

การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุก่อสร้างยิปซัมจากกากของเสียอุตสาหกรรม

นางสาวพิณศิริ อัมพพนาร์ตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF GYPSUM BUILDING MATERIALS  
FROM INDUSTRIAL WASTES

Miss Pinsiri Umponpanarat

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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุก่อสร้างยิปซัมจากกากของเสียอุตสาหกรรม
โดย	นางสาวพิณศิริ อัมพพนาวัฒน์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.วิทยา พันธุ์พา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร.วิทยา พันธุ์พา)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพ็ชรพงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.จิราภรณ์ เชื้อชลิตานุกุล)

พิณศิริ อัมพนพนารัตน์ : การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุก่อสร้างยิปซัมจากกากของเสียอุตสาหกรรม (PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF GYPSUM BUILDING MATERIALS FROM INDUSTRIAL WASTES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร.วิทยา พันธุ์พา, 124 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นองค์ประกอบของวัสดุก่อสร้างฐานยิปซัมที่ผลิตขึ้นโดยใช้ยิปซัมพลูแก๊สเป็นองค์ประกอบหลัก 75-90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รวมทั้งยังพัฒนาสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุก่อสร้างฐานยิปซัมที่ได้ ได้แก่ ความแข็งแรง ความคงทน การดูดซึมน้ำ ความต้านทานต่อการละลายน้ำ กากอุตสาหกรรมที่นำมาศึกษาร่วมกับยิปซัมพลูแก๊สมี 4 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ ตะกรันบ้ำหลอม เหล็กจากการรีไซเคิลเหล็กกล้า ตะกอนผงเศษแก้วจากโรงงานกระจกนิรภัย ไดอะทอไมต์จากการผลิตเบียร์ และกากตะกอนของเสียจากโรงงานผลิตกระเบื้องหลังคา จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ยิปซัมพลูแก๊สร่วมกับกากอุตสาหกรรมจะทำให้ได้วัสดุก่อสร้างฐานยิปซัมที่มีสมบัติแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกิดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก สัดส่วนของกากอุตสาหกรรมที่ใช้และธรรมชาติของกากเหล่านั้น ส่วนผสมยิปซัมที่มีกากตะกอนของเสียจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีเส้นใยเป็นตัวเสริมแรง การใส่ตะกรันบ้ำหลอมเหล็กทำให้สมบัติทางกายภาพและทางกลในช่วงแรก ต่อมาสมบัติเหล่านั้นจะแยกลงเนื่องจากการบวมตัวของตะกรัน ในขณะที่การเติมตะกอนผงเศษแก้วและไดอะทอไมต์ส่งผลทำให้ความแข็งแรงและความทนทานเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำและการละลายน้ำต่ำลง โดยเปรียบเทียบแล้วตะกอนผงเศษแก้วมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการละลายน้ำได้ดีกว่าไดอะทอไมต์

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2555 ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

# # 5372434223 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : GYPSUM / GLASS CULLET / DIATOMITE / LADLE FURNACE SLAG /  
ROOFTILE SLUDGE / WATER RESISTANCE

PINSIRI UMPONPANARAT : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF  
GYPSUM BUILDING MATERIALS FROM INDUSTRIAL WASTES. THESIS  
ADVISOR : ASST. PROF. WANTANEE BUGGAKUPTA, Ph.D., THESIS CO-  
ADVISOR : WITHAYA PANPA. Ph.D., 122 pp.

This project focused on a possibility of using industrial wastes as raw materials in gypsum-based building materials, which mainly consisted of 75-90 wt% flue-gas desulfurization, FGD gypsum, and other wastes. This work also aimed to improve their properties, including strength, durability, water absorption and water resistance. There were 4 more wastes employed in the gypsum mixtures: ladle furnace slag from steel recycling, glass cullet powder from safety glass finishing process, diatomite from brewery production and roof tile sludge from roof tile manufacturing process. The work found that the mixture between FGD gypsum and other wastes resulted in the gypsum-based bodies with various properties, depending on the degree of hydration and pozzolanic reactions as well as type, content and natures of the combined wastes. A mixture containing roof tile sludge gained higher strength due to its fibrous nature. Ladle furnace slag developed strength in the beginning and became poorer later due to water swelling. Meanwhile, glass cullet and diatomite led to superior strength and durability. Low water absorption and water resistance were also achieved. In comparison, glass cullet waste provided superior water resistance to the diatomite one.

Department : Materials Science ..... Student's Signature .....

Field of Study : Ceramic Technology ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012 ..... Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณความช่วยเหลือทั้งในทางด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.วิทยา พันธุ์พา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับคำแนะนำ คำชี้แนะในการช่วยแก้ไขปัญหา ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ แนวทางการดำเนินงานวิจัย และแง่คิดที่ดีต่อการทำงานวิจัย และการดำเนินชีวิตตลอดจนมอบโอกาสและประสบการณ์ที่ดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่ามาให้ความรู้ คำแนะนำและคำชี้แนะรวมทั้งการตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณชุมพล เพียรเจริญ ผู้จัดการฝ่ายผลิต บริษัท ปทุมธานีบริวเวอรี่ จำกัด คุณสุรศักดิ์ เชื้อกิตติศักดิ์ เจ้าหน้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ คุณชญานี แพรพริ้วงาม กรรมการและผู้จัดการทั่วไป บริษัท วิเอ็มซีเซฟตี้กลาส(ประเทศไทย)จำกัด ผู้อำนวยการโรงงานกระบือทองหลังคา โรงงานสระบุรี บริษัท กระบือทองกระดาษไทย จำกัด ที่เอื้อเฟื้อวัตถุดิบภาคตะกอนของเสียเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology) ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษา และทุนวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณวิรพงษ์ ครอบนอม คุณธนากร เทพามาตย์ คุณสมคิด ทองศิลา ที่กรุณาให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือและแนะนำการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือในการทำทดลอง แลกเปลี่ยนความคิดเห็น และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

สุดท้าย กราบขอบพระคุณครอบครัว ที่อบรมสั่งสอนและคอยเป็นกำลังใจ ทั้งมอบโอกาสและประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ช
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ .....	ณ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1. ยิปซัม .....	4
2.1.1. ประเภทและแหล่งที่มาของยิปซัม .....	4
2.1.2. องค์ประกอบและเฟสของยิปซัม .....	6
2.1.3. สมบัติของยิปซัม .....	9
2.1.4. ยิปซัมฟลูแก๊ส .....	10
2.2. วัสดุปอซโซลาน .....	13
2.2.1. แหล่งที่มาและประเภทของวัสดุปอซโซลาน .....	14
2.2.2. สมบัติของวัสดุปอซโซลาน .....	15
2.2.3. ปฏิกริยาปอซโซลาน .....	16
2.2.4. กากของเสียอุตสาหกรรมที่มีสมบัติปอซโซลาน .....	17
2.3. ตะกรันเหล็กกล้า .....	21
2.4. กากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคา .....	24
2.5. การประยุกต์ใช้กากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในการผลิตวัสดุก่อสร้างฐานยิปซัม .....	25

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	28
3.1. วัตถุประสงค์.....	28
3.2. วิธีการทดลอง .....	29
3.2.1. การออกแบบการทดลอง.....	29
3.2.2. การเตรียมวัตถุดิบ .....	32
3.2.3. การเตรียมชิ้นงาน.....	35
3.3. การตรวจสอบลักษณะเฉพาะ.....	36
3.3.1. สัณฐานวิทยา (Morphology).....	36
3.3.2. องค์ประกอบทางเฟส (Phase content) .....	37
3.3.3. องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) .....	37
3.3.4. การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle size distribution) .....	38
3.4. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกล .....	38
3.4.1. เวลาที่ใช้ในการก่อตัว (Setting time).....	38
3.4.2. ความแข็งแรงอัด (Compressive strength) .....	39
3.4.3. การดูดซึมน้ำ (Water absorption) .....	40
3.4.4. ความคงทน (Durability).....	40
3.4.5. ความทนทานต่อการละลายน้ำ (Water resistance).....	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล .....	42
4.1. ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ.....	42
4.1.1. องค์ประกอบทางเคมี.....	42
4.1.2. การกระจายขนาดอนุภาค .....	44
4.1.3. องค์ประกอบทางเฟส.....	45
4.1.4. สัณฐานวิทยา .....	47
4.2. ผลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ต่อสมบัติของยิปซัม (ระบบ HH-PC-CAC).....	48
4.3. ผลของกากตะกอนของเสียต่อสมบัติของยิปซัม (ระบบ HH-PC-CAC-RS).....	52
4.4. ผลของตะกอนน้ำหอมเหล็กต่อสมบัติของยิปซัม (ระบบ HH-PC-CAC-RS-LS) .....	54
4.4.1. เวลาที่ใช้ในการก่อตัว .....	55



4.4.2. ความแข็งแรงอัดและการดูดซึมน้ำ.....	56
4.4.3. ความคงทน .....	60
4.4.4. ความทนทานต่อการละลายน้ำ.....	61
4.5. ผลของตะกอนผงเศษแก้วต่อสมบัติของยิปซัม (ระบบ HH-PC-CAC-RS-GC).....	62
4.5.1. เวลาที่ใช้ในการก่อตัว .....	62
4.5.2. ความแข็งแรงอัดและการดูดซึมน้ำ.....	63
4.5.3. ความคงทน .....	67
4.5.4. ความทนทานต่อการละลายน้ำ.....	68
4.6. ผลของไดอะทอมไมต์ต่อสมบัติของยิปซัม (HH-PC-CAC-RS-DI) .....	69
4.6.1. เวลาที่ใช้ในการก่อตัว .....	69
4.6.2. ความแข็งแรงอัดและการดูดซึมน้ำ.....	70
4.6.3. ความคงทน .....	74
4.6.4. ความทนทานต่อการละลายน้ำ.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	77
5.1. สรุปผลการวิจัย .....	77
5.2. ข้อเสนอแนะ .....	78
รายการอ้างอิง .....	79
ภาคผนวก .....	84
ภาคผนวก ก .....	85
ภาคผนวก ข .....	101
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	109

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	ค่าตัวแปรในการทดสอบหาค่าประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer.....	37
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุบิชนิดต่างๆ .....	43
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุบิด้วยวิธีการใช้ตะแกรงร่อนแบบแห้ง .....	43
ตารางที่ 4.3	อัตราส่วนผสมส่วนผสมยิปซั่มในระบบ HH-PC-CAC .....	49
ตารางที่ 4.4	อัตราส่วนผสมส่วนผสมยิปซั่มที่มีส่วนผสมของตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก.....	55
ตารางที่ 4.5	เวลาที่ใช้ในการก่อตัวของชิ้นงานยิปซั่มที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสม .....	56
ตารางที่ 4.7	การทดสอบความคงทนของส่วนผสมยิปซั่มผสมตะกรันบ้ำาหลอมเหล็กที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน.....	61
ตารางที่ 4.8	การทดสอบความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซั่มที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน .....	61
ตารางที่ 4.9	อัตราส่วนผสมส่วนผสมยิปซั่มที่มีส่วนผสมของตะกอนเศษแก้ว.....	62
ตารางที่ 4.10	เวลาที่ใช้ในการก่อตัวของชิ้นงานยิปซั่มที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสม .....	63
ตารางที่ 4.12	การทดสอบความคงทนของส่วนผสมยิปซั่มที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสมและผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน .....	67
ตารางที่ 4.13	การทดสอบความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซั่มที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสมและผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน.....	68
ตารางที่ 4.14	อัตราส่วนผสมส่วนผสมยิปซั่มที่มีส่วนผสมของไดอะทอไมต์ .....	69
ตารางที่ 4.15	เวลาที่ใช้ในการก่อตัวของชิ้นงานยิปซั่มที่มีส่วนผสมของไดอะทอไมต์.....	70
ตารางที่ 4.17	การทดสอบความคงทนของส่วนผสมยิปซั่มที่มีไดอะทอไมต์เป็นส่วนผสมและผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน.....	75
ตารางที่ 4.18	การทดสอบความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซั่มที่มีไดอะทอไมต์เป็นส่วนผสมและผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน.....	76

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	แร่ยิปซัมธรรมชาติ .....5
ภาพที่ 2.2	(ก) ยิปซัมฟลูแก๊ส(Flue-gas gypsum) และ(ข) ฟอสฟอยิปซัม(Phosphogypsum).....6
ภาพที่ 2.3	ลักษณะผลึกของปีตาเฮมิไฮเดรต .....7
ภาพที่ 2.4	ลักษณะผลึกของแอลฟาเฮมิไฮเดรต.....8
ภาพที่ 2.5	ลำดับการเปลี่ยนแปลงเฟสของยิปซัม.....9
ภาพที่ 2.6	ลักษณะรูปร่างและขนาดของยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ .....12
ภาพที่ 2.7	(ก) การอัดแห้งเป็นก้อน Briquette ด้วยเครื่อง Roller press และ (ข) การทำงานของเครื่องไฮโดรไซโคลน..... 13
ภาพที่ 2.8	วัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ เรียงจากซ้ายไปขวา ถ้ำลอย(Class C) ดินขาวเผา ซิลิกาฟุ่ม ถ้ำลอย(Class F) ตะกรันและหินดินดานเผา.....14
ภาพที่ 2.9	ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า.....23
ภาพที่ 2.10	ตะกรันเบาหลอมเหล็ก .....24
ภาพที่ 2.11	โครงสร้างจุลภาคของไดอะทอไมต์ .....20
ภาพที่ 3.1	การเตรียมวัตถุดิบตั้งต้น .....30
ภาพที่ 3.2	การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบสมบัติ .....31
ภาพที่ 3.3	(ก) ยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และ (ข)ผงปีตาเฮมิไฮเดรตสังเคราะห์จากยิปซัมฟลูแก๊ส.....33
ภาพที่ 3.4	(ก) กากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคา และ (ข)กากตะกอนของเสียที่ผ่านการอบและคัดกรองขนาด.....33
ภาพที่ 3.5	(ก)ก้อนตะกรันเบาหลอมเหล็กจากโรงงานหลอมเหล็ก และ (ข) ผงตะกรันเบาหลอมเหล็กจากโรงงานหลอมเหล็กที่ได้หลังจากการอบ .....34
ภาพที่ 3.6	(ก) ก้อนตะกอนผงเศษแก้วจากโรงงานกระจกแก้ว และ (ข) ตะกอนผงเศษแก้วจากโรงงานกระจกแก้ว .....35
ภาพที่ 3.7	ผงไดอะทอไมต์.....35
ภาพที่ 3.8	เครื่อง Vicat apparatus .....39
ภาพที่ 3.9	เครื่อง Universal Testing Machines รุ่น 5882.....40
ภาพที่ 4.1	การกระจายขนาดสะสมของขนาดอนุภาคเฉลี่ยของกากแต่ละชนิด .....44

ภาพที่ 4.2	องค์ประกอบทางเฟสของผงวัตถุดิบ ก) ยิปซัมฟลูแก๊ส ข) ปีตาเฮมิไฮเดรต ค) กากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคา ง) ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก จ) ตะกอนผงเศษแก้ว และ ฉ) ไดอะทอไมต์ .....	46
ภาพที่ 4.3	สัณฐานวิทยาของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ก) ยิปซัมฟลูแก๊ส ข) ปีตาเฮมิไฮเดรต ค) ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก ง) ตะกอนผงเศษแก้ว จ) ไดอะทอไมต์ และ ฉ) กากตะกอนของเสีย.....	47
ภาพที่ 4.4	กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงอัดของชิ้นงานที่เตรียมในระบบ HH-PC-CAC ที่การบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน .....	49
ภาพที่ 4.5	กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมในระบบ HH-PC-CAC ที่การบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน .....	50
ภาพที่ 4.6	ภาพถ่ายชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ก) 1 เปอร์เซ็นต์ ข) 3 เปอร์เซ็นต์ และ ค) 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน .....	51
ภาพที่ 4.7	องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน .....	52
ภาพที่ 4.8	กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงอัดของชิ้นงานที่เตรียมในระบบ HH-PC-CAC-RS ที่การบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน.....	53
ภาพที่ 4.9	กราฟเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมในระบบ HH-PC-CAC-RS ที่การบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน.....	54
ภาพที่ 4.10	ความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก .....	57
ภาพที่ 4.11	โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมยิปซัมที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ที่ขนาดกำลังขยาย 5000 เท่า ก) ตะกรันบ้ำาหลอม 5 เปอร์เซ็นต์ ข) ตะกรันบ้ำาหลอม 7.5 เปอร์เซ็นต์ ค) ตะกรันบ้ำาหลอม 10 เปอร์เซ็นต์ และ ง) ตะกรันบ้ำาหลอม 15 เปอร์เซ็นต์ .....	58
ภาพที่ 4.12	องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก 7.5 เปอร์เซ็นต์ .....	59
ภาพที่ 4.13	โครงสร้างจุลภาคและการทดสอบ Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) ของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก 7.5 เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ก) โครงสร้างจุลภาค ข) บริเวณที่ทำกรวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และ ค) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ .....	59
ภาพที่ 4.14	การดูดซึมน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก .....	60

ภาพที่ 4.15	ความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสม .....	64
ภาพที่ 4.16	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานยิปซัมที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ที่ขนาดกำลังขยาย 10000 เท่า ก) ตะกอนผงเศษแก้ว 5 เปอร์เซ็นต์ ข) ตะกอนผงเศษแก้ว 7.5 เปอร์เซ็นต์ 8) ตะกอนผงเศษ แก้ว 10 เปอร์เซ็นต์ และ ง) ตะกอนผงเศษแก้ว 15 เปอร์เซ็นต์ .....	65
ภาพที่ 4.17	องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมตะกอนผงเศษแก้ว 15 เปอร์เซ็นต์ .....	65
ภาพที่ 4.18	การดูดซึมน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสม .....	66
ภาพที่ 4.19	โครงสร้างจุลภาคและการทดสอบ Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) ของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกอนเศษแก้ว 10 เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ก) โครงสร้าง จุลภาค ข) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และ ค) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบ ของธาตุ .....	66
ภาพที่ 4.20	ความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีไดอะทอไมต์เป็นส่วนผสม .....	71
ภาพที่ 4.21	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานยิปซัมที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ที่ขนาดกำลังขยาย 10000 เท่า ก) ไดอะทอไมต์ 5 เปอร์เซ็นต์ ข) ไดอะทอไมต์ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ค) ไดอะทอไมต์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ ง) ไดอะทอไมต์ 15 เปอร์เซ็นต์ .....	72
ภาพที่ 4.22	องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมไดอะทอไมต์ 10 เปอร์เซ็นต์ .....	72
ภาพที่ 4.23	การดูดซึมน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีไดอะทอไมต์เป็นส่วนผสม .....	73
ภาพที่ 4.24	โครงสร้างจุลภาคและการทดสอบ Energy dispersion spectroscopy (EDS) ของ ส่วนผสมยิปซัมที่มีไดอะทอไมต์ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน และที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก) โครงสร้างจุลภาค ข) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และ ค) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ .....	74

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาคอุตสาหกรรมมีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติจำนวนมากมหาศาลเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งนอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการแล้วยังเกิดผลพลอยได้ในรูปแบบต่างๆ จำนวนหนึ่ง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอาจทำให้เกิดมลพิษทางน้ำ อากาศ และ ดิน ด้วยเหตุนี้จึงก่อให้เกิดแรงกระตุ้นในการหาแหล่งทรัพยากรทดแทนวัตถุดิบธรรมชาติ การนำกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

ยิปซัมเป็นที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตวัสดุก่อสร้าง สามารถเตรียมได้จากแร่ยิปซัมธรรมชาติหรือสังเคราะห์จากวัตถุดิบอื่น วัสดุก่อสร้างยิปซัมมีสมบัติที่สำคัญประกอบด้วย ความทนทานต่อความร้อน น้ำหนักเบา และความแข็งแรงสูง การใช้งานยิปซั่มมักใช้ผสมกับเม็ดปูนซีเมนต์ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และบดเพื่อหน่วงเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือนำยิปซัมไปผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเฮมิไฮเดรต ยิปซัมเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุก่อสร้างที่ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตค่อนข้างต่ำ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลิตภัณฑ์ยิปซัมใช้คุณสมบัติการผลิตในช่วงประมาณ 130-160 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่ในช่วงประมาณ 1400-1500 องศาเซลเซียส<sup>(2,3)</sup>

ยิปซัมฟลูแก๊ส (Flue-gas desulfurization gypsum , FGD gypsum) เป็นกากของเสียชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นหลักในการผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างยิปซัม กากของเสียนี้เกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหิน ยิปซัมฟลูแก๊สผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์จนเกิดเฟสเฮมิไฮเดรตซึ่งใช้พลังงานในกระบวนการผลิตค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามข้อเสียของผลิตภัณฑ์ยิปซัมคือ ความต้านทานการละลายน้ำไม่ดีนัก ทำให้สามารถใช้งานก่อสร้างได้อย่างจำกัด จึงเกิดมีความพยายามที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการเติมวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ ซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์ อีกทั้งซิลิกา และอะลูมินา เป็นองค์ประกอบในวัสดุปอซโซลาน โดยออกไซด์สำคัญเหล่านี้นอกจากจะได้จากวัตถุดิบธรรมชาติ ยังสามารถได้จากกากของเสียที่เกิดขึ้นจาก

อุตสาหกรรม ซึ่งกากของเสียดังกล่าวเกิดขึ้นในอุตสาหกรรมปริมาณมากและจำเป็นต้องมีการจัดการที่เหมาะสม หากมีการนำกากของเสียเหล่านี้ไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน นอกจากจะเป็นการลดปริมาณของกากของเสียเหล่านี้แล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่ารวมไปถึงเป็นแหล่งทรัพยากรแหล่งใหม่สำหรับการผลิตวัสดุก่อสร้างด้วย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากอุตสาหกรรม ได้แก่ ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็กจากโรงงานหลอมเศษเหล็ก กากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคา ตะกอนผงเศษแก้วจากโรงงานรีไซเคิลแก้ว ไตอะทอไมต์จากโรงงานเบียร์ และ ยิปซัมฟลูแก๊สจากอุตสาหกรรมโรงผลิตไฟฟ้ามาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุก่อสร้างฐานยิปซัมที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่เหมาะสม อีกทั้งยังศึกษาวิธีการพัฒนาสมบัติทางกายภาพและทางกลของชิ้นงานที่ได้

## 1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำยิปซัมฟลูแก๊ส และกากของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ ตะกอนผงเศษแก้ว ไตอะทอไมต์ และตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก ตะกอนของเสียจากการผลิตกระเบื้องหลังคามาผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม

1.2.2 พัฒนาสมบัติของวัสดุที่ได้โดยเฉพาะความต้านทานต่อการละลายน้ำและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ รวมทั้งศึกษาการพัฒนาความต้านทานของวัสดุก่อสร้างฐานยิปซัมที่ผลิตจากกากอุตสาหกรรม

## 1.3. ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะเตรียมและศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุก่อสร้างฐานยิปซัมที่ทำจากยิปซัมฟลูแก๊สเป็นองค์ประกอบหลัก ศึกษาผลของการเติมกากอุตสาหกรรมในส่วนผสมของยิปซัมอันได้แก่ ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็กจากการรีไซเคิลเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า กากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคา ตะกอนผงเศษแก้วจากโรงงานกระจก และไตอะทอไมต์จากโรงงานผลิตเบียร์ต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงกดอัด การดูดซึมน้ำ ความทนทาน ความต้านทานต่อการละลายน้ำและโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมยิปซัมที่ได้

#### 1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุก่อสร้างฐานยึดที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่เหมาะสมจากกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นหัวข้อหลัก 3 หัวข้อ โดยหัวข้อแรกกล่าวถึงแหล่งที่มา สมบัติทั่วไปและประเภทของวัสดุก่อสร้างฐานยิปซัม หัวข้อที่สองอธิบายลักษณะของวัสดุปอซโซลาน แหล่งที่มา และสมบัติ ของวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ตะกรันเบาหลอมเหล็ก ตะกอนผงเศษแก้ว ไดอะทอมไมต์ และกากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคา หัวข้อสุดท้ายกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานยิปซัมและกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

#### 2.1. ยิปซัม (gypsum)

ยิปซัมเป็นแร่ชนิดหนึ่งที่เป็นผลึกของสารประกอบกลุ่มแคลเซียมซัลเฟตและน้ำ พบในธรรมชาติ และสามารถสังเคราะห์ได้ ส่วนมากไม่มีสี แต่อาจพบชนิดที่มีสี เช่น สีเทา สีแดง เป็นต้น เนื่องจากสิ่งเจือปนในยิปซมนั้น ยิปซัมมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้าง การทำแม่แบบขึ้นรูปชิ้นงานในอุตสาหกรรมเซรามิก และใช้เป็นตัวหน่วงปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงสมบัติของยิปซัมจนสามารถใช้ในการทำแม่แบบวัสดุการแพทย์ และทันตกรรม เช่น การทำเฝือก แบบพิมพ์ฟันปลอม เป็นต้น

##### 2.1.1. ประเภทและแหล่งที่มาของยิปซัม

ยิปซัมสามารถแบ่งเป็นประเภทหลักได้ 2 ประเภท<sup>(1)</sup> คือ ยิปซัมธรรมชาติ (Natural gypsum) และ ยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic gypsum)

##### ก) ยิปซัมธรรมชาติ (Natural gypsum)

แร่ยิปซัม หรือเกลือซี้ด เป็นแร่ที่เกิดจากการที่น้ำทะเลอิมตัวพบในบริเวณทะเลตื้นเขิน และเกิดการระเหยจนทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นชั้น ยิปซัมชนิดนี้เป็นเกลือแคลเซียมที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบทางเคมีอยู่ 2 โมเลกุล มีสูตรทางเคมีดังนี้  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งแหล่งแร่ยิปซัมในแต่ละที่จะส่งผลต่อความบริสุทธิ์ โครงสร้าง สีของแร่ยิปซัมที่แตกต่างกันขึ้นกับปริมาณสิ่งเจือปนในแร่ยิปซัม ลักษณะโดยทั่วไปของแร่ยิปซัมมีความแวววาวคล้ายแก้ว หรือมุก เนื้อโปร่งใสจนกระทั่งโปร่งแสง ดังแสดงในภาพที่ 2.1<sup>(1)</sup>



ภาพที่ 2.1 แร่ยิปซัมธรรมชาติ <sup>(1)</sup>

ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ยิปซัมเริ่มจากการขุดเจาะฝังระเบิดในแหล่งยิปซัม เพื่อให้แร่ยิปซัมถูกระเบิดออกเป็นก้อนขนาดใหญ่ ก่อนจะลำเลียงโดยสายพานไปยังโรงย่อย เพื่อทำการลดขนาดจนมีขนาดเล็กตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการแต่งแร่ เพื่อลดปริมาณสิ่งเจือปนที่อาจเจือปนมากับแร่ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ดิน โดโลไมต์ ซิลิโคนไดออกไซด์ สารประกอบของเหล็ก เป็นต้น โดยใช้การล้างออกด้วยน้ำจนได้แร่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีและขนาดที่สม่ำเสมอ ก่อนทำการแคลไซน์และเตรียมนำไปใช้งานต่อไป

#### ข) ยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic gypsum)

ยิปซัมกลุ่มนี้มีการพัฒนามาจากการสังเคราะห์กากของเสีย หรือวัสดุพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตยิปซัม ซึ่งยิปซัมที่ได้มีคุณภาพดี ไม่ด้อยไปกว่ายิปซัมที่ได้จากธรรมชาติ และสามารถพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีกว่ายิปซัมธรรมชาติได้ โดยวัตถุดิบที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ยิปซัมประเภทนี้ในปัจจุบัน <sup>(1, 4)</sup> ได้แก่ ยิปซัมฟลูแก๊ส (Flue-gas gypsum) และฟอสฟอยิปซัม (Phosphogypsum) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 (ก) ยิปซัมฟลูแก๊ส(Flue-gas gypsum) และ(ข) ฟอสฟอยิปซัม(Phosphogypsum) <sup>(1, 4)</sup>

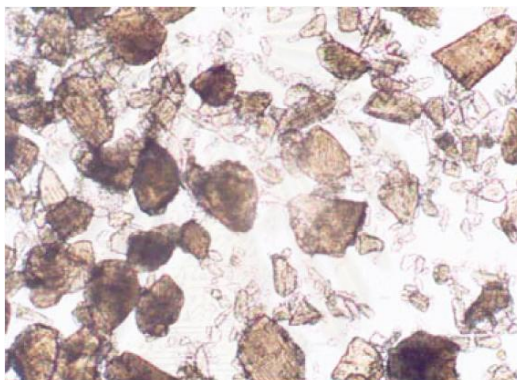
### 2.1.2. องค์ประกอบและเฟสของยิปซัม

ยิปซัมคือแคลเซียมซัลเฟตซึ่งมีโมเลกุลของน้ำรวมอยู่ด้วย องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) 46.5% แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) 32.6% หรือ แคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) 79% และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 20.9% โดยแบ่งตามเฟสของยิปซัมซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากอุณหภูมิ ความดัน และความชื้น ดังต่อไปนี้

ก) แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (Calcium sulfate dihydrate :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นเฟสยิปซัมที่สามารถคงตัวได้ที่ช่วงอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส ณ ความดันปกติ ไม่เกิดปฏิกิริยาเมื่อมีความชื้น จึงเป็นเฟสที่นิยมใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น การขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์ การใช้ประดับตกแต่ง และใช้เป็นส่วนผสมในสี เป็นต้น

ข) แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (Calcium sulfate hemihydrates :  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นเฟสที่เกิดเมื่อไดไฮเดรต (Dihydrate) ได้รับความร้อน มีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบทางเคมี 1/2 โมเลกุล เฟสประเภทนี้สามารถแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

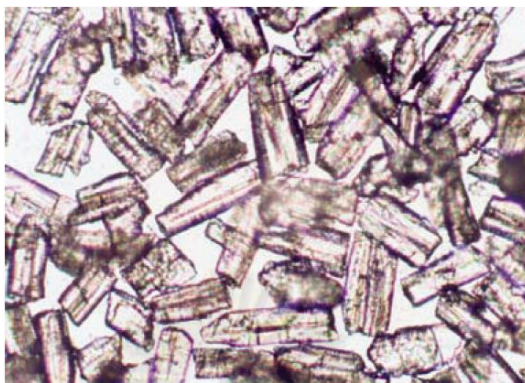
1) บีตาเฮมิไฮเดรต ( $\beta$ -hemihydrate) หรือ Plaster of Paris เป็นเฟสที่ได้จากการอบยิปซัมในช่วงอุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียส โดยโครงสร้างของผลึกจะจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบ คล้ายก้อนฟองน้ำ มีรูพรุน ทำให้มีความหนาแน่นน้อย การกระจายตัวของอนุภาคมีช่วงกว้าง มีลักษณะของรูปผลึกในกลุ่ม Orthorhombic เป็นขนาดเล็กมากมาเกาะกัน ลักษณะเป็นแผ่น ผิวขรุขระ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 และมีความสามารถในการละลายสูงกว่า แอลฟาเฮมิไฮเดรต <sup>(1, 5)</sup>



