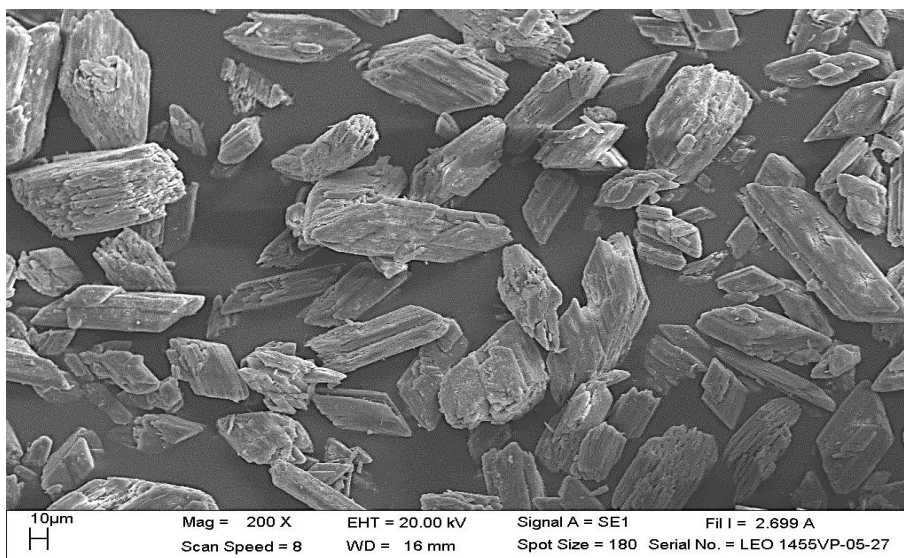
การศึกษาในหัวข้อนี้จะนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ไปทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1:1 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่อง universal testing จากผลการทดสอบความทนแรงอัด พบว่าค่าความทนแรงอัดที่ได้เฉลี่ยอยู่ที่ 9.45 MPa

4.2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 C(80-120°C)

ให้ความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เริ่มจากอุณหภูมิห้องไปยัง 80 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปยัง 120 องศาเซลเซียส รวมเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง 30 นาที โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นดังนี้

1.) ศึกษาลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2

จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ไม่ส่งผลให้ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากหลังล้างด้วยกรดซัลฟูริกเช่นเดียวกับกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ลักษณะผลึกยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ รูปแบบที่ 2 C(80-120°C)

เนื่องจากยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถนำไปขึ้นรูป ดังนั้นจึงไม่ได้ศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนเช่นเดียวกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 แต่จะทำการศึกษาสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถไปขึ้นรูปได้ ซึ่งได้อธิบายไว้ในตอนที่ 4.2

4.2.2 ยิปซัมทันตรกรรมชนิดที่ 2 เต็นท์สโตน ศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา 2 รูปแบบ

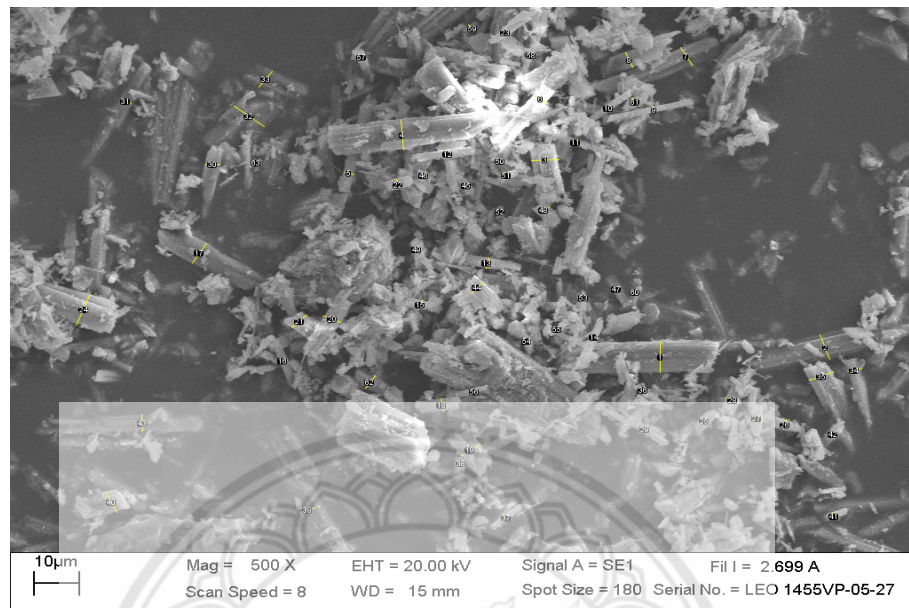
4.2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar)

ให้ความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นดังนี้

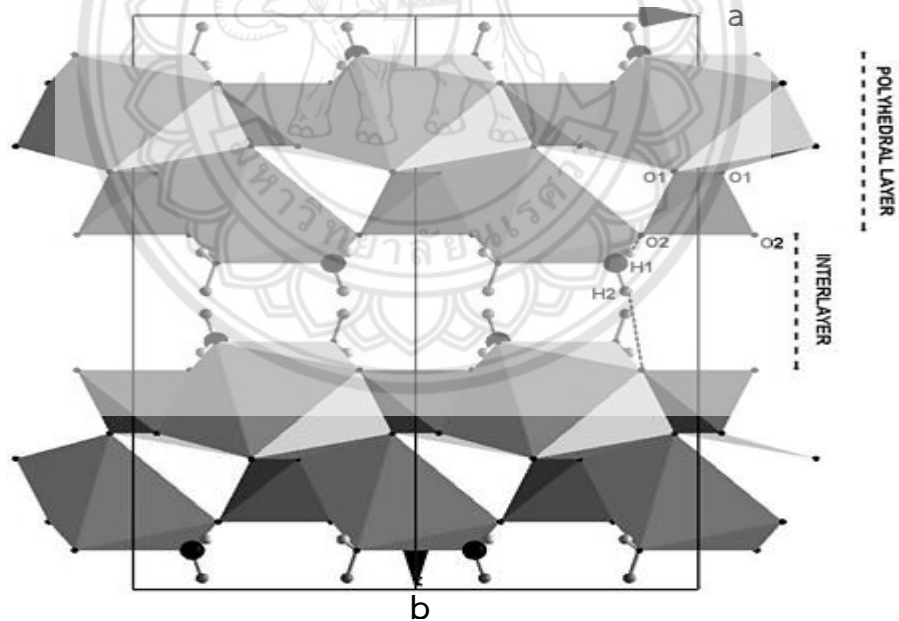
- 1.) ศึกษาลักษณะผลึกยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1

จากการนำยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์โดยวิธีการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ากระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ทำให้ลักษณะผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากหลังล้างด้วยกรดซัลฟูริก โดยได้วัดขนาดของผลึกด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่าผลึกมีขนาดตั้งแต่ 1.216-8.733 ไมโครเมตร ขนาดผลึกที่เล็กลงอาจเป็นผลมาจากความดันที่ทำให้ช่องว่างภายในผลึก (interlayer) ซึ่งมีโมเลกุลของน้ำอยู่ ดังรูปที่ 4.14 เกิดการอัดตัวมากขึ้น [16] ดังนั้นผลึกยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ในสภาวะที่มีความดันจึงมีความหนาแน่นที่สูงกว่าผลึกที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ในสภาวะปกติ และยังสังเกตเห็นได้ว่า

ผลึกที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ในสภาวะที่มีแรงดันจะอยู่กันเป็นกลุ่มรวมตัวกันอย่างหนาแน่น ดังรูปที่ 4.13 ไม่กระจายตัวเหมือนผลึกที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ในสภาวะปกติดังเช่นผลึกที่ได้จากของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติกอร์ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.13 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแกสที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar)

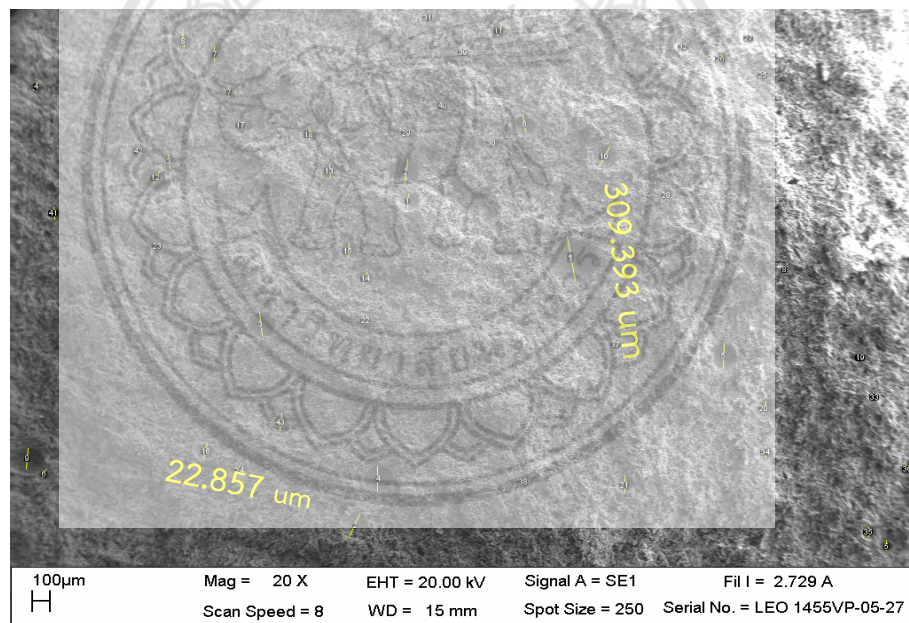


รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะโครงสร้างยิปซัม [16]

จากรูปที่ 4.14 สามารถอธิบายได้ว่าโครงสร้างของยิปซัมอาจแสดงได้จากลำดับการซ้อนกันของโซ่ CaO และ SO_4 ในระนาบ (010) ซึ่งสลับกันกับชั้นของน้ำตามแนวแกน b

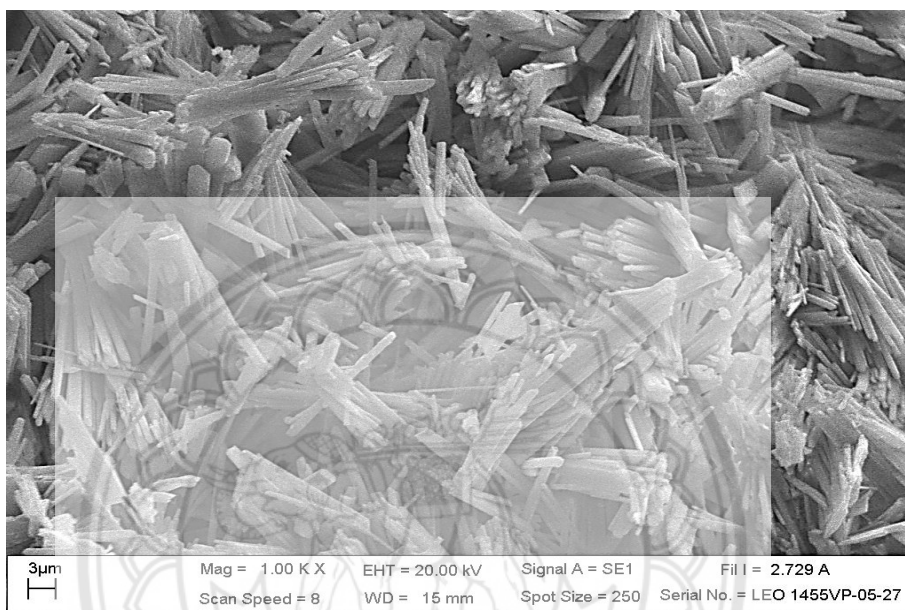
2.) ศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน

การศึกษาในหัวข้อนี้จะเริ่มจากนำยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar) มาทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1:1.25 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้าแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่ จากนั้นนำชิ้นงานหักแบ่งครึ่งความสูงโดยบากรอยก่อนหัก แล้วนำไปศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) พบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 22.857-309.393 ไมโครเมตร พื้นที่ทั้งหมดของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานมีพื้นที่เป็น 26873.47 ตารางไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดพื้นที่น้อยกว่าพื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติก เนื่องจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 นี้มีความหนาแน่นที่มากกว่า ดังนั้นในการขึ้นรูปจึงใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สน้อยกว่า [13] จึงส่งผลให้เมื่อยิปซัมฟลูแก๊สเกิดการเซ็ทตัว น้ำส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะเหลืออยู่ภายนอกโครงสร้างปริมาณเพียงเล็กน้อย เมื่อเกิดการระเหยออกไปจึงทำให้เกิดรูพรุนเปิดเอาไว้ในโครงสร้างไม่มาก ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1