ภาพที่ 2.3 ลักษณะผลึกของปีตาเฮมิไฮเดรต<sup>(3)</sup>

ในภาคอุตสาหกรรมมีการผลิตยิปซัมเฟสนี้จากยิปซัมธรรมชาติ ด้วยการใช้เตาอบแบบต่างๆ ทั้งเตาหมุนแบบให้ความร้อนโดยตรง (Directly fired rotary kiln) เป็นการเผาโดยไม่ต้องผ่านการอบแห้ง เตาที่ใช้จะแคลไซน์เม็ดของแร่ยิปซัม โดยจะส่งผ่านแร่มาทางสายพานให้เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันหรือสวนทางกันกับแก๊สร้อนเข้าไปในเตาที่บุด้วยแผ่นเหล็กกล้า ซึ่งเป็นการส่งถ่ายความร้อนโดยตรงแก่ก้อนแร่ โดยเวลาจะแปรผันโดยตรงกับขนาดของก้อนแร่ ยิปซัมที่ได้เมื่อผ่านการแคลไซน์ที่สมบูรณ์จะมีสมบัติที่สม่ำเสมอ ส่วนเตาเผาอีกประเภทคือเตาเผาทางอ้อม เป็นระบบเตาแบบเคตเทิล (Indirectly heated kettles) เป็นเตาที่ให้ความร้อนแก่ก้อนแร่ทางอ้อม โดยการให้ความร้อนจากภายนอกแก่ก้อนแร่ จึงต้องทำการอบแห้ง และบดให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร<sup>(1)</sup> ก่อนจะส่งเข้าเตาจากด้านบน ขณะที่เกิดการดีไฮเดรตของยิปซัม ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะลอยตัวสู่ด้านบนสวนทางกับยิปซัม เกิดเป็นกลุ่มก้อนไอน้ำ ซึ่งช่วยให้การส่งถ่ายความร้อนดียิ่งขึ้น และเป็นข้อดีของระบบเตาประเภทนี้ คือ มีฝุ่นละอองออกมากับแก๊สเสียน้อย และสามารถเลือกได้ทั้งแบบแนวตั้งและแนวนอน

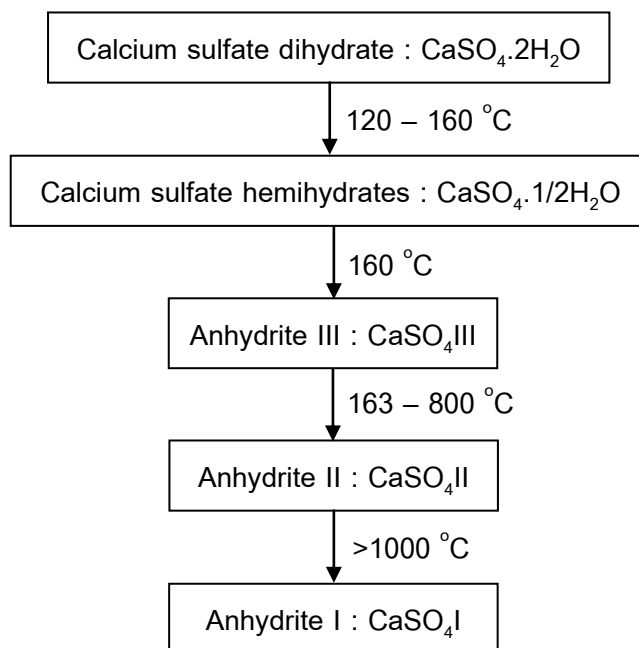
2) แอลฟาเฮมิไฮเดรต ( $\alpha$ -hemihydrate) เป็นเฟสที่มีผลึกลักษณะเป็นรูปเข็ม จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ มีลักษณะผลึกในกลุ่ม Trigonal เป็นผลึกรูปแท่งสมบูรณ์ โปร่งใส มีขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ทำให้จับตัวกันแน่น ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณน้ำในการผสมน้อยกว่าปีตาเฮมิไฮเดรต และมีความแข็งแรงมากกว่าปีตาเฮมิไฮเดรต



ภาพที่ 2.4 ลักษณะผลึกของแอลฟาเฮมิไฮเดรต<sup>(3)</sup>

การผลิตแอลฟาเฮมิไฮเดรตสามารถทำได้หลายวิธีตัวอย่างเช่น การแคลไซน์ยิปซัมภายใต้ความดันไอน้ำในหม้ออบความดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 120-150 องศาเซลเซียส หรือการขจัดน้ำ (Dehydration) ในยิปซัมด้วยโซเดียม (Sodium succinate) 0.5% โดยน้ำหนักหรือน้อยกว่าในหม้ออบความดัน หรือการขจัดน้ำในยิปซัมด้วยหม้อต้มที่มีแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักในน้ำ และกระบวนการให้ความร้อนกับแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (Calcium sulfate hemihydrate) ที่ความดันปรกติในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1-7 N เป็นเวลา 5-120 นาที จนสารละลายมีอุณหภูมิถึงจุดเดือด แต่ต้องทำการกวนและเป่าลมผ่านสารละลายตลอดเวลาก็เป็นอีกวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์แอลฟาเฮมิไฮเดรตยิปซัม<sup>(1, 4, 5)</sup>

3) แอนไฮไดรต์ (Anhydrite :  $\text{CaSO}_4$ ) เป็นเฟสที่เกิดเมื่อเฮมิไฮเดรตได้รับความร้อนสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ เฟส Anhydrite I พบที่อุณหภูมิสูงกว่า 1180 องศาเซลเซียส<sup>(1)</sup> ซึ่งเฟสนี้ไม่สามารถผลิตให้มีความเสถียรได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ ประเภทต่อมาคือ Anhydrite II (Insoluble anhydrite) เป็นเฟสที่เกิดเมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 163-800 องศาเซลเซียส มีลักษณะรูปผลึกเป็น Orthorhombic ประเภทสุดท้ายคือ Anhydrite III (Soluble anhydrite) เป็นเฟสที่ไม่เสถียร จึงสามารถเปลี่ยนแปลงกลับเป็นเฟสเฮมิไฮเดรตได้ง่ายเมื่อได้รับความชื้น มีลักษณะรูปผลึกแบบ Hexagonal เกิดเมื่อให้ความร้อนในช่วง 140 องศาเซลเซียส โดยลำดับการเปลี่ยนแปลงเฟสของยิปซัมจากเฟสไดไฮเดรตเป็นแอนไฮไดรต์เมื่อได้รับความร้อน และความดันในช่วงต่างๆ สามารถแสดงได้ดังแผนภาพในภาพที่ 2.5

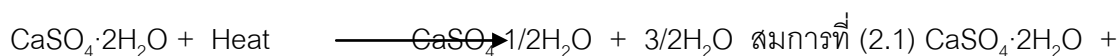


ภาพที่ 2.5 ลำดับการเปลี่ยนแปลงเฟสของยิปซัม<sup>(1)</sup>

### 2.1.3. สมบัติของยิปซัม

ยิปซัมเป็นวัสดุอุตสาหกรรมที่มีประโยชน์มาก มีสมบัติที่สามารถสูญเสียน้ำในผลึกทันทีที่ได้รับความร้อน และเมื่อเติมน้ำหรือได้รับความชื้นในยิปซัมที่ผ่านการเผาแคลไซน์ จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเป็นไดไฮเดรตที่ก่อตัวได้ดังสมการที่ 2.1-2.4<sup>(1,6)</sup>

#### Dehydration



#### Rehydration



ยิปซัมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ จนเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส ยิปซัมเปลี่ยนเฟสไดไฮเดรตเป็นเฟสเฮมิไฮเดรตและน้ำเมื่อได้รับความร้อน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ดีไฮเดรชัน (Dehydration) ส่วนสมการปฏิกิริยาผันกลับแสดงปฏิกิริยาของยิปซัมเฟสเฮมิไฮเดรตได้รับ

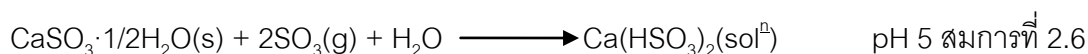
ความชื้น หรือน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นยิปซัมไดไฮเดรตและคายความร้อน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า รีไฮเดรชัน (Rehydration) ยิปซัมส่วนใหญ่จึงเกิดการก่อตัวและแข็งตัวเมื่อผ่านการทำปฏิกิริยากับ น้ำ โดยจะมีความหนาแน่นต่ำ และปริมาตรรูพรุนสูง ส่งผลให้มีการนำความร้อนต่ำ และด้วยขนาด ของรูพรุนที่ใหญ่ จึงทำให้การดูดซึม และการระเหยของน้ำได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามยิปซัมไม่ สามารถทนอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสูงหรืออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียสได้ เพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของยิปซัมจนเกิดความเสียหายได้

#### 2.1.4. ยิปซัมฟลูแก๊ส (Flue gas gypsum)

ยิปซัมฟลูแก๊สเป็นยิปซัมสังเคราะห์ประเภทหนึ่งซึ่งได้จากการสังเคราะห์ผลพลอยได้จาก กระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมันและ ถ่านหิน โดยเฉพาะจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งมีปริมาณมากในแต่ละปี ในปี ค.ศ.1983 ประเทศเยอรมนีตะวันตกได้เริ่มมีการนำเอาระบบเอฟจีดี (Flue gas desulfurizer : FGD) มาใช้ในการ กำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยสารละลายหินปูน (Limestone) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่ pH 7-8 และได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งสีน้ำตาล ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ดังสมการที่ 2.5<sup>(1,3)</sup>



เมื่อ pH ลดลงต่ำกว่า 5 จะทำให้แคลเซียมซัลไฟต์ (Calcium Sulfite) เปลี่ยนเป็น แคลเซียมซัลไฟต์ที่ละลายน้ำได้ (Soluble Calcium Bisulfite ( $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ )) ที่ละลายน้ำได้ ดัง แสดงในสมการที่ 2.6



Calcium Bisulfite สามารถถูกออกซิไดซ์ได้โดยง่ายด้วยออกซิเจนจากอากาศกลายเป็น ยิปซัมฟลูแก๊สดังแสดงในสมการที่ 2.7



กรดซัลฟิวริก( $H_2SO_4$ ) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยานี้จะทำปฏิกิริยากับหินปูนที่เหลือเกิดเป็นยิปซัม ดังสมการที่ 2.8

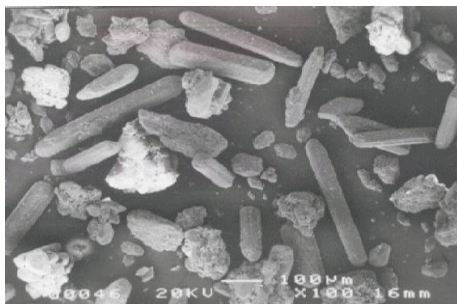


ผลึกยิปซัมที่ได้จะโตขึ้นและจับตัวกันแน่นเป็นผง แขนงลอยในน้ำและสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการใช้ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) และตามด้วยเครื่องกรองสูญญากาศ (Vacuum drum filter) หรือเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ยิปซัมที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีน้ำอยู่น้อย และมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งสามารถเขียนปฏิกิริยารวมได้ดังสมการที่ 2.9



ในประเทศไทยยิปซัมฟลูแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่มาจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะปีละประมาณ 3 ล้านตัน<sup>(4)</sup> จากการศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติของยิปซัมฟลูแก๊สพบว่ายิปซัมฟลูแก๊สมีปริมาณของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตประมาณร้อยละ 93 มีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น โดโลไมต์ ( $CaMg(CO_3)_2$ ) ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) เถ้าลอย (Fly ash) และสารประกอบเหล็กซึ่งทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีสี ลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคแตกต่างกัน โดยลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคยิปซัมฟลูแก๊สแสดงดังภาพที่ 2.6<sup>(4)</sup> เพราะเหตุนี้จึงทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีข้อจำกัดในการนำมาใช้ทดแทนยิปซัมธรรมชาติโดยตรง แต่จากการศึกษาวิจัยพบว่าหากนำยิปซัมฟลูแก๊สไปผ่านกระบวนการบางอย่าง เช่น การล้าง การอบแห้ง หรือการทำให้กลุ่มของเม็ดอนุภาคเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ (Agglomeration) ซึ่งเป็นการทำให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีสมบัติที่ดีขึ้นจนสามารถนำมาใช้ทดแทนยิปซัมจากธรรมชาติได้<sup>(4)</sup>





ภาพที่ 2.6 ลักษณะรูปร่างและขนาดของยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ<sup>(4)</sup>

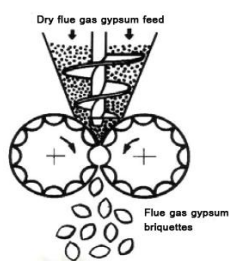
ภาคอุตสาหกรรมมีการปรับปรุงสมบัติของยิปซัมฟลูแก๊สเพื่อใช้ทดแทนยิปซัมธรรมชาติ ด้วยกระบวนการต่างๆ มากมาย กระบวนการล้างเป็นวิธีหนึ่งในการพัฒนายิปซัมฟลูแก๊ส จากการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งการล้างออกเป็น 2 วิธี<sup>(4)</sup> วิธีแรกคือการใช้ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบันเพราะเป็นวิธีที่สามารถล้างได้ต่อเนื่องและในปริมาณมาก โดยใช้หลักการแรงหมุนในการเพิ่มอัตราการตกของอนุภาค แรงที่เกิดขึ้นมีสองแรงซึ่งอยู่ตรงข้ามกัน คือ แรงหนึ่งเป็นแรงหมุน ส่วนอีกแรงเป็นแรงจุด แรงทั้งสองสามารถทำให้เกิดการแยกของอนุภาค โดยขึ้นกับขนาด และความถ่วงจำเพาะของอนุภาค อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และความถ่วงจำเพาะมากจะตกเร็วกว่าและวิ่งไปยังผนังของไฮโดรไซโคลนตกลงด้านล่าง แต่ด้วยแรงจุดจะทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กและความถ่วงจำเพาะน้อยเคลื่อนตัวไปสู่แกนกลางของไฮโดรไซโคลนและถูกพัดออกไป ดังแสดงในภาพที่ 2.7<sup>(4)</sup>

ส่วนการล้างอีกวิธีคือการล้างโดยใช้กรดและการตกตะกอน กรดที่ใช้คือกรดซัลฟูริก การเติมกรดนี้เพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปนมาให้เปลี่ยนเป็นยิปซัม และเพื่อละลายเหล็กที่เป็นคอลลอยด์ ซึ่งไม่สามารถแยกออกได้ด้วยเครื่องแยกแม่เหล็ก จากนั้นจึงทำการตกตะกอนเพื่อแยกยิปซัมออก โดยยิปซัมที่ผ่านการล้างวิธีนี้จะมีควมบริสุทธิ์และสะอาดมากขึ้น แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดที่ได้ยิปซัมในปริมาณน้อย จึงใช้ในระดับน้อยปฏิบัติการเท่านั้น<sup>(4)</sup>

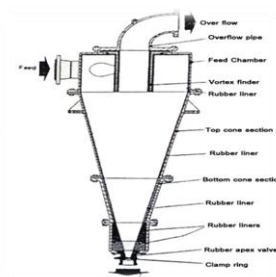
นอกจากกระบวนการล้าง การอบแห้งเป็นอีกวิธีหนึ่งในการปรับปรุงยิปซัมฟลูแก๊ส เพราะในยิปซัมฟลูแก๊สจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 10 ซึ่งเกิดจากการดูดซับบริเวณพื้นผิว และมีความชื้นในตัวยิปซัมเองอีกประมาณร้อยละ 20 โดยแทรกอยู่ในโครงสร้าง การอบแห้งจึงเป็นการกำจัดน้ำส่วนที่พื้นผิวออก ก่อนทำการแคลไซต์เพื่อกำจัดน้ำในโครงสร้างยิปซัม อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ที่ต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส แต่ต้องใช้เวลาในการกำจัดน้ำส่วนนี้ จึงมีการศึกษาเพื่อลดเวลาและพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการนี้ พบว่าการอบแห้งด้วยวิธีการใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสผ่านเพียง 8-13 วินาทีสามารถกำจัดปริมาณน้ำส่วนนี้ได้ โดย

ไม่สูญเสียไอน้ำภายในโครงสร้างจนเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของยิปซัมก่อนการแคลไซน์ขึ้นขณะอบแห้ง<sup>(4)</sup>

สุดท้ายเป็นกระบวนการทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคอย่างหลวมๆซึ่งเป็นกระบวนการอัดให้ยิปซัมฟลูแก๊สมีสสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับยิปซัมธรรมชาติ โดยวิธีที่นิยมในปัจจุบันคือ การอัดแห้งเป็นก้อน (Briquette) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 เพราะจะทำให้ยิปซัมมีความหนาแน่นปรากฏสูง สะดวกในการเก็บรักษา และง่ายต่อการใช้งานกว่าวิธีการอื่น เพราะไม่จำเป็นต้องเติมสารจำพวกสารช่วยการยึดเกาะลงไปเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง<sup>(4)</sup>



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.7 (ก) การอัดแห้งเป็นก้อน Briquette ด้วยเครื่อง Roller press และ (ข) การทำงานของเครื่องไฮโดรไซโคลน<sup>(4)</sup>

## 2.2. วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการปรับปรุงสมบัติของปูนซีเมนต์และคอนกรีต อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนของการใช้คอนกรีตอีกด้วย ในอดีตชาวกรีกและชาวโรมันได้ใช้เถ้าภูเขาไฟที่บดละเอียดจากหมู่บ้านปอซซูโโอลิ ซึ่งอยู่ใกล้กับภูเขาไฟวิซุเวียสผสมกับยิปซัมและทรายทำให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงมากขึ้นกว่ายิปซัมในสมัยนั้น เรียกวัสดุที่มีความละเอียดและมีองค์ประกอบของธาตุซิลิกาและอะลูมินาผสมคล้ายกับเถ้าภูเขาไฟนี้ว่า “วัสดุปอซโซลาน”<sup>(5)</sup> วัสดุปอซโซลานมักใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์และคอนกรีต เพราะสามารถเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน และปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตได้โดยง่าย ซึ่งในประเทศไทยมีแหล่งวัสดุปอซโซลานมากมาย เช่น ซิลิกาฟุ้ง ตะกั่วหินเตาถลุงเหล็ก เถ้าชานอ้อย แต่ที่นิยมใช้กัน คือ เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ

### 2.2.1. แหล่งที่มาและประเภทของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานหมายถึงวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ตามมาตรฐาน ASTM C618<sup>(7)</sup> ซึ่งไม่มีสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้ามีความละเอียดสูงและมีความชื้นที่เพียงพอสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติและสามารถทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานได้

ประเภทของวัสดุปอซโซลานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มาจากแหล่งที่มา 2 แหล่ง ได้แก่ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) เช่น เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ เป็นต้นดังแสดงในภาพที่ 2.8 โดยวัสดุเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อนนำไปใช้ เช่น การบด การเผา และการทำให้แห้ง เพื่อให้วัสดุปอซโซลานมีความสม่ำเสมอและสมบัติที่ดีเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ปัจจุบันมีการนำวัสดุเหล่านี้ไปใช้ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่มีผลกระทบกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำให้น้อยลง ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตกับวัสดุและสามารถช่วยควบคุมการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับต่างในวัสดุได้อีกด้วย<sup>(5)</sup> นอกจากนี้ยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกทางหนึ่งเนื่องจากราคาที่ต่ำกว่าวัสดุประเภทอื่นๆ วัสดุปอซโซลานอีกประเภทหนึ่งคือวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) ได้แก่ เถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าลอยมีอนุภาคของซิลิกาที่มีลักษณะเป็นทรงกลมประมาณ 66-68 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วัสดุปอซโซลานบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยากับเม็ดปูนขาวและต่างได้อย่างรวดเร็วเกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการยึดประสาน หรือทำปฏิกิริยากับน้ำจนแข็งตัวได้เช่นกัน



ภาพที่ 2.8 วัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ เรียงจากซ้ายไปขวา เถ้าลอย(Class C) ดินขาวเผา ซิลิกาฟุ้ง เถ้าลอย(Class F) ตะกรันและหินดินดานเผา<sup>(8)</sup>

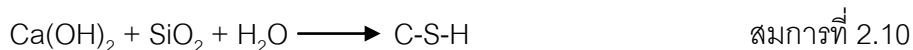
วัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งคุณภาพเป็น 3 ประเภทคือ<sup>(5, 8)</sup> ชั้นคุณภาพ N เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ผ่านการเผาเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ มีผลรวมขององค์ประกอบทางเคมีของซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ ไม่น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการสูญเสียเนื่องจากการเผาไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ประเภทต่อมาคือ ชั้นคุณภาพ F เป็นกลุ่มของเถ้าลอยที่ได้จากการเผากากหินบิทุมินัสหรือกากหินแอนทราไซต์ มีผลรวมขององค์ประกอบทางเคมีของซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ ไม่น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและการสูญเสียเนื่องจากการเผาไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ประเภทสุดท้ายคือชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าที่ได้จากการเผากากหินลิกไนต์หรือกากหินซัลฟิวไรด์ ซึ่งวัสดุปอซโซลานประเภทนี้นอกจากจะมีความเป็นปอซโซลานแล้วยังมีสมบัติเหมือนกันปูนซีเมนต์คือสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดการยึดประสานได้ มีผลรวมขององค์ประกอบทางเคมีของซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ ไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความชื้นไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการสูญเสียเนื่องจากการเผาไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อาจมีปูนขาวปนเปื้อนอยู่มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก<sup>(9)</sup>

### 2.2.2. สมบัติของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุที่มีสมบัติปอซโซลานได้จะต้องมีลักษณะดังนี้ คือ มีปริมาณซิลิกาสูง มีความละเอียดและ เป็นวัสดุอสัณฐาน (Amorphous) วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากสมการปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate : C-S-H) เป็นส่วนที่ทำหน้าเป็นตัวยึดประสาน ทำให้เกิดการแข็งตัว และยึดเกาะกันของวัสดุเพราะมีความเหนียวคล้ายกาว ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เป็นอีกผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นผลึกอยู่ในโพรงเล็กๆ ทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสมบัติเป็นต่าง และสามารถเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ บนเหล็ก ทำให้ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กได้ แต่ไม่ส่งผลในการเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของซีเมนต์ สามารถชะล้างได้โดยง่าย แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไปจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า จึงมีการใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในคอนกรีตขนาดใหญ่<sup>(10)</sup>

### 2.2.3 ปฏิกริยาปอซโซลาน

การเกิดปฏิกริยาปอซโซลานในวัสดุปอซโซลานเป็นการเกิดปฏิกริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับซิลิกา และน้ำ เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังสมการที่ 2.10<sup>(10)</sup>



หลังเกิดปฏิกริยาปอซโซลานปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเพิ่มขึ้น และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงส่งผลให้ช่องว่างภายในลดลง ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำจึงลดลงตามไปด้วย ชี้นงานจึงมีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น และเพราะปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีน้อยลงทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะถูกทำลายโดยตรงลดน้อยลงด้วย ทำให้มีความทนทานที่สูงขึ้น ปฏิกริยานี้จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในการทำปฏิกริยามีขนาดอนุภาคเล็กและมีปริมาณซิลิกาสูง ทำให้เกิดปฏิกริยาปอซโซลานได้ง่ายและรวดเร็วกว่าวัสดุปอซโซลานทั่วไป เนื่องจากในวัสดุปอซโซลานทั่วไปจะมีความเป็นด่างสูง จากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น เพื่อปฏิกริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาในวัสดุปอซโซลาน ทำปฏิกริยาได้ดีขึ้น

นอกจากนี้ซิลิกาบางส่วนอาจทำปฏิกริยากับแอลคาไล (Alkali)<sup>(5)</sup> ก่อนเกิดปฏิกริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความเสียหายจากการขยายตัวของชี้นงาน ชี้นงานที่มีความเข้มข้นของแอลคาไลสูงจะส่งผลต่อปฏิกริยาที่ได้จากระบบแคลเซียม-แอลคาไล-ซิลิกาที่ซับซ้อนจะขยายตัวมากกว่าชี้นงานที่มีความเข้มข้นของแอลคาไลต่ำ<sup>(5)</sup> วัสดุปอซโซลานจึงทำหน้าที่เป็นเพียงวัสดุเฉื่อยในระยะต้นของการทำปฏิกริยา ส่งผลให้ความแข็งแรงน้อย แม้ว่าจะส่งผลเป็นตัวเติมเต็มในช่องว่าง (Filler effect) แต่ความแข็งแรงในช่วงระยะแรกของการทำปฏิกริยาต่ำ และในวัสดุปอซโซลานที่มีอนุภาคขนาดเล็กบางส่วน อนุภาคของวัสดุจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสช่วยเร่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกริยาไฮเดรชัน อย่างไรก็ตามการใช้อนุภาคขนาดเล็กดังกล่าวไม่สามารถมีความแข็งแรงเทียบเท่าชี้นงานที่เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งหมดในระยะต้นได้<sup>(5)</sup>

## 2.2.4. กากของเสียอุตสาหกรรมที่มีสมบัติปอซโซลาน

กากของเสียอุตสาหกรรมเป็นของวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตหรือเกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุจนไม่สามารถใช้งานได้ กากของเสียเหล่านี้ยังมีสมบัติและความเข้มข้นที่สามารถพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้<sup>(11)</sup> กากของเสียอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานต้องมีลักษณะสำคัญคือมีปริมาณซิลิกาสูง และมีความเป็นอสัณฐาน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการเลือกใช้กากของเสียอุตสาหกรรม 2 ชนิดดังนี้

### 2.2.4.1. ตะกอนผงเศษแก้ว (Glass cullet powder)

แก้ว (Glass) เป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์ มีความเปราะ มันแวววาวสามารถผลิตได้จากการนำสารอนินทรีย์ต่างๆ มาเผาให้ถึงจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เมื่อเย็นตัวลงจะกลายเป็นของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคอย่างไม่เป็นระเบียบ หรือโครงสร้างอสัณฐาน<sup>(12)</sup> โดยแก้วที่นิยมใช้ในการผลิตขวด แก้วน้ำ หรือ กระจก คือแก้วชนิดโซดาไลม์ (Soda lime glass) ซึ่งผลิตได้จาก ทราาย โซดาแอส และหินปูน สามารถทำให้เกิดสีได้โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีต่างๆ ลงไป<sup>(12, 13)</sup>

### ก) องค์ประกอบทางเคมีและวัตถุประสงค์ในการหลอมแก้ว

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของแก้ว โดยขึ้นกับปริมาณ และคุณภาพของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว อาทิเช่น

- ซิลิกา( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักในการผลิตแก้ว ทำให้แก้วมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนต่อความร้อนและสารเคมี จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงในการหลอม และด้วยความหนืดสูงจึงทำให้ยากต่อการขึ้นรูปแก้ว
- โซเดียมออกไซด์( $\text{Na}_2\text{O}$ ) เพื่อช่วยให้อุณหภูมิในการหลอมแก้วต่ำลง แต่จะทำให้แก้วเปราะแตกหักง่าย และไม่ทนต่อสารเคมี ถ้ามีในปริมาณมากจะทำให้สามารถละลายน้ำได้
- โพแทสเซียมออกไซด์( $\text{K}_2\text{O}$ ) เพื่อช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของผลึกสวยงามขึ้น
- แคลเซียมออกไซด์( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์( $\text{MgO}$ ) หรือ แบเรียมออกไซด์( $\text{BaO}$ ) เป็นสารช่วยให้แก้วมีความคงตัวเร็วขึ้น เมื่อเย็นตัวลงและเพิ่มความทนทานต่อสารเคมี โดยเฉพาะแก้วที่มีแมกนีเซียมออกไซด์มากกว่าแคลเซียมออกไซด์จะมีการตกผลึกช้าลง
- อะลูมินา( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) มีส่วนในการช่วยให้แก้วมีความทนทานต่อการสึกกร่อน

- เหล็กออกไซด์( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ทำให้แก้วมีสีเขียวและช่วยประหยัดเชื้อเพลิงขณะหลอม และออกไซด์อื่นๆ ช่วยให้เนื้อแก้วมีสีสันแตกต่างกัน

## ข) ประเภทของแก้ว

แก้วสามารถแบ่งประเภทจากแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 ประเภทคือ กำเนิดโดยธรรมชาติ เป็นแก้วที่เกิดจากการหลอมตัวของทรายหรือทรายแก้ว ชื่อเรียกทางเคมีว่า ซิลิคอนไดออกไซด์ มีการพบหินที่มีลักษณะเช่นเดียวกับทรายแก้ว เช่น หินเขี้ยวหนุมาน (Quartz) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงมาก โดยทรายแก้วบริสุทธิ์จะมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1710 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดการหลอมละลายเรียกว่าแก้วประเภทนี้ว่า ซิลิกาฟิวส์(Fused Silica) แก้วอีกประเภทหนึ่งคือ แก้วที่กำเนิดโดยการสังเคราะห์ เป็นแก้วที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยสารประกอบต่างๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมทำให้ได้แก้วที่มีสมบัติและลักษณะที่แตกต่างกันตามความต้องการ

แก้วโซดาไลม์(Soda-lime glass) เป็นแก้วประเภทที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์แก้วเป็นจำนวนมาก สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นกระจกนิรภัยในรถยนต์ เครื่องบิน โดยต้องมีสมบัติเด่นคือ เมื่อถูกของแข็งกระทบแตกจะไม่มีลักษณะแหลมคมแต่จะเกิดการแตกร้าวไปทั่วแผ่นกระจกและเกิดเป็นเม็ดกลมๆแทน สามารถทำการผลิตได้ด้วยกรรมนำแก้วโซดาไลม์แผ่นบางๆหลายๆแผ่นมาประกอบเข้าด้วยกัน จากนั้นจึงนำมาตัดโค้งตามรูปแบบที่ต้องการโดยใช้ความร้อน ส่วนกระจกนิรภัยจะต้องให้ความร้อนเกือบถึงจุดอ่อนตัวของแก้วหลังจากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว

การผลิตแผ่นแก้วกระจกมีวัตถุดิบหลักคือ ทรายแก้ว โซดาแอส หินปูน โซเดียมซิลเฟต หรือหินฟันม้า หินโดโลไมท์ และเศษแก้วกระจก รวมทั้งโลหะออกไซด์ต่างๆ เพื่อให้เกิดสีในกระจก เช่น นิกเกิล เหล็ก โคบอลต์ เป็นต้น ขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการผสมวัตถุดิบหลักอย่างทรายแก้ว โซดาแอส โซเดียมซิลเฟต หินโดโลไมท์ ผสมกับเศษแก้วกระจกตามสัดส่วนที่กำหนด จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปหลอมในเตาหลอมที่อุณหภูมิ 1500-1600 องศาเซลเซียส ส่วนผสมต่างๆ จะหลอมจนเป็นเนื้อแก้วจึงลดอุณหภูมิลงเหลือ 800-1100 องศาเซลเซียส เมื่อมีความหนืดพอเหมาะต่อการขึ้นรูปจากนั้นจึงนำแก้วไปผ่านกระบวนการทำเป็นแผ่น ก่อนจะลดอุณหภูมิลงให้เย็นตัวอย่างช้าๆและผ่านกระบวนการอบอ่อน เพื่อขจัดความเครียดในเนื้อกระจก เมื่อกระจกเย็นตัวลงแล้วจึงนำไปล้าง เป่าแห้ง และตัดตามขนาดที่ต้องการ ในขั้นตอนการตัดแต่งกระจกแผ่นจะมีผงเศษแก้วหลุดออกมาตามน้ำที่ใช้ในการตัดแผ่นกระจกเพื่อหล่อเย็น นอกจากนี้ในกระบวนการแปรรูปกระจกแผ่นเป็นกระจกรถยนต์จะมีขั้นตอนในการเจียรและตัดแต่งแผ่นกระจกให้มีลักษณะตามต้องการและลบความคมของแผ่นกระจก ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้มีผงตะกอนเศษแก้วหลุดออกมาด้วย