ในส่วนลักษณะของผลึกหลังจากขึ้นรูปพบว่าผลึกมีขนาดเล็ก และมึลักษณะคล้ายเข็ม เช่นเดียวกับผลึกของยิปซัมทางทันตกรรมประเภท ปูนพลาสติก แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดของผลึกยิปซัมฟลูแก๊สหลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 (A(120°C,1bar) มีขนาดเล็กกว่า ความหนาแน่นมากกว่า และผลึกมีการอยู่กันเป็นกลุ่มไม่กระจายตัว ดังรูปที่ 4.13 จึงส่งผลให้ผลึกรูปเข็มที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของเฟสแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตกับน้ำมีขนาดที่เล็กกว่าผลึกที่ได้จากการขึ้นรูปของยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติก และมีการเชื่อมต่อกันระหว่างผลึกหนาแน่นมากกว่า ดังรูปที่ 4.16

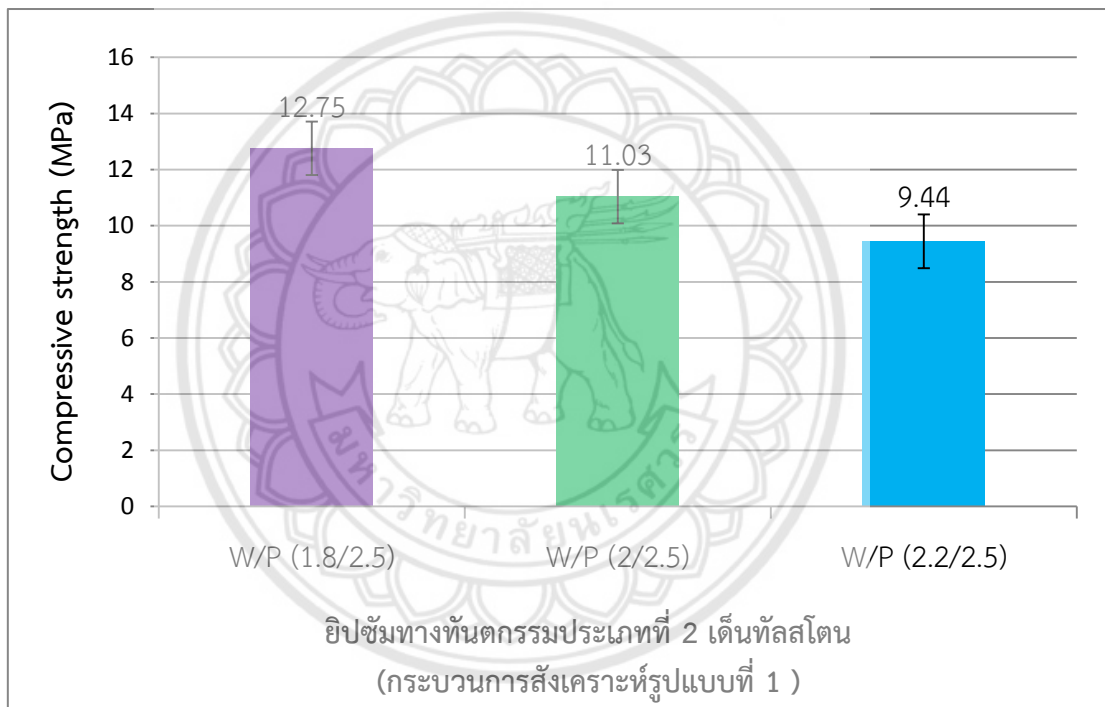


รูปที่ 4.16 ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากการขึ้นรูป A(120°C,1bar)

3.) ศึกษาความทนแรงอัดของชิ้นงาน

ในการศึกษาในหัวข้อนี้จะนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ไปทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 2:2.5 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่จากนั้นนำไปทำการทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่อง universal testing จากผลการทดสอบความทนแรงอัด พบว่าค่าความทนแรงอัดที่ได้เฉลี่ยอยู่ที่ 11.036 MPa ค่าความทนแรงอัดที่ได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเต็นทัลสโตนที่กำหนดอยู่ที่ 20 MPa ดังนั้นจึงได้ปรับอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊ส โดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1.8:2.5 โดยน้ำหนัก และเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อผงยิปซัมเป็น 2.2:2.5 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบความทนแรงอัดพบว่าอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สที่ลดลงส่งผลให้ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้เพิ่มขึ้นเป็น 12.757 MPa และอัตราส่วนน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความทนแรงอัดที่ได้มีค่าลดลงเป็น 9.44 MPa. ดังรูปที่ 4.17 จากผลของการเพิ่มและลดอัตราส่วนการผสมของ

น้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ สามารถยืนยันได้ว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมมีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ซึ่งส่วนหนึ่งอาจมาจากรูพรุนที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานเมื่อใช้น้ำในการผสมมากขึ้น จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความทนแรงอัดที่ได้หลังจากลดอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมลง ก็ยังไม่ถึงค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ของยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนซึ่งอาจจะเกิดจากอุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar) ต่ำไป จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นที่ไม่มากพอจึงทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง และจากการวิเคราะห์เฟสในตอน 4.2 พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตเพียง 9.34 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำที่ผสมลงไปแล้วเกิดการเชื่อมต่อกันของผลึกอย่างแข็งแรงคือส่วนที่เป็นเฟสแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตที่ไม่มากพอก็อาจจะทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงเช่นเดียวกัน



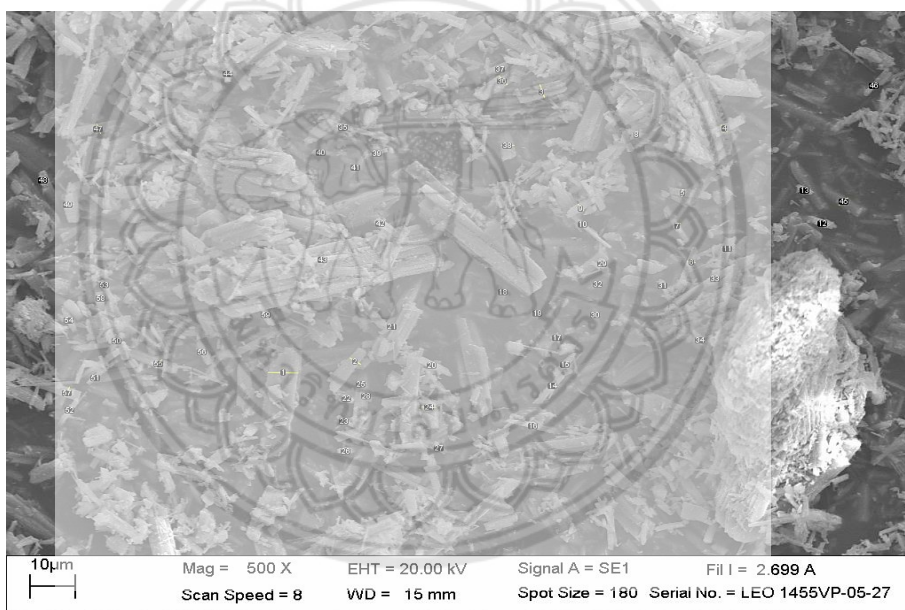
รูปที่ 4.17 แสดงค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้จากการปรับอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊ส

4.2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 A(130°C,1.8bar)

ให้ความร้อนที่ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 บาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นดังนี้

1.) ศึกษาลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2

จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ากระบวนการสังเคราะห์รูปแบบ 2 ส่งผลให้ผลึกของยิปซัมฟลูแก๊สเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ในก่อนหน้านี้ แต่เนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์ในรูปแบบที่ 2 ใช้อุณหภูมิ และความดันที่มากกว่า ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่มากกว่า และส่งผลให้ผลึกมีขนาดเล็กกว่า โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.616-6.989 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นมากกว่า ดังรูปที่ 4.18

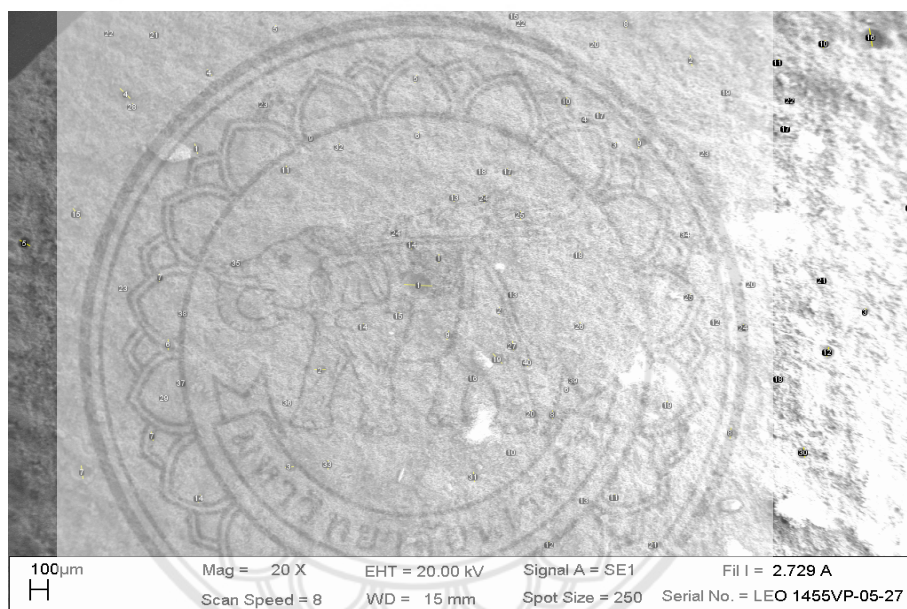


รูปที่ 4.18 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 A(130°C,1.8bar)

2.) ศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน

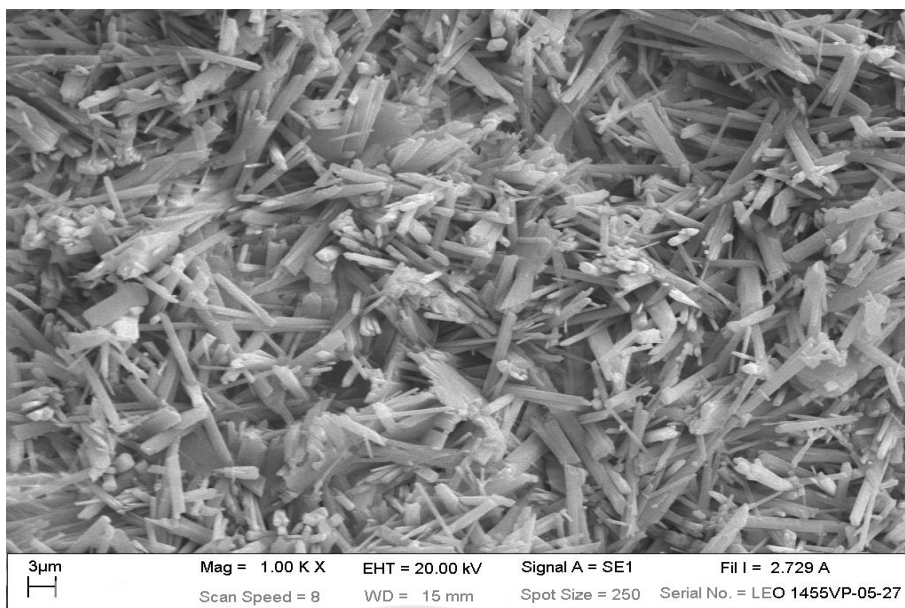
การศึกษาในหัวข้อนี้จะเริ่มจากการนำยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 A(130°C,1.8bar) มาทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1:1.25 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้าแล้วนำไปขึ้นเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แห้งตัวเต็มที่ จากนั้นนำชิ้นงานหักแบ่งครึ่งความสูงโดยบากรอยก่อนหัก แล้วนำไป

ศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) เช่นเดียวกับกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 จากผลการศึกษพบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 14.815-170.531 ไมโครเมตร พื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานมีพื้นที่เป็น 27357.843 ตารางไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งมีขนาดพื้นที่มากกว่าพื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar) ซึ่งเป็นไปได้ว่าเนื่องจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 ใช้แรงดันที่มากกว่าทำให้ผลึกและผงยิปซัมมีความหนาแน่นมากกว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ดังนั้นจึงต้องการอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมที่น้อยกว่าหรือต้องการน้ำในปริมาณที่น้อยกว่า แต่ในการทดลองได้ใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สที่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้น้ำที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและเหลืออยู่ภายนอกโครงสร้างมีมากกว่า ส่งผลทำให้มีพื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานมากกว่า



รูปที่ 4.19 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมทางทันตกรรมชนิด เติ้นทึลสโตนในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2

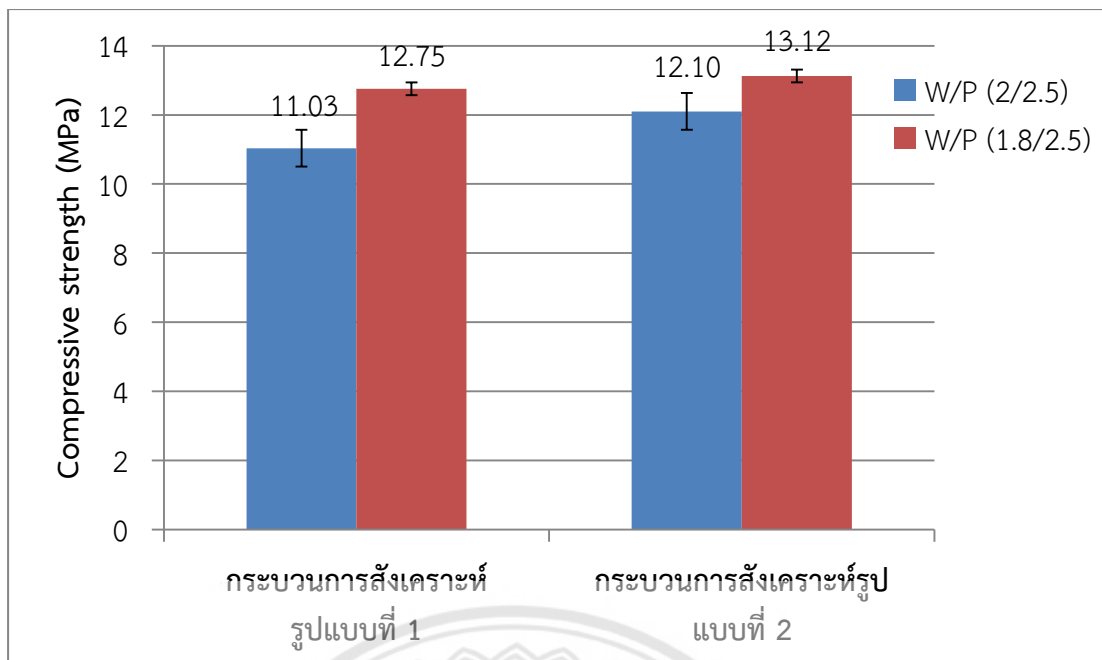
ในส่วนลักษณะของผลึกหลังจากขึ้นรูปพบว่าผลึกมีขนาดเล็ก และ มีลักษณะคล้ายเข็ม เช่นเดียวกับผลึกของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 แต่เนื่องจากผลึกที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 มีขนาดเล็กกว่า และผงยิปซัมฟลูแก๊สมีความหนาแน่นมากกว่าจึงส่งผลให้ผลึกรูปเข็มที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์กับน้ำมีขนาดเล็กกว่าผลึกที่ได้จากการขึ้นรูปของกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างผลึกที่หนาแน่นมากกว่า ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากการขึ้นรูป A(130°C,1.8bar)

3.) ศึกษาความทนแรงอัดของชิ้นงาน

การศึกษาในหัวข้อนี้จะนำยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ไปทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมพลูแก๊สเป็น 2:2.5 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่จากนั้นนำไปทำการทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่อง universal testing จากผลการทดสอบความทนแรงอัด พบว่าชิ้นงานมีความทนแรงอัดที่ได้เฉลี่ยอยู่ที่ 12.102 MPa โดยค่าความทนแรงอัดที่ได้สูงกว่าชิ้นงานของกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ซึ่งอาจจะขัดแย้งกับผลการศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนในตอนต้นที่ 4.2.2.1 เนื่องจากผลการศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนของกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 พบว่ามีพื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 จึงมีแนวโน้มว่าพื้นที่ของรูพรุนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอาจจะมากกว่า ซึ่งจะส่งผลทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 น้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมพลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผลึกของยิปซัมพลูแก๊สที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 มีความหนาแน่น และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตที่มากกว่า จึงอาจจะส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงสูงกว่า อย่างไรก็ตามค่าความทนแรงอัดที่ได้ยังคงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเต็มทึลสโตน จึงได้ทำการลดอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมพลูแก๊สลง เพื่อต้องการที่จะเพิ่มค่าความทนแรงอัดของชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้ปรับอัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมเป็น 1.8:2.5 โดยน้ำหนัก จากผลที่ได้พบว่าค่าความทนแรงอัดที่ได้มีค่าสูงขึ้นเป็น 13.12 MPa. ดังรูปที่ 4.21 แต่ค่าความทนแรงอัดที่ได้ก็ยังไม่ถึงเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากการกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2

4.2.3 ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทที่ 3 เติ้นทึบสโตนที่มีความแข็งสูง ศึกษาผลของสารเคมีที่ใช้ในการต้ม 2 ชนิด

4.2.3.1 ต้มในสารละลายเคมีชนิดที่ 1 แคลเซียมคลอไรด์

โดยวิธีการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นดังนี้

1.) ศึกษาลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

เนื่องจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ จึงนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ดังกล่าวนี้ไปตรวจหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ซึ่งพบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ดังนั้นจึงได้เพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไปทำการเผาในบรรยากาศปกติ C(120-165°C) ก็นำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อน้ำไอ A(130°C,1.8bar) จากนั้นนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ก่อนและหลังการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นตอนได้ดังนี้

ตอนที่ 1 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ B(Cl)

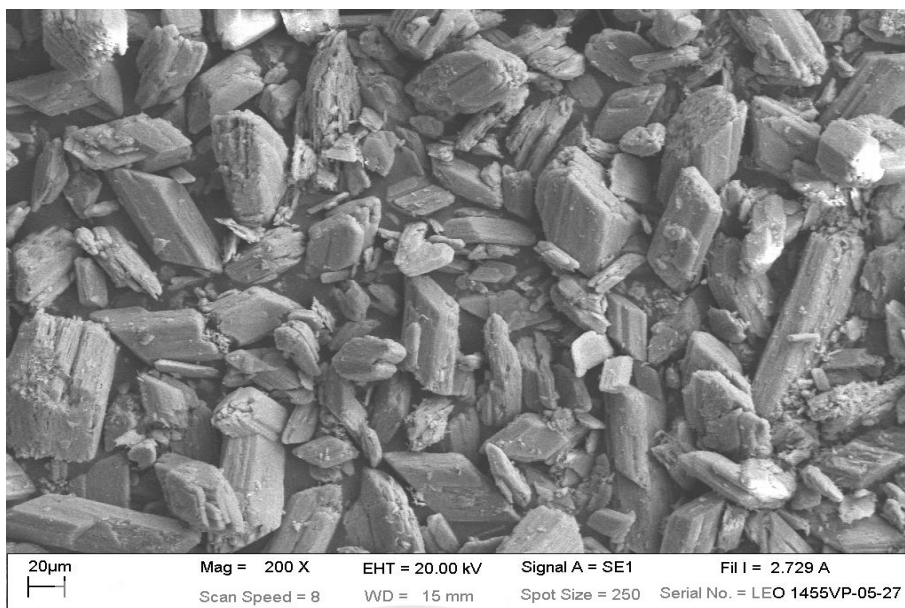
จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไปทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลที่ได้พบว่าผลึกมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลง ผลึกยังคงมีขนาดใหญ่ และมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยม ดังรูปที่ 4.22 ทั้งนี้อาจเกิดจากระยะเวลาที่ใช้ในการต้มไม่มากพอที่จะทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและมีขนาดเล็กลง ดังในงานวิจัยของสุธารี [21] ที่ได้แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาการคายน้ำของยิปซัมในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 โมลาร์ พบว่าที่เวลา 0.5 และ 1 ชั่วโมง คริสตัลยังคงมีขนาดใหญ่ แต่จะเปลี่ยนรูปร่างไปเรื่อย ๆ และมีรูปร่างที่เรียวขึ้น โดยแคลเซียมคลอไรด์สามารถถูกดูดซับลงบนส่วนต่างๆของคริสตัลได้ จึงนำไปสู่รูปร่างคริสตัลต่างๆโดยการควบคุมอัตราการเจริญเติบโตตามแกนคริสตัลต่างๆ



รูปที่ 4.22 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ B(Cl)

ตอนที่ 2 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สหลังการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ B(Cl) > C(120-165°C)

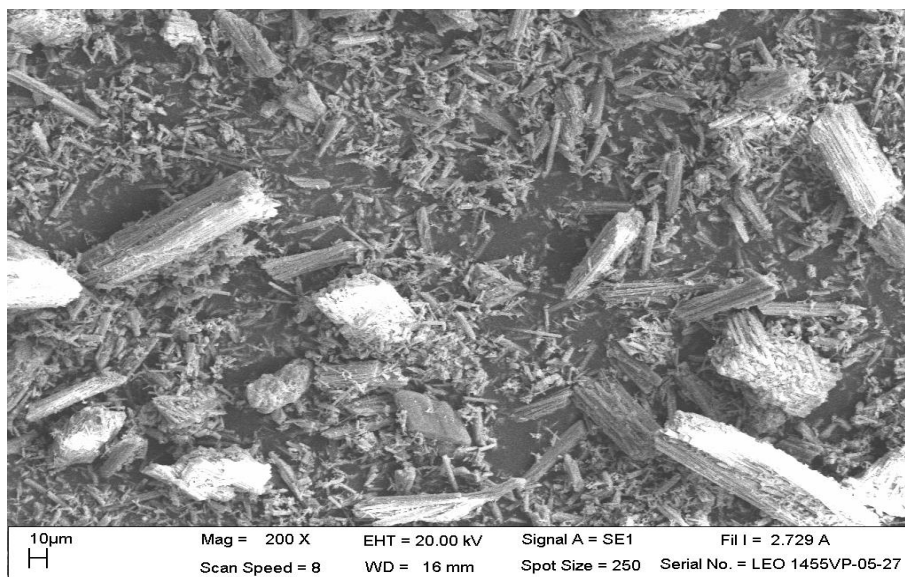
จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวนี้ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลที่ได้พบว่าการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ ไม่ส่งผลให้ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สเกิดการเปลี่ยนแปลง ผลึกมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยมและยังคงมีขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูออไรด์หลังการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(Cl) > C(120-165^{\circ}C)$

ตอนที่ 3 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูออไรด์หลังการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำ $B(Cl) > A(130C, 1.8bar)$

จากผลที่ได้พบว่าลักษณะของผลึกยิปซัมฟลูออไรด์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ โดยผลึกที่ได้มีขนาดเล็กลง และมีส่วนที่เล็กลงมากจนมีลักษณะคล้ายผง ดังรูปที่ 4.24 จากการศึกษาหลังจากนำยิปซัมฟลูออไรด์ไปเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำ พบว่าผงยิปซัมฟลูออไรด์บางส่วนจับตัวกันเป็นก้อน ดังรูปที่ 4.25 ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่ายิปซัมส่วนที่จับตัวเป็นก้อนเกิดการทำปฏิกิริยากับไอน้ำที่อยู่ในหม้อน้ำไอน้ำ เนื่องจากก่อนที่จะนำมาเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำ ยิปซัมฟลูออไรด์ได้ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้เป็นสารละลายในการต้มส่งผลทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกจากผลึกยิปซัมฟลูออไรด์ได้ดีขึ้น จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์เร็วขึ้น และเกิดการทำปฏิกิริยากับไอน้ำภายในหม้อน้ำไอน้ำเกิดเป็นผลึกยิปซัม จึงทำผลึกที่ได้มีขนาดเล็กลงมากจนมีลักษณะคล้ายผง



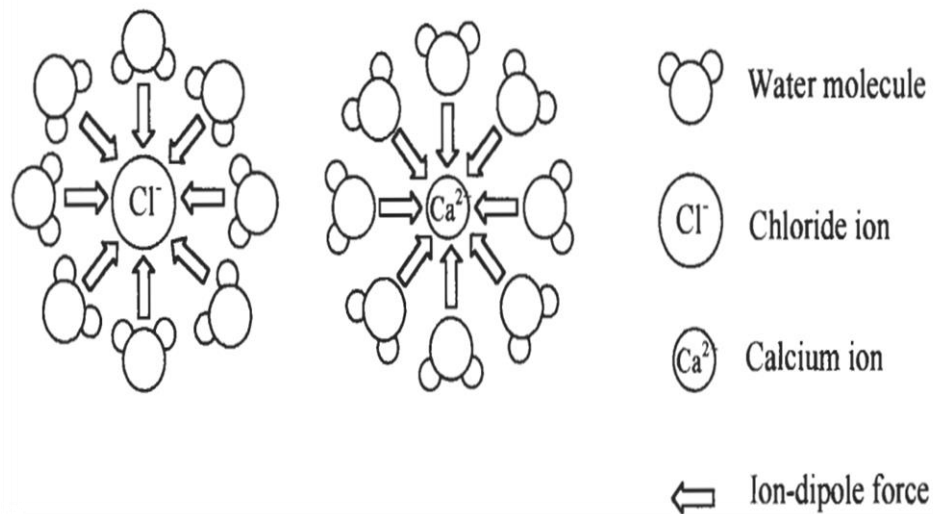
รูปที่ 4.24 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สหลังการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำไปเผา ในสภาวะที่มีความดันในหม้อนึ่งไอน้ำ B(Cl) > A(130°C, 1.8bar)



รูปที่ 4.25 ผงยิปซัมฟลูแก๊สที่จับตัวกันเป็นก้อน

2.) ศึกษาผลของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อการเปลี่ยนเฟสจาก แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต

จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ไปทำการตรวจหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต จากผลที่ได้พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต เนื่องจากความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้อาจจะต่ำไป ดังนั้นอาจจะต้องใช้เวลาในการต้มที่นานกว่านี้ จึงจะทำให้ไอออนที่เกิดจากการแตกตัวของแคลเซียมคลอไรด์สามารถดึงโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างผลึกออกมา โดยสามารถแสดงการดึงดูตโมเลกุลของน้ำจากไอออนของแคลเซียมคลอไรด์ได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.26 แสดงการดึงดูดโมเลกุลของน้ำจากไอออนของแคลเซียมคลอไรด์