ผงตะกอนเศษแก้วที่ได้มีการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การหลอมนำกลับไปใช้ใหม่ ใช้เป็นตัวกรอง ผสมในงานคอนกรีต ใช้เป็นวัสดุขัดสี ใช้เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในเซรามิก ใช้เป็นวัตถุดิบเคลือบในงานเซรามิก และใช้เป็นตัวเติมในสี เป็นต้น<sup>(14)</sup> ในการนำตะกอนเศษแก้วไปใช้งานจะต้องมีการทำความสะอาดก่อนเพื่อลดสิ่งเจือปนจากสิ่งแวดล้อม

#### 2.2.4.2 ไดอะทอมไมต์ (Diatomite)

ไดอะทอมไมต์เป็นซากของพืชและสัตว์น้ำเซลล์เดียวเรียกว่า ไดอะตอม ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมักใช้ไดอะทอมไมต์เป็นตัวกรองน้ำตาลอ้อย เบียร์ เหล้าวิสกี้ เหล้าองุ่น น้ำมันพืช และยา เนื่องจากมีความพรุนตัวสูงและความดันที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างมีความแตกต่างกันตามขนาดอนุภาคของไดอะทอมไมต์ นอกจากนี้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์โดยใช้เป็นตัวเติมแต่งเพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติให้มีความแข็งมากขึ้น เป็นต้น สามารถประยุกต์ใช้เป็นฉนวนในอิฐผนังเตา แผ่นฉนวนกันความร้อนและอิฐกันความร้อน โดยมักใช้ผสมกับดินเพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตัวเร่งการดูดซับในผลิตภัณฑ์กรองอากาศและผสมซีเมนต์เพื่อเป็นแหล่งซิลิกาในการทำปฏิกิริยาของซีเมนต์<sup>(15, 16)</sup> สัณฐานของไดอะทอมไมต์แสดงในภาพที่ 2.11

#### ก) องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของไดอะทอมไมต์

ไดอะทอมไมต์มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและมีอะลูมินา เหล็กออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์รวมอยู่ด้วย ไดอะทอมไมต์มีลักษณะแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและมีขนาดที่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 10-200 ไมโครเมตร ในโครงสร้างมีช่องว่างมากกว่า 80-90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีความพรุนตัวสูง น้ำหนักเบา พื้นที่ผิวสูง ส่งผลให้ความหนาแน่นต่ำและมีสมบัติในการดูดซับที่ดี ซึ่งเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะการใช้งานเป็นตัวกรอง (Filtering agent) ดังเช่นที่กล่าวมาแล้วข้างต้น





ภาพที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคของไดอะทอไมต์<sup>(17)</sup>

### ข) การใช้งานไดอะทอไมต์

สำหรับการใช้งานไดอะทอไมต์ในอุตสาหกรรมต่างๆ จะมีการเตรียมไดอะทอไมต์เพื่อพัฒนาสมบัติของไดอะทอไมต์ โดยเฉพาะความพรุนตัวของไดอะทอไมต์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะทำลายโครงสร้างของไดอะทอไมต์บางส่วน แต่ไม่ส่งผลต่อรูปแบบโครงสร้างมากนัก และไม่ปิดรูพรุน กระบวนการในการปรับปรุงไดอะทอไมต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการดังนี้

(1) การอบเป็นกระบวนการพื้นฐานในการเตรียมไดอะทอไมต์ที่มีความชื้นต่ำ ซึ่งความชื้นของไดอะทอไมต์ขึ้นกับภูมิภาคและภูมิภาคของแหล่งกำเนิดไดอะทอไมต์ หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งไล่ความชื้นจะทำให้การบิดและคัดขนาดของไดอะทอไมต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยมากมักจะใช้เป็นตัวดูดความชื้นและเป็นตัวกรอง

(2) การเผาแคลไซน์เป็นกระบวนการหนึ่งที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเตรียมไดอะทอไมต์ อุณหภูมิที่ใช้จะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของไดอะทอไมต์ซึ่งอุณหภูมิล้อมอยู่ในช่วง 800-1000 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้เป็นการกำจัดน้ำและสารอินทรีย์ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อขนาดอนุภาค และความพรุนตัวของไดอะทอไมต์ หลังจากผ่านกระบวนการแคลไซน์ ขนาดอนุภาคจะมีความแตกต่างกันจึงต้องผ่านการคัดขนาด นอกจากนี้เหล็กออกไซด์ที่ปนเปื้อนหลังจากการแคลไซน์มีผลให้ไดอะทอไมต์มีสีที่แตกต่างกัน เช่น เหลืองอ่อน ชมพู น้ำตาล จึงนิยมใช้ไดอะทอไมต์กลุ่มนี้เป็นสารเติมแต่งในโรงงานอุตสาหกรรม

(3) การเผาเป็นกระบวนการเตรียมไดอะทอไมต์ด้วยการเติมแอลคาไลน์ฟลักซ์ เช่น โซเดียมคาร์บอเนตประมาณ 1-6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000-1200 องศาเซลเซียส การเติมฟลักซ์จะทำให้เกิดการหลอมของโซเดียมซิลิเกตพร้อมกับเปลือกและชิ้นส่วนของไดอะทอไมต์เป็นก้อน รวมทั้งเหล็กที่อยู่โดยรอบทำให้สิ่งเจือปนในไดอะทอไมต์ลดลง และความแข็งแรง

เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับอุณหภูมิ ชนิด ปริมาณของ ฟลักซ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงมากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของไดอะทอไมต์จากที่เป็นซิลิกาออสฐานเปลี่ยนเป็นคริสโตบาไลต์(Cristobalite) หรือซิลิกาที่เป็นผลึกผสม ส่งผลให้ความพรุนตัวและพื้นที่ผิวลดลง

### 2.3. ตะกรันเหล็กกล้า (Steel Slag)

ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นภายในเตาหลอมซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำเหล็กและ ฟลักซ์ได้แก่ ปูนขาว (quick lime) เติมลงไปเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนและปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของน้ำเหล็ก ตะกรันเหล็กจะลอยตัวอยู่เหนือผิวหน้าของน้ำเหล็กเมื่อเย็นตัวลงจะได้เป็นก้อนของแข็ง นอกจากนี้ตะกรันสามารถเกิดจากการละลายของอิฐทนไฟที่เกิดการหลอมละลายเพราะความร้อนและความเสื่อมสภาพจากอายุการใช้งาน ตะกรันเหล็กสามารถเกิดจากกระบวนการรีไซเคิลกากของเสียได้อีกด้วย โดยทั่วไปตะกรันเหล็กจะหมายถึงตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag) ซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) ประมาณ 1 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) แต่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและคาร์บอนเนชันแทน คาร์บอนเนชันเป็นปฏิกิริยาที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทำปฏิกิริยากับสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ให้สารแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นผลิตภัณฑ์และมีน้ำร่วมทำปฏิกิริยา โดยถ้าเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้มากในตะกรันเหล็กจะทำให้ตะกรันเหล็กสามารถแตกสลายได้ง่าย เพราะตะกรันเหล็กที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันมากจะมีความเป็นผลึกต่ำกว่าในตะกรันเหล็กที่มีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันต่ำ โดยทั่วไปสามารถนำเอาตะกรันเหล็กไปใช้ในงานกรูถนน ผสมปูนซีเมนต์ได้เลย แต่ในอนาคตเราสามารถปรับปรุงสมบัติของตะกรันเหล็กให้สามารถใช้งานตะกรันเหล็กได้หลากหลายยิ่งขึ้น<sup>(5, 18)</sup>

#### ก) องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของตะกรัน

ตะกรันเหล็กประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ส่วนแรกคือออกไซด์ของโลหะที่มีสมบัติคล้ายวัสดุก่อสร้าง เช่น แคลเซียมออกไซด์ ซิลิกา และอะลูมินา ส่วนที่สองคือโลหะหนักบางชนิดที่อาจปนเปื้อนจากภาชนะสำหรับหลอมเหล็ก หรือวัสดุทนไฟอื่นๆ เช่น โครเมียม ส่วนสุดท้ายคือโลหะเจือปนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น เหล็ก<sup>(12)</sup>

ตะกรันส่วนใหญ่มักมีส่วนผสมของอะลูมินา แมกนีเซียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และ ซิลิกา โดยเฉพาะอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) ส่งผลต่อความเป็นกรดเป็นเบสของตะกรัน ตะกรันที่มีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  มากกว่า  $\text{CaO}$  จะส่งผลให้มีความเป็นกรดสูงกว่าที่มีอัตราส่วนของ  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  น้อย นอกจากนี้การมีปริมาณ  $\text{CaO}$  มากจะทำให้เกิดหินปูนอิสระซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติของตะกรัน โดยหินปูนอิสระสามารถดูดความชื้นได้ดีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของไดแคลเซียมซิลิเกตกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการขยายตัวของตะกรันได้ง่าย สามารถป้องกันการเกิด หินปูนอิสระได้จากการควบคุมการไหลของน้ำเหล็ก การละลายของแคลเซียมออกไซด์ และปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่เติมลงในน้ำเหล็ก นอกจากนี้การบ่ม (Aging) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยิยมในการปรับปรุงตะกรันให้มีปริมาณ หินปูนอิสระลดลง<sup>(5, 19)</sup>

#### ข) ประเภทของตะกรันเหล็ก

สมบัติของตะกรันแต่ละประเภทขึ้นกับกระบวนการผลิตเหล็กในแต่ละขั้นตอนและองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันประเภทนั้น ตะกรันสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ตามแหล่งที่เกิดตามกระบวนการผลิตหลากหลายประเภทตะกรันที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมมีดังนี้

- ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag)

ตะกรันมักมีสารประกอบโลหะที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ สารประกอบต่างๆ ในตะกรันค่อนข้างไม่คงที่ในแต่ละชนิดของตะกรันโดยในตะกรันที่ได้จากเตาอาร์คไฟฟ้าจะมีปริมาณของเหล็กออกไซด์ค่อนข้างสูงประมาณ 25-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และซิลิคอนออกไซด์ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ตะกรันที่ได้มีลักษณะสีดำน่อน ข้างเข้ม ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่มีพิษ<sup>(19)</sup> ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.10 ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า<sup>(19)</sup>

- ตะกรันเบ้าหลอมเหล็ก (Ladle furnace slag)

ตะกรันเบ้าหลอมเหล็กมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ค่อนข้างสูงประมาณ 35-60 โดยน้ำหนัก ตะกรันมีลักษณะเป็นสีเทาเข้ม แข็ง เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ค่อนข้างสูงจึงทำให้อัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกามีค่าสูงด้วย ส่งผลให้มีฤทธิ์เป็นด่างมากกว่าตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า ตะกรันเบ้าหลอมเหล็กมักมีโลหะเหล็กเจือปน จึงจัดตะกรันเบ้าหลอมเหล็กเป็นวัสดุไม้ใช้แล้วที่ไม่มีพิษเช่นกันดังแสดงในภาพที่ 2.10

ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในการนำตะกรันเบ้าหลอมเหล็กไปใช้งานคือการบวมตัวของชิ้นงาน อันเนื่องมาจากปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มีค่อนข้างสูง เมื่อแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นผลให้ชิ้นงานเกิดการละลาย การปล่อยให้ตะกรันเบ้าหลอมเหล็กเย็นตัวอย่างช้าๆ จะทำให้เฟสไดแคลเซียมซิลิเกตเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นผงฝุ่นเกาะอยู่บนพื้นผิวชิ้นงาน นอกจากนี้ในตะกรันเบ้าหลอมเหล็กมีส่วนผสมของแมกนีเซียมออกไซด์ซึ่งมักจะตกตะกอนเมื่อปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ทำให้ตะกรันเบ้าหลอมเหล็กเกิดการบวมตัวในระยะยาวได้ ด้วยคุณสมบัติที่กล่าวในข้างต้นตะกรันเบ้าหลอมเหล็กจึงนิยมนำไปสร้างเป็นสถานเพาะเลี้ยงปะการัง และด้วยสมบัติในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงมีการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานเพื่อขจัดสารพิษนอกจากนี้ยังนำไปผสมกับซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมในงานวัสดุก่อสร้าง อีกทั้งยังมีการใช้ตะกรันเบ้าหลอมเหล็กในงานหลอมเหล็กกล้าโดยใช้ทดแทนปูนขาว แต่มักประสบปัญหาการควบคุมปริมาณตะกรันเบ้าหลอม<sup>(5, 18, 19)</sup>



ภาพที่ 2.11 ตะกรันเป่าหลอมเหล็ก

- ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast furnace slag)

ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากการเตาถลุงเหล็กที่ทำให้ตะกรันที่หลอมเหลวเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยการจุ่มลงในน้ำ นิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเติมในการผลิตปูนซีเมนต์ สามารถใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนขาวอิมตัว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือยิปซัม ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีข้อดีคือ สามารถบดตะกรันเตาถลุงให้มีความละเอียดได้ตามต้องการ และสามารถปรับปริมาณให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทได้ ปัจจุบันมีการนำตะกรันเตาถลุงไปผ่านกระบวนการบดให้มีขนาดเล็กเพื่อใช้ในการถมที่ และใช้เป็นมวลรวมผสมในคอนกรีต<sup>(5, 19)</sup>

#### 2.4. กากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคา (Roof tile sludge waste)

ในการผลิตกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์จะมีการใช้เยื่อกระดาษหรือแร่ใยหินเป็นส่วนผสม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระเบื้อง ก่อนจะนำไปขึ้นรูปเป็นกระเบื้องในรูปแบบต่างๆ ของเสียที่ได้จากการผลิตกระเบื้องหลังคาแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ เศษแข็ง(Hard waste) เป็นเศษที่เกิดจากส่วนผสมของซีเมนต์ ยิปซัม เส้นใยธรรมชาติ และแร่ใยหินหรือแอสเบสตอส(Asbestos) ที่เกาะตัวกันจนเป็นก้อนแข็ง ซึ่งได้แก่ เศษกระเบื้อง กระเบื้องที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ เป็นต้น ของเสียส่วนนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่แทนแร่ใยหินในกระเบื้องคุณภาพต่ำ ส่วนต่อมาเป็นน้ำทิ้ง(Water discharge) มีความเป็นด่างสูง และมีตะกอนของซีเมนต์และยิปซัมผสมอยู่ หากปล่อยทิ้งโดยไม่ผ่านการบำบัดจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ส่วนสุดท้ายคือ เศษเปียก(Sludge waste) เป็นเศษของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต มีความชื้นสูงประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์

สามารถบำบัดก่อนนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตใหม่แต่มีค่าใช้จ่ายที่สูง เนื่องจากต้องผ่านการปรับปรุงสมบัติให้มีความสม่ำเสมอในถังพักก่อน เรียกว่า Week-end tank เศษเป็ยกส่วนใหญ่จึงถูกทำให้มีความชื้นน้อยลงแล้วนำไปฝังกลบแทน<sup>(20)</sup> เศษเป็ยกส่วนใหญ่เกิดจากเศษที่ติดอยู่ตามเครื่องจักรซึ่งถูกชะล้างจากเครื่องจักรหรือเกิดขึ้นขณะเดินเครื่องจักร ตะกอนกากของเสียที่ได้มีสีเทาจับตัวกันเป็นก้อน และมีความชื้นสูง ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนของเสียนี้ส่วนใหญ่เป็น CaO และพบ SiO<sub>2</sub> บางส่วน นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบทางเคมีอื่นๆ เจือปน เช่น SO<sub>3</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MgO เป็นต้น จึงมีการนำกากตะกอนส่วนนี้ไปใช้เป็นสารตัวเติมแทนปูนขาวในอุตสาหกรรมซีเมนต์ หรือผสมกับซีเมนต์แล้วกลบกับซีเมนต์เพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้มีความทนทานและแข็งแรงขึ้น<sup>(21, 22)</sup>

## 2.5. การประยุกต์ใช้กากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในการผลิตวัสดุก่อสร้างฐานยิปซัม

ปัจจุบันมีการนำยิปซัมที่พัฒนาสมบัติด้วยการเติมกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยวัสดุที่ได้จะมีความแข็งแรง ทนทาน และมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานในด้านต่างๆมากขึ้น ในอนาคตมีการคาดการณ์ถึงการนำยิปซัมที่ผ่านการเติมแต่งด้วยกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมไปประยุกต์ใช้ในงานรูปแบบอื่นๆ เพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการศึกษาวิจัยถึงความเป็นไปได้ในการนำยิปซัมที่ผ่านการสังเคราะห์จากของเสียอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ M. Garg และคณะ<sup>(23)</sup> ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุก่อสร้างจากการสังเคราะห์ฟอสฟอริปซัม (phosphogypsum) จากกากของเสียในอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยเคมีมาใช้เป็นวัตถุดิบหลัก โดยได้ทำการเตรียมกากของเสียจากโรงงานผลิตปุ๋ยด้วยการทำความสะอาดและคัดกรองผ่านตะแกรงร่อนด้วยวิธีคัดกรองผ่านตะแกรงร่อนแบบเปียก (wet sieving) เพื่อขจัดสิ่งเจือปนพวกสารอินทรีย์ แอลคาไล คลอไรด์ เป็นต้น จากนั้นแคลไซน์ฟอสฟอริปซัมที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้เป็นพลาสติกอร์เฟสปีตาเอมิไฮเดรต 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมกับเถ้ากลบ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อช่วยในการยึดประสานของยิปซัมและเถ้ากลบ และ ตัวหน่วงปฏิกิริยา 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถผลิตวัสดุก่อสร้างที่มีสมบัติความแข็งแรงที่ดี น้ำหนักเบา และมี รูปทรงสูง ต่อมาได้มีการศึกษายิปซัมที่ได้จากการสังเคราะห์ชนิดอื่น เช่น ยิปซัมฟลูแก๊สโดย S. Marinkovic และคณะ<sup>(24)</sup> ได้ทำการศึกษาการนำยิปซัมฟลูแก๊สซึ่งเป็นยิปซัมอีกประเภทหนึ่งที่ได้จากการโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าไปผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ผสมกับเถ้ากลบหินปูน และน้ำเพื่อผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง พบว่าได้วัสดุที่มีความแข็งแรงที่ดี การดูดซึมน้ำต่ำ

และทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เนื่องจากพบเฟสยิปซัม (gypsum) ปอร์ตแลนด์ไดต์ (portlandite) เอททริงไกต์ (ettringite) ทูมาไซต์ (thaumasite) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของยิปซัมและวัสดุเติมแต่งเฟสเหล่านี้มีการสานตัวกันเป็นโครงสร้างร่างแหที่หนาแน่น ซึ่งจะเห็นได้จากงานวิจัยข้างต้นมีการใช้เถ้าแกลบเป็นส่วนผสมในการผลิตพัฒนาสมบัติของยิปซัม เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอซโซลานอีกประเภทหนึ่งที่นิยมใช้ในการผสมกับซีเมนต์หรือยิปซัมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกซ์ขึ้น ทำให้ได้ยิปซัมหรือซีเมนต์ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้เถ้าแกลบแล้วได้มีการเลือกใช้วัสดุอื่นๆ ในการปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์ อาทิผงเศษแก้วที่ได้ทำการศึกษาโดย R. Idir และคณะ<sup>(25)</sup> ถึงความเป็นไปได้ในการนำผงเศษแก้วชนิดต่างๆมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการหล่อชิ้นงานซีเมนต์ โดยพิจารณาผลกระทบของผงเศษแก้วแต่ละชนิดกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน พบว่าผงเศษแก้วที่มีความละเอียดจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ส่งผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้น ซึ่งในช่วง 7 วันแรกซีเมนต์ที่ผสมเศษแก้วที่มีปริมาณต่ำจะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าซีเมนต์ที่ผสมเศษแก้วสูง แต่ระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซีเมนต์ที่ผสมเศษแก้วปริมาณมากจะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า และมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานซีเมนต์ที่มีการผสมเศษแก้วน้อย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ไดอะทอไมต์เป็นวัสดุปอซโซลานของ D. Kastis และคณะ<sup>(26)</sup> ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของไดอะทอไมต์ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติกับซีเมนต์ พบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานซีเมนต์ที่ผสมไดอะทอไมต์เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงโดยเฉพาะที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน แต่ต้องใช้น้ำในการขึ้นรูปสูงกว่าการหล่อซีเมนต์ทั่วไป และมีการศึกษาความน่าจะเป็นในการใช้ตะกรันบ้ำหาลอมเหล็กในการพัฒนาสมบัติของซีเมนต์โดย A. Rodriguez และคณะ<sup>(27)</sup> ได้ศึกษาการเตรียมชิ้นงานซีเมนต์ที่ผสมตะกรันบ้ำหาลอมเหล็กในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาความแข็งแรงและความทนทานต่อการใช้งานซึ่งการผสมตะกรันบ้ำหาลอมเหล็กส่งผลให้ชิ้นงานซีเมนต์มีความแข็งแรงและความทนทานที่สูงกว่าชิ้นงานซีเมนต์แบบดั้งเดิม เนื่องจากตะกรันบ้ำหาลอมเหล็กที่มีความละเอียดสูง จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับน้ำ ส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานซีเมนต์สูงขึ้นและเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้น นอกจากนี้การใส่ตะกรันบ้ำหาลอมเหล็กในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ใช้ปริมาณน้ำในการผสมลดลง นอกจากนี้ M. Lanzon และคณะ<sup>(28)</sup> ได้ศึกษาการผลิตวัสดุก่อสร้างจากกากของเสียในอุตสาหกรรมหินอ่อนผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมีการเติมสารเติมแต่ง เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เพื่อเพิ่มโครงสร้างที่เป็นเส้นใยในวัสดุก่อสร้าง และ กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) ส่งผลให้วัสดุก่อสร้างมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงต่ำเพราะ

กรดทำปฏิกิริยากับแคลเซียมในวัสดุเกิดการสลายตัวกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นโพรงภายในวัสดุเป็นต้น

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าการนำวัสดุที่มีความเป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนมาใช้ในการพัฒนาสมบัติของยิปซัมและซีเมนต์ แต่วัสดุที่เลือกใช้ไม่มีความหลากหลายและมีข้อจำกัด เช่น อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมวัสดุชนิดของวัสดุพอลิโพรพิลีน เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาสมบัติของยิปซัมให้ดีขึ้น โดยการเลือกใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนที่ได้จากกากอุตสาหกรรมชนิดอื่นทดแทนถ้าแก่บซึ่งยังไม่เคยมีผู้ศึกษามาก่อน โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก ตะกอนผงเศษแก้ว และไดอะทอมไมต์ซึ่งมีความเป็นวัสดุพอลิโพรพิลีน และได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในซีเมนต์อย่างแพร่หลาย ซึ่งจากงานวิจัยของ M. Garg<sup>(20)</sup> และ S. Marinkovic<sup>(21)</sup> พบว่าการใช้ถ้าแก่บเป็นส่วนผสมในยิปซัมสังเคราะห์ได้ผลการทดลองที่ดีคือ มีความแข็งแรงสูงขึ้นและมีความทนทานต่อการละลายน้ำสูงขึ้น จึงเลือกใช้ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก ตะกอนผงเศษแก้ว และไดอะทอมไมต์ซึ่งมีความเป็นพอลิโพรพิลีน โดยพิจารณาจากปริมาณของซิลิกาในวัสดุที่มีปริมาณสูงและความเป็นเอกลักษณ์ของวัสดุที่คล้ายคลึงกับถ้าแก่บ มีการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานในชั้นงานและกากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคาซึ่งมีความเป็นเส้นใย และมียิปซัมผสมอยู่ด้วย นอกจากนี้ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก ตะกอนผงเศษแก้ว และไดอะทอมไมต์เป็นกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีปริมาณมาก และมีการนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์น้อย จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก ตะกอนผงเศษแก้ว และไดอะทอมไมต์ผสมในยิปซัมฟลูแก๊สซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ได้ชั้นงานยิปซัมที่มีความแข็งแรงและมีความทนทานต่อการละลายน้ำสูง



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุยิปซัมโดยการใช้อยิปซัมฟลูแก๊สเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นโดยมีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมยิปซัมด้วยการเติมตะกรันบ้ำาหลอมเหล็ก ตะกอนผงเศษแก้ว ไดอะทอมไมต์ กากตะกอนของเสีย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์แคลเซียมอะลูมิเนต ในอัตราส่วนต่างๆ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และลักษณะเฉพาะของชิ้นงานที่เตรียมได้ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการเตรียมวัตถุดิบ การเตรียมชิ้นตัวอย่าง วิธีการทดสอบสมบัติทางกล และทางกายภาพ และเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะเฉพาะ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

#### 3.1. วัตถุดิบ

สำหรับงานวิจัยนี้มีการแบ่งวัตถุดิบหลักเป็น 2 ประเภทคือ วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการทำงานวิจัยนี้ได้แก่

##### 3.1.1. กากของเสีย ได้แก่

3.1.1.1 ยิปซัมฟลูแก๊ส จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหิน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3.1.1.2 ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็กจากโรงงานหลอมเศษเหล็ก บริษัท เกษมศักดิ์เทรอดตั้งจำกัด กรุงเทพมหานคร

3.1.1.3 กากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องไฟเบอร์ซีเมนต์ บริษัท กระเบื้องกระดาศไทย จำกัด จังหวัดสระบุรี

3.1.1.4 ตะกอนผงแก้วจากการเจียรกระจกนิรภัย จากบริษัท วีเอ็มซีเซฟตี้กลาส (ประเทศไทย) จำกัด กรุงเทพมหานคร

3.1.1.5 ไดอะทอมไมต์ จากบริษัท ปทุมธานีบริวเวอรี จำกัด จังหวัดปทุมธานี

### 3.1.2. สารเติมแต่ง ได้แก่

3.1.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง จากบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

3.1.2.2 แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ จากบริษัท Kerneos Aluminate Technologies จำกัด

3.1.2.3 Methocel J75MS™ เป็นสารช่วยให้ปฏิกิริยาคงตัว (Stabilizer) จากบริษัท The Dow Chemical Company จำกัด

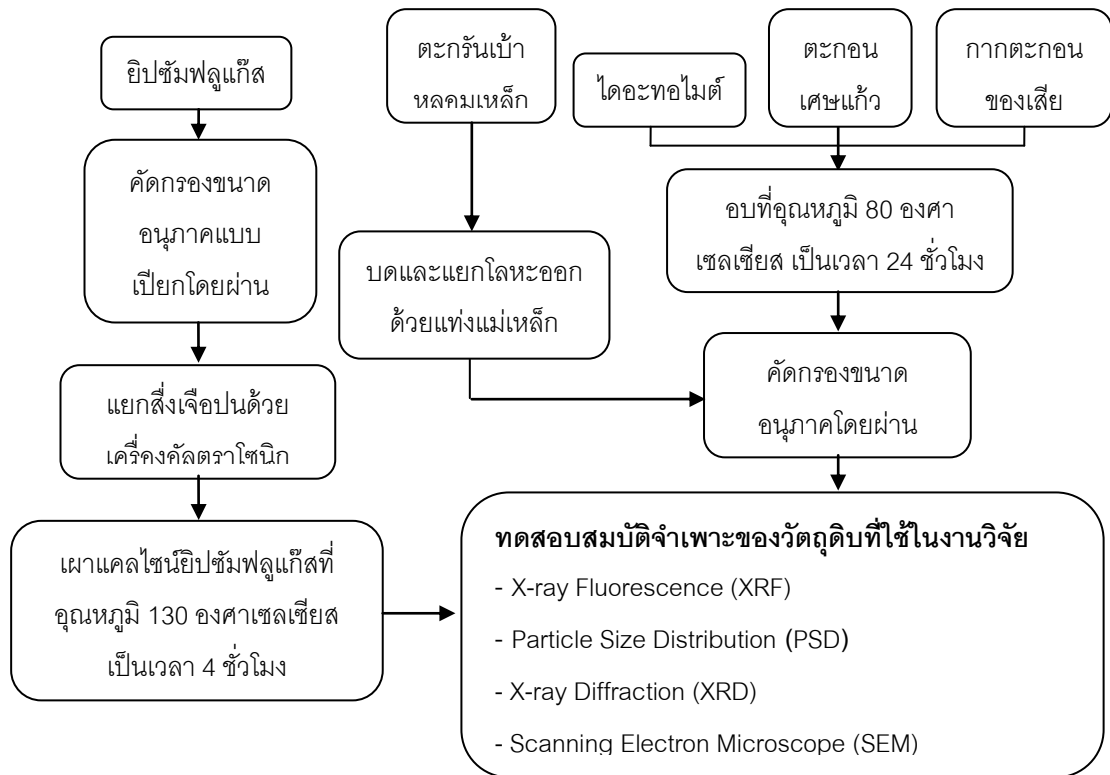
3.1.2.4 กรดซิตริก (Citric acid) เป็นสารหน่วงปฏิกิริยา (Retarder) จากบริษัท Riedel Dehaen จำกัด