จากรูปที่ 4.26 สามารถอธิบายได้ว่า ไอออน Ca^{2+} และ Cl^- ที่เกิดจากการแตกตัวของ CaCl_2 ในน้ำ จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำที่อยู่รอบ ๆ ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดที่เรียกว่าแรงไอออนขั้วคู่ (Ion-dipole force) ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลาย CaCl_2 ที่สูงขึ้น จึงช่วยเพิ่มไอออนที่ดึงดูดโมเลกุลของน้ำในเฟสของเหลวทำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตได้เร็วขึ้น

เนื่องจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ ซึ่งเป็นเพราะยิปซัมฟลูแก๊สไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต เมื่อนำไปขึ้นรูปจึงไม่เกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดการเชื่อมต่อกันของผลึก ดังนั้นจึงได้เพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไปทำการเผาในบรรยากาศปกติ C(120-165°C) ก็นำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ A(130°C, 1.8bar) จากผลการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์พบว่าหลังจากนำไปเผาในบรรยากาศปกติ และเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต 98.95 และ 88.98 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตที่ตรวจหาได้มีค่าที่สูงมาก ถ้าเทียบกับเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรตของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมประเภทปูนพลาสติกในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1C(120-165°C) จะพบว่ามีค่าที่สูงกว่า ซึ่งอาจเกิดจากการที่แคลเซียมคลอไรด์ดึงดูดโมเลกุลของน้ำไว้ จึงทำให้แคลเซียมคลอไรด์ที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลของน้ำ

มีจุดเดือดลดลง จากข้อมูล Calcium Chloride A Guide to Physical Properties [22] ได้ระบุไว้ว่าแคลเซียมคลอไรด์ที่มีน้ำอยู่ในโมเลกุลอยู่จะมีจุดเดือดที่ลดลง ซึ่งแคลเซียมคลอไรด์ที่มีโมเลกุลของน้ำหนึ่งหน่วย($\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) จะมีจุดเดือดอยู่ที่ 183 องศาเซลเซียส และแคลเซียมคลอไรด์ที่มีโมเลกุลของน้ำสองหน่วย($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะมีจุดเดือดอยู่ที่ 174 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าโมเลกุลของน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แคลเซียมคลอไรด์มีจุดเดือดลดลง ดังนั้นเมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ไปทำการเพิ่มขึ้นตอนโดยการเผาในบรรยากาศ และนำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ จึงทำให้มีการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตได้ดีขึ้น

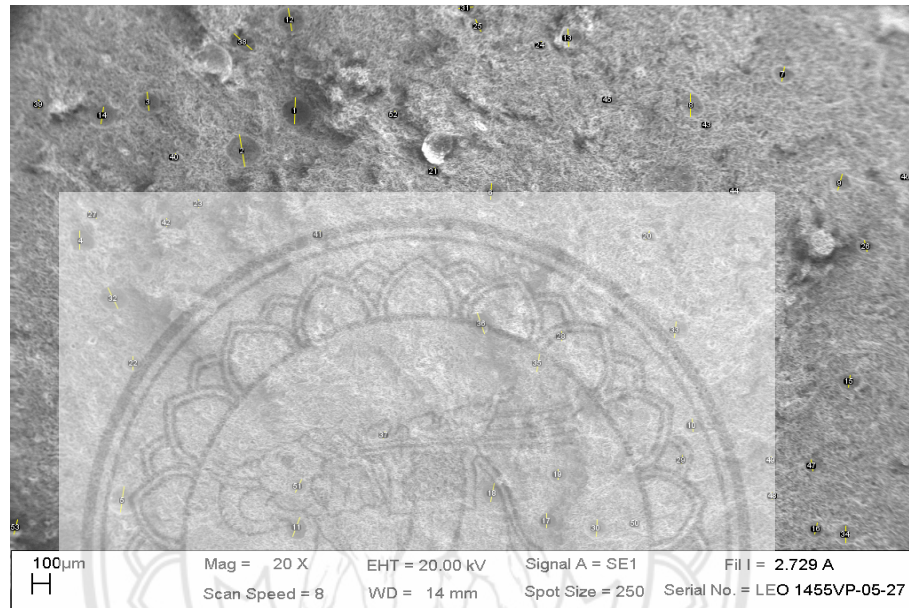
3.) ศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน

การศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการเพิ่มขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมประเภทที่ 3 เติ้นท์สโตนที่มีความแข็งแรงสูง โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน ดังต่อไปนี้

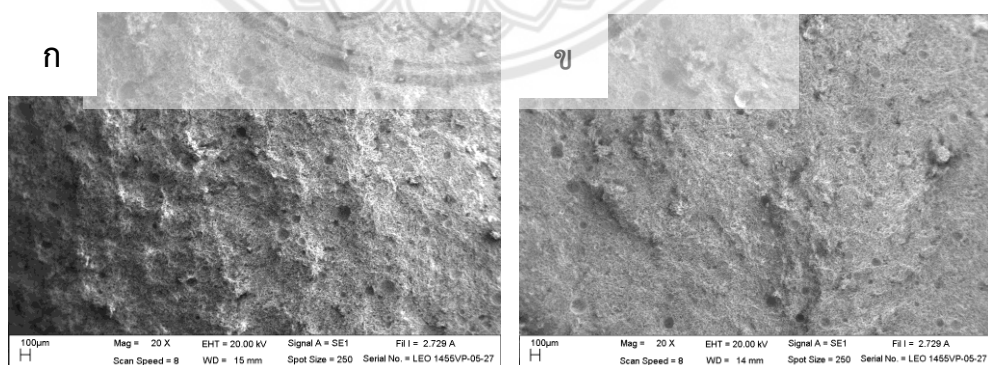
ตอนที่ 1 ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำไปเพิ่มขึ้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(C) > C(120-165^\circ\text{C})$

จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีดังกล่าวไปทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1:1 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร สูง 1.6 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่ จากนั้นนำตัวอย่างหักแบ่งครึ่งความสูงโดยบากรอยก่อนหัก แล้วนำไปศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากผลการศึกษาพบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานมีขนาดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 29.618-224.102 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ พื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานมีพื้นที่เป็น 28897.46 ตารางไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งมีขนาดพื้นที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติก ซึ่งมีพื้นที่เป็น 31370.93 ตารางไมโครเมตร ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากขนาดของผลึกยิปซัมฟลูแก๊สของทั้งสองกระบวนการมีขนาดที่ใหญ่ และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เนื่องจากผลึกของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดและความหนาแน่น

ดังนั้น เมื่อนำไปทำการขึ้นโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สที่เท่ากัน คือ 1:1 โดยน้ำหนัก จึงทำให้น้ำส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและอยู่ข้างนอกโครงสร้างมีปริมาณที่เท่าๆกัน เมื่อยิปซัมเกิดการเซตตัวน้ำที่อยู่ข้างนอกโครงสร้างจะระเหยและทิ้งรูพรุนเปิดเอาไว้ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบของทั้งสองกระบวนการมีพื้นที่ใกล้เคียงกัน และจากการสังเกตจะพบว่าลักษณะและขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานของกระบวนการสังเคราะห์ทั้งสองกระบวนการมีลักษณะที่คล้ายกัน และเพื่อให้สะดวกต่อการสังเกตจึงได้แสดงรูปภาพเปรียบเทียบให้เห็นดังรูปที่ 4.28

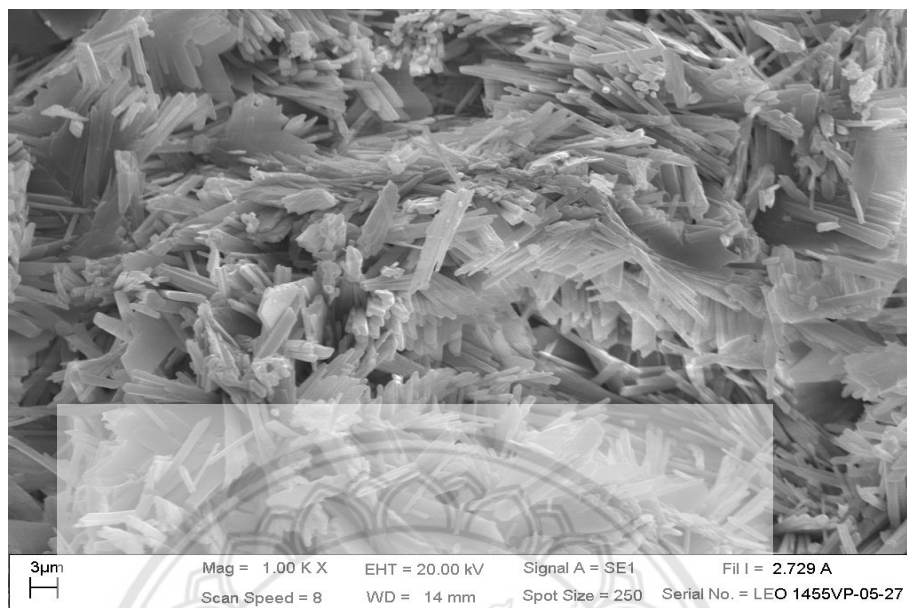


รูปที่ 4.27 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำไปเพิ่มชั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ B(CI) >C(120-165°C)



รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนพลาสติก C(120-165°C) รูป(ก) และยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งสูง B(CI) >C(120-165°C) รูป(ข)

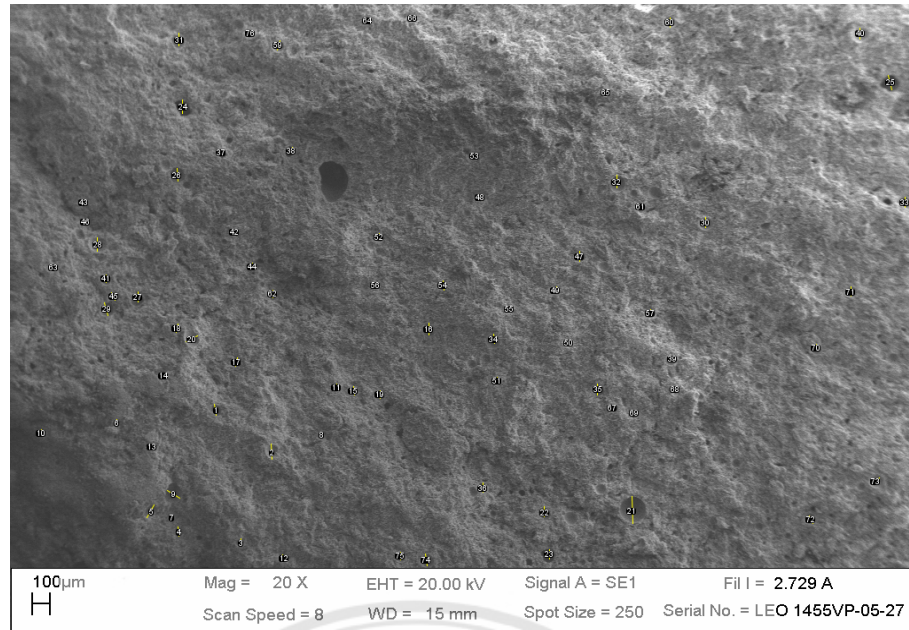
ในส่วนลักษณะของผลึกหลังจากขึ้นรูปพบว่าผลึกมีขนาดเล็กลง และมีลักษณะคล้ายเข็ม ขนาดของผลึกรูปเข็มที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์กับน้ำมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.29



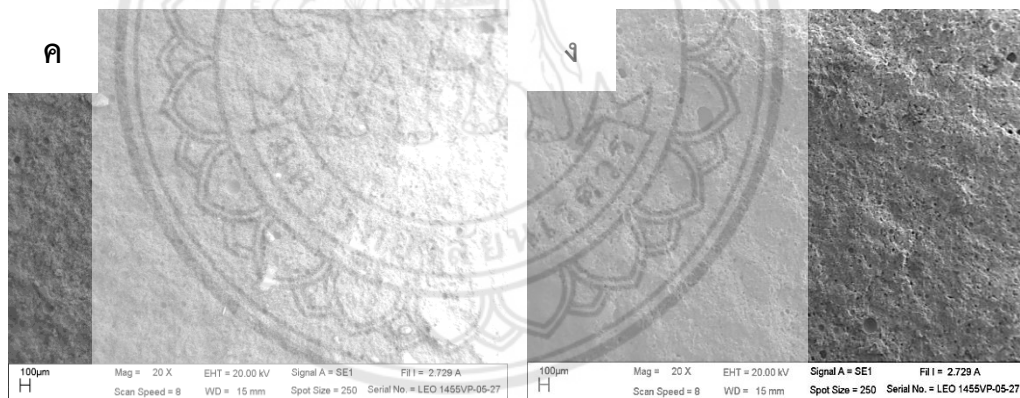
รูปที่ 4.29 ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากขึ้นรูปด้วยยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำไปเพิ่มขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(Cl) > C(120-165^{\circ}C)$