3.1.2.5 Melment™ เป็นสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) จากบริษัท Clariant Polymers จำกัด

## 3.2. วิธีการทดลอง

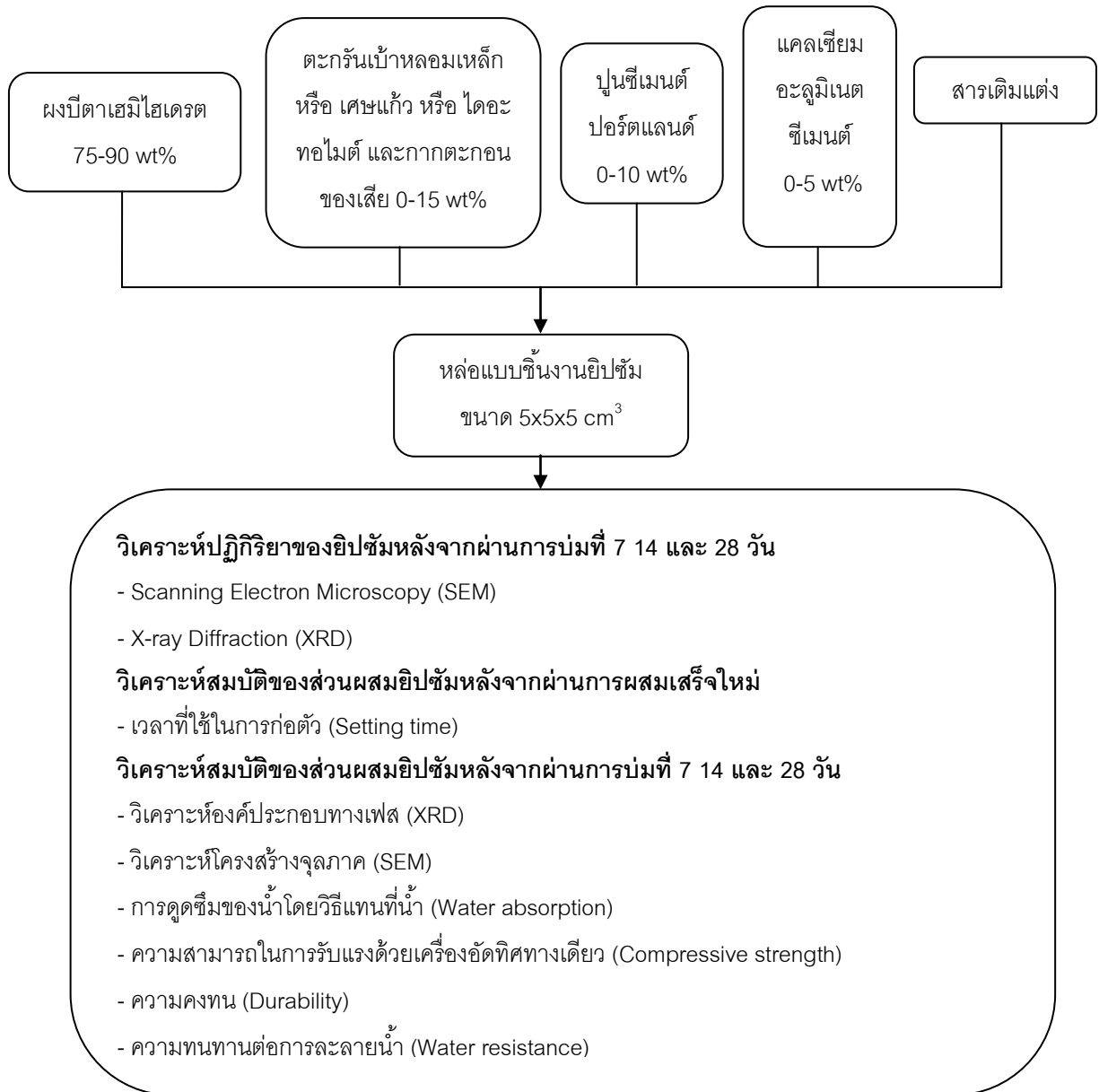
### 3.2.1. การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน กล่าวคือ การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้น อันได้แก่ ยิปซัมฟลูแก๊ส ตะกรันบ้ำหอลอมเหล็ก กากตะกอนของเสีย ตะกอนผงเศษแก้วและไดอะทอมไมต์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยวัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีขั้นตอนในการเตรียมที่แตกต่างกันตามลักษณะและความเหมาะสม จากนั้นทำการทดสอบสมบัติของวัตถุดิบ โดยขั้นตอนการเตรียมแสดงในภาพที่ 3.1 รายละเอียดของการเตรียมวัตถุดิบแต่ละชนิดดังหัวข้อที่ 3.2.2



ภาพที่ 3.1 การเตรียมวัตถุดิบตั้งต้น

การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมและความน่าจะเป็นในการผสมตะกรันเบ้าหลวม ตะกอนผงเศษแก้ว และไดอะทอไมต์ โดยนำวัตถุดิบที่ได้จากการเตรียมในการทดลองที่ 1 คือ ยิปซัมฟลูแก๊สในอัตราส่วนร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ผสมกับสารเติมแต่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำการควบคุมอัตราส่วนผสมของตะกรันเบ้าหลวม หรือตะกอนผงเศษแก้ว หรือไดอะทอไมต์กับกากตะกอนของเสียในอัตราส่วนตั้งแต่ 0:15 5:10 7.5:7.5 10:5 และ 15:0 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบดังแสดงขั้นตอนในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบสมบัติ

### 3.2.2. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบในงานวิจัยนี้เป็นวัตถุดิบที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่

#### 3.2.2.1. บีตาเฮมิไฮเดรตยิปซัม ( $\beta$ -hemihydrate gypsum)

บีตาเฮมิไฮเดรตยิปซัมเป็นวัตถุดิบที่เตรียมได้จากการสังเคราะห์ยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินมีขั้นตอนในการเตรียมเริ่มต้นจากการคัดกรองขนาดของยิปซัมฟลูแก๊สซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอมส้มละเอียดดังแสดงในภาพที่ 3.3(ก) ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 230 เพื่อให้ได้อนุภาคยิปซัมฟลูแก๊สที่มีขนาดเล็กกว่า 63 ไมโครเมตร โดยทำการคัดกรองขนาดโดยใช้วิธีการคัดกรองขนาดแบบเปียก (Wet sieving) หลังจากคัดกรองขนาดของยิปซัมฟลูแก๊สตามต้องการแล้วขั้นตอนต่อไปคือการแยกสิ่งเจือปนออกจากยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการคัดกรองขนาดแล้วด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic machine) โดยการเตรียมยิปซัมฟลูแก๊สผสมกับน้ำจากนั้นใช้แท่งแก้วคนผสมยิปซัมฟลูแก๊สกับน้ำให้เข้ากัน และไม่มียิปซัมฟลูแก๊สตกตะกอนที่ก้นภาชนะ จากนั้นใช้เครื่องอัลตราโซนิกเร่งทำให้เกิดการตกตะกอนของยิปซัมฟลูแก๊สสิ่งเจือปนในยิปซัมฟลูแก๊สจะลอยขึ้นด้านบนแยกออกจากส่วนยิปซัมฟลูแก๊สทำการแยกสิ่งเจือปนออกจากส่วนของยิปซัมฟลูแก๊สที่ตกตะกอน จากนั้นทำตามขั้นตอนการแยกสิ่งเจือปนอีกครั้งจนกว่าจะไม่เกิดการแยกชั้นของสิ่งเจือปนกับยิปซัมฟลูแก๊ส เมื่อแยกสิ่งเจือปนออกจากยิปซัมฟลูแก๊สแล้วจึงอบยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการแยกสิ่งเจือปนเสร็จแล้วที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อไล่น้ำออกจากยิปซัมฟลูแก๊สจากนั้นจึงทำการเผาแคลไซน์ยิปซัมฟลูแก๊สที่ผ่านการอบแล้วที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยทำการกลับยิปซัมฟลูแก๊สเพื่อให้ความร้อนกระจายตัวทั่วถึงยิปซัมฟลูแก๊สทั้งหมดทุกๆ 1 ชั่วโมง จะได้เป็นผงบีตาเฮมิไฮเดรตพลาสติกอร์ลักษณะสีขาวเหลืองละเอียดดังแสดงในภาพที่ 3.3(ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.3 (ก) ยิปซัมฟลูแก๊สจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และ (ข) ผงปีตาเฮมิไฮเดรตสังเคราะห์จากยิปซัมฟลูแก๊ส

#### 3.2.2.2. กากตะกอนของเสี้ยว (Rooftile sludge)

กากตะกอนของเสี้ยวจากโรงงานกระเบื้องหลังคา เป็นวัสดุดิบที่มีเส้นใยเป็นองค์ประกอบ สามารถเตรียมกากตะกอนของเสี้ยว เริ่มจากการอบกากตะกอนของเสี้ยวซึ่งมีลักษณะเป็นก้อน เส้นใยสีเทาอ่อนดังแสดงในภาพที่ 3.4(ก) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงเพื่อไล่น้ำออกจากกากตะกอนของเสี้ยวจากนั้นทำการคัดกรองขนาดกากตะกอนของเสี้ยวด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 30 เพื่อคัดขนาดกากตะกอนของเสี้ยวให้ได้เป็นผงกากตะกอนของเสี้ยวที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 600 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.4(ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.4 (ก) กากตะกอนของเสี้ยวจากโรงงานกระเบื้องหลังคา และ (ข) กากตะกอนของเสี้ยวที่ผ่านการอบและคัดกรองขนาด

### 3.2.2.3. ตะกรันเบ้าหลอมเหล็ก (Ladle furnace slag)

ตะกรันเบ้าหลอมเหล็กจากโรงงานหลอมเศษเหล็กเป็นวัสดุที่มีความแข็ง ขึ้นตอนในการเตรียมตะกรันเบ้าหลอมเหล็ก เริ่มจากทำการบดตะกรันเบ้าหลอมซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนแข็งสีดำเทา ดังแสดงในภาพที่ 3.5(ก) ด้วยเครื่องบดหยาบเพื่อให้ได้ตะกรันเบ้าหลอมเหล็กที่มีขนาดเล็ก ก่อนนำไปบดให้มีลักษณะเป็นผงตะกรันเบ้าหลอมเหล็กละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียด จากนั้นนำตะกรันเบ้าหลอมเหล็กที่ผ่านการบดจนเป็นผงละเอียดไปทำการคัดแยกโลหะออกด้วยแท่งแม่เหล็ก เพื่อลดสิ่งเจือปนที่เป็นโลหะออกจากผงตะกรันเบ้าหลอมเหล็ก จากนั้นทำการคัดกรองขนาดด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 200 เพื่อให้ได้อนุภาคตะกรันเบ้าหลอมที่มีขนาดเล็กละเอียดกว่า 75 ไมโครเมตร ดังแสดงดังภาพที่ 3.5(ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.5 (ก) ก้อนตะกรันเบ้าหลอมเหล็กจากโรงงานหลอมเหล็ก และ (ข) ผงตะกรันเบ้าหลอมเหล็กจากโรงงานหลอมเหล็กที่ได้หลังจากการบด

### 3.2.2.4. ตะกอนผงเศษแก้ว (Glass cullet powder)

ตะกอนผงเศษแก้วจากการเจียรกระจกนิรภัยสามารถเตรียมได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้ เริ่มต้นด้วยการบดก้อนตะกอนผงแก้วลักษณะเป็นก้อนแข็งสีขาวดังแสดงในภาพที่ 3.6(ก) ด้วยเครื่องบดหยาบเพื่อบดย่อยให้ก้อนตะกอนผงเศษแก้วมีขนาดเล็กลง จากนั้นจึงใช้เครื่องบดละเอียดเพื่อบดก้อนตะกอนผงเศษแก้วเป็นตะกอนผงเศษแก้วที่มีความละเอียดมากขึ้น หลังจากนั้นทำการคัดกรองขนาดของตะกอนผงเศษแก้วบดละเอียดด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 200 เพื่อให้ได้ผงตะกอนผงเศษแก้วที่มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.6(ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.6 (ก) ก้อนตะกอนผงเศษแก้วจากโรงงานกระจกแก้ว และ (ข) ตะกอนผงเศษแก้วจากโรงงานกระจกแก้ว

#### 3.2.2.5. ไดอะทอมไมต์ (Diatomite)

ไดอะทอมไมต์จากโรงงานผลิตเบียร์เป็นกากของเสียที่ได้จากขั้นตอนการกรองเบียร์สามารถเตรียมเพื่อใช้ในการทดลองโดยเริ่มต้นจากการอบไดอะทอมไมต์ซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อละเอียดสีน้ำตาลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงเพื่อไล่น้ำออกจากไดอะทอมไมต์หลังจากนั้นทำการคัดกรองขนาดของไดอะทอมไมต์ด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 200 ซึ่งทำให้ได้ไดอะทอมไมต์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลอ่อนที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 75 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ผงไดอะทอมไมต์

#### 3.2.3. การเตรียมชิ้นงาน

สำหรับการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ ต่อผงบิตาเฮมิไฮเดรต ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของกากตะกอนของเสียต่อสมบัติของยิปซัม ส่วนที่สามเป็นการศึกษาผลของตะกอนบ้ำหุลอมเหล็กต่อสมบัติของยิปซัม ส่วนที่สี่เป็น



การศึกษาสมบัติของตะกอนเศษแก้วต่อสมบัติของยิปซัม และส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลของ ไดอะทอไมต์ต่อสมบัติของยิปซัม โดยทำการผสมปีตาเฮมิไฮเดรต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ กากตะกอนของเสีย และวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม ได้แก่ ตะกรัน เบ้าหลอมเหล็ก ตะกอนเศษแก้ว และไดอะทอไมต์ ผสมวัตถุดิบทั้งหมดกับน้ำในอัตราส่วน 0.5 ต่อ น้ำหนักสาร และกำหนดปริมาณ Methocel 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กรดซิตริก (Citric acid) 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ Melment 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยเครื่องผสมและทำการ หล่อแบบชิ้นงานเป็นลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร โดยกำหนดอัตราส่วนผสมของชิ้นงานในรูป ของระบบ aHH-bPC-cCAC-dRS-eWS กำหนดให้ a แทนปริมาณของปีตาเฮมิไฮเดรตมีค่าตั้งแต่ 70-90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก b แทนปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าตั้งแต่ 0-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก c แทนปริมาณของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์มีค่าตั้งแต่ 0-5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก d แทนปริมาณของกากตะกอนของเสียมีค่าตั้งแต่ 0-15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ e แทนปริมาณของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมีค่าตั้งแต่ 0-15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ HH แทนปีตาเฮมิไฮเดรต PC แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้สัญลักษณ์ RS แทนกากตะกอนของเสีย และแทนวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมด้วย WS ที่ทำการศึกษาด้วยกัน 3 ชนิดคือ ตะกรันเบ้าหลอมเหล็ก (LS) ไดอะทอไมต์ (DI) และตะกอนเศษแก้ว (GC) จากนั้นทำการบ่มชิ้นงานในอากาศโดยการคลุมชิ้นงานด้วยผ้าชุบน้ำหมาด เก็บในกล่องพลาสติก ควบคุมความชื้นเพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน แล้วจึงหยุดปฏิกิริยา ด้วยสารละลายอะซิโตน นำส่วนผสมยิปซัมไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ

### 3.3. การตรวจสอบลักษณะเฉพาะ

#### 3.3.1. สัณฐานวิทยา (Morphology)

ทำการทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของวัตถุดิบและชิ้นงานในงานวิจัยนี้ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) รุ่น JSM-6480LV ของ JEOL โดยทำการเตรียมตัวอย่างด้วยการติดเทปกาวคาร์บอนด้านบนของแท่นวาง โลหะ จากนั้นชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นผงจะทำการโรยลงบนเทปกาวคาร์บอนบางๆและให้กระจายตัว ส่วนชิ้นงานที่ลักษณะเป็นก้อนจะทุบให้มีขนาดเล็กแล้ววางลงบนเทปกาวคาร์บอน จากนั้นใช้ ลูกยางเป่าให้เศษฝุ่นผงที่ไม่ยึดติดกับเทปกาวคาร์บอนหลุดออกมา ก่อนนำไปฉาบผิวด้วยทอง

เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.3.2. องค์ประกอบทางเฟส (Phase content)

ทำการทดสอบองค์ประกอบทางเฟสของวัสดุดิบและชิ้นงานในงานวิจัยนี้ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer รุ่น D8 Advanced จากบริษัท Bruker โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ มีการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบโดยการบดชิ้นงานตัวอย่างให้ละเอียด หลังจากนั้นนำผงตัวอย่างใส่ลงในช่องสำหรับกรอกสารแล้วใช้แผ่นกระจกสไลด์กวดผงสารตัวอย่างให้เรียบและอัดแน่นเต็มช่องใส่สาร จากนั้นนำไปทดสอบหาองค์ประกอบทางเฟสซึ่งมีค่าตัวแปรที่กำหนดในการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรในการทดสอบหาองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer

ตัวแปร	รายละเอียด
Scan angle (°)	5-70
Scan rate (°/point)	0.02
Target	Cu K $\alpha$ ( $\lambda=1.54060 \text{ \AA}$ )
Temperature (°C)	25 (Room temperature)
Filter	Ni
Generator voltage (kV)	40
Generator current (mA)	40

### 3.3.3. องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)

การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบและตัวอย่างชิ้นงานในงานวิจัยนี้ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence spectrometry: XRF แบบ WDX รุ่น PW 2400 ยี่ห้อ Philips โดยใช้หลักการในการวัดอัตราการเรืองรังสีเอ็กซ์ที่เป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุซึ่งเกิดจากการคลายพลังงานจากอะตอมของธาตุที่สภาวะถูกกระตุ้น ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบต้องไม่มีความชื้น จึงต้องผ่านกระบวนการอบแห้งก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence spectrometry

### 3.3.4. การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle size distribution)

การทดสอบการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C136 – 84 <sup>(29)</sup> จากตะแกรงร่อนขนาดใหญ่จนถึงขนาดเล็ก เพื่อหาขนาดอนุภาคของตัวอย่างโดยเปรียบเทียบวัตถุที่ค้างตะแกรงร่อนขนาดต่างๆ กับน้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่าง โดยสามารถแบ่งวิธีการทดสอบออกเป็น 2 วิธีคือ แบบแห้ง (Dry sieve) เริ่มต้นจากการร่อนตัวอย่างที่ใส่ในตะแกรงร่อนที่เรียงลำดับขนาดตะแกรงร่อนจากขนาดใหญ่ไปขนาดเล็ก จากนั้นชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าน้ำหนักของตัวอย่างที่ค้างอยู่ในตะแกรงร่อนในแต่ละชั้น แล้วคำนวณหาค่าร้อยละของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงร่อนโดยน้ำหนัก ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือแบบเปียก (Wet sieve) มีกระบวนการทดสอบเหมือนกันกับแบบแห้ง แต่เป็นวิธีการร่อนตะแกรงร่อนโดยการร่อนในน้ำ

## 3.4. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกล

### 3.4.1. เวลาที่ใช้ในการก่อตัว (Setting time)

เวลาที่ใช้ในการก่อตัวสามารถทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Vicat apparatus ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191-07<sup>(30)</sup> ดังแสดงในภาพที่ 3.8 เริ่มต้นการทดสอบด้วยการเตรียมผสมส่วนผสมยิปซัมตามอัตราส่วนที่กำหนดลงในโม่อย่างจนเต็ม จากนั้นใช้ค้อนยางเคาะด้านบนของแม่พิมพ์ยางเพื่อทำการไล่ฟองอากาศภายในออก แล้วจึงทำการปิดบริเวณผิวหน้าส่วนผสมยิปซัมให้เรียบ จากนั้นทำการตั้งค่าเครื่อง Vicat apparatus โดยทำการปล่อยปลายเข็มสัมผัสที่ผิวหน้าของส่วนผสมยิปซัมที่ได้ทำการเตรียมในขั้นต้นแรก จากนั้นทำการลอคเข็มไม่ให้ขยับ เพื่อปรับแถบอ่านค่าของเครื่อง Vicat apparatus ให้ชี้กลางอยู่ที่เลขศูนย์ หลังจากปล่อยให้เกิดการก่อตัวระยะหนึ่งจึงทำการปล่อยเข็มลงสู่ผิวหน้าของส่วนผสมยิปซัมและสังเกตค่าจากแถบอ่าน ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนแถบอ่านค่าหยุดที่ 25 มิลลิเมตร จึงบันทึกช่วงระยะเวลาเริ่มต้นในการก่อตัว (Initial setting time) ส่วนเวลาสุดท้ายของการก่อตัว (Final setting time) เป็นเวลาที่เข็มไม่สามารถเจาะผ่านชิ้นงานได้ (ระยะจะเริ่มนับตั้งแต่เริ่มผสมวัตถุดิบทั้งหมดกับน้ำ) ค่าที่วัดได้จะมีหน่วยเป็นนาที



ภาพที่ 3.8 เครื่อง Vicat apparatus

### 3.4.2. ความแข็งแรงอัด (Compressive strength)

ความแข็งแรงอัดสามารถทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น 5882 ผลิตโดยบริษัท INSTRON ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C-109<sup>(31)</sup> ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ขั้นตอนในการทดสอบเริ่มจากการหล่อแบบส่วนผสมยิปซัมตามอัตราส่วนผสมที่กำหนดด้วยแม่พิมพ์ทองเหลืองขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีการกระทำซึ่งขึ้นงานขณะเทใส่แม่พิมพ์เพื่อให้ฟองอากาศและเพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดสามารถไหลตัวได้ทั่วถึงทั้งขึ้นงาน จากนั้นทำการปาดผิวหน้าขึ้นงานให้เรียบ จากนั้นจึงปล่อยให้แข็งตัว หลังจากขึ้นงานแข็งตัวเรียบร้อยแล้วจึงทำการถอดส่วนผสมยิปซัมออกจากแม่พิมพ์ทองเหลืองซึ่งผ่านการทำความสะอาดแล้วทาดด้วยน้ำมันบางๆ เพื่อให้สะดวกในการถอดขึ้นงานเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นทำการบ่มขึ้นงานตามระยะเวลาที่กำหนดจนครบ จึงหยุดการทำปฏิกิริยาจากนั้นจึงทำการวัดขนาด (กว้างxยาวxสูง) และซึ่งนำนักขึ้นงาน ก้อนนำไปทดสอบค่าความแข็งแรงอัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากนั้นบันทึกค่าแรงกดที่ได้ แล้วคำนวณตามสมการที่ 3.1

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

$\sigma$  = ความแข็งแรงอัด (Compressive strength, MPa)

$F$  = แรงกด (N)

$A$  = พื้นที่ผิวสัมผัส ( $\text{mm}^2$ )



ภาพที่ 3.9 เครื่อง Universal Testing Machines รุ่น 5882

### 3.4.3. การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

การดูดซึมน้ำของยิปซัมสามารถทดสอบตามมาตรฐาน IS 2542-1964<sup>(32)</sup> เริ่มต้นการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำด้วยการหล่อชิ้นงานเช่นเดียวกับการทดสอบความแข็งแรงอัด แล้วนำชิ้นงานไปบ่มเป็นระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มชิ้นงานและผ่านการหยุดปฏิกิริยาเรียบร้อยแล้ว นำส่วนผสมยิปซัมแช่ในน้ำ โดยไม่ให้สัมผัสกับภาชนะ และให้ระดับน้ำอยู่เหนือชิ้นงานประมาณ 3 เซนติเมตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดระยะเวลานำผ้าชุบน้ำพอหมาดซับน้ำส่วนเกินบนผิวหน้าของชิ้นงานออกจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักหลังอิมด้ว ( $W_1$ ) หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จนคงที่ จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงานอบแห้ง ( $W_2$ ) หลังจากนั้นนำค่าน้ำหนักชิ้นงานหลังอิมด้ว ( $W_1$ ) และค่าน้ำหนักชิ้นงานอบแห้ง ( $W_2$ ) แทนค่าในสมการที่ 3.2 เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน

$$\text{Percentage absorption} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_2} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

### 3.4.4. ความคงทน (Durability)

ความคงทนของของส่วนผสมยิปซัมสามารถทดสอบโดยทำตามขั้นตอนตามมาตรฐาน IS 2542-1964<sup>(32)</sup> และ ASTM C1262-07<sup>(33)</sup> ขั้นตอนในการทดสอบความคงทนเริ่มต้นจากการหล่อชิ้นงานเช่นเดียวกับการทดสอบความแข็งแรงอัดและการทดสอบการดูดซึมน้ำ จากนั้นนำ

ชิ้นงานไปบ่มเป็นระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มชิ้นงานและผ่านการหยุดปฏิกิริยาแล้ว ทำการบันทึกน้ำหนักของส่วนผสมยิปซัม ก่อนนำส่วนผสมยิปซัมแช่ในน้ำ โดยไม่ให้สัมผัสกับภาชนะ และให้ระดับน้ำอยู่เหนือชิ้นงาน เป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดระยะเวลา นำผ้าชุบน้ำพองหมาดซับน้ำส่วนเกินบนผิวหน้าของชิ้นงานออก หลังจากแช่ชิ้นงานในน้ำแล้ว ทำการอบชิ้นงานที่ได้ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงานอบแห้ง บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบทั้งหมด 10 รอบ สังเกตลักษณะของส่วนผสมยิปซัมที่ผ่านการแช่และให้ความร้อนจนครบ

### 3.4.5. ความทนทานต่อการละลายน้ำ (Water resistance)

ความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมสามารถทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C473-07<sup>(34)</sup> ขั้นตอนในการทดสอบสมบัติความทนทานต่อการละลายเริ่มต้นจากการหล่อชิ้นงานรูปทรงกระบอกขนาด 1.5X3 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นงานไปบ่มเป็นระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มชิ้นงานและผ่านการหยุดปฏิกิริยา นำส่วนผสมยิปซัมแช่ในน้ำ โดยไม่ให้สัมผัสกับภาชนะ และให้ระดับน้ำอยู่เหนือชิ้นงาน เป็นเวลา 2 8 และ 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดระยะเวลานำผ้าชุบน้ำพองหมาดซับน้ำส่วนเกินบนผิวหน้าของชิ้นงานออกแล้วนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักหลังอิมิตัว ( $W_1$ ) จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาประมาณ 24 ชั่วโมงจนคงที่ (ความแตกต่างของมวลหลังการชั่ง 2 ครั้งต่อเนื่องกัน ในระยะเวลา 24 ชั่วโมงต้องน้อยกว่าร้อยละ 0.1) จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงานอบแห้ง ( $W_2$ ) นำน้ำหนักหลังอิมิตัวลบออกด้วยน้ำหนักของชิ้นงานอบแห้งเพื่อหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงดังสมการที่ 3.2 โดยสามารถอธิบายความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมด้วยค่าการดูดซึมน้ำและน้ำหนักที่หายไปของส่วนผสมยิปซัม เมื่อค่าการดูดซึมน้ำมีค่าสูงและมีค่าน้ำหนักที่หายไปต่ำจะแสดงค่าความทนทานต่อการละลายน้ำที่สูง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองโดยได้แบ่งออกเป็น 6 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่หนึ่งกล่าวถึงลักษณะเฉพาะของวัตถุบิชนิดต่างๆ ส่วนที่สองกล่าวถึงผลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ต่อสมบัติของยิปซัม ส่วนที่สามกล่าวถึงผลของกากตะกอนของเสียต่อสมบัติของยิปซัม ส่วนที่สี่กล่าวถึงผลของตะกรันเบาหุลอมเหล็กต่อสมบัติของยิปซัม ส่วนที่ห้ากล่าวถึงสมบัติของตะกอนผงเศษแก้วต่อสมบัติของยิปซัม และส่วนที่หกกล่าวถึงผลของไดอะทอมไมต์ต่อสมบัติของยิปซัม

#### 4.1. ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุบิ

วัตถุบิที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ ตะกรันเบาหุลอมเหล็ก ไดอะทอมไมต์ ตะกอนเศษแก้ว กากตะกอนของเสีย และยิปซัมฟลูแก๊ส ซึ่งผลของการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุบิแต่ละชนิดแสดงได้ดังนี้ คือ

##### 4.1.1. องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุบิด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence spectrometry ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ตะกรันเบาหุลอมเหล็ก ไดอะทอมไมต์ ตะกอนผงเศษแก้ว และกากตะกอนของเสียต่างๆ ประกอบไปด้วยซิลิกาในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยไดอะทอมไมต์นั้นพบว่ามีปริมาณซิลิกาสูงถึง 91.67 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับตะกอนผงเศษแก้ว ตะกรันเบาหุลอมเหล็กและกากตะกอนของเสียมีปริมาณของซิลิกาที่ต่ำกว่าคือ 66.54 21.96 และ 18.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ นอกจากซิลิกาแล้ว ตะกรันเบาหุลอมเหล็ก กากตะกอนของเสีย และตะกอนผงเศษแก้ว ยังประกอบไปด้วยแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงคือ 38.9 37.5 และ 11.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งทั้งซิลิกาและแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก สำหรับยิปซัมฟลูแก๊สนั้นมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือซัลเฟอไรโตรออกไซด์ 57.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแคลเซียมออกไซด์ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อดำเนินการกลับเป็นเฟส  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  แล้วถือได้

ว่ามีความบริสุทธิ์มากกว่า 97%โดยน้ำหนัก โดยความบริสุทธิ์ที่สูงของยิปซัมฟลูแก๊สจะมีผลต่อสมบัติของพลาสติกเตอร์ที่ได้จากการเผาแคลไซน์

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบชนิดต่างๆ

สูตรเคมี	องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)				
	ตะกรันเบา หลอมเหล็ก	ไดอะทอมไมต์	ตะกอนผง เศษแก้ว	กากตะกอน ของเสีย	ยิปซัม ฟลูแก๊ส
MgO	11.23	0.53	5.09	7.33	0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.66	1.79	1.39	6.98	0.10
SiO <sub>2</sub>	21.96	91.67	66.54	18.14	0.30
SO <sub>3</sub>	4.34	0.31	0.15	9.35	57.38
CaO	38.85	0.54	11.91	37.46	39.96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.23	1.92	0.72	6.73	0.12
Other	11.73	3.24	14.20	14.01	2.00

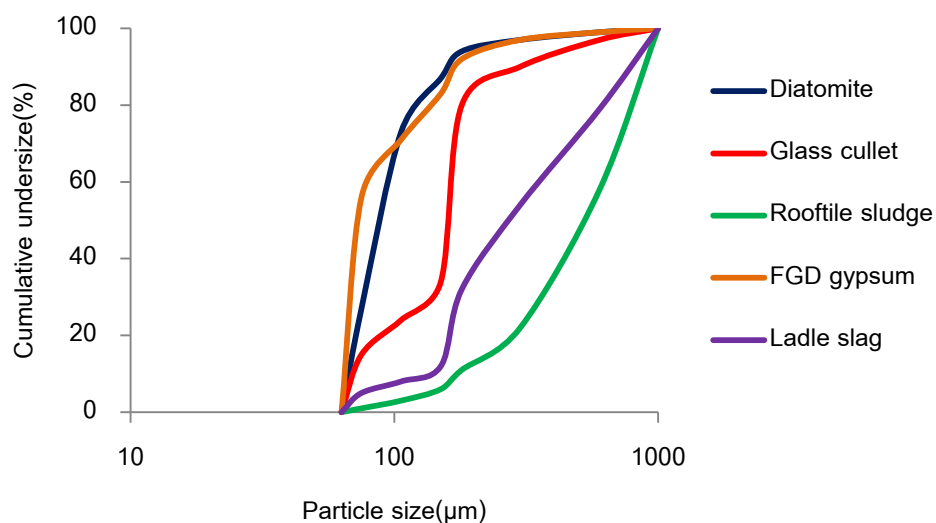
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบด้วยวิธีการใช้ตะแกรงร่อนแบบแห้ง

ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )	ปริมาณวัตถุดิบที่ค้างบนตะแกรงร่อน(%)				
	ตะกรันเบา หลอมเหล็ก	ไดอะทอมไมต์	ตะกอน เศษแก้ว	กากตะกอน ของเสีย	ยิปซัมฟลูแก๊ส
600-300	21	1	3	42	1
300-180	25	2	7	36	2
180-150	22	3	10	11	5
150-106	20	7	46	5	9
106-75	4	14	10	3	12
75-63	3	46	9	2	15
<63	5	27	15	1	56