ตอนที่ 2 ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำไปเพิ่มขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำ $B(Cl) > A(130^{\circ}C, 1.8\text{bar})$

จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีดังกล่าวมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบโดยใช้อัตราส่วนผสมอัตราส่วนน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1:1.25 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแล้วรอให้แข็งตัวเต็มที่ จากนั้นนำไปศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน.เช่นเดียวกับตอนที่ 1 จากผลการศึกษพบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบมีขนาดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 11.765-188-399 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ คิดเป็นพื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานได้เป็น 27923.88 ตารางไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.30 ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและพื้นที่ของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงาน มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีความสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเห็นทึบสีโตนในกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 $A(130^{\circ}C, 1.8\text{bar})$ และเพื่อให้สะดวกต่อการเข้าใจจึงได้แสดงรูปภาพเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.31

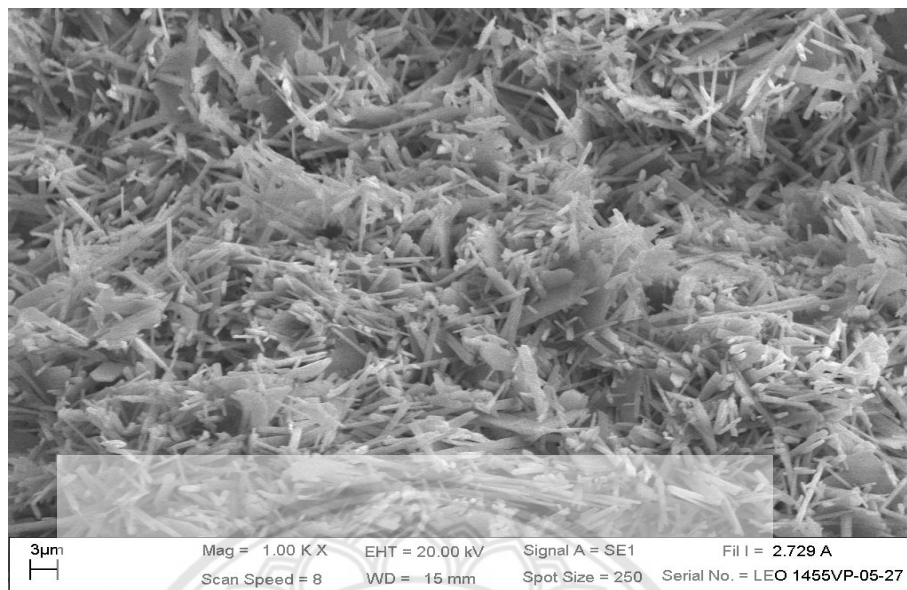


รูปที่ 4.30 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำไปเพิ่มขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อน้ำ
 $B(Cl) > A(130^{\circ}C, 1.8bar)$



รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตน
 $A(130^{\circ}C, 1.8bar)$ รูป (ค) และยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งสูง
 $B(Cl) > A(130^{\circ}C, 1.8bar)$ รูป (ง)

ในส่วนลักษณะของผลึกหลังจากขึ้นรูปพบว่าผลึกมีขนาดเล็กลงมาก และมีลักษณะคล้ายเข็ม มีการเชื่อมต่อกันระหว่างผลึกหนาแน่น ดังรูปที่ 4.32

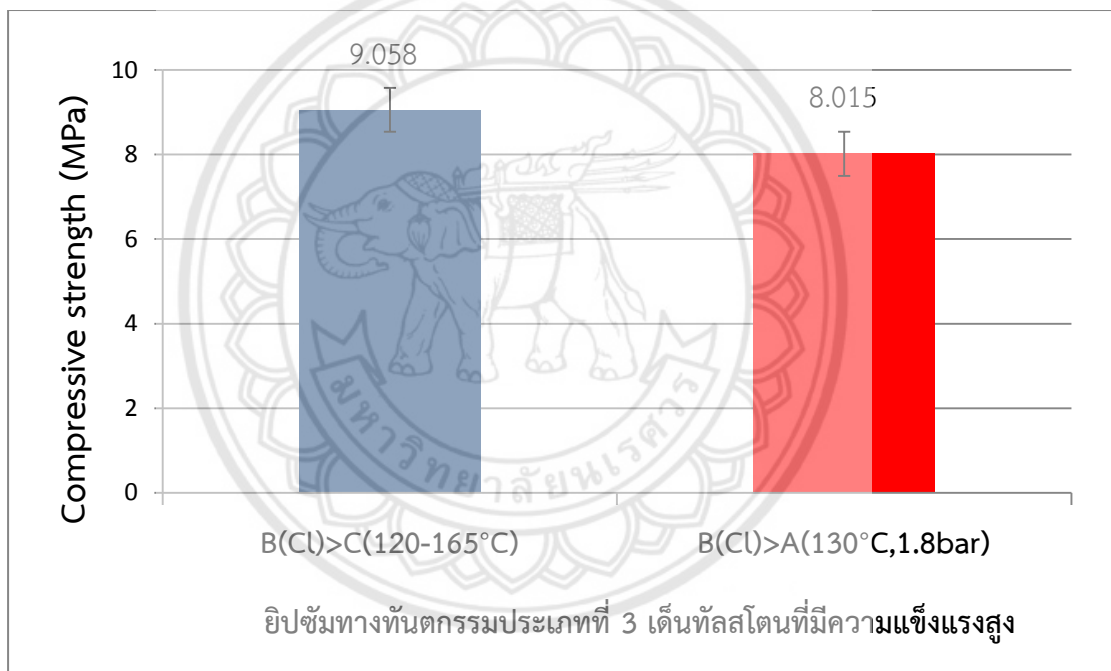


รูปที่ 4.32 ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากขึ้นรูปด้วยยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และนำไปเพิ่มขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(Cl) > C(120-165^{\circ}C)$

4.) ศึกษาความทนแรงอัดของชิ้นงาน

ในการศึกษาในหัวข้อนี้จะนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(Cl) > C(120-165^{\circ}C)$ กับเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำ $B(Cl) > A(130^{\circ}C, 1.8\text{bar})$ ไปทดสอบการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกันดังนี้ ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการเพิ่มขั้นตอนโดยการเผาในบรรยากาศปกติจะใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมเป็น 1:1 โดยน้ำหนัก ส่วนยิปซัมฟลูแก๊สที่เผาในสถานะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำ จะใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1.8:2.5 โดยน้ำหนัก จากนั้นผสมให้เข้ากันแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่แล้วนำไปทำการทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่อง universal testing จากผลการทดสอบความทนแรงอัด พบว่าค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการเพิ่มขั้นตอนโดยการเผาในบรรยากาศ กับเผาในสถานะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 9.058 และ 8.015 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.33 ค่าความทนแรงอัดที่ได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเดินทอลสโตนที่มีความแข็งแรงสูงที่กำหนดไว้อยู่ที่ 30 MPa โดยค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติมีค่าใกล้เคียงกับค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ให้มี

คุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมชนิดปูนปลาสเตอร์ และจากลักษณะทางกายภาพที่เปรียบเทียบให้เห็นในส่วนก่อนหน้านี้ จึงช่วยยืนยันว่าการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในสารละลายแคลคลอไรด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ไม่ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพ เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่นรูปร่างและขนาดของผลึก รวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ที่จะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงขึ้น เช่นความหนาแน่นของผลึก ดังนั้นเมื่อนำไปผ่านกระบวนการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ จึงไม่ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ในส่วนของค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ พบว่าค่าที่ได้ต่ำกว่าแบบที่นำไปเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีนำไปเผาในบรรยากาศ ซึ่งอาจจะเกิดจากข้อสันนิษฐานที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า ยิปซัมฟลูแก๊สบางส่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแคลเซียม-ซัลเฟตเอมิไฮเดรตและทำปฏิกิริยากับไอน้ำภายในหม้อหนึ่งไอน้ำจึงเกิดการจับตัวเป็นก้อน ดังนั้นเมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สกลับมาขึ้นรูปใหม่อีกรอบจึงทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้ลดลง



รูปที่ 4.33 แสดงค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ B(CI) > C(120-165°C) กับเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ B(CI) > A(130°C, 1.8bar)

4.2.3.2 ต้มในสารละลายเคมีชนิดที่ 2 โซเดียมซัคซิเนต

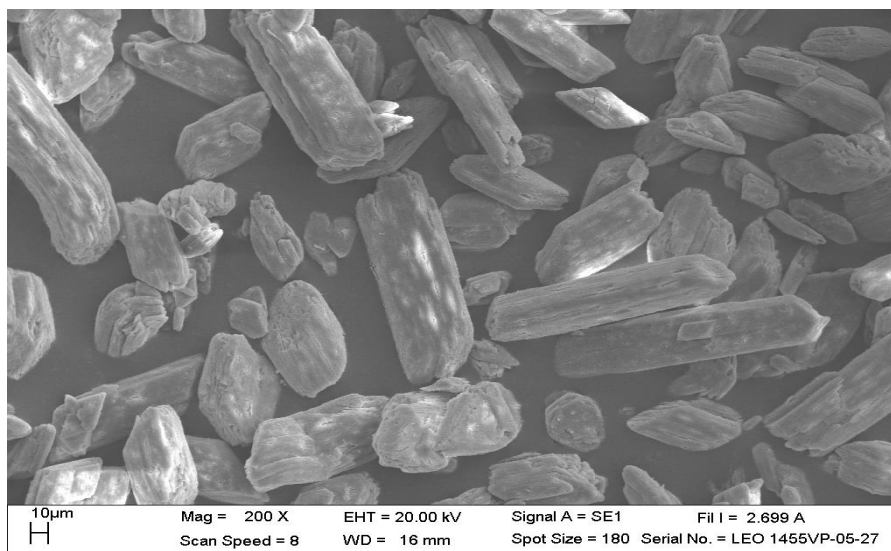
โดยวิธีการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นดังนี้

1.) ศึกษาลักษณะผลึกของยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ โดยวิธีการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนต

เนื่องจากยิปซัมฟลูแก๊สที่การสังเคราะห์โดยวิธีการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวนี้ไปขึ้นรูปผลที่ได้คือไม่สามารถขึ้นรูปได้ จึงได้นำไปตรวจวัดเปอร์เซ็นต์แคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ซึ่งพบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ดังนั้นจึงได้เพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไปเผาในบรรยากาศปกติ C(120-165°C) ก็นำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ A(130°C,1.8bar) เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มยิปซัมฟลูแก๊สในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และได้นำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ไปศึกษาลักษณะของผลึก โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็นตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สก่อนเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ B(S)

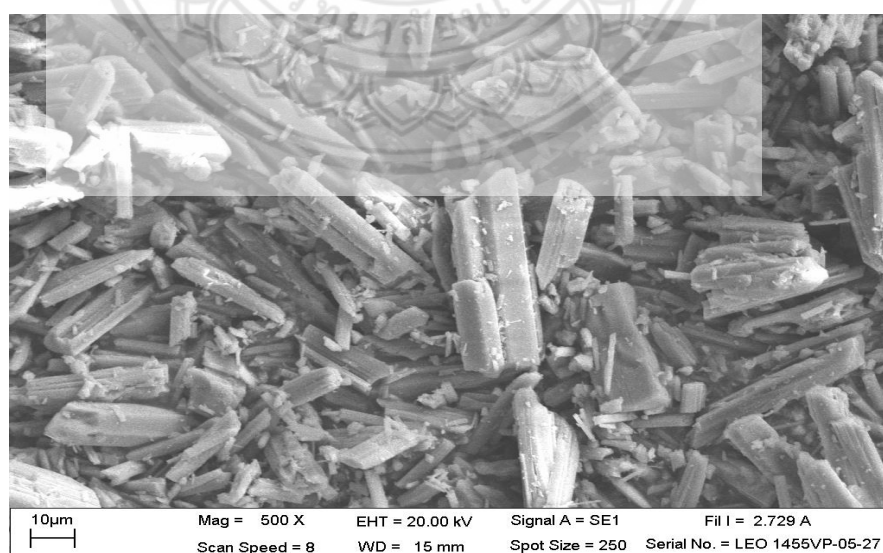
จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตไปทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลที่ได้พบว่าผลึกมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลง ผลึกยังคงมีขนาดใหญ่ และมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยม ดังรูปที่ 4.34 อย่างไรก็ตามลักษณะของผลึกที่สังเกตเห็นเป็นเพียงลักษณะทางกายภาพ ซึ่งไม่สามารถบอกถึงคุณสมบัติด้านอื่นๆได้



รูปที่ 4.34 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สก่อนการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ B(S)

ตอนที่ 2 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สหลังการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำยิปซัมฟลูแก๊สไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ B(S)>A(130°C,1.8bar)

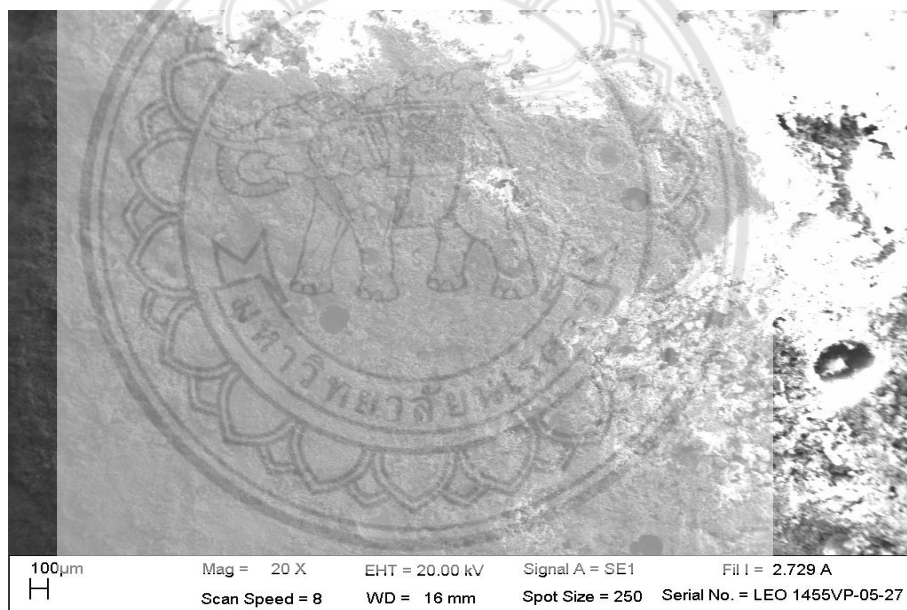
จากการนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวนี้ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลที่ได้พบว่าการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ ส่งผลให้โครงสร้างผลึกยิปซัมฟลูแก๊สเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยลักษณะของผลึกที่สังเกตได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีรูปทรงที่ไม่แน่นอน ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ลักษณะผลึกยิปซัมฟลูแก๊สหลังการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ B(S)>A(130°C,1.8bar)

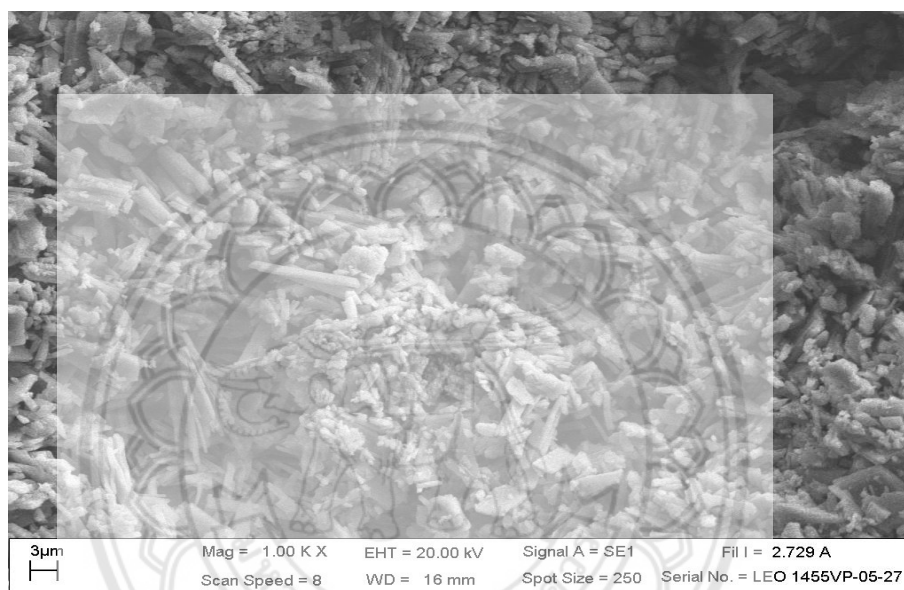
2.) ศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุน

การศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนของชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการเพิ่มขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมประเภทที่ 3 เด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง โดยได้ทำการศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่การเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ $B(S) > C(120-165^{\circ}C)$ โดยนำยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์โดยการล้างทำความสะอาดด้วยกรดซัลฟูริกที่ระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีดังกล่าว มาทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1:1 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้าแล้วนำขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แห้งตัวเต็มที่ จากนั้นนำชิ้นงานมาหักแบ่งครึ่งความสูง แล้วนำไปศึกษาการเรียงตัวของผลึกและความพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) จากผลการศึกษาพบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่และเล็ก ลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานขรุขระไม่ค่อยเรียบดังในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าตัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนต และนำไปเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อน้ำ $B(S) > C(120-165^{\circ}C)$

ในส่วนของคุณลักษณะผลึกหลังจากขึ้นรูปพบว่ามีความเป็นก้อนไม่แตกตัวเป็นรูปเข็ม ผลึกมีลักษณะก่อตัวไม่เต็มที ดังรูปที่ 4.37 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโซเดียมซัคซิเนตที่ใช้ในการต้ม เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของโซเดียมซัคซิเนตกับน้ำทำให้เกิดกรดซัคซินิก ($C_4H_6O_4$) ซึ่งกรดซัคซินิกคือกรดอินทรีย์ชนิดไดคาร์บอกซิลิกดังนั้นอาจจะเป็นไปตามข้อสรุปของ Carsten Vellmer [19] ได้รายงานว่ากรดคาร์บอกซิลิกมีผลต่อการก่อตัวของนิวเคลียสยิปซัม และชะลอการเจริญเติบโตของผลึก ดังนั้นโซเดียมซัคซิเนตจึงอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารเคมีในการต้มยิปซัมฟลูแก๊ส แต่อาจจะนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ เพื่อชะลอการเจริญเติบโตของผลึก หรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาของเฟสแคลเซียมฟอสเฟตไฮเดรตกับไอน้ำในหม้อหนึ่งไอน้ำ

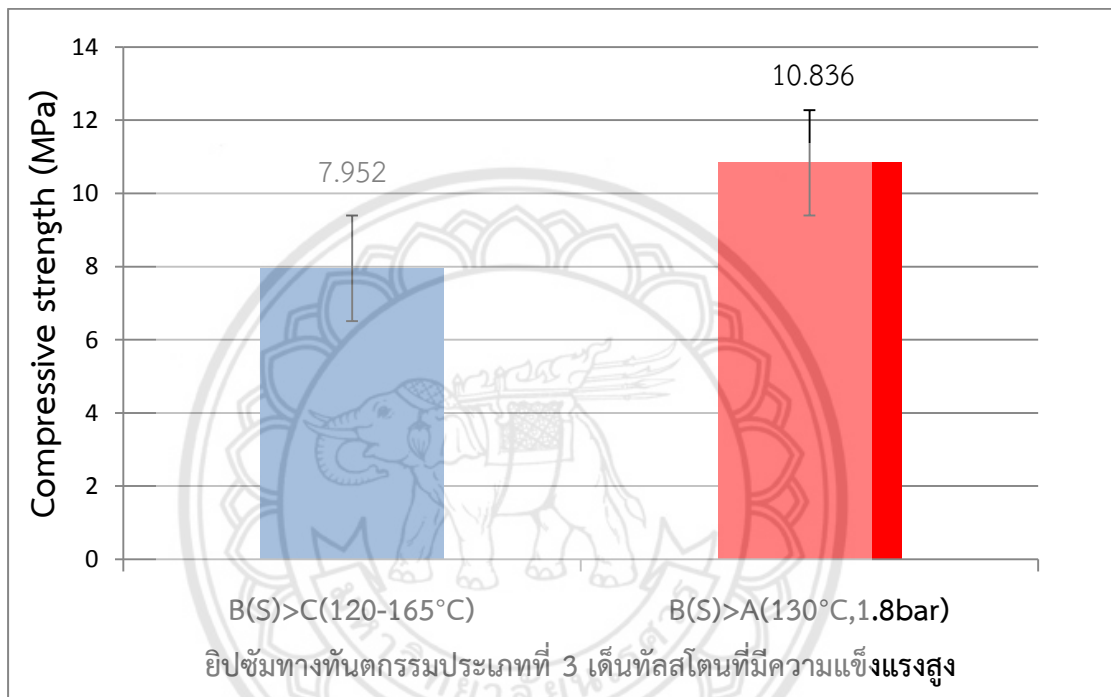


รูปที่ 4.37 ลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากขึ้นรูปด้วยยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตและนำไปเพิ่มขั้นตอนกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ B(S) > C(120-165°C)

3.) ศึกษาความทนแรงอัดของชิ้นงาน

การศึกษาหัวข้อนี้จะเริ่มจากนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ B(S) > C(120-165°C) และเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ B(S) > A(130°C, 1.8 bar) ไปทดสอบการขึ้นรูปโดยใช้อัตราส่วนการผสมดังนี้ ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการเพิ่มขั้นตอนโดยการเผาในบรรยากาศปกติ จะใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมเป็น 1:1 โดยน้ำหนัก ส่วนยิปซัมฟลูแก๊สที่เผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำจะใช้อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัมฟลูแก๊สเป็น 1.8:2.5 โดยน้ำหนัก จากนั้นผสมให้เข้ากันแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร รอให้แข็งตัวเต็มที่แล้วนำไปทำการทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่อง universal testing จากผลการทดสอบความทนแรงอัด พบว่าค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่

ผ่านกระบวนการเพิ่มขึ้นตอนโดยการเผาในบรรยากาศปกติ และเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.952 และ 10.83 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.38 โดยค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตแล้วนำไปเผาในบรรยากาศต่อ B(S)>C(120-165°C) มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมที่ผ่านการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วนำไปเผาต่อในบรรยากาศปกติ B(Cl) >C(120-165°C) ซึ่งชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดอยู่ที่ 9.058 MPa แต่อย่างไรก็ตามค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มด้วยสารเคมีทั้งสองชนิดก็ยังต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานโดยกำหนดไว้อยู่ที่ 30 MPa



รูปที่ 4.38 แสดงค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการไปเผาในบรรยากาศปกติ B(S) >C(120-165°C) กับเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อน้ำไอน้ำ B(S) >A(130°C, 1.8bar)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาผลของระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊ส

จากผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกที่ระยะเวลา 15 30 และ 60 นาที มีค่าความทนแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริกจะให้ค่าความทนแรงอัดมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ไม่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการล้างที่ระยะเวลา 15 นาทีก็เพียงพอที่จะทำให้คุณสมบัติของยิปซัมฟลูแก๊สดีขึ้น และส่งผลให้ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

5.1.2 การศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทปูนพลาสติก

จากผลการทดสอบพบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ และชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมประเภทปูนพลาสติก ส่วนยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ไม่สูงพอ และระยะเวลาในการเผาไม่มากพอ จึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต

5.1.3 การศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตน

จากผลการทดสอบพบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 เมื่อนำไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ และชิ้นงานมีค่าความทนแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 12.75 และ 13.12 MPa ตามลำดับ ค่าความทนแรงอัดที่ได้ยังไม่ผ่านมาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมชนิดเด็นทัลสโตน แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบพบว่าค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 2 จะให้ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานมากกว่ากระบวนการสังเคราะห์รูปแบบที่ 1 ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าความดันที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ยังไม่มากพอที่จะทำให้ผลึกมีความแข็งแรงและความหนาแน่นมากขึ้น รวมทั้งการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตที่ไม่มากพอ จึงทำให้ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