#### 4.1.2. การกระจายขนาดอนุภาค

การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุชนิดต่างๆซึ่งทดสอบโดยวิธีการใช้ตะแกรงร่อนแบบแห้ง (Dry sieve analysis) <sup>(35)</sup> แสดงในตารางที่ 4.2 ปริมาณยิปซัมฟลูแก๊สที่ติดค้างอยู่บนตะแกรงร่อนที่สามารถให้วัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 63 ไมครอนผ่านได้มีปริมาณมากที่สุด และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 ( $d_{50}$ ) ต่ำที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4.1 โดยตะแกรงร่อนที่มีความละเอียดของตะแกรงมากกว่าสามารถกรองสิ่งเจือปนต่างๆเช่น ก้อนหิน เศษไม้ และก้อนยิปซัมฟลูแก๊สขนาดใหญ่ออกได้ สำหรับกากตะกอนของเสียจากอุตสาหกรรมกระเบื้องหลังคาซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใย มีปริมาณกากตะกอนของเสียติดค้างอยู่บนตะแกรงร่อนเบอร์ 30 มากที่สุด ซึ่งเป็นตะแกรงร่อนที่วัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 300 ไมครอนสามารถผ่านไปได้และมีเศษไม้กับก้อนกากตะกอนของเสียติดค้างอยู่บนตะแกรงร่อนที่มีความละเอียดมากกว่าบางส่วน ส่วนปริมาณตะกอนน้ำหอมเหล็กติดค้างอยู่บนตะแกรงร่อนเบอร์ 50 มากที่สุด ซึ่งเป็นตะแกรงร่อนที่ติดค้างอยู่ในช่วงขนาดอนุภาค 600-106 ไมครอน สำหรับตะกอนเศษแก้วติดค้างอยู่บนตะแกรงร่อนเบอร์ 100 มากที่สุดซึ่งที่ตะแกรงร่อนเบอร์นี้สามารถให้วัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 106 ไมครอนผ่านได้ วัสดุชนิดสุดท้ายคือไดอะทอมไมต์ซึ่งมีความละเอียดสูงที่สุดในวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีปริมาณไดอะทอมไมต์ติดค้างอยู่ที่ตะแกรงร่อนเบอร์ 200 มากที่สุด ซึ่งเป็นตะแกรงร่อนที่วัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 63 ไมครอนสามารถผ่านได้ โดยสิ่งเจือปนอื่นๆ อาทิเช่นเศษไม้ ก้อนวัสดุที่มีขนาดใหญ่และเกาะตัวกันแน่นจะติดค้างอยู่บนตะแกรงร่อนที่มีความละเอียดของช่องว่างระหว่างตะแกรงหยาบกว่า



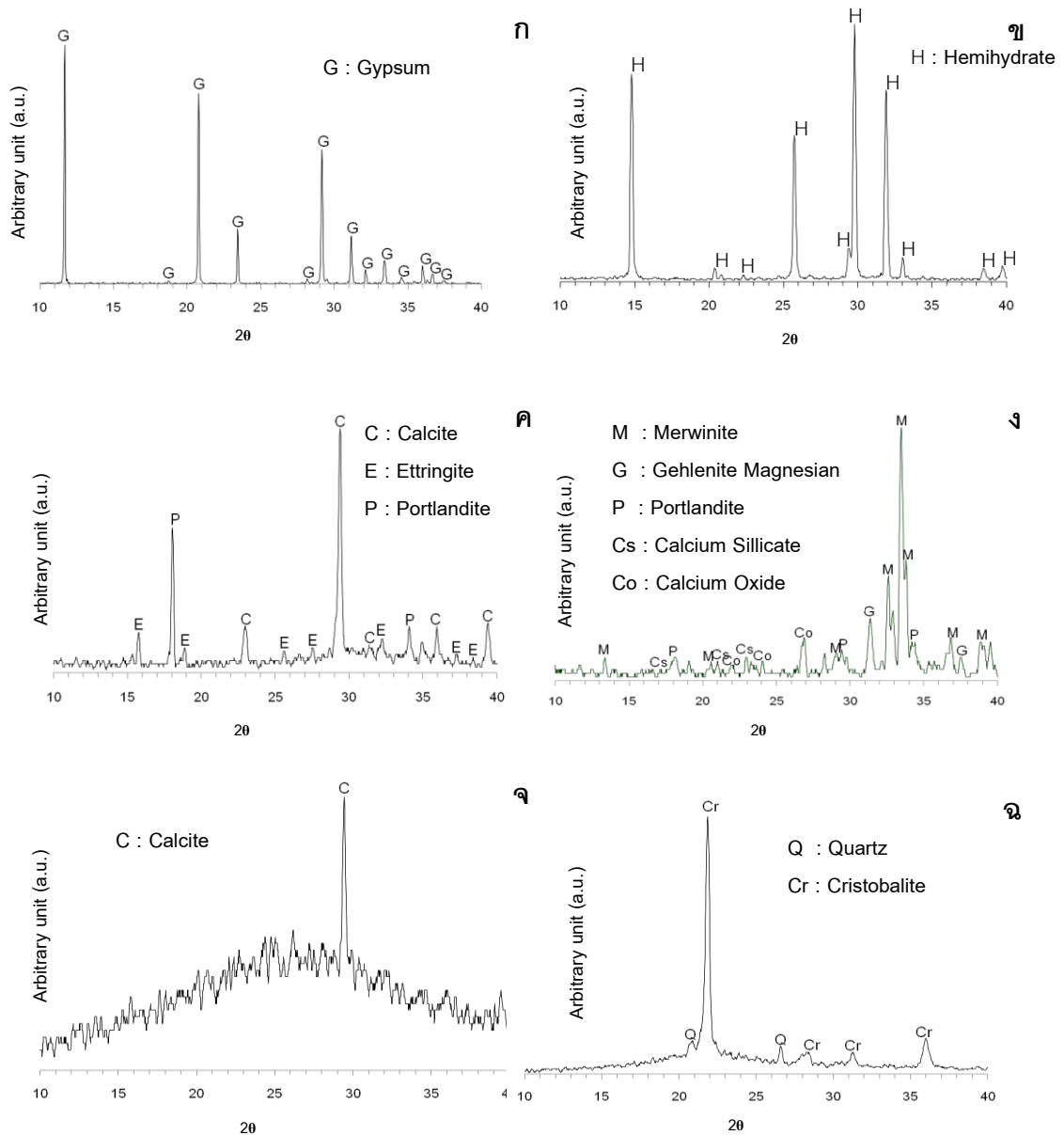
ภาพที่ 4.1 การกระจายขนาดสะสมของขนาดอนุภาคเฉลี่ยของกากแต่ละชนิด

#### 4.1.3. องค์ประกอบทางเฟส

องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุประเภทต่างๆ จากโรงงานที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้พบว่า ผงยิปซัมฟลูออไรด์มีเฟสของยิปซัมหรือเฟสของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเพียงเฟสเดียว ( $\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$ , JCPDS หมายเลข 01-074-1433) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบมอโนคลินิก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีที่พบแคลเซียมออกไซด์และซัลเฟตปริมาณมากในยิปซัมฟลูออไรด์ ยิปซัมฟลูออไรด์ที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2.1 พบว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสจากเฟสของยิปซัมเป็นเฟสของปีตาฮีไมไฮเดรตซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ( $\text{Ca}(\text{SO}_4)0.5(\text{H}_2\text{O})$ , JCPDS หมายเลข 00-041-0225) ส่วนภาคตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคาพบมีเฟสทั้งหมด 4 เฟส คือ เอททริงไคต์ ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , JCPDS หมายเลข 00-041-1451), แคลไซต์ในรูปผลึกแบบรวมโบฮีตไรต์ ( $\text{CaCO}_3$ , JCPDS หมายเลข 00-005-0586), โครงสร้างของควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ , JCPDS หมายเลข 01-089-1961) และปอร์ตแลนด์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , JCPDS หมายเลข 00-044-1481) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลแบบเดียวกัน ส่วนตะกอนน้ำหลอมเหล็กมีเฟสทั้งหมด 5 เฟส ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ไฮดรอกไซด์มีรูปผลึกแบบเฮกซะโกนัล ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , JCPDS หมายเลข 00-044-1481) Merwinite ซึ่งมีรูปผลึกแบบมอโนคลินิก ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ , JCPDS หมายเลข 01-074-0382) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ , JCPDS หมายเลข 00-017-0912), Gehlenite magnesian ( $\text{Ca}_2(\text{Mg}_{0.25}\text{Al}_{0.75})(\text{Si}_{1.25}\text{Al}_{0.75}\text{O}_7)$ , JCPDS หมายเลข 01-079-2422) และแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , JCPDS หมายเลข 00-003-1084) ซึ่งมีรูปผลึกแบบเตตระโกนัล, องค์ประกอบทางเฟสของตะกอนผงเศษแก้วพบเฟส 2 เฟส ได้แก่ แคลไซต์ในรูปผลึกแบบรวมโบฮีตไรต์ ( $\text{CaCO}_3$ , JCPDS หมายเลข 00-005-0586) กับซิลิเกตที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , JCPDS หมายเลข 00-016-0818) และวัสดุบิซนิตสุดท้ายคือ ไดอะทอไมต์พบเฟสของโครงสร้างของควอตซ์ที่อุณหภูมิต่ำ ( $\text{SiO}_2$ , JCPDS หมายเลข 01-089-1961) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล กับคริสโตบาไลต์ที่อุณหภูมิต่ำ ( $\text{SiO}_2$ , JCPDS หมายเลข 01-077-1317) องค์ประกอบทางเฟสทั้งหมดของวัสดุบิแสดงใน ภาพที่ 4.2 (รายละเอียดของเฟสแต่ละชนิดแสดงในภาคผนวก ข)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของโครงสร้างผลึกที่พบในไดอะทอไมต์ ตะกอนผงเศษแก้ว และตะกอนน้ำหลอมเหล็กพบว่ามีความเป็นออสัญฐานยกเว้นตะกอนน้ำหลอมเหล็กซึ่งมีความเป็นผลึก แม้จะมีองค์ประกอบของซิลิกาเหมือนกันพิจารณาจากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุบิทั้ง 3 ชนิด แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความเป็นออสัญฐานของตะกอนผงเศษแก้วกับ

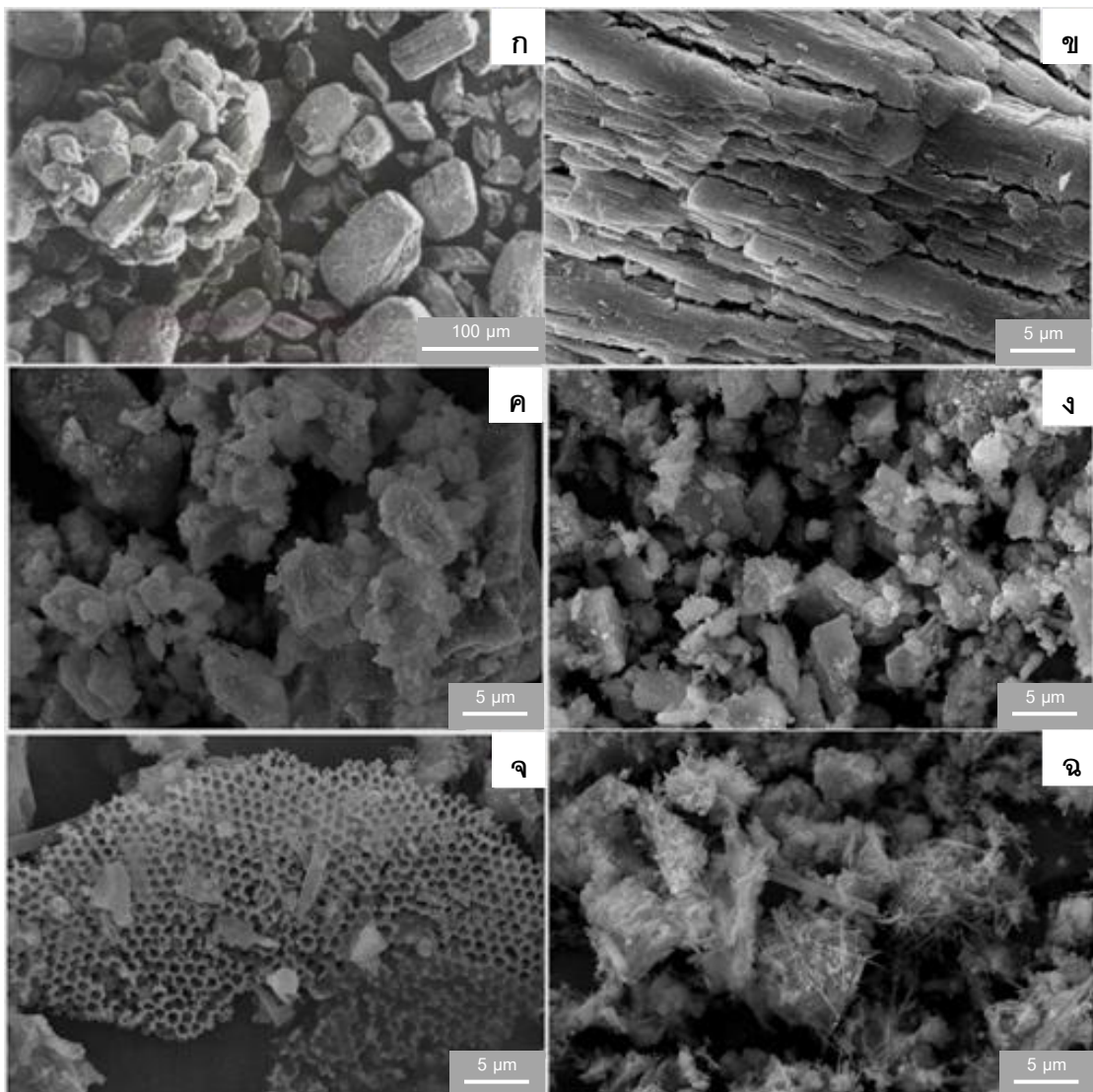
ไดอะทอไมต์พบว่าตะกอนผงเศษแก้วมีความเป็นอสัณฐานสูงกว่าไดอะทอไมต์ แม้ว่าจะมีปริมาณซิลิกาสูงกว่า



ภาพที่ 4.2 องค์ประกอบทางเฟสของผงวัสดุดิบ ก)ยิปซัมฟลูไคส์ ข)บีตาเฮมิไฮเดรต ค)กากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคา ง)ตะกักรับน้ำหลอมเหล็ก จ)ตะกอนผงเศษแก้ว และ ฉ)ไดอะทอไมต์

#### 4.1.4. สัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่ถูกใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมชิ้นงาน ซึ่งประกอบด้วยยิปซัมฟลูแก๊ส ตะกรันเบาหกลมเหล็ก ตะกอนผงเศษแก้ว ไดอะทอมไมต์ และกากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคาแสดงดังในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ก) ยิปซัมฟลูแก๊ส<sup>(4)</sup> ข) ปีตาเฮมิไฮเดรต ค) ตะกรันเบาหกลมเหล็ก ง) ตะกอนผงเศษแก้ว จ) ไดอะทอมไมต์ และ ฉ) กากตะกอนของเสีย

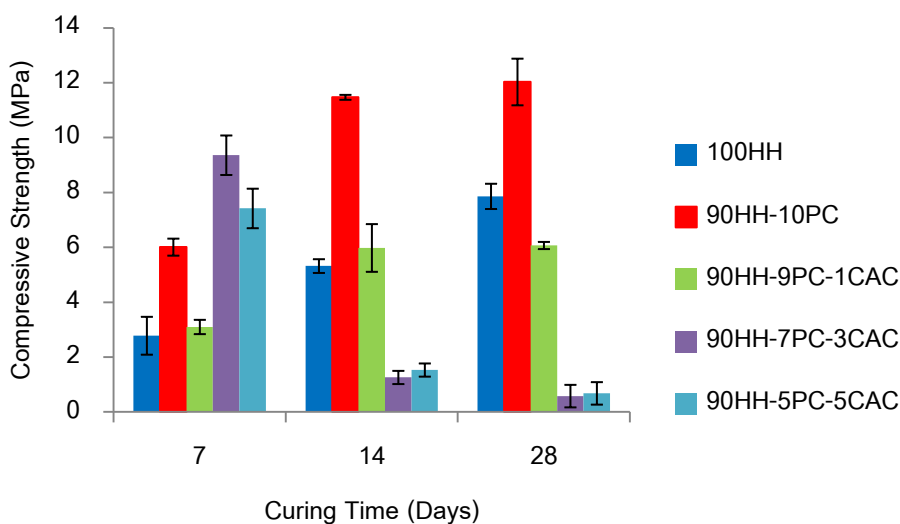
จากภาพที่ 4.3 พบว่าผงยิปซัมฟลูแก๊สมีลักษณะรูปร่างเป็นแท่งยาว มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 ไมครอน ส่วนผงปีตาเฮมิไฮเดรตซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากการสังเคราะห์ยิปซัมฟลูแก๊สมีลักษณะเป็นแท่งรูปร่างไม่สม่ำเสมอ เรียงตัวเป็นชั้นขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 5 ไมครอน ส่วนตะกรันเข้าหาลอมเหล็กและตะกอนผงเศษแก้ว มีลักษณะค่อนข้างกลม และมีบางส่วนที่เกาะกลุ่มเป็นแท่งรูปร่างแตกต่างกัน กระจายตัวปะปนอยู่กับอนุภาคขนาดใหญ่ แต่ตะกรันเข้าหาลอมมีลักษณะอนุภาคเป็นแผ่นเกาะเรียงเป็นชั้นๆ จนเป็นแท่งขนาดใหญ่ นอกจากนี้มีกลุ่มอนุภาคขนาดเล็กเกาะกลุ่มเรียงตัวบนอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ สำหรับไดอะทอมไมต์มีลักษณะอนุภาคประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ขนาดอนุภาคของไดอะทอมไมต์มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน มีลักษณะอนุภาครูปร่างไม่สม่ำเสมอ ส่วนใหญ่เป็นแท่งและเป็นแผ่นขนาดเล็ก ส่วนวัตถุดิบอย่างสุดท้ายคือกากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคา มีลักษณะอนุภาคที่มีรูปร่างแตกต่างกันปะปนกันอยู่ โดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนทรงกลมขนาดใหญ่แตกต่างกันปะปนกับอนุภาคลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็กเกาะกลุ่มจำนวนมากอยู่บนอนุภาคก้อนทรงกลมขนาดใหญ่

#### 4.2. ผลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ต่อสมบัติของยิปซัม (ระบบ HH-PC-CAC)

ในการทดลองส่วนนี้ได้เตรียมสูตรส่วนผสมให้อยู่ในระบบของปีตาเฮมิไฮเดรต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์(HH-PC-CAC) โดยปีตาเฮมิไฮเดรตที่ได้จากการสังเคราะห์ยิปซัมฟลูแก๊สที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในการเตรียมชิ้นงานได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของส่วนผสมโดยการเติมส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ (CAC) ลงไปตามตารางที่ 4.3 ซึ่งผลการทดสอบความแข็งแรงอัด (Compressive strength) และการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มในระยะเวลาที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนผสมส่วนผสมยิปซั่มในระบบ HH-PC-CAC

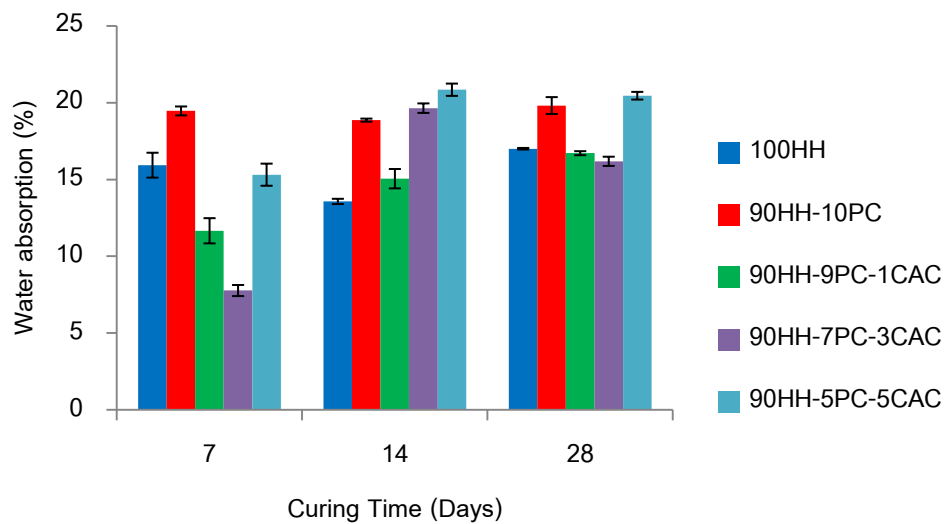
สูตรส่วนผสม	ส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	HH	PC	CAC
100HH	100	0	0
10PC	90	10	0
9PC-1CAC	90	9	1
7PC-3CAC	90	7	3
5PC-5CAC	90	5	5



ภาพที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงอัดของชิ้นงานที่เตรียมในระบบ HH-PC-CAC ที่การบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

การพัฒนากำลังอัดของส่วนผสมในระบบ HH-PC-CAC นั้นเป็นผลมาจากผลิตภัณฑ์ไดไฮเดรต ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (rehydration) ของเอมไฮเดรต และผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (C-S-H gel) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ของซีเมนต์จากภาพที่ 4.4 ความแข็งแรงอัดของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มนานขึ้น อันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมของ 90HH-10PC ที่จะมี ความแข็งแรงอัดสูงสุดคือ 12.03 MPa ที่การบ่ม 28 วัน เมื่อพิจารณาการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่แสดงใน

ภาพที่ 4.5 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำไม่ได้ลดลงตามสัดส่วนของความแข็งแรงอัดที่เพิ่มขึ้นของส่วนผสม 90HH-10PC และ 90HH-9PC-1CAC ที่การบ่ม 28 วัน การดูดซึมน้ำของส่วนผสม 90HH-10PC และ 90HH-9PC-1CAC มีอยู่ที่ประมาณ 19.81 เปอร์เซ็นต์ และ 16.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) ลงไปในยิปซัมจะก่อให้เกิด C-S-H gel ขึ้นในชั้นงาน การที่ชั้นงานมีความแข็งแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ 100HH อันเนื่องมาจากการแทรกไปตามช่องว่างระหว่างผลึกไดไฮเดรตหรือยิปซัมของ C-S-H gel ยิ่งการบ่มที่นานขึ้น C-S-H gel ก็จะมีเกิดมากขึ้นทำให้เกิดการพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้นด้วย



ภาพที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชั้นงานที่เตรียมในระบบ HH-PC-CAC ที่การบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

การเติมแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ลงไปในส่วนผสมเพื่อต้องการให้เกิดเฟสเอทริงไคต์มากขึ้น ซึ่งเอทริงไคต์นี้เป็นเฟสที่ไม่ละลายน้ำโดยแคลเซียมในแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์จะไปทำปฏิกิริยากับยิปซัมก่อให้เกิดเอทริงไคต์จากผลการทดสอบความแข็งแรงอัดแสดงดังภาพที่ 4.5 พบว่าเมื่อมีปริมาณของ CAC มากขึ้นคือ 3เปอร์เซ็นต์ และ 5เปอร์เซ็นต์ จะไม่พบการพัฒนากำลังอัดของชั้นงานเมื่อระยะเวลาในการบ่มนานขึ้น ส่วนผสมระบบ 90HH-7PC-3CAC และ 90HH-5PC-5CAC มีความแข็งแรงอัดสูงสุดที่การบ่ม 7 วัน คือ 9.36 MPa และ 7.42 MPa ตามลำดับ หลังจากผ่านการบ่มที่ 14 และ 28 วันพบว่าทั้ง 2 ส่วนผสมความแข็งแรงอัดลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยที่การบ่ม 28 วัน 90HH-7PC-3CAC และ 90HH-5PC-5CAC ความแข็งแรงอัดลดลง

เหลือ 0.58 MPa และ 0.68MPa ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากการดูดซึมน้ำในภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีค่าสูงขึ้นหลังจากผ่านการบ่มที่ 14 และ 28 วัน โดย 90HH-7PC-3CAC และ 90HH-5PC-5CAC ที่การบ่ม 28 วัน จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเป็น 16.18 เปอร์เซ็นต์ และ 20.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



(ก) Calcium aluminate  
cement 1%

(ข) Calcium aluminate  
cement 3%

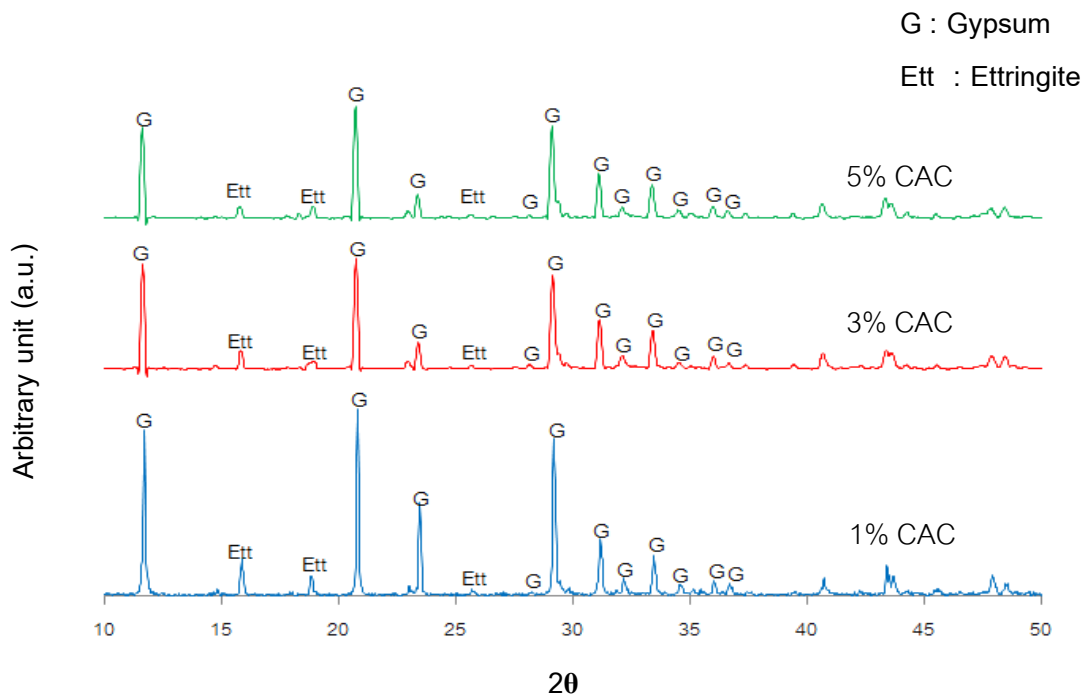
(ค) Calcium aluminate  
cement 5%

**ภาพที่ 4.6** ภาพถ่ายชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ก) 1 เปอร์เซ็นต์ ข) 3 เปอร์เซ็นต์ และ ค) 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน

เอททริงไคต์เป็นผลึกรูปร่างคล้ายเข็มสานกันไปมา ปริมาณจะมากขึ้นและขนาดของผลึกจะใหญ่ยาวขึ้นได้ก็ต่อเมื่อในระบบมีสารประกอบประเภทแคลเซียมซัลเฟตและแคลเซียมอะลูมิเนตอยู่มาก ในการทดลองนี้ส่วนผสมที่ใช้เตรียมชิ้นงานประกอบไปด้วยแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนต (CA) ที่อยู่ใน CAC ส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ 3 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์และผ่านการบ่มเป็น 28 วันพบรอยแตกบนส่วนผสมยิปซัมดังแสดงในภาพที่ 4.6 ซึ่งแตกต่างกับส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์ ไม่พบรอยแตกบนชิ้นงาน โดยเฉพาะส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์มีการบวมตัว เนื่องจากปริมาณผลึกเอททริงไคต์เพิ่มมากขึ้นจนเกิดการดันตัวภายในโครงสร้างผลึก และเกิดการขยายตัวของชิ้นงานซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ในภาพที่ 4.7 เมื่อปริมาณ CAC มากขึ้น เอททริงไคต์ก็เกิดได้ดีขึ้นด้วย ดังนั้นการเติมแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความหนาแน่นให้กับยิปซัมได้ แต่การ



เพิ่มปริมาณแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ในชิ้นงานมากเกินไปจะทำให้ส่วนผสมยิปซัมเกิดการขยายตัวจนเกิดรอยแตกได้ ดังนั้นปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของส่วนผสมยิปซัมอยู่ที่ 1 เปอร์เซ็นต์ แต่ในส่วนผสมที่ไม่มีแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ผสมมีค่าความแข็งแรงอัดต่ำกว่าในส่วนผสมยิปซัมที่มีแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ผสม 1 เปอร์เซ็นต์



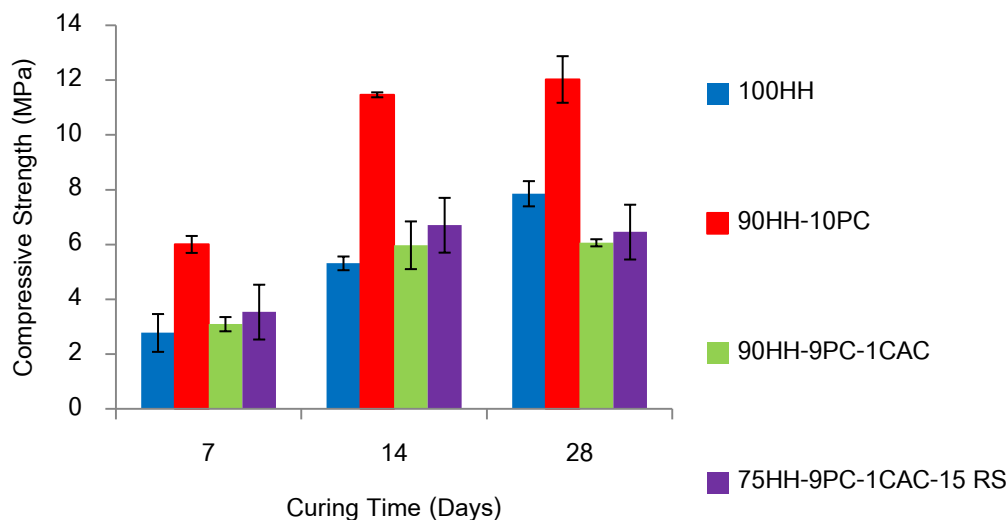
**ภาพที่ 4.7** องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมของแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

โดยสรุปการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ในอัตราส่วน 9:1 ส่งผลให้ความแข็งแรงอัดมีค่าสูงและการดูดซึมน้ำต่ำ เพราะเกิดเอททริงไกต์และ C-S-H เข้าแทรกในช่องว่างของยิปซัม

#### 4.3 ผลของกากตะกอนของเสียต่อสมบัติของยิปซัม (ระบบ HH-PC-CAC-RS)

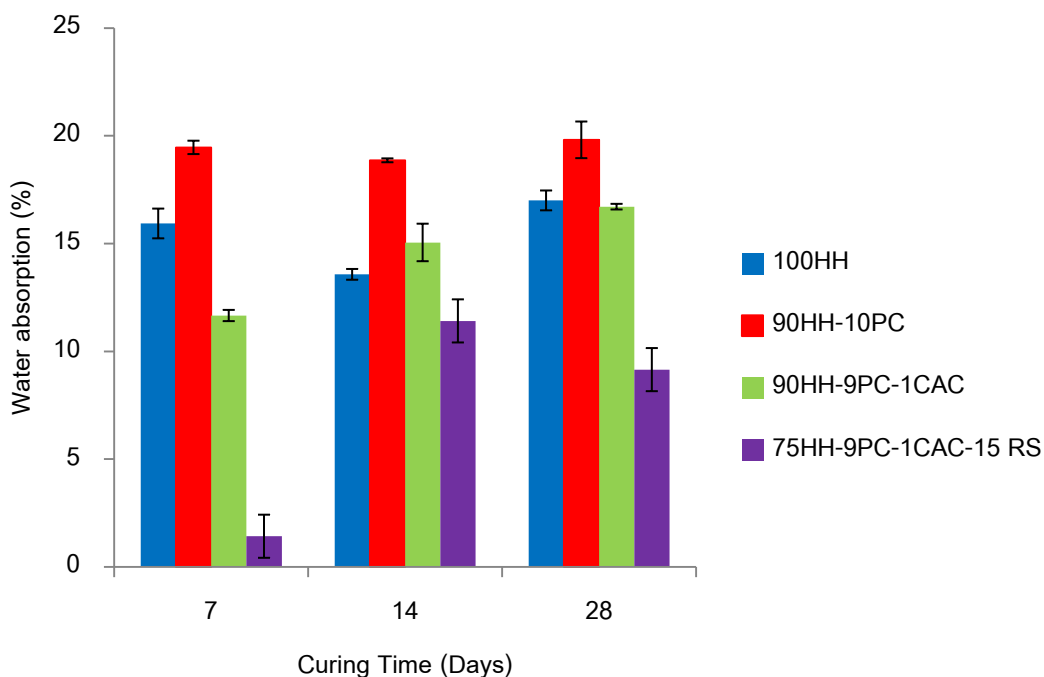
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 พบว่าในส่วนผสมที่มีซีเมนต์เป็นองค์ประกอบสามารถพัฒนากำลังอัดและก่อให้เกิดเฟสเอททริงไกต์เพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นจึงได้เลือกสูตรส่วนผสม 90HH-9PC-1CAC มาพัฒนาต่อไป โดยกำหนดส่วนผสมนี้เป็นตัวเปรียบเทียบและใช้สัญลักษณ์ STD2 และกำหนดให้สูตรส่วนผสม 100HH เป็นตัวเปรียบเทียบใช้สัญลักษณ์ STD1 ในการทดลองส่วนนี้

ได้เตรียมสูตรส่วนผสมให้อยู่ในระบบของบิตาเฮมิไฮเดรต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์-กากตะกอนของเสีย (HH-PC-CAC-RS)



ภาพที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบความแข็งแรงอัดของชิ้นงานที่เตรียมในระบบ HH-PC-CAC-RS ที่การบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

ความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีสัดส่วนของกากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้อง 15 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มในอากาศนานขึ้นอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ที่มากขึ้น ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ C-S-H gel เข้าแทรกในช่องว่างระหว่างโครงสร้างยิปซัมมากขึ้น โดยความแข็งแรงอัดมีค่าเป็น 6.46 MPa ที่การบ่ม 28 วัน แม้ว่ากำลังอัดจะพัฒนาขึ้นแต่ในทางตรงกันข้ามการดูดซึมน้ำที่แสดงในภาพที่ 4.9 กลับมีค่าสูง อาจเป็นไปได้ว่ากากตะกอนของเสียที่มีเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติเป็นองค์ประกอบมีการดูดซึมน้ำได้ดีนั่นเอง และเมื่อเทียบกับ 90HH-9PC-1CAC แล้วพบว่าความแข็งแรงอัดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของ RS 15 เปอร์เซ็นต์ สูงมากกว่าเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการเสริมแรงของเส้นใยในชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Vegas<sup>(36)</sup> และงานวิจัยของ Lee<sup>(37)</sup> ซึ่งทำการผสมกากตะกอนของเสียกับซีเมนต์ โดยลักษณะโครงสร้างที่เป็นเส้นใยของกากตะกอนของเสียส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่เป็นโครงข่ายในชิ้นงานและส่งเสริมให้เกิดการเชื่อมติดกันของผลึกที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 : \text{C}_2\text{S}$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 : \text{C}_3\text{S}$ ) เกิดเป็นผลึกของ C-S-H ในโครงสร้างได้ดีขึ้น



ภาพที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมในระบบ HH-PC-CAC-RS ที่การบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

การเติมกากตะกอนของเสียส่งผลให้ความแข็งแรงอัดเพิ่ม เนื่องจาก C-S-H เข้าแทรกในช่องว่าง แต่ค่าการดูดซึมน้ำกลับสูง อาจเป็นเพราะลักษณะเป็นเส้นใยที่สามารถดูดน้ำได้ดี

#### 4.4. ผลของตะกอนน้ำหลอมเหล็กต่อสมบัติของยิปซัม (ระบบ HH-PC-CAC-RS-LS)

จากผลการทดลอง 4.3 พบว่าการเติมกากตะกอนของเสียลงไปในส่วนผสมในระบบ HH-PC-CAC สามารถพัฒนากำลังอัดขึ้นได้เพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการเสริมแรงของเส้นใยเซลลูโลส อย่างไรก็ตามกากตะกอนของเสียยังมีองค์ประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งจะมีส่วนในการช่วยในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นจึงได้เลือกการเติม RS 15 เปอร์เซ็นต์ มาพัฒนาต่อไป โดยกำหนดสูตรส่วนผสม 75HH-9PC-1CAC-15RS เป็นตัวเปรียบเทียบแทนด้วยสัญลักษณ์ STD3 ในการทดลองนี้ได้เตรียมสูตรส่วนผสมให้อยู่ในระบบของปีตาเอมิไฮเดรต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์-กากตะกอนของเสีย-ตะกอนน้ำหลอมเหล็ก (HH-PC-CAC-RS-LS) ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมในการเตรียมชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังนี้คือ

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนผสมส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกรันเบาหอลมเหล็ก

ชื่อย่อ	สูตรส่วนผสม	ส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)				
		HH	PC	CAC	LS	RS
STD1	100HH	100	0	0	0	0
STD2	90HH-9PC-1CAC	90	9	1	0	0
STD3	75HH-9PC-1CAC-15RS	90	9	1	0	15
5LS	75HH-9PC-1CAC-10RS-5LS	75	9	1	5	10
7.5LS	75HH-9PC-1CAC-7.5RS-7.5LS	75	9	1	7.5	7.5
10LS	75HH-9PC-1CAC-5RS-10LS	75	9	1	10	5
15LS	75HH-9PC-1CAC-0RS-15LS	75	9	1	15	0

#### 4.4.1. เวลาที่ใช้ในการก่อตัว

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อระยะเวลาในการก่อตัวของยิปซัมและซีเมนต์คือ ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ และแรงค์ประกอบ อย่างไรก็ตามเวลาในการก่อตัวของวัสดุเชื่อมประสานเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนให้เร็วขึ้นหรือช้าลงได้ ด้วยการยิปซัมเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) ยิปซัมน่าช้า (Retarder) หรืออัตราส่วนของน้ำที่ใช้ผสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่กำลังปฏิบัติเป็นสำคัญ ตารางที่ 4.5 แสดงเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกรันเบาหอลมเหล็กในปริมาณที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมตะกรันเบาหอลมเหล็กลงไปในส่วนผสม จะทำให้ส่วนผสมที่ได้มีความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกรันเบาหอลมเหล็กที่ใช้จากตารางที่ 4.5 เมื่อใช้ปริมาณตะกรันเบาหอลมเหล็กในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมจะมีการก่อตัวที่เร็วขึ้นเป็นอย่างมาก โดยลดเวลาจาก 207.5 212.5 และ 218 นาที (STD1 STD2 และ STD3 ตามลำดับ) มาอยู่ที่เวลาประมาณ 50.5 และ 51.5 นาทีตามลำดับ โดยทั่วไปยิปซัมจะมีการก่อตัวที่เร็วเมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำที่ใช้ในการผสมต่ำ การใส่ตะกรันเบาหอลมเหล็กลงไปในส่วนผสมนั้น จะทำให้น้ำในส่วนผสมมีการลดลงไป อันเนื่องมาจากการดูดซึมน้ำของตะกรันเบาหอลมเหล็ก จากผล XRD ในภาพที่ 4.2 (ง) พบว่ามีเฟสของแคลเซียมออกไซด์

อยู่ ดังนั้นแคลเซียมออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบในตะกรันเบ้าหลอมเหล็กจะดึงน้ำมาใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จึงทำให้น้ำในส่วนผสมมีการลดลง การก่อตัวของยิปซัมจึงเร็วขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของตะกรันเบ้าหลอมเหล็กเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ และ 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการก่อตัวของยิปซั่มกลับช้าลงกล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการก่อตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 124.5 และ 207.5 นาทีตามลำดับ เมื่อตะกรันเบ้าหลอมเหล็กมีปริมาณมากขึ้นไปพร้อมกับแคลเซียมออกไซด์ที่มีปริมาณมากขึ้นด้วย การดึงน้ำในส่วนผสมเพื่อเกิดปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงเกิดได้ดี ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ลดลง การก่อตัวของส่วนผสมจึงใช้เวลานานขึ้นและในขณะเดียวกันไอออน  $SO_4^{2-}$  ในยิปซัมจะละลายออกมาได้น้อยลง และไอออน  $Ca^{2+}$  ในส่วนผสมจะถูกดึงกลับเข้าไปในตะกรันเบ้าหลอมเหล็กได้มาก ทำให้ลดอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันชนิดเอทริงไคต์ซึ่งในสภาวะปกติจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นตัวช่วยเร่งการก่อตัวของซีเมนต์

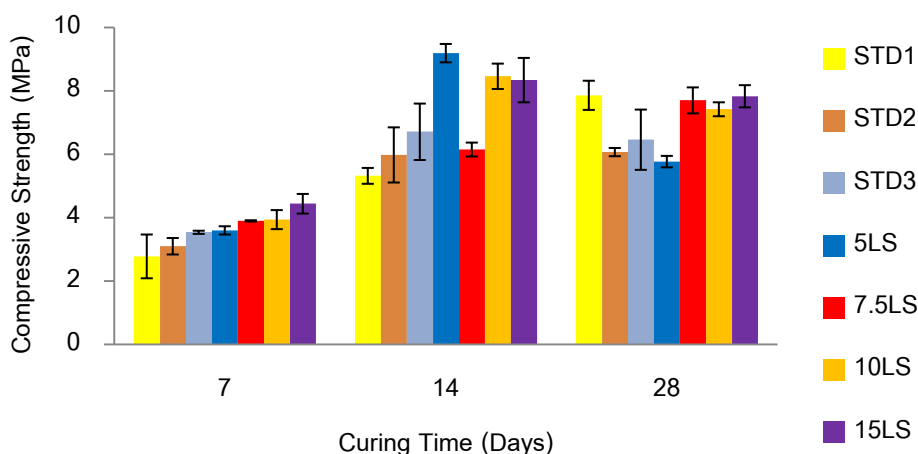
ตารางที่ 4.5 เวลาที่ใช้ในการก่อตัวของชิ้นงานยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสม

สูตร ส่วนผสม	Initial setting time (นาที)	Final setting time (นาที)
STD1	207.5	260
STD2	212.5	240
STD3	218	240
5LS	50.5	53.5
7.5LS	51.5	54.5
10LS	124.5	134.5
15LS	207.5	307.5

#### 4.4.2. ความแข็งแรงอัดและการดูดซึมน้ำ

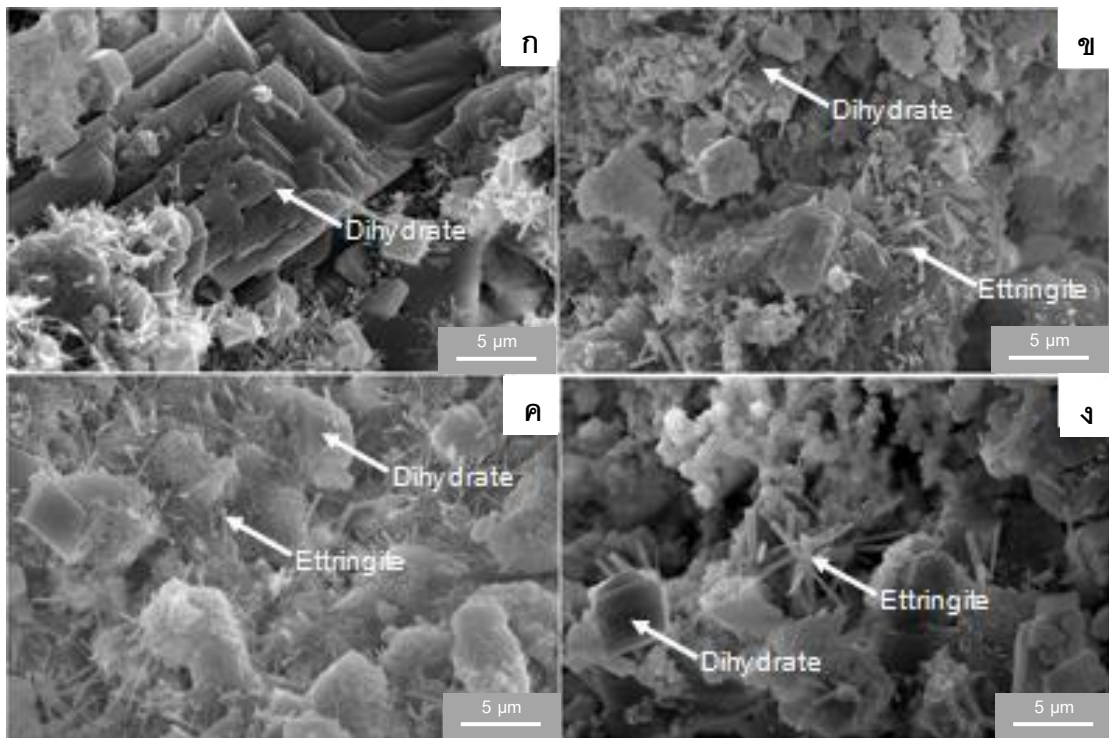
ผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของชิ้นงานยิปซัมที่เตรียมได้จากการเติมตะกรันเบ้าหลอมเหล็กในปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4.10 ยิปซัมที่มีตะกรันเบ้าหลอมเหล็กในส่วนผสมจะมีการพัฒนากำลังอัดเมื่อเวลาที่ใช้ในการบ่มนานขึ้นกล่าวคือ ความแข็งแรงอัดจะเพิ่มสูงขึ้นหลังจากการบ่ม 7 วัน อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น

ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกซิลไซด์ C-S-H และเอททริงไคต์ จะเข้าไปอยู่ในระหว่างช่องว่างของผลึกไดไฮเดตหรือยิปซัมดังแสดงในภาพที่ 4.11 ทำให้ชิ้นงานยิปซัมมีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงอัดสูงขึ้นด้วย



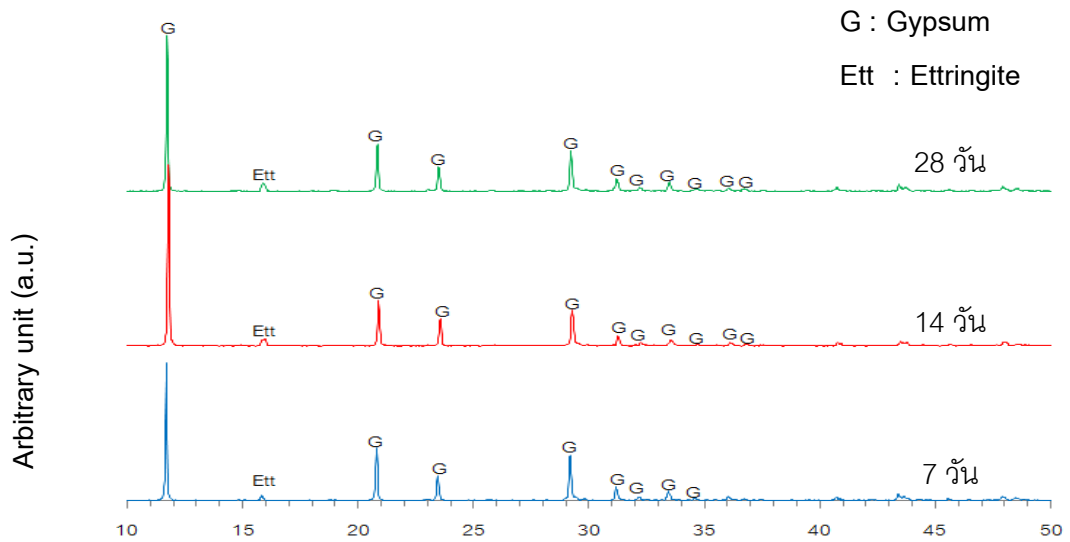
ภาพที่ 4.10 ความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมตะกรันบ้ำหลอมเหล็ก

จากผลการทดสอบความแข็งแรงอัดในภาพที่ 4.10 พบว่าที่ 7.5LS การพัฒนากำลังอัดได้เพิ่มสูงขึ้นไปตามเวลาในการบ่มที่นานขึ้นจาก 7 วันไปเป็น 28 วัน โดยความแข็งแรงอัดที่การบ่ม 28 วันอยู่ที่ 7.7 MPa ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติมตะกรันบ้ำหลอมเหล็กที่มีความแข็งแรงอัดอยู่ที่ 6.46 MPa ในขณะที่ชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกรันบ้ำหลอมเหล็กในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 15 เปอร์เซ็นต์ การพัฒนากำลังอัดจะสูงสุดอยู่ที่การบ่ม 14 วัน คือมีค่าเป็น 9.19 MPa 8.46 MPa และ 8.34 MPa ตามลำดับ เมื่อผ่านการบ่ม 28 วัน ความแข็งแรงอัดของชิ้นงานที่มีตะกรันบ้ำหลอมเหล็กในปริมาณดังกล่าวได้มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากการบวมตัวของตะกรันบ้ำหลอมเหล็กที่อยู่ในส่วนผสม<sup>(38-40)</sup> การที่ส่วนผสมยิปซัมมีตะกรันบ้ำหลอมเหล็กเป็นองค์ประกอบสามารถเพิ่มความแข็งแรงอัดได้เมื่อผ่านการบ่มที่นานขึ้น อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิลของเฟส Merwinite ซึ่งเป็นเฟสที่ตรวจพบในตะกรันบ้ำหลอมเหล็กดังแสดงในภาพที่ 4.2(ง) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ C-S-H ได้<sup>(41)</sup>



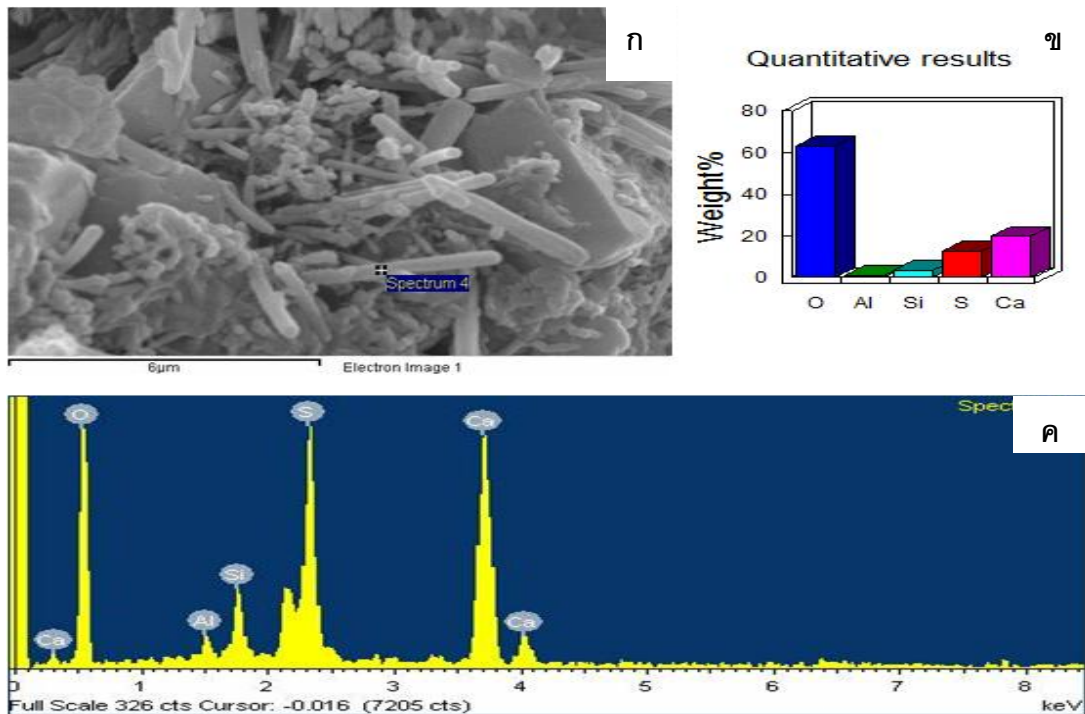
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมยิปซัมที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ที่ขนาดกำลังขยาย 5000 เท่า ก) ตะกรันน้ำหลอม 5 เปอร์เซ็นต์ ข) ตะกรันน้ำหลอม 7.5 เปอร์เซ็นต์ ค) ตะกรันน้ำหลอม 10 เปอร์เซ็นต์ และ ง) ตะกรันน้ำหลอม 15 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนผสมระบบ HH-PC-CAC-RS-LS การพัฒนากำลังอัดที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการก่อตัวนั้น เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของเอมิไฮเดรต ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่ได้จะเป็นผลึกรูปร่างเป็นแผ่นหนาเชื่อมต่อกันเป็นกลุ่ม เกิดช่องว่างระหว่างผลึก (ภาพที่ 4.11) เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ได้เฟสองค์ประกอบคือ ยิปซัม แสดงในภาพที่ 4.3 หลังจากเวลาผ่านไป  $C_3S$  และ  $C_2S$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นผลิตภัณฑ์เจล C-S-H แทรกอยู่ตามช่องว่างของผลึกยิปซัมและบางส่วนก็หุ้มอยู่บนผิวของผลึกยิปซัมในขณะที่ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และแคลเซียมอะลูมิเนตในแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตที่ได้จากยิปซัม ก่อให้เกิดเป็นผลึกเอททริงไต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็ม (ภาพที่ 4.11) แทรกไปตามช่องว่างระหว่างผลึกยิปซัมเช่นกัน จากภาพที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ซึ่งได้ช่วยยืนยันให้เห็นอย่างชัดเจนว่าผลึกรูปเข็มที่กระจายอยู่ในชิ้นงานเป็นผลึกของเอททริงไต์ และยังสามารถตรวจสอบวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในภาพที่ 4.12



20

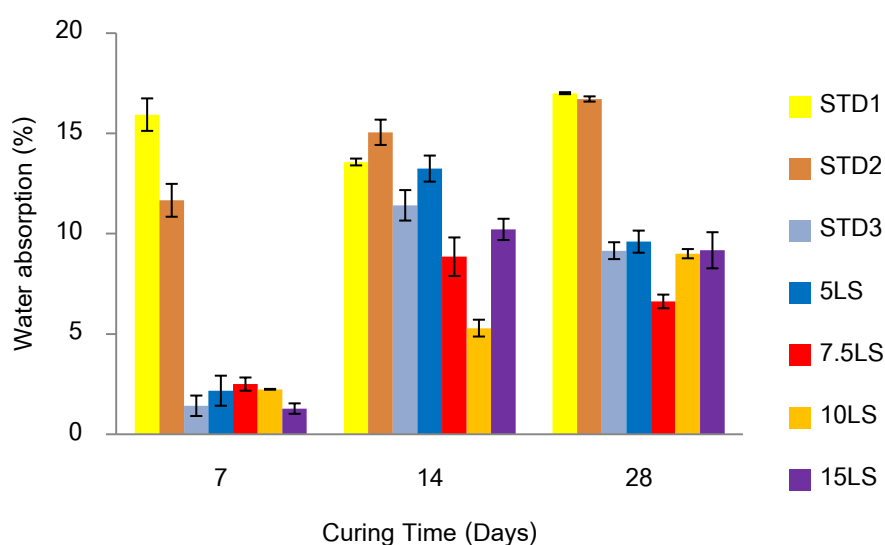
ภาพที่ 4.12 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมตะกรันเบาหุลอมเหล็ก 7.5 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคและการทดสอบ Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) ของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกรันเบาหุลอมเหล็ก 7.5 เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ก) โครงสร้างจุลภาค ข) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และ ค) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ



เมื่อพิจารณาการดูดซึมน้ำของชิ้นงานในภาพที่ 4.14 พบว่า การดูดซึมน้ำไม่ได้มีอัตราลดลงตามความแข็งแรงอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด บางส่วนผสมความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำก็สูงขึ้นด้วย เห็นได้อย่างชัดเจนที่สุดคือ หลังจากการบ่ม 14 วันอาจเป็นไปได้ว่าแม้ช่องว่างระหว่างผลึกยิปซัมจะถูกแทรกเติมด้วย C-S-H และเอพทริงไคต์ แต่ในโครงสร้างของชิ้นงานก็ยังคงมีรูพรุนหรือช่องว่างขนาดเล็กๆ กระจายอยู่มากนั่นเอง ทำให้การดูดซึมน้ำยังคงสูงอยู่แม้ความแข็งแรงอัดจะเพิ่มขึ้น<sup>(42, 43)</sup>



ภาพที่ 4.14 การดูดซึมน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมตะกรันเบาหลอมเหล็ก

#### 4.4.3 ความคงทน

ความคงทนของชิ้นงานยิปซัมได้ถูกทำการทดสอบด้วยวิธีการนำชิ้นงานที่ผ่านการบ่มในอากาศ 28 วัน มาแช่ในน้ำอุณหภูมิห้องสลับกับการอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นจำนวน 10 รอบ จากตารางที่ 4.6 พบว่าความแข็งแรงอัดของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบทุกสัดส่วนของตะกรันเบาหลอมเหล็กที่ใช้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด พร้อมกับการละลายของยิปซัมออกจากชิ้นงาน ซึ่งสังเกตได้จากน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานหลังการทดสอบ การที่ตะกรันเบาหลอมเหล็กมีการบวมตัวได้ดีอันเกิดจากการมีแคลเซียมออกไซด์ ทำให้เมื่อแช่นานขึ้นการดึงน้ำเข้าไปเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก็เกิดขึ้นได้ดีเช่นกัน ทำให้เกิดช่องว่างมาก ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่สูงขึ้นเข้าไปในชิ้นงาน ซึ่งไปเพิ่มการละลายของยิปซัม<sup>(32, 33, 43)</sup>

**ตารางที่ 4.6** การทดสอบความคงทนของส่วนผสมยิปซัมผสมตะกรันบ้ำหลอมเหล็กที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน

สูตรส่วนผสม	ความแข็งแรงอัดหลังผ่านการบ่ม 10 รอบ (MPa)		น้ำหนักที่หายไป (%)
	ก่อนทดสอบ 10 รอบ	หลังทดสอบ 10 รอบ	
STD1	7.86	4.3	0.45
STD2	6.07	3.28	4.12
STD3	6.46	5.13	3.86
5LS	5.77	3.07	5.35
7.5LS	7.70	4.10	5.53
10LS	7.42	3.92	10.31
15LS	7.83	3.71	10.62

#### 4.4.4 ความทนทานต่อการละลายน้ำ

ตารางที่ 4.7 แสดงผลของการทดสอบสมบัติความทนทานต่อการละลายน้ำของยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกรันบ้ำหลอมเหล็กในอัตราส่วนที่ต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบโดยการแช่ในน้ำนานขึ้นเป็นการเร่งปฏิกิริยา ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้นและส่งผลให้น้ำหนักของยิปซัมน้ำหนักมีค่าลดลงจากการละลาย โดยขึ้นกับปริมาณของตะกรันบ้ำหลอมเหล็กที่ผสมในส่วนผสมยิปซัม ส่วนผสมยิปซัมที่มีปริมาณของตะกรันบ้ำหลอมเหล็กมากจะมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ แต่หากผสมกากตะกอนของเสียมากเกินไปจะทำให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น เพราะกากตะกอนของเสียสามารถดูดซึมน้ำได้ดี จึงเร่งให้เกิดการทำปฏิกิริยาได้ดีด้วย<sup>(27)</sup>

**ตารางที่ 4.7** การทดสอบความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน

สูตรส่วนผสม		การดูดซึมน้ำ (%)					น้ำหนักที่หายไป (%)				
		STD3	5LS	7.5LS	10LS	15LS	STD3	5LS	7.5LS	10LS	15LS
ระยะเวลาในการทดสอบ (ชั่วโมง)	2	23.9	22.7	19.0	20.6	19.3	19.3	18.5	16.0	17.1	16.2
	8	24.0	23.3	19.6	21.0	19.8	19.3	18.9	16.4	17.4	16.5
	24	25.4	24.6	21.0	22.5	21.0	20.2	19.8	17.4	18.4	17.4

ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็กส่งผลให้ความแข็งแรงอัดสูง และการดูดซึมน้ำต่ำ เนื่องจาก C-S-H เข้าแทรกในช่องว่าง และมีผลึกเอทริงไคต์เข้าแทรกในช่องว่าง แต่การพัฒนากำลังไม่สูงมากนัก เพราะ ตะกรันบ้ำาหลอมเหล็กเกิดการรวมตัวเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ส่งผลทำให้ความคงทน และความทนทานต่อการละลายน้ำมีสูงขึ้นด้วย

#### 4.5. ผลของตะกอนผงเศษแก้วต่อสมบัติของยิปซัม (ระบบ HH-PC-CAC-RS-GC)

ในการทดลองนี้ได้เตรียมสูตรส่วนผสมให้อยู่ในระบบของบีตาเฮมิไฮเดรต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์-กากตะกอนของเสีย-ผงตะกอนเศษแก้ว (HH-PC-CAC-RS-GC) โดยกำหนดอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4.8 และแสดงผลการทดลองได้ดังนี้คือ

ตารางที่ 4.8 อัตราส่วนผสมส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกอนเศษแก้ว

ชื่อย่อ	สูตรส่วนผสม	ส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)				
		HH	PC	CAC	GC	RS
STD1	100HH	100	0	0	0	0
STD2	90HH-9PC-1CAC	90	9	1	0	0
STD3	75HH-9PC-1CAC-15RS	90	9	1	0	15
5GC	75HH-9PC-1CAC-10RS-5GC	75	9	1	5	10
7.5GC	75HH-9PC-1CAC-7.5RS-7.5GC	75	9	1	7.5	7.5
10GC	75HH-9PC-1CAC-5RS-10GC	75	9	1	10	5
15GC	75HH-9PC-1CAC-0RS-15GC	75	9	1	15	0