5.1.4 การศึกษาผลของกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง

จากผลการทดสอบพบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาทำการทดสอบการขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ อาจเป็นเพราะระยะเวลาที่ใช้ในการต้มไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการคายน้ำของผลึกแล้วเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมซัลเฟตเอมิไฮเดรต ที่มีผลึกมีขนาดเล็กและแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไปเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ กับเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ เมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไปทดสอบการขึ้นรูปพบว่าสามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมเอมิไฮเดรตที่สูงขึ้น แต่ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ได้ก็ยังคงไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วนำไปเผาในบรรยากาศปกติ กับเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำมีค่าความทนแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 9.05 และ 8.01 MPa ตามลำดับ ส่วนยิปซัมฟลูแก๊สที่ต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ไม่สามารถขึ้นรูปได้เช่นเดียวกัน แต่เมื่อนำยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการต้มในสารละลายโซเดียมซัคซิเนตไปเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ กับเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำ พบว่ายิปซัมฟลูแก๊สที่ได้สามารถนำไปขึ้นรูปได้ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ถูกเพิ่มขึ้นตอนโดยการนำไปเผาในบรรยากาศปกติ กับเผาในสภาวะที่มีความดันในหม้อหนึ่งไอน้ำมีค่าความทนแรงอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 7.95 และ 10.83 MPa ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาวิธีการล้างทำความสะอาดยิปซัมฟลูแก๊สเพื่อลดค่าใช้จ่ายในเรื่องของสารเคมีที่ใช้ล้าง และลดความเสียหายที่เกิดจากกรดซัลฟูริก
2. ควรเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตน โดยการนำยิปซัมฟลูแก๊สไปจุ่มในสารเคมีชนิดโซเดียมซัคซิเนตก่อนเข้าหม้อหนึ่งไอน้ำ
3. ในกระบวนการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง โดยวิธีการต้มในสารเคมีชนิดแคลเซียมคลอไรด์ ควรศึกษาระยะเวลาและความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์ และคณะ.(2555). ถ่านหินกับการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย.
- [2] กองอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักงานอนามัยกรุงเทพมหานคร. แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์.
- [3] ASTA ผู้จัดการรายวัน. (2553). การนำยิปซัมจากกระบวนการลดแก๊สซัลเฟอร์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะไปใช้ประโยชน์.
- [4] ปูนปลาสเตอร์ทันตกรรมและทันตกรรมหิน.(2561).ยิปซัมทางทันตกรรม.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://thai.alibaba.com/g/dental-plaster-and-dental-stone.html> . (30 มิถุนายน 2561).
- [5] IN THAI DENTAL. (2012).กองทุนทันตกรรม ประสานสู่นาคต สปสช.
- [6] Kostic-Pulek A., Marinkovic S., Popov S., Djuricic M. & Djinovic J.(2005) .The treatment of gypsum as a product of the flue gas desulphurization process. Ceramics – Silikáty 49 (2): 115-119
- [7] วิทยา พันธุ์พา.(2545). Production of dental stone from flue-gas gypsum. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์
- [8] จรรยา ชื่นอารมณ์. (2554). ผลของการเก็บรักษาผงยิปซัมปลาสเตอร์ต่อสมบัติเชิงกลของแบบหล่อปูนปลาสเตอร์. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ 14(3) : 152-159
- [9] Azer S.S., Kerby R.E. & Knobloch L.A.(2008). Effect of mixing methods on the physical properties of dental stones. Journal of Dentistry. journal of dentistry 36: 736–744
- [10] De Cesero L, Burntt junior LH & Papaleo RM. (2017) . The addition of silica nanoparticles on the mechanical properties of dental stone. The Journal of Prosthetic Dentistry : 535-539
- [11] ภาคภูมิ ยินดีสิทธิ์ และภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ.(2016). ฟลูแก๊สซัลเฟอร์ไอเซชันโดยใช้หินปูนระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน.The National and international Graduate Research Conference. Khon Koen Thailand.
- [12] Aleya Ranganathan, Ansha Bharath & Nida Suroor.(2561).Gypsum product. [ออนไลน์].แหล่งที่มา:<http://www.slideshare./ajeyaranganathan/gypsum-products-in-dentistry> (25 มิถุนายน 2561)
- [13] William J.O'Brien.(2002). Dental materials and their selection.3rd Ed. Ann Arbor, Michigan.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [14] ความแข็งแรงต่อการดึง, การอัด, การเฉือน. (2558).**ความแข็งแรงต่อการอัด**. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=218&bookID=1818&read=true&count=true (2 กรกฎาคม 2561)
- [15] Scanning ElectronMicroscope : SEM. (2012). **กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด**. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html> (20 มิถุนายน 2561).
- [16] Paola Comodi and Sergio SPeziale.(2008). **High-pressure behavior of gypsum: A single-crystal X-ray study**. American Mineralogist, 93: 1530– 1537.
- [17] ภัทรวรรณ เฉยเจริญ.(2018). **ปูนปลาสเตอร์ (Plaster of Paris)**. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www2.mtec.or.th/th/special/cdm/articles4.html> (15 กรกฎาคม 2561)
- [18] ปรีนทร ศตเมธม, บุญเลิศ กู้เกียรติตระกูล, จิตติมา ดิเรกสุนทร, ชัยเมศวร์ ชุ่นอื้อ, ภัทริยาภรณ์ ศรีบุรุษ และรัตน์ธญา เวชพิมล. (2557). **ความแข็งแรงและการขยายขณะก่อตัวของแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ที่เสริมแรงด้วยผงแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตจากยิปซัมทางทันตกรรมชนิดที่สี่**. ว.ทันต.สงขลานครินทร์, 2(1): 30-38
- [19] Carsten Vellmer.(2014). **Effect of Carboxylic Acids on the Hydration of CalciumSulfate Hemihydrate Pastes**. TA Instruments, 109 Lukens Drive, New Castle, DE 19720, USA
- [20] Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research. (2009). **Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012**. Fraunhofer ECOFSY and Oka-Institut e.V.
- [21] สุธารี เกียรติมัน.(2544). **การแคลซิเนชันยิปซัมที่เป็นผลิตภัณฑ์รองจากกระบวนการทางเคมี**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [22] **Calcium Chloride A Guide to Physical Properties**.(2018). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.oxy.com/OurBusinesses/Chemicals/Products/Documents/CalciumChloride/173-01791.pdf> (20 กรกฎาคม 2561).
- [23] Sandeep Kumar Kuthadi.(2015). **Laboratory Scale Study of Calcium Sulfate Hydration Forms**. Western Kentucky University TopSCHOLAR

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [24] ปรีดา พิมพ์ขาวขำ.(2547).เซรามิกส์.[ออนไลน์].แหล่งที่มา. <http://www.material.chula.ac.th/RADIO47/September/radio9-3.htm> (2 กรกฎาคม 2561).



ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบความทนแรงอัดของชิ้นงานและเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้
จากการตรวจหา



ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมประเภทปูนปลาสเตอร์ (รูปแบบที่ 1)

ชิ้นงานที่	ไม่ผ่านการล้าง	Compressive (MPa)		
		ล้างด้วยกรดซัลฟูริก		
		15 นาที	30 นาที	60 นาที
1	1.7026	11.1814	9.0836	8.6174
2	2.7122	7.6212	10.062	9.854
3	2.7805	9.5765	11.05	9.7243

ตารางที่ ก.2 ความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตนที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (รูปแบบที่ 1)

ชิ้นงานที่	Compressive (Mpa.)		
	W/P (1.8/2.5)	W/P (2/2.5)	W/P (2.2/2.5)
1	11.2	10.68	9.1105
2	13.307	10.818	9.52
3	13.766	11.612	9.7131

ตารางที่ ก.3 ความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยิปซัมทางทันตกรรมประเภทเด็นทัลสโตน (รูปแบบที่ 2)

ชิ้นงานที่	Compressive (MPa)	
	อัตราส่วนการผสมน้ำต่อผงยิปซัม	
	W/P (1.8/2.5)	W/P (2/2.5)
1	11.19	11.018
2	13.725	11.84
3	14.4575	13.448

ตารางที่ ก.4 ความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากการทดลองเพิ่มเติม (สารเคมีชนิด แคลเซียมคลอไรด์)

ชิ้นงานที่	Compressive (MPa)	
	B(Cl)>C(120-165C°)	B(Cl)>A(130C°,1.8bar)
1	6.4743	7.1825
2	7.5633	6.8276
3	9.9671	8.2897
4	10.03	7.9927
5	11.256	9.7849

ตารางที่ ก.5 ความทนแรงอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้จากการทดลองเพิ่มเติม
(สารเคมีชนิด เดียมซัคซิเนต)

ชิ้นงานที่	Compressive (MPa)	
	B(S)>C(120-165C°)	B(S)>A(130C°,1.8bar)
1	6.875	10.037
2	5.7486	9.4725
3	7.5391	11.423
4	9.5401	12.414
5	10.06	-

ตารางที่ ก.6 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ C(80-120°C)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซั่ม (g)	กระจก+ยิปซั่ม (ก่อน)	กระจก+ยิปซั่ม (หลัง)
1	38.6055	1.0001	39.6056	39.6098
2	56.6852	1.0005	57.6857	57.7081

ตารางที่ ก.7 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ C(120-165°C)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซั่ม (g)	กระจก+ยิปซั่ม (ก่อน)	กระจก+ยิปซั่ม (หลัง)
1	28.3235	1.0009	29.3244	29.3275
2	31.568	1.0002	32.5682	32.7252

ตารางที่ ก.8 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์ A(120°C,1bar)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซั่ม (g)	กระจก+ยิปซั่ม (ก่อน)	กระจก+ยิปซั่ม (หลัง)
1	31.5688	1.0012	32.57	32.569
2	28.3212	1.0016	29.3228	29.3358

ตารางที่ ก.9 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมเฮมิไฮเดรต A(130°C,1.8bar)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซัม (g)	กระจก+ยิปซัม (ก่อน)	กระจก+ยิปซัม (หลัง)
1	56.686	1.0003	57.6863	57.6841
2	38.6065	1.0008	39.6073	39.6419

ตารางที่ ก.10 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมเฮมิไฮเดรต B(CI)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซัม (g)	กระจก+ยิปซัม (ก่อน)	กระจก+ยิปซัม (หลัง)
1	31.5581	1.0006	32.5587	32.56
2	38.6209	1.0006	39.6215	39.6233

ตารางที่ ก.11 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมเฮมิไฮเดรต B(CI)>C(120-165°C)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซัม (g)	กระจก+ยิปซัม (ก่อน)	กระจก+ยิปซัม (หลัง)
1	30.8762	1.0012	31.8774	31.8758
2	31.0467	1.0016	32.0483	32.2258

ตารางที่ ก.12 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมเฮมิไฮเดรต B(CI)>A(130°C,1.8bar)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซัม (g)	กระจก+ยิปซัม (ก่อน)	กระจก+ยิปซัม (หลัง)
1	31.5649	1.0007	32.5656	32.5649
2	28.3195	1.0008	29.3203	29.4802

ตารางที่ ก.13 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมเฮมิไฮเดรต B(S)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซัม (g)	กระจก+ยิปซัม (ก่อน)	กระจก+ยิปซัม (หลัง)
1	28.321	1.0002	29.3122	29.3114
2	30.8661	1.0001	31.8662	31.8668

ตารางที่ ก.14 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมเฮมิไฮเดรต B(S) >C(120-165°C)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซัม (g)	กระจก+ยิปซัม (ก่อน)	กระจก+ยิปซัม (หลัง)
1	31.5638	1.0008	32.5646	32.5632
2	28.3191	1.0004	29.3195	29.4862

ตารางที่ ก.15 ค่าที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมเฮมิไฮเดรต B(S)>A(130°C,1.8bar)

ตัวอย่างที่	น้ำหนักกระจก (g)	ยิปซัม (g)	กระจก+ยิปซัม (ก่อน)	กระจก+ยิปซัม (หลัง)
1	38.6074	1.0007	39.6081	39.6077
2	56.6854	1.0007	57.6861	57.8173

ตารางที่ ก.16 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของปูนปลาสเตอร์
รูปแบบที่ 1 C(120-165°C) ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ

	Area	Length		Area	Length
1	771.01	131.209	34	308.404	51.832
2	647.648	113.268	35	555.127	96.259
3	1048.574	185.705	36	493.446	84.425
4	1264.456	220.899	37	956.052	167.054
5	709.329	124.123	38	370.085	59.236
6	1048.574	185.114	39	616.808	104.716
7	678.489	118.704	40	462.606	79.749
8	1141.095	201.153	41	339.244	56.391
9	740.17	127.822	42	493.446	81.45
10	801.85	140.686	43	524.287	91.589
11	616.808	106.017	44	524.287	88.855
12	524.287	86.668	45	370.085	59.236
13	555.127	93.661	46	277.564	46.83
14	616.808	104.716	47	277.564	44.427
15	986.893	170.305	48	647.648	111.315
16	678.489	119.395	49	370.085	59.236
17	585.968	99.618	50	400.925	67.051
18	585.968	98.789	51	370.085	63.265
19	986.893	170.947	52	370.085	59.697
20	740.17	126.746			
21	832.691	143.77			
22	493.446	82.785			
23	431.766	74.046			
24	431.766	74.046			
25	524.287	88.855			
26	647.648	111.068			
27	678.489	114.95			
28	400.925	66.641			
29	925.212	158.291			
30	524.287	88.855			
31	585.968	98.789			
32	277.564	43.176			
33	493.446	81.45			

ตารางที่ ก.17 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของเต็นท์ลัสโตน
รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar)ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ

	Area	Length		Area	Length
1	1795.918	309.393	34	522.449	83.81
2	979.592	168.31	35	457.143	76.19
3	946.939	160.724	36	489.796	78.443
4	979.592	167.619	37	293.878	45.714
5	979.592	167.792	38	326.531	53.875
6	685.714	115.297	39	163.265	22.857
7	587.755	99.048	40	195.918	30.476
8	555.102	91.745	41	522.449	84.155
9	848.98	144.962	42	424.49	68.571
10	848.98	143.149	43	718.367	122.853
11	489.796	79.545	44	587.755	99.34
12	555.102	92.061	45	1077.551	181.103
13	522.449	84.155	46	587.755	99.34
14	489.796	79.545	47	359.184	58.025
15	555.102	91.745	48	424.49	68.571
16	620.408	101.651	49	359.184	58.025
17	424.49	70.244	50	391.837	60.952
18	457.143	76.57	51	195.918	30.476
19	261.224	38.095			
20	522.449	85.184			
21	685.714	114.286			
22	391.837	62.828			
23	293.878	43.1			
24	293.878	45.714			
25	195.918	31.414			
26	489.796	79.545			
27	261.224	41.03			
28	359.184	59.507			
29	326.531	53.333			
30	424.49	68.147			
31	195.918	30.476			
32	489.796	80.992			
33	261.224	33.432			