##### 4.5.1. เวลาที่ใช้ในการก่อตัว

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมตะกอนผงเศษแก้วลงไปในส่วนผสม จะทำให้ส่วนผสมที่ได้มีความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกอนผงเศษแก้วที่ใช้ อันเนื่องมาจากการที่น้ำในส่วนผสมบางส่วนถูกดูดซับไปบนผิวที่ละเอียดของตะกอนผงเศษแก้วนั่นเอง ตารางที่ 4.9 แสดงเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้วในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าการเติมตะกอนผงเศษแก้วลงไปในส่วนผสมยิปซัมจะทำให้การก่อตัวเกิดเร็วขึ้นหรือเวลาที่ใช้สั้นลง

โดยไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนผงเศษแก้วที่ใช้ โดยเวลาที่ใช้ในการก่อตัวจะอยู่ประมาณ 40-50 นาที ตะกอนผงเศษแก้วจะไม่มีควมพรุนตัวหรือมีการบวมตัวเหมือนกับตะกอนเบาหลอมเหล็ก ดังนั้นปริมาณน้ำจึงไม่ได้สูญหายไป การก่อตัวที่เร็วขึ้นเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นระหว่างซิลิกาในตะกอนผงเศษแก้วที่มีปริมาณค่อนข้างสูงและมีความเป็นอสัณฐานที่ดี กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

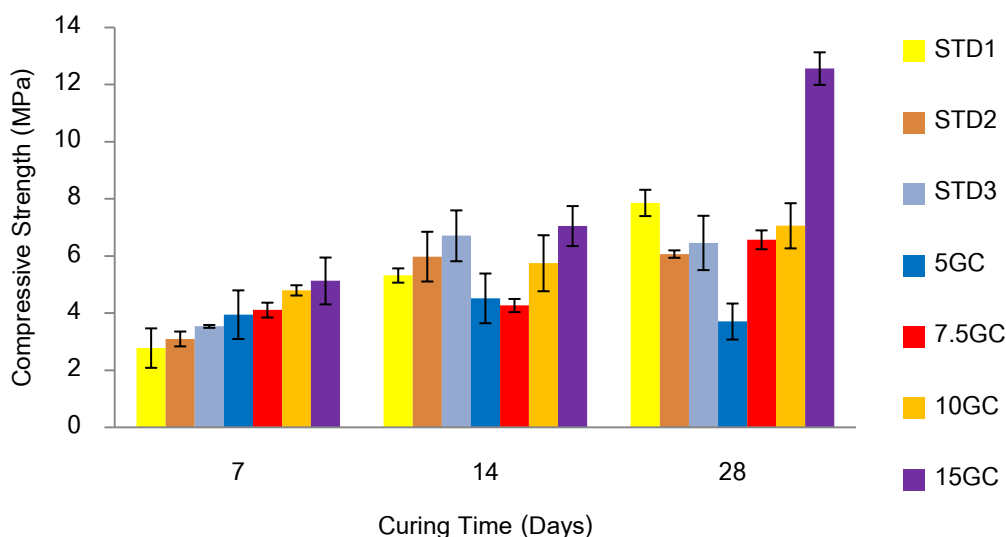
ตารางที่ 4.9 เวลาที่ใช้ในการก่อตัวของชิ้นงานยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสม

สูตร ส่วนผสม	Initial setting time (นาที)	Final setting time (นาที)
STD1	207.5	260
STD2	212.5	240
STD3	218	240
5GC	36	48.5
7.5GC	41	57.5
10GC	47.5	57.5
15GC	47.5	67.5

#### 4.5.2. ความแข็งแรงอัดและการดูดซึมน้ำ

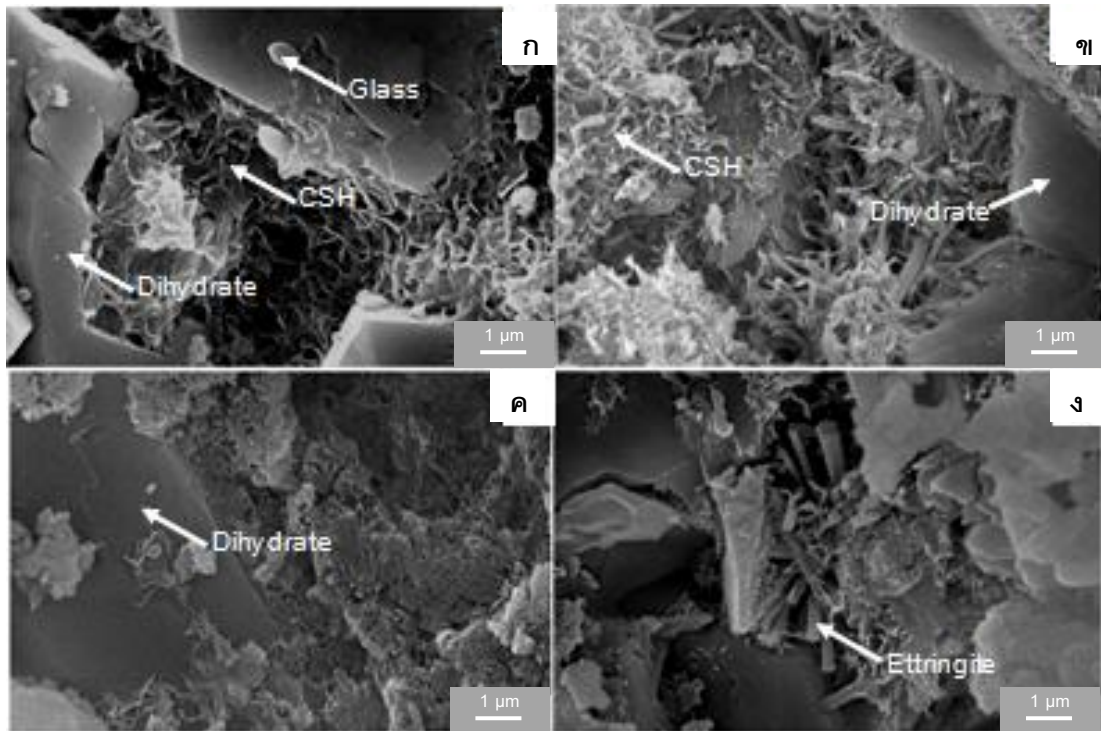
ผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของชิ้นงานยิปซัมที่เตรียมได้จากการเติมตะกอนผงเศษแก้วในปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4.15 ยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้วในส่วนผสมจะสามารถพัฒนากำลังอัดได้เมื่อใช้เวลาในการบ่มที่นานขึ้น กล่าวคือ ความแข็งแรงอัดจะเพิ่มสูงขึ้นหลังการบ่ม 7 วัน ที่เห็นได้อย่างชัดเจนที่สุดคือ การพัฒนากำลังอัดของส่วนผสมที่มีปริมาณตะกอนผงเศษแก้ว 15เปอร์เซ็นต์ ความแข็งแรงที่การบ่ม 28 วัน เป็น 12.56 MPa เมื่อเทียบกับการบ่ม 7 วันที่มีค่าเป็น 5.13 MPa จากภาพที่ 4.15 จะพบว่าการเติมตะกอนผงเศษแก้วในปริมาณ 7.5เปอร์เซ็นต์ 10เปอร์เซ็นต์ และ 15เปอร์เซ็นต์ จะมีแนวโน้มของความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มนานขึ้น โดยที่ 15GC ในการบ่ม 28 วัน จะมีค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด ในขณะที่ส่วนผสมที่ไม่มีตะกอนผงเศษแก้ว (STD3) ความแข็งแรงอัดที่ 28 วัน มีค่าเป็น 6.46 MPa

นอกจาก C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดความแข็งแรงแล้ว การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานยังสามารถช่วยเพิ่มปริมาณ C-S-H ในยิปซัมได้อีกเป็นผลให้เมื่อใช้ตะกอนผงเศษแก้วมากขึ้นความแข็งแรงอัดจึงเพิ่มขึ้น<sup>(25, 44)</sup>

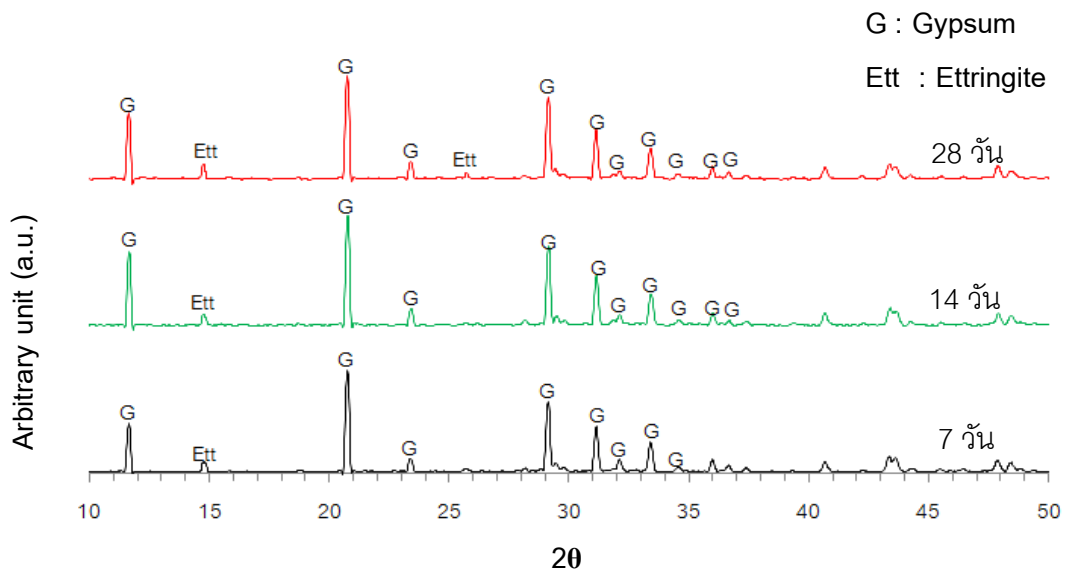


ภาพที่ 4.15 ความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสม

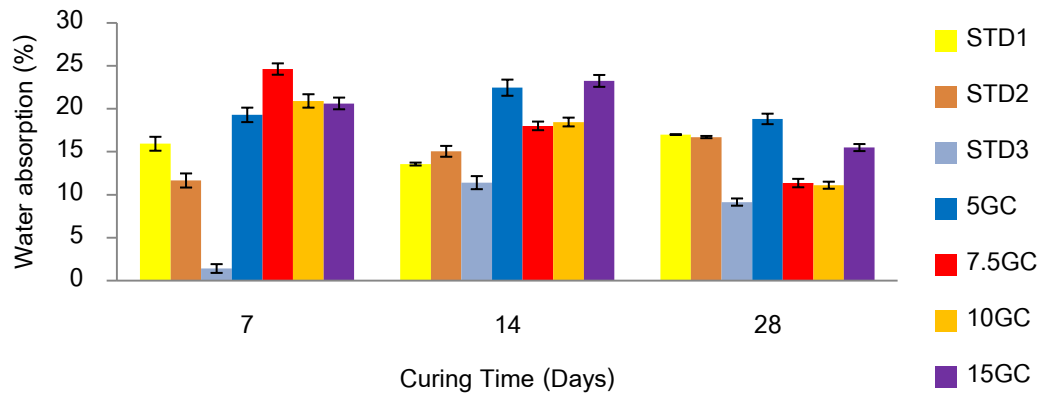
ในส่วนผสมระบบ HH-PC-CAC-RS-GC การพัฒนากำลังอัดที่เกิดขึ้นในช่องแรกของการก่อตัวนั้น เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของเอมิไฮเดรต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะเป็นผลึกที่มีรูปร่างเป็นแผ่นหนาเชื่อมติดกันเป็นกลุ่ม เกิดช่องว่างระหว่างผลึกดังแสดงในภาพที่ 4.16 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ได้เฟสองค์ประกอบคือ ยิปซัม แสดงในภาพที่ 4.17 หลังจากเวลาผ่านไป  $C_3S$  และ  $C_2S$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิดเจลของ C-S-H แทรกอยู่ตามช่องว่างของผลึกยิปซัมและมีบางส่วนปกคลุมอยู่บนผิวของผลึกยิปซัม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับซิลิกาจากตะกอนผงเศษแก้ว ก่อให้เกิด C-S-H เพิ่มขึ้นมาในชั้นงานจึงเป็นเหตุทำให้เกิดการพัฒนากำลังอัดที่สูงขึ้นด้วย ในขณะที่  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแคลเซียมอะลูมิเนตในแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ได้เกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตที่ได้จากยิปซัม ก่อให้เกิดเป็นผลึกเอททริงไคต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็มแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของผลึกยิปซัม



ภาพที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานยิปซัมที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ที่ขนาดกำลังขยาย 10000 เท่า ก) ตะกอนผงเศษแก้ว 5 เปอร์เซ็นต์ ข) ตะกอนผงเศษแก้ว 7.5 เปอร์เซ็นต์ ค) ตะกอนผงเศษแก้ว 10 เปอร์เซ็นต์ และ ง) ตะกอนผงเศษแก้ว 15 เปอร์เซ็นต์

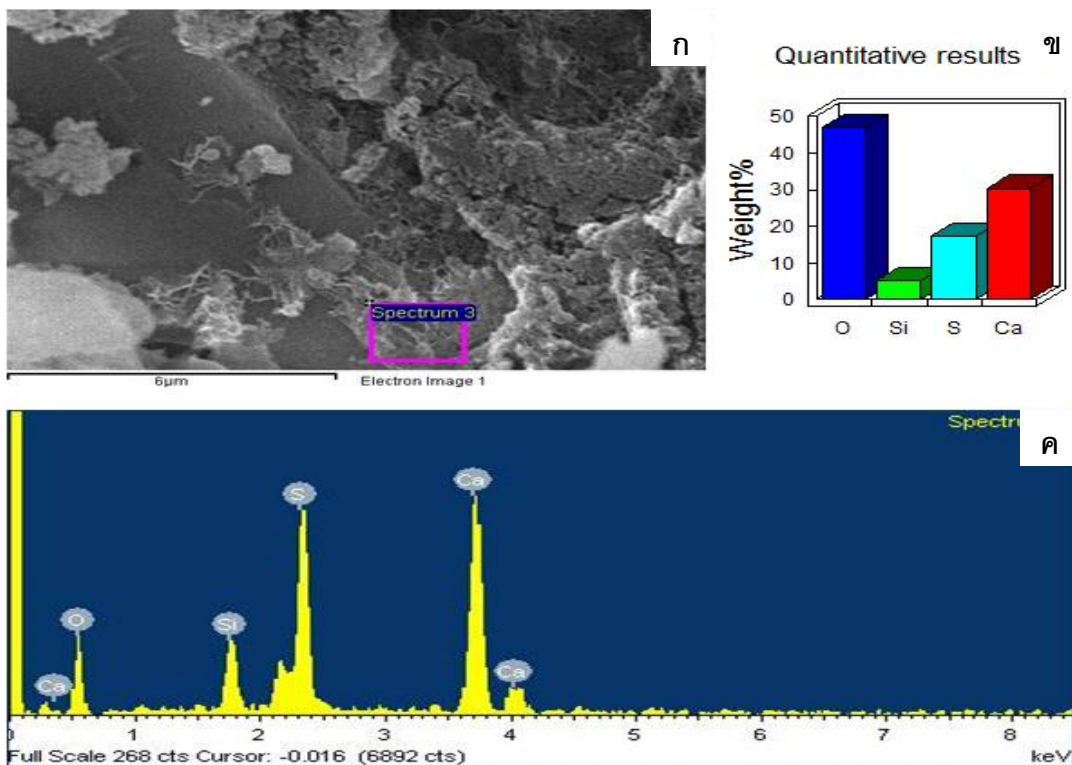


ภาพที่ 4.17 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมตะกอนผงเศษแก้ว 15 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสม

เมื่อพิจารณาการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่แสดงในภาพที่ 4.18 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการบ่มชิ้นงานนานขึ้น สำหรับทุกสัดส่วนของตะกอนผงเศษแก้วที่ใช้



ภาพที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคและการทดสอบ Energy Dispersion Spectroscopy (EDS) ของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกอนเศษแก้ว 10 เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ก) โครงสร้างจุลภาค ข) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และ ค) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

จากภาพที่ 4.19 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้ว 10เปอร์เซ็นต์ ในส่วนผสม ซึ่งได้ช่วยยืนยันให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามี C-S-H ที่ปกคลุมและแทรกอยู่ตามช่องว่างของผลึกยิปซัมเป็นเจล C-S-H ซึ่งมีความเป็นอสัณฐานจึงไม่สามารถตรวจพบได้ในผลการวิเคราะห์ XRD

#### 4.5.3. ความคงทน

จากตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบความคงทนของยิปซัมที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า ยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกอนผงเศษแก้ว 5เปอร์เซ็นต์ 7.5เปอร์เซ็นต์ 10เปอร์เซ็นต์ และ 15เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นหลังผ่านการทดสอบ และไม่พบการละลายของชิ้นงาน ซึ่งสังเกตได้จากค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน การทดสอบที่มีการแช่น้ำนั้นเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้สูงขึ้น ดังนั้นผลึก C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอลิไซคลานจึงเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างระหว่างผลึกยิปซัมได้มากขึ้นจึงลดอัตราการละลายของชิ้นงาน และเพิ่มความแข็งแรงอัดได้

**ตารางที่ 4.10** การทดสอบความคงทนของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกอนผงเศษแก้วเป็นส่วนผสมและผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน

สูตรส่วนผสม	ความแข็งแรงอัดหลังผ่านการบ่ม 10 รอบ (MPa)		น้ำหนักที่หายไป (%)
	ก่อนทดสอบ 10 รอบ	หลังทดสอบ 10 รอบ	
STD1	7.86	4.3	0.45
STD2	6.07	3.28	4.12
STD3	6.46	5.13	3.86
5GC	3.71	6.55	0
7.5GC	6.57	8.2	0
10GC	7.06	8.16	0
15GC	12.56	13.04	0



#### 4.5.4. ความทนทานต่อการละลายน้ำ

ตารางที่ 4.11 แสดงผลของการทดสอบสมบัติความทนทานต่อการละลายน้ำของยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกอนเศษแก้วที่อัตราส่วนแตกต่างกันพบว่าเมื่อมีระยะเวลาในการแช่น้ำนานขึ้นส่งผลให้เกิดการละลายของยิปซัม น้ำหนักของชิ้นงานจึงลดน้อยลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของตะกอนเศษแก้ว (STD3) แล้ว การเติมตะกอนเศษแก้วลงไปในยิปซัม มีแนวโน้มที่จะลดเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและอัตราการละลายของยิปซัม การใช้ตะกอนเศษแก้วซึ่งมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานจะไปเพิ่ม C-S-H ในชิ้นงาน ทำให้ช่องว่างในชิ้นงานลดต่ำลง อัตราการดูดซึมน้ำและการละลายจึงมีแนวโน้มลดลงด้วย<sup>(13)</sup>

**ตารางที่ 4.11** การทดสอบความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีตะกอนเศษแก้วเป็นส่วนผสมและผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน

สูตรส่วนผสม		การดูดซึมน้ำ (%)					น้ำหนักที่หายไป (%)				
		STD3	5 GC	7.5 GC	10 GC	15 GC	STD3	5 GC	7.5 GC	10 GC	15 GC
ระยะเวลาใน	2	23.9	17.2	11.5	10.5	8.4	19.3	14.7	10.3	9.5	7.7
การทดสอบ	8	24.0	17.8	11.8	10.8	9.2	19.3	15.1	10.6	9.7	8.4
(ชั่วโมง)	24	25.4	18.3	12.6	11.5	9.9	20.2	15.5	11.2	10.3	9.0

เนื่องจากตะกอนเศษแก้วมีความเป็นอสัณฐานทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ส่งผลให้มี C-S-H เข้าแทรกในช่องว่างได้มากขึ้นและปกคลุมผลึกยิปซัมในบางส่วน ส่งผลให้ความแข็งแรงอัดสูง และการดูดซึมน้ำต่ำ ความคงทน และความทนทานต่อการละลายน้ำซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำจึงมีการพัฒนาที่ดีขึ้นด้วย

#### 4.6. ผลของไดอะทอไมต์ต่อสมบัติของยิปซัม (HH-PC-CAC-RS-DI)

ในการทดลองนี้ได้เตรียมสูตรส่วนผสมให้อยู่ในระบบของปีตาเฮมิไฮเดรต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์-กากตะกอนของเสีย-ไดอะทอไมต์(HH-PC-CAC-RS-DI) ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมในการเตรียมชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 4.12 และแสดงผลการทดลองได้ดังนี้คือ

ตารางที่ 4.12 อัตราส่วนผสมส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของไดอะทอไมต์

ชื่อย่อ	สูตรส่วนผสม	ส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)				
		HH	PC	CAC	DI	RS
STD1	100HH	100	0	0	0	0
STD2	90HH-9PC-1CAC	90	9	1	0	0
STD3	75HH-9PC-1CAC-15RS	90	9	1	0	15
5DI	75HH-9PC-1CAC-10RS-5DI	75	9	1	5	10
7.5DI	75HH-9PC-1CAC-7.5RS-7.5DI	75	9	1	7.5	7.5
10DI	75HH-9PC-1CAC-5RS-10DI	75	9	1	10	5
15DI	75HH-9PC-1CAC-0RS-15DI	75	9	1	15	0

##### 4.6.1. เวลาที่ใช้ในการก่อตัว

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมไดอะทอไมต์ลงไปในส่วนผสมยิปซัมจะทำให้ส่วนผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณไดอะทอไมต์ที่ใช้ จากตารางที่ 4.13 เมื่อใช้ไดอะทอไมต์ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ 7.5 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมจะมีการก่อตัวที่เร็วขึ้น โดยลดจาก 207.5 212.5 และ 218 นาที (STD1 STD2 และSTD3 ตามลำดับ) มาอยู่ที่เวลาประมาณ 57.5 66.5 และ 76.5 นาที ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มไดอะทอไมต์เป็น 15เปอร์เซ็นต์ เวลาในการก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ไดอะทอไมต์มีลักษณะเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้มีความสามารถดูดซึมน้ำเข้าไปในรูพรุนได้ดี เมื่อใช้ปริมาณมากส่งผลให้น้ำในส่วนผสมลดน้อยลง การก่อตัวของยิปซัมจึงเร็วขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณที่สูงขึ้นเป็น 15เปอร์เซ็นต์ น้ำในส่วนผสมน้อยลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ลดลง

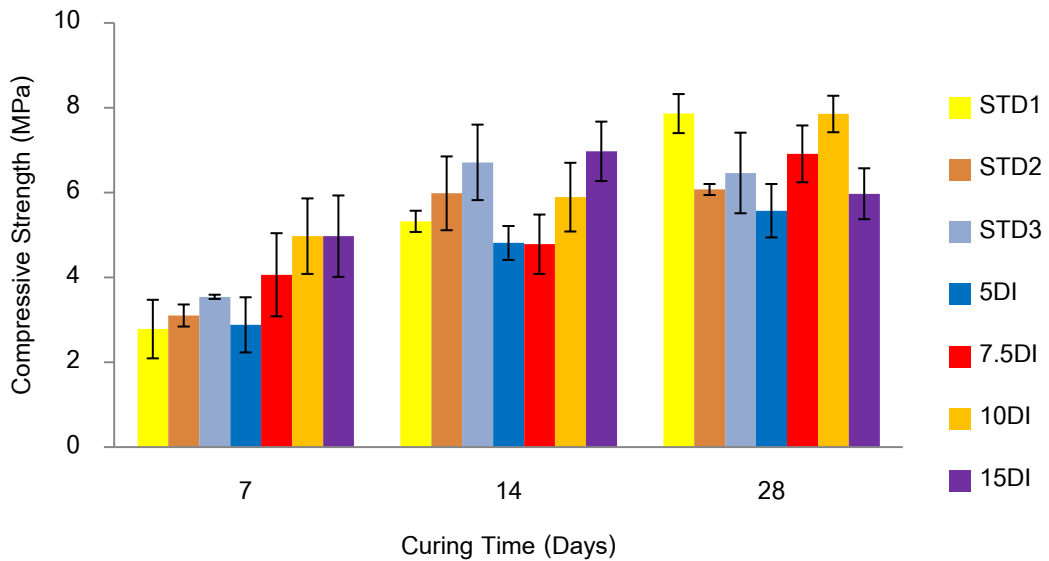
การก่อตัวของส่วนผสมจึงนานขึ้น และในขณะเดียวกันไฮดรอกไซด์เฟต( $\text{SO}_4^{2-}$ )ในยิปซัมละลายออกมาได้น้อยลง และไฮดรอกไซด์แคลเซียม( $\text{Ca}^{2+}$ )ในส่วนผสมก็ถูกดูดซึมเข้าไปในรูพรุนของไดอะทอมไมต์ได้มาก ทำให้ลดอัตราการเกิดเอทริงไคต์ ซึ่งปกติจะเกิดอย่างรวดเร็วและเป็นตัวช่วยเร่งให้เกิดการก่อตัว

ตารางที่ 4.13 เวลาที่ใช้ในการก่อตัวของชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมของไดอะทอมไมต์

สูตร ส่วนผสม	Initial setting time (นาที)	Final setting time (นาที)
STD1	207.5	260
STD2	212.5	240
STD3	218	240
5DI	57.5	92.5
7.5DI	66.5	102.5
10DI	76.5	122.5
15DI	177.5	222.5

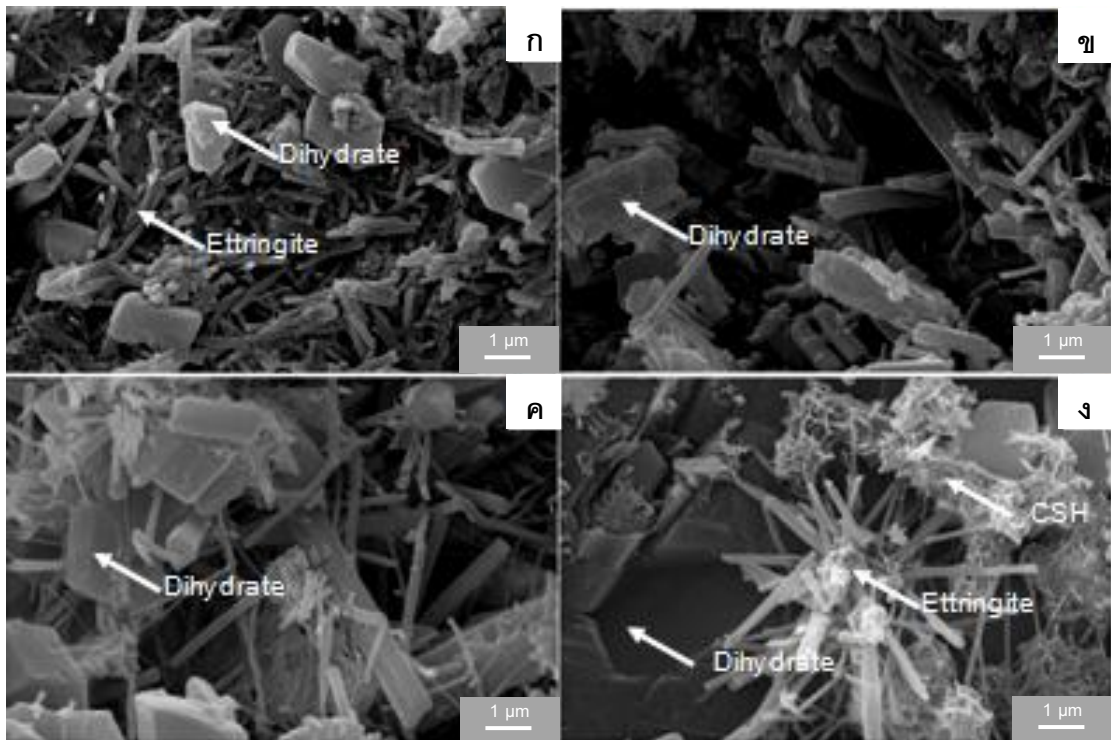
#### 4.6.2 ความแข็งแรงอัดและการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของชิ้นงานยิปซัมที่เตรียมได้จากการเติมไดอะทอมไมต์ในปริมาณที่ต่างกัน แสดงได้ดังภาพที่ 4.20 ยิปซัมที่มีไดอะทอมไมต์ในส่วนผสมจะสามารถพัฒนากำลังอัดได้เมื่อใช้เวลาในการบ่มที่นานขึ้นกล่าวคือ ความแข็งแรงอัดจะเพิ่มสูงขึ้นหลังการบ่ม 7 วัน และที่การบ่ม 28 วัน ส่วนผสมยิปซัมที่มีปริมาณไดอะทอมไมต์เป็น 7.5เปอร์เซ็นต์ และ 10เปอร์เซ็นต์ จะมีความแข็งแรงอัดอยู่ที่ 6.91 MPa และ 7.85 MPa ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับยิปซัมที่ไม่มีส่วนผสมของไดอะทอมไมต์จะมีความแข็งแรงสูงกว่า โดย 10DI จะให้ความแข็งแรงอัดสูงสุด<sup>(15-17, 26)</sup>

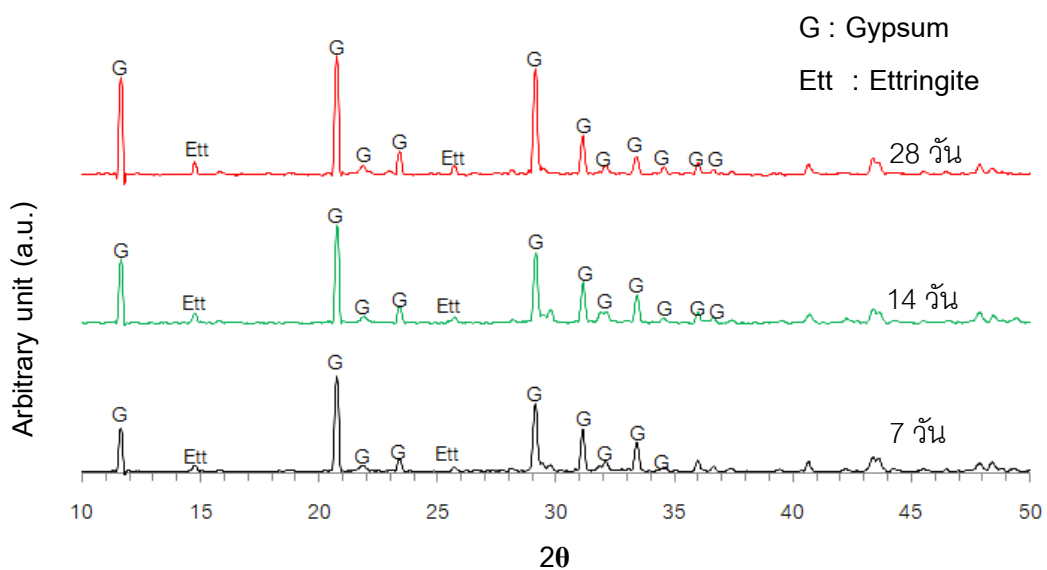


ภาพที่ 4.20 ความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีไดอะทอมไมต์เป็นส่วนผสม