ตารางที่ ก.18 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของเต็นท์ลสโตน
รูปแบบที่ 2 A(130°C,1.8bar)ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ

	Area	Length		Area	Length		Area	Length
1	987.654	170.531	34	185.185	29.63	67	261.224	38.333
2	401.235	66.667	35	185.185	29.63	68	163.265	23.561
3	308.642	52.378	36	246.914	37.037	69	326.531	52.683
4	308.642	47.431	37	246.914	37.771	70	261.224	40
5	432.099	69.881	38	185.185	29.63	71	391.837	63.888
6	432.099	74.074	39	246.914	37.037	72	326.531	51.429
7	524.691	89.197	40	424.49	70.244	73	195.918	29.137
8	308.642	51.852	41	489.796	77.699	74	163.265	25.555
9	401.235	66.667	42	293.878	46.345	75	293.878	43.435
10	370.37	59.259	43	555.102	91.745	76	261.224	41.905
11	370.37	59.72	44	261.224	38.095	77	228.571	34.759
12	370.37	59.72	45	293.878	48.187	78	293.878	45.714
13	308.642	51.852	46	326.531	53.333	79	228.571	34.286
14	308.642	51.852	47	457.143	76.57	80	293.878	46.345
15	462.963	80.123	48	391.837	61.427	81	326.531	54.21
16	679.012	119.441	49	326.531	53.875	82	130.612	17.143
17	277.778	44.444	50	293.878	46.345	83	228.571	34.286
18	277.778	45.058	51	195.918	30.476	84	163.265	22.857
19	493.827	84.457	52	261.224	38.85	85	163.265	20.603
20	246.914	37.037	53	326.531	53.875	86	163.265	23.561
21	277.778	44.444	54	261.224	38.095	87	228.571	34.286
22	123.457	14.815	55	195.918	30.476	88	195.918	28.571
23	246.914	37.771	56	163.265	24.094			
24	277.778	45.058	57	195.918	31.414			
25	246.914	37.771	58	293.878	45.714			
26	277.778	44.444	59	261.224	38.095			
27	370.37	59.72	60	261.224	41.03			
28	277.778	44.444	61	261.224	41.03			
29	185.185	29.63	62	228.571	34.073			
30	401.235	67.077	63	326.531	53.333			
31	401.235	67.077	64	391.837	60.952			
32	277.778	44.444	65	359.184	57.143			
33	370.37	59.259	66	326.531	51.429			

ตารางที่ ก.19 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง สารเคมีชนิด แคลเซียมคลอไรด์ B(CI)>C(120-165°C)ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ

	Area	Length		Area	Length
1	1048.574	185.262	34	678.489	118.473
2	1264.456	224.102	35	678.489	119.395
3	740.17	126.095	36	863.531	147.535
4	740.17	125.877	37	339.244	53.906
5	1017.733	179.092	38	894.372	157.074
6	647.648	111.315	39	370.085	59.236
7	585.968	97.392	40	277.564	46.83
8	925.212	162.9	41	277.564	43.176
9	678.489	114.95	42	308.404	51.832
10	524.287	89.163	43	185.042	29.618
11	801.85	140.491	44	246.723	37.023
12	894.372	157.074	45	246.723	37.023
13	678.489	118.704	46	185.042	29.618
14	678.489	119.395	47	493.446	81.786
15	493.446	82.785	48	308.404	51.832
16	493.446	82.785	49	277.564	45.04
17	616.808	103.664	50	246.723	39.875
18	740.17	127.822	51	555.127	96.259
19	431.766	74.046	52	246.723	37.756
20	370.085	63.265	53	616.808	106.017
21	246.723	39.875			
22	555.127	96.259			
23	308.404	51.832			
24	246.723	37.756			
25	524.287	89.47			
26	462.606	75.512			
27	400.925	68.267			
28	400.925	66.641			
29	370.085	59.697			
30	678.489	118.704			
31	524.287	89.163			
32	863.531	152.649			
33	647.648	112.051			

ตารางที่ ก.20 ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และพื้นที่รูพรุนของเด็นทัลสโตนที่มีความแข็งแรงสูง สารเคมีชนิด แคลเซียมคลอไรด์ B(Cl)>A(130°C,1.8bar) ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ

	Area	Length		Area	Length		Area	Length
1	484.429	74.465	33	449.827	70.588	65	242.215	35.294
2	657.439	103.109	34	415.225	63.233	66	207.612	29.412
3	311.419	44.991	35	484.429	78.431	67	311.419	47.425
4	415.225	62.044	36	415.225	62.745	68	207.612	29.412
5	588.235	96.028	37	242.215	35.076	69	138.408	18.602
6	242.215	32.883	38	311.419	49.604	70	276.817	39.216
7	207.612	26.633	39	276.817	39.216	71	415.225	62.745
8	207.612	29.994	40	484.429	78.431	72	380.623	59.732
9	622.837	100.389	41	346.021	54.902	73	380.623	61.257
10	242.215	37.203	42	173.01	23.529	74	346.021	55.459
11	242.215	35.294	43	276.817	39.411	75	346.021	54.902
12	276.817	38.348	44	242.215	36.155	76	207.612	31.373
13	276.817	38.348	45	380.623	56.148			
14	173.01	25.301	46	207.612	29.866			
15	346.021	55.042	47	449.827	70.588			
16	519.031	82.353	48	311.419	47.425			
17	380.623	59.344	49	311.419	47.425			
18	380.623	56.148	50	276.817	42.824			
19	346.021	54.902	51	311.419	47.059			
20	519.031	84.2	52	311.419	47.059			
21	1141.869	188.399	53	173.01	26.307			
22	449.827	70.588	54	415.225	64.973			
23	415.225	62.745	55	242.215	35.781			
24	588.235	94.118	56	173.01	24.254			
25	657.439	104.641	57	311.419	47.059			
26	553.633	86.63	58	346.021	52.613			
27	449.827	70.588	59	415.225	67.069			
28	588.235	94.118	60	415.225	64.706			
29	553.633	89.426	61	276.817	41.595			
30	449.827	70.588	62	346.021	52.941			
31	553.633	86.275	63	173.01	23.529			
32	553.633	86.275	64	103.806	11.765			

ตารางที่ ก.21 ขนาดของผลึกที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์ รูปแบบที่ 1 A(120°C,1bar) ที่
วัดจากโปรแกรม ImageJ

	Length		Length
1	7.839	34	3.283
2	6.731	35	5.872
3	6.357	36	1.869
4	7.722	37	1.968
5	2.395	38	2.333
6	3.189	39	3.639
7	5.18	40	5.741
8	4.127	41	1.544
9	1.379	42	2.418
10	1.65	43	4.258
11	1.637	44	3.636
12	2.266	45	1.912
13	2.889	46	1.923
14	2.098	47	2.278
15	2.309	48	2.923
16	1.882	49	1.827
17	6.074	50	0.919
18	3.445	51	1.732
19	5.172	52	1.556
20	4.065	53	1.216
21	4.683	54	1.855
22	2.61	55	1.577
23	2.089	56	1.331
24	8.733	57	1.813
25	2.441	58	1.55
26	2.729	59	2.298
27	2.738	60	2.087
28	3.407	61	2.653
29	2.232	62	3.865
30	3.246	63	0.919
31	2.599		
32	8.653		
33	5.027		

ตารางที่ ก.22 ขนาดของผลึกที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์ รูปแบบที่ 2 A(130°C,1.8bar)
ที่วัดจากโปรแกรม ImageJ

	Length		Length
1	6.989	34	1.225
2	2.963	35	1.104
3	3.465	36	2.824
4	2.281	37	1.482
5	1.852	38	3.017
6	1.794	39	1.07
7	1.852	40	1.475
8	1.287	41	1.07
9	1.973	42	1.863
10	1.092	43	1.24
11	2.442	44	1.104
12	1.938	45	2.81
13	1.658	46	1.339
14	1.677	47	2.559
15	1.639	48	1.994
16	1.603	49	1.923
17	0.616	50	1.202
18	1.512	51	1.162
19	0.873	52	1.254
20	1.808	53	1.241
21	0.921	54	1.335
22	1.456	55	2.485
23	1.104	56	1.976
24	3.225	57	2.671
25	1.849	58	2.055
26	1.438	59	1.149
27	1.316		
28	0.877		
29	1.235		
30	1.453		
31	1.063		
32	1.259		
33	1.508		



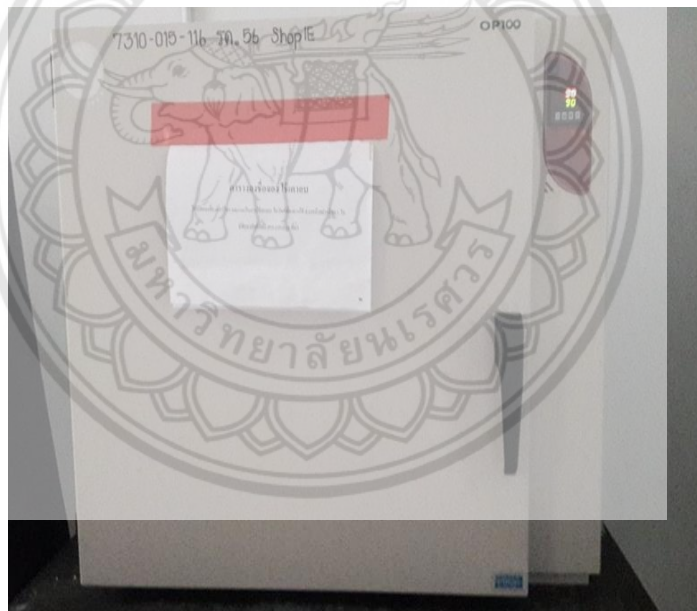
ตารางที่ ข.1 ต้นทุนในการสังเคราะห์ยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภท

ขั้นตอนการล้างยิปซัมฟลูแก๊สด้วยกรดซัลฟูริก				
ค่าใช้จ่าย (ประเภท)	ราคา	ปริมาณที่ใช้	คิดเป็นเงิน (บาท)	
ยิปซัมฟลูแก๊ส	0.04 บาท/กิโลกรัม	1 กิโลกรัม	0.04	
กรดซัลฟูริก	240บาท/ลิตร	0.16 ลิตร	38.4	
น้ำประปา	8.5บาท/ลูกบาศก์เมตร	0.015 ลูกบาศก์เมตร	0.1275	
ค่าไฟฟ้า -เตาอบ	5 บาท/หน่วย	- ที่ 80 °C, 5ชม.	4.3	
รวมค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการล้าง 42.86 บาท				
ขั้นตอนการสังเคราะห์ยิปซัมฟลูแก๊สให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงยิปซัมทางทันตกรรม				
ประเภทที่ 1 ปูนปลาสเตอร์				
ค่าใช้จ่าย (ประเภท)	ราคา	เวลาที่ใช้	คิดเป็นเงิน (บาท)	
ค่าไฟฟ้า - เตาเผา	5 บาท/หน่วย	-ที่ 120 °C, 1ชม. กับ 165 °C, 1ชม.	5.57	
ประเภทที่ 2 เเดินท์สโตน				
ค่าใช้จ่าย (ประเภท)	ราคา	เวลาที่ใช้	คิดเป็นเงิน (บาท)	
ค่าไฟฟ้า - หม้อนึ่งไอน้ำ - เตาอบ	5 บาท/หน่วย	- ที่ 130 °C, 1.8 บาร์ 1 ชม. - ที่ 80 °C, 5 ชม.	16.8	
ประเภทที่ 3 เเดินท์สโตนที่มีความแข็งแรงสูง				
ค่าใช้จ่าย (ประเภท)	ราคา	เวลาที่ใช้	ปริมาณที่ใช้	คิดเป็นเงิน (บาท)
ค่าไฟฟ้า - หม้อต้ม - เตาอบ - เตาเผา	5 บาท/หน่วย	-ที่ 100 °C, 1 ชม. -ที่ 80 °C, 5 ชม. -ที่ 120 °C, 1ชม. กับ 165 °C, 1ชม.	-	19.48
แคลเซียมคลอไรด์	0.9 บาท/กรัม	-	428.5 กรัม	385.65
ค่าใช้จ่ายทั้งหมดจ่ายในการผลิตยิปซัมทางทันตกรรมแต่ละประเภทต่อหนึ่งกิโลกรัม				
ประเภท				
- ปูนปลาสเตอร์คิดเป็นเงิน 48 .43 บาทต่อกิโลกรัม				
- เเดินท์สโตนคิดเป็นเงิน 59.66 บาทต่อกิโลกรัม				
- เเดินท์สโตนที่มีความแข็งแรงสูงคิดเป็นเงิน 448 บาทต่อกิโลกรัม				





รูปที่ ค.1 เตาเผาสำหรับเผาชิปซิมพลูแก๊สในบรรยากาศปกติ



รูปที่ ค.2 เตาอบ



รูปที่ ค.3 โถดูดความชื้นสำหรับใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์
หาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมเฮมิไฮเดรต



รูปที่ ข.ค เครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง



รูปที่ ค.5 ที่บดสาร



รูปที่ ค.6 เครื่องกรองสุญญากาศ