ในส่วนผสมระบบ HH-PC-CAC-RS-DI การพัฒนากำลังอัดที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการก่อตัวนั้น เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของบีตาเฮมิไฮเดรต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะเป็นผลึกที่มีรูปร่างเป็นแผ่นหนาเชื่อมติดกันเป็นกลุ่ม เกิดช่องว่างระหว่างผลึกดังแสดงในภาพที่ 4.21 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ได้เฟสองค์ประกอบของยิปซัมแสดงในภาพที่ 4.22 หลังจากเวลาผ่านไป  $C_3S$  และ  $C_2S$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิดเจลของ C-S-H ที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างของผลึกยิปซัม และมีบางส่วนปกคลุมผิวของผลึกยิปซัม ต่อจากนั้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะไปทำปฏิกิริยาปอลิไซคลานกับซิลิกาในไดอะทอมไมต์ซึ่งมีลักษณะกึ่งอสัณฐาน (Semi-amorphous) ก่อให้เกิดเจล C-S-H เพิ่มมากขึ้นในชั้นงานเป็นเหตุให้เกิดการพัฒนากำลังอัดที่สูงขึ้น ในขณะที่  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และแคลเซียมอะลูมิเนตในแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ได้เกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตที่ได้จากยิปซัมก่อให้เกิดเป็นผลึกเอททริงไกต์ที่มีรูปร่างคล้ายเข็มแทรกและกระจายอยู่ระหว่างช่องว่างของผลึกยิปซัม

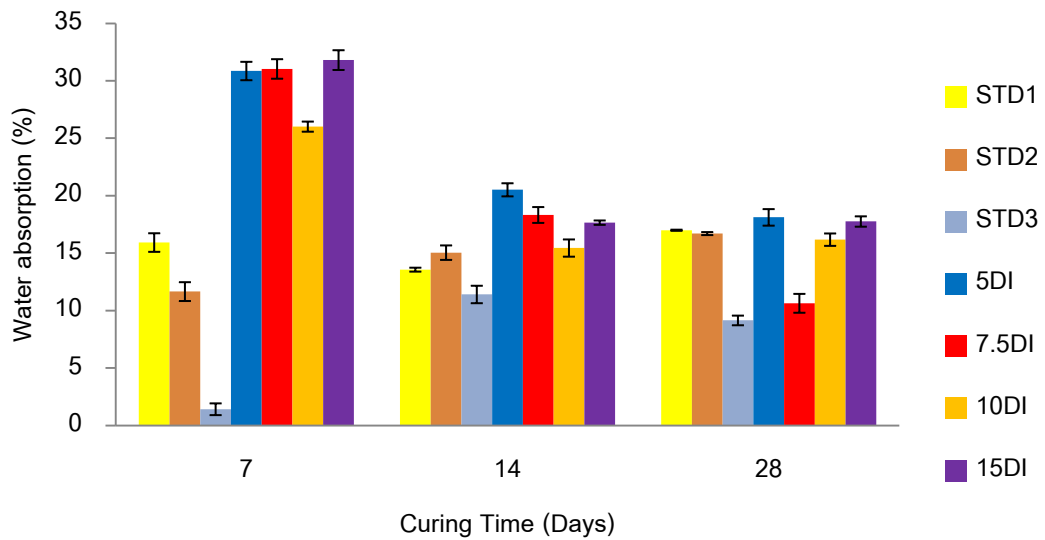


ภาพที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานยิปซัมที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ที่ขนาดกำลังขยาย 10000 เท่า ก) ไดอะทอไมต์ 5 เปอร์เซ็นต์ ข) ไดอะทอไมต์ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ค) ไดอะทอไมต์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ ง) ไดอะทอไมต์ 15 เปอร์เซ็นต์



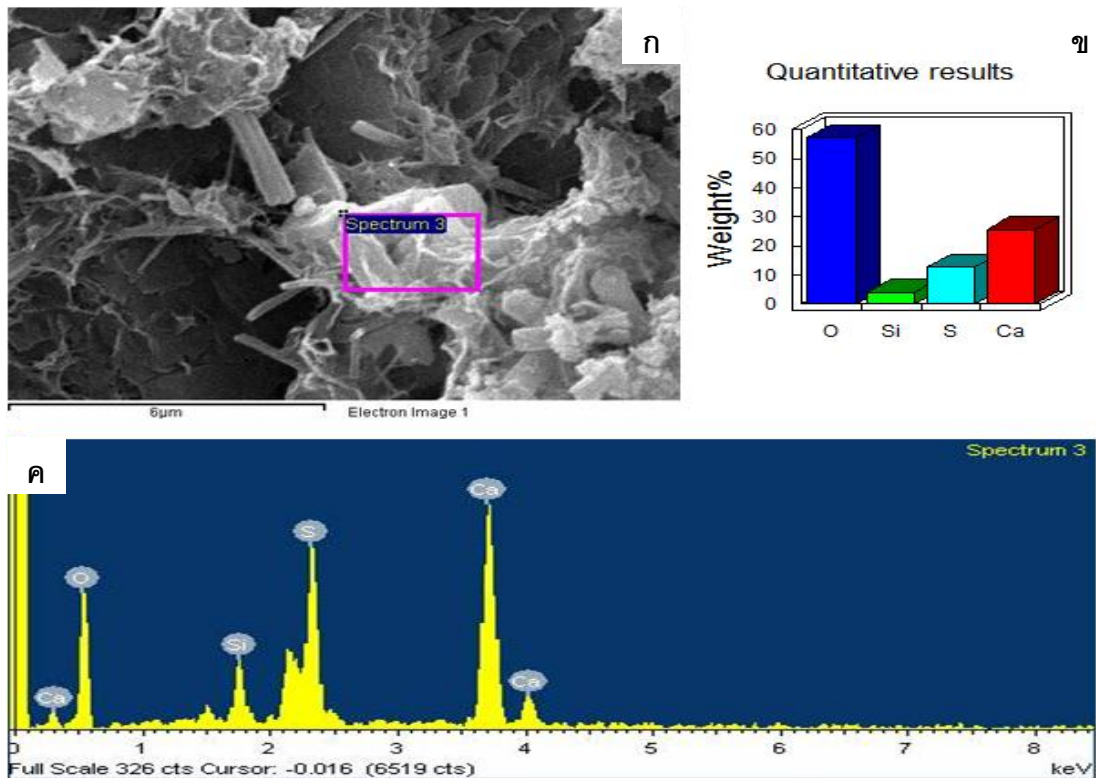
ภาพที่ 4.22 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานยิปซัมที่มีส่วนผสมไดอะทอไมต์ 10 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่แสดงในภาพที่ 4.23 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการบ่มชิ้นงานนานขึ้น ที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือที่ 5DI และ 7.5DI



ภาพที่ 4.23 การดูดซึมน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีไดอะทอมไมต์เป็นส่วนผสม

ผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ของยิปซัมที่มีไดอะทอมไมต์ 7.5 เปอร์เซ็นต์ในส่วนผสมแสดงในภาพที่ 4.24 ซึ่งได้ช่วยยืนยันให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเจล C-S-H ปกคลุมผลึกของยิปซัม และแทรกอยู่ตามช่องว่างของผลึกยิปซัมเป็นผลึกของ C-S-H ซึ่งมีความเป็นอสัณฐานจึงไม่สามารถตรวจพบได้ในผลการวิเคราะห์ XRD



ภาพที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคและการทดสอบ Energy dispersion spectroscopy (EDS) ของ ส่วนผสมยิปซัมที่มีไดอะทอมไมต์ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน และที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก) โครงสร้างจุลภาค ข) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS และ ค) สเปกตรัมแสดง องค์ประกอบของธาตุ

#### 4.6.3. ความคงทน

ผลการทดสอบความคงทนของยิปซัมที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วันแสดงในตารางที่ 4.14 จากผลการทดลองพบว่า ยิปซัมที่มีส่วนผสมของไดอะทอมไมต์ 5 เปอร์เซ็นต์ 7.5 เปอร์เซ็นต์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 15 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นหลังผ่านการทดสอบ และไม่พบการละลายของชิ้นงานซึ่งสังเกตได้จากค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน การทดสอบที่มีการแช่น้ำนั้นเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้สูงขึ้น ดังนั้น C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานจึงได้เข้าเติมเต็มในช่องว่างระหว่างผลึกยิปซัมได้มากขึ้น จึงลดอัตราการละลายของชิ้นงานและเพิ่มความแข็งแรงอัดได้

**ตารางที่ 4.14** การทดสอบความคงทนของส่วนผสมยิปซัมที่มีไดอะทอไมต์เป็นส่วนผสมและผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน

สูตรส่วนผสม	ความแข็งแรงอัดหลังผ่านการบ่ม 10 รอบ (MPa)		น้ำหนักที่หายไป (%)
	ก่อนทดสอบ 10 รอบ	หลังทดสอบ 10 รอบ	
STD1	7.86	4.3	0.45
STD2	6.07	3.28	4.12
STD3	6.46	5.13	3.86
5DI	5.77	7.91	0
7.5DI	7.7	8.53	0
10DI	7.42	9.41	0
15DI	7.83	8.36	0

#### 4.6.4. ความทนทานต่อการละลายน้ำ

ตารางที่ 4.15 แสดงผลของการทดสอบสมบัติความทนทานต่อการละลายน้ำของยิปซัมที่มีส่วนผสมของไดอะทอไมต์ที่อัตราส่วนแตกต่างกันพบว่า เมื่อระยะเวลาในการทดสอบแช่น้ำนานขึ้นส่งผลให้เกิดการละลายของยิปซัมมากขึ้น น้ำหนักของชิ้นงานยิปซัมจึงลดน้อยลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของไดอะทอไมต์ การเติมไดอะทอไมต์ลงไปในยิปซัมมีแนวโน้มที่จะสามารถลดเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและอัตราการละลายของยิปซัมได้ การใช้ไดอะทอไมต์ที่มีสมบัติเป็นวัสดุปอลิไซคลาน จะไปช่วยเพิ่มปริมาณ C-S-H ในชิ้นงาน ทำให้ความพรุนตัวหรือช่องว่างในชิ้นงานลดต่ำลง ทำให้อัตราการดูดซึมน้ำและการละลายมีแนวโน้มลดลงด้วย



ตารางที่ 4.15 การทดสอบความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีไดอะทอไมต์เป็นส่วนผสมและผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน

สูตรส่วนผสม		การดูดซึมน้ำ (%)					น้ำหนักที่หายไป (%)				
		STD3	5 DI	7.5 DI	10 DI	15 DI	STD 3	5 DI	7.5 DI	10 DI	15 DI
ระยะเวลาใน การทดสอบ (ชั่วโมง)	2	23.9	21.4	18.4	16.5	17.1	19.3	17.6	15.6	14.2	14.6
	8	24.0	22.0	19.1	17.6	18.0	19.3	18.0	16.1	14.9	15.2
	24	25.4	22.8	20.0	18.3	18.9	20.2	18.6	16.7	15.4	15.9

ความเป็นกึ่งอสังฐานและความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีของไดอะทอไมต์ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ทำให้มี C-S-H เข้าแทรกในช่องว่างได้มากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงอัดสูง และการดูดซึมน้ำต่ำ ความคงทน และความทนทานต่อการละลายน้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงอัดและค่าการดูดซึมน้ำจึงมีการพัฒนาที่ดีขึ้นด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความน่าจะเป็นในการใช้ของเสียจากภาคอุตสาหกรรมได้แก่ ยิปซัมฟลูแก๊ส ตะกรันบ้ำหอลอมเหล็ก ไดอะทอไมต์ ตะกอนตะกอนผงเศษแก้ว และกากตะกอนของเสีย โดยศึกษาถึงอัตราส่วนต่างๆ ของวัตถุดิบดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ของเสียจากโรงงานในรูปของวัสดุก่อสร้างฐานยิปซัม สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ส่วนผสมยิปซัมที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์เป็นองค์ประกอบสามารถพัฒนาความแข็งแรงอัดและทำให้เกิดผลึกเอททริงไคต์เพิ่มขึ้นได้ โดยเฉพาะที่มีแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ 1 เปอร์เซ็นต์เป็นส่วนผสมเพราะเกิดผลึกเอททริงไคต์ในปริมาณที่เหมาะสม ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัดสูงกว่าส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าด้วย

5.1.2 การเติมกากตะกอนของเสียจากโรงงานกระเบื้องหลังคาผสมกับยิปซัมสามารถปรับปรุงสมบัติการดูดซึมน้ำให้มีค่าต่ำลงได้ และมีค่าความแข็งแรงอัดของส่วนผสมใกล้เคียงกับส่วนผสมยิปซัมในระบบ HH-PC-CAC

5.1.3 ส่วนผสมยิปซัมที่มีสัดส่วนของตะกรันบ้ำหอลอมเหล็กผสมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตะกรันบ้ำหอลอมเหล็กที่ผสม และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำลงด้วย โดยเฉพาะที่มีสัดส่วนของตะกรันบ้ำหอลอมเหล็ก 7.5 เปอร์เซ็นต์ เพราะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเกิดการบวมตัวจากตะกรันบ้ำหอลอน้อย นอกจากนี้ค่าความคงทนและมีความทนทานต่อการละลายน้ำสูงกว่าส่วนผสมยิปซัมที่ไม่มีตะกรันบ้ำหอลอมเหล็กเป็นส่วนผสม

5.1.4 ส่วนผสมยิปซัมที่มีสัดส่วนของตะกอนผงเศษแก้วผสมที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้น และส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีค่าต่ำลงด้วย ซึ่งส่วนผสมยิปซัมที่มีสัดส่วนของตะกอนผงเศษแก้ว 15 เปอร์เซ็นต์มีกำลังดีที่สุด ส่วนความคงทนมีค่าความแข็งแรงอัดมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น และมีความทนทานต่อการละลายน้ำสูง เนื่องจากความเป็นอสัณฐานของตะกอนผงเศษแก้วทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี

5.1.5 ส่วนผสมยิปซัมที่มีสัดส่วนของไดอะทอไมต์ผสมค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไดอะทอไมต์ที่ผสม และมีผลให้การดูดซึมน้ำมีค่าลดลงด้วย โดยเฉพาะส่วนผสมยิปซัมที่มีสัดส่วนของไดอะทอไมต์ 10 เปอร์เซ็นต์เป็นเพราะความสามารถในการดูดซับน้ำของไดอะทอไมต์และการทำปฏิกิริยาของไดอะทอไมต์ได้ดีขึ้นเนื่องจากความเป็นอสัณฐานของไดอะ

ทอไมต์และลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่มีความพรุนตัวของไดอะทอไมต์ นอกจากนี้ความคงทนและความทนทานต่อการละลายน้ำค่าความแข็งแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย

5.1.6 ระยะเวลาในการก่อตัวของส่วนผลมยิปซัมที่มีสัดส่วนของไดอะทอไมต์มีค่าสูงกว่าส่วนผลมยิปซัมที่มีสัดส่วนของตะกอนผงเศษแก้ว แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงอัดและความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผลมยิปซั้กับตะกอนเศษแก้วมีค่าสูงกว่ายิปซัมที่มีสัดส่วนของไดอะทอไมต์

## 5.2. ข้อเสนอแนะ

5.2.1. ปรับกระบวนการเตรียมวัสดุเช่น การเร่งปฏิกิริยาด้วยการแช่น้ำ การบ่มในน้ำหรือที่อุณหภูมิต่างๆ การใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล การใช้สารเคมีหรือสารเติมแต่ง เป็นต้น

5.2.2 ปรับสัดส่วนระหว่างยิปซัมฟลูแก๊สและกากแต่ละชนิดให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

- (1) Jinawath, S. Gypsum Technology. Bangkok: Research unit of advanced deramics, 2005.
- (2) Panpa, W. Production of dental stone from flue-gas gypsum. Master's Thesis, Department of Materials Science, Faculty of science, Chulalongkorn University, 2002.
- (3) Prakaypun, W. Upgrading of mae moh flue-gas gypsum by mineral processing technique. Master's Thesis, Department of Mining and Petroleum Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University, 2006.
- (4) Thitianan, C. Production of projection plaster from flue-gas gypsum. Master's Thesis, Department of Materials Science, Faculty of science, Chulalongkorn University, 2000.
- (5) ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2553.
- (6) Camarini, G., De Milito, J. A. Gypsum hemihydrate–cement blends to improve renderings durability. Construction and Building Materials 25 (2011): 4121-4125.
- (7) (ASTM) Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, ASTM C618-00, 04.02, United State: ASTM, 2001, 310-313.
- (8) Cheatham, C. Fly Ash, Slag, Silica Fume, and Natural Pozzolans [Online]. 2010. Available from : <http://www.greenbuildinglawupdate.com/> [2010, April 30]

- (9) (ASTM), Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, ASTM C618-91, United State: ASTM, 1991, 303-305.
- (10) Banjongkling, S. Potential of glass powder as pozzolan. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2006.
- (11) Kaewkanya, S. Physical and chemical properties of heavy metals in mortars incorporating cement from co-incineration process using copper slag. Master's Thesis, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2006.
- (12) Samunya, S. Glass Science and Technology Information Services [Online]. 2004. Available from : <http://www.mtec.or.th/th/research/GSAT/Glassweb/define.html> [2004, January 28]
- (13) Shi, C., Zheng, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources, Conservation and U Recycling 52 (2007): 234-247.
- (14) วรรณมา ต.แสงจันทร์, การพัฒนาอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว. กรมวิทยาศาสตร์บริการ 179 (2552): 46-52.
- (15) Ediz, N., Bentli, Tatar. Improvement in filtration characteristics of diatomite by calcination. International Journal of Mineral Processing 94 (2010): 129-134.
- (16) Sangpairoj, M. Diatomite quality improvement by calcination for removal of arsenic from contaminated water. Master's Thesis, Department of Environmental Science, Faculty of science, Chulalongkorn University, 2006.

- (17) Yilmaz, B., Ediz, N. The use of raw and calcined diatomite in cement production. Cement and Concrete Composites 30 (2008): 202-211.
- (18) Shi, C., Qian, J. High performance cementing materials from industrial slags — a review. Resources, Conservation and Recycling 29 (2000): 195-207.
- (19) วันทนีย์ พุกกะคุปต์, เทคโนโลยีรีไซเคิลตะกรันจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและเข้าสู่นำเหล็ก, การแปรรูปของเสียเป็นทรัพยากรทดแทน, กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2554.
- (20) Somsaen, N. Application of sludge waste from asbestos-cement roof tile process for a concrete cushion product. Master's Thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 1998.
- (21) กรกฎ วิจิตรพงศ์. การใช้ซีเมนต์ลอยแม่เมาะในการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- (22) Columna, V. B. The effect of rice hull ash in cement and concrete mixes. Master's thesis, Asian institute of technology, 1974.
- (23) Garg, M., Minocha, A. K., Jain, N. Environment hazard mitigation of waste gypsum and chalk: Use in construction materials. Construction and Building Materials 25 (2011): 944-949.
- (24) Marinkovic, S., Kostic-Pulek, A. Examination of the system fly ash–lime–calcined gypsum–water. Journal of Physics and Chemistry of Solids 68 (2007): 1121-1125.
- (25) Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A. Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. Cement and Concrete Composites 33 (2011): 19-29.

- (26) Kastis, D., Kakali, G., Tsvilis, S., Stamatakis, M. G. Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. Cement and Concrete Research 36 (2006): 1821-1826.
- (27) Rodriguez, Á., Manso, J. M., Aragón, Á., Gonzalez, J. J. Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. Resources, Conservation and Recycling 53 (2009): 645-651.
- (28) Lanzón, M., García-Ruiz, P. A. Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. Construction and Building Materials 22 (2008): 1798-1806.
- (29) (ASTM), Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates , ASTM C136 - 06, United State: ASTM, 2010.
- (30) (ASTM), Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM C191-07, United State: ASTM, 2007.
- (31) (ASTM), Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM C109/C 109M-07, United State: ASTM, 2007.
- (32) (IS), Methods of Test for Gypsum Plaster, Concrete and Products, IS 2542(Part II)-1964.
- (33) (ASTM), Standard Test Method for Evaluating the Freeze-Thaw Durability of Manufactured Concrete Masonry Units and Related Concrete Units, ASTM C1262-07, United State: ASTM 2007.
- (34) (ASTM), Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum Panel Products, ASTM C473-07, 2007.
- (35) (ASTM), Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM C33-01, United State: ASTM, 2009.

- (36) Vegas, I., Urreta, J., Frias, M., García, R. Freeze–thaw resistance of blended cements containing calcined paper sludge. Construction and Building Materials 23 (2009): 2862-2868.
- (37) Lee, T.-C. Recycling of municipal incinerator fly-ash slag and semiconductor waste sludge as admixtures in cement mortar. Construction and Building Materials 23 (2009): 3305-3311.
- (38) Degirmenci, N. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products. Construction and Building Materials (2008): 1857-1862.
- (39) Garg, M., Jain, N. Waste gypsum from intermediate dye industries for production of building materials. Construction and Building Materials 24 (2010): 1632-1637.
- (40) Shi, C., Hu, S. Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions. Cement and Concrete Research 33 (2003): 1851-1856.
- (41) Muhmood, L., Vitta, S., Venkateswaran, D. Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. Cement and Concrete Research 39 (2009): 102-109.
- (42) Singh, M., Garg, M. Activation of gypsum anhydrite-slag mixtures. Cement and Concrete Research 25 (1995): 332-338.
- (43) Singh, M., Garg, M., Rehsi, S. S. Durability of phosphogypsum based water-resistant anhydrite binder. Cement and Concrete Research 20 (1990): 271-276.
- (44) Ismail, Z. Z., Al-Hashmi, E. A. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. Waste Management 29 (2009): 655-659.



ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก - 1 ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุบดอ้างอิง

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD
100HH	7 Days	16.18	16.62	16.37	14.56	15.92	15.93	0.81
	14 Days	13.84	13.37	13.49	13.56	13.56	13.57	0.17
	28 Days	17.06	17.01	16.93	17.00	17.00	17.00	0.05
90HH-10PC	7 Days	12.15	12.47	11.69	10.32	11.66	11.66	0.82
	14 Days	14.46	14.45	15.94	15.34	15.08	15.05	0.63
	28 Days	16.63	16.92	16.57	16.71	16.71	16.71	0.13
90HH-9PC-1CAC	7 Days	1.06	1.07	1.06	1.71	2.18	1.42	0.51
	14 Days	10.53	10.77	12.21	12.13	11.4	11.41	0.76
	28 Days	8.83	9.84	8.8	9.15	9.15	9.15	0.42

ตารางที่ ก - 2 ค่าการดูดซึมน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกรันเบาหลอมเหล็ก

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD
5LS	7 Days	2.16	2.65	2.40	2.40	1.24	2.17	0.55
	14 Days	13.76	13.24	13.78	12.18	13.24	13.24	0.65
	28 Days	9.59	10.50	9.20	9.10	9.59	9.60	0.55
7.5LS	7 Days	2.97	2.03	2.50	2.50	2.50	2.50	0.33
	14 Days	8.50	7.94	10.47	8.49	8.84	8.85	0.96
	28 Days	6.83	6.96	6.62	6.07	6.62	6.62	0.34
10LS	7 Days	2.24	2.24	2.22	2.26	2.24	2.24	0.02
	14 Days	4.88	5.05	5.27	5.98	5.29	5.29	0.42
	28 Days	9.00	9.37	9.00	8.74	8.90	9.00	0.23
15LS	7 Days	1.39	0.97	1.18	1.21	1.67	1.28	0.26
	14 Days	10.19	9.88	10.92	10.49	9.56	10.21	0.53
	28 Days	10.08	9.63	9.69	7.98	8.47	9.17	0.90

ตารางที่ ก - 3 ค่าการดูดซึมน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกอนเศษแก้ว

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD
5GC	7 Days	18.20	19.46	20.53	18.96	19.30	19.29	0.84
	14 Days	21.53	21.45	21.67	23.85	22.74	22.45	0.94
	28 Days	18.43	18.13	18.99	19.72	18.81	18.82	0.61
7.5GC	7 Days	23.73	24.62	25.57	24.74	24.44	24.62	0.66
	14 Days	18.01	17.91	17.45	18.82	17.87	18.01	0.5
	28 Days	11.32	11.36	11.37	12.09	10.69	11.36	0.49
10GC	7 Days	20.48	19.84	21.61	21.71	20.89	20.91	0.78
	14 Days	18.59	19.19	18.26	17.80	18.47	18.46	0.51
	28 Days	11.12	11.23	11.47	10.41	11.35	11.11	0.41
15GC	7 Days	23.66	22.63	23.14	22.81	21.81	22.81	0.68
	14 Days	14.49	14.94	16.22	15.80	15.34	15.36	0.69
	28 Days	8.96	9.30	8.68	9.43	8.44	8.96	0.41

ตารางที่ ก - 4 ค่าการดูดซึมน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของโดอะทอไมต์

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD
5DI	7 Days	30.20	30.92	29.92	31.81	31.46	30.86	0.80
	14 Days	19.98	20.52	20.35	21.48	20.28	20.52	0.57
	28 Days	19.26	18.18	17.33	17.72	18.11	18.12	0.72
7.5DI	7 Days	30.61	31.63	30.61	32.20	30.14	31.04	0.85
	14 Days	17.15	18.89	18.33	18.55	18.74	18.33	0.69
	28 Days	10.63	10.89	9.62	11.82	10.22	10.64	0.82
10DI	7 Days	25.44	25.83	26.60	25.94	26.28	26.02	0.44
	14 Days	15.74	15.54	14.24	16.29	15.44	15.45	0.75
	28 Days	15.88	15.51	16.40	16.94	16.16	16.18	0.54
15DI	7 Days	32.33	30.66	31.50	32.93	31.63	31.81	0.86
	14 Days	17.93	17.51	17.46	17.75	17.66	17.66	0.19
	28 Days	18.45	17.20	17.75	17.66	17.77	17.76	0.45

ตารางที่ ก – 5 ค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุบิข้างอิง

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD
100HH	7 Days	3.57	3.29	2.38	1.86	2.78	2.78	0.69
	14 Days	5.32	5.67	5.32	4.96	5.31	5.32	0.25
	28 Days	7.86	7.21	7.85	7.87	8.51	7.86	0.46
90HH-10PC	7 Days	3.10	3.10	2.80	3.51	2.99	3.10	0.26
	14 Days	5.98	5.06	5.49	5.98	7.38	5.98	0.87
	28 Days	6.07	6.04	6.09	5.88	6.26	6.07	0.13
90HH-9PC-1CAC	7 Days	3.50	3.54	3.58	3.61	3.46	3.54	0.05
	14 Days	6.71	5.46	6.68	6.71	7.99	6.71	0.89
	28 Days	5.03	6.65	6.46	6.46	7.71	6.46	0.95

ตารางที่ ก – 6 ค่าความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกรันบ้ำหลอมเหล็ก

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD
5LS	7 Days	3.60	3.60	3.41	3.78	3.60	3.60	0.13
	14 Days	9.19	9.20	9.19	8.78	9.59	9.19	0.29
	28 Days	5.77	5.59	6.07	5.66	5.77	5.77	0.18
7.5LS	7 Days	3.90	3.87	3.90	3.92	3.90	3.90	0.02
	14 Days	5.92	6.51	6.15	6.03	6.15	6.15	0.22
	28 Days	7.70	8.20	7.06	7.70	7.83	7.70	0.41
10LS	7 Days	3.51	3.08	3.94	3.51	3.51	3.51	0.30
	14 Days	8.46	7.94	8.38	8.46	9.06	8.46	0.40
	28 Days	7.42	7.76	7.14	7.42	7.35	7.42	0.22
15LS	7 Days	3.99	4.44	4.88	4.44	4.44	4.44	0.31
	14 Days	8.34	7.20	8.90	8.34	8.91	8.34	0.70
	28 Days	7.83	8.32	7.83	7.84	7.34	7.83	0.35

ตารางที่ ก – 7 ค่าความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกอนเศษแก้ว

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD
5GC	7 Days	3.95	3.51	3.04	5.31	3.95	3.95	0.85
	14 Days	3.42	4.52	4.31	5.84	4.52	4.52	0.87
	28 Days	3.04	3.71	3.37	4.72	3.71	3.71	0.63
7.5GC	7 Days	4.11	4.50	4.11	3.78	4.06	4.11	0.26
	14 Days	4.27	4.20	4.63	4.26	3.99	4.27	0.23
	28 Days	6.57	6.13	7.05	6.56	6.52	6.57	0.33
10GC	7 Days	4.80	4.97	4.50	4.79	4.92	4.80	0.18
	14 Days	5.75	4.96	4.94	5.74	7.35	5.75	0.98
	28 Days	7.06	6.75	6.13	7.06	8.30	7.06	0.79
15GC	7 Days	4.66	5.13	4.28	5.12	6.46	5.13	0.82
	14 Days	7.05	6.85	6.18	7.04	8.12	7.05	0.70
	28 Days	12.56	13.42	11.83	12.44	12.55	12.56	0.57

ตารางที่ ก – 8 ค่าความแข็งแรงอัดของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของไดอะทอมไมต์

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD
5DI	7 Days	2.64	2.57	2.46	2.71	4.03	2.88	0.65
	14 Days	4.26	4.80	5.38	4.81	4.80	4.81	0.40
	28 Days	5.57	6.24	4.56	5.92	5.57	5.57	0.63
7.5DI	7 Days	3.95	3.09	4.36	3.33	5.57	4.06	0.98
	14 Days	4.78	4.29	4.13	5.93	4.78	4.78	0.70
	28 Days	7.65	5.84	6.91	7.25	6.91	6.91	0.67
10DI	7 Days	3.40	5.21	5.63	5.41	5.19	4.97	0.89
	14 Days	5.89	5.09	5.89	5.37	7.20	5.89	0.81
	28 Days	7.85	7.74	7.31	7.85	8.51	7.85	0.43
15DI	7 Days	4.23	4.41	5.04	4.57	6.61	4.97	0.96
	14 Days	6.97	6.12	6.74	6.97	8.05	6.97	0.70
	28 Days	5.97	5.37	5.97	5.59	6.94	5.97	0.60

ตารางที่ ก - 9 ค่าความคงทนของวัสดุดิบอ้างอิง

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
100HH	7 Days	Compressive strength(MPa)	3.27	4.23	3.45	2.70	3.46	3.42	0.55
		Weigth loss(%)	3.40	4.56	4.09	4.21	3.89	4.04	0.41
	28 Days	Compressive strength(MPa)	4.79	3.87	4.23	4.30	4.30	4.30	0.33
		Weigth loss(%)	0.74	0.01	0.63	0.45	0.45	0.45	0.28
90HH-10PC	7 Days	Compressive strength(MPa)	1.60	1.46	2.75	2.37	2.05	2.05	0.53
		Weigth loss(%)	2.12	2.61	2.70	3.03	2.60	2.61	0.32
	28 Days	Compressive strength(MPa)	3.41	3.47	3.02	3.02	3.28	3.28	0.18
		Weigth loss(%)	4.38	4.10	4.36	3.66	4.12	4.12	0.29
90HH-9PC- 1CAC	7 Days	Compressive strength(MPa)	0.66	0.65	0.66	0.66	0.67	0.66	0.01
		Weigth loss(%)	0.45	0.80	0.45	0.45	1.0	0.45	0.25
	28 Days	Compressive strength(MPa)	4.98	5.11	5.29	5.13	5.13	5.13	0.11
		Weigth loss(%)	3.53	4.09	3.94	3.86	3.86	3.86	0.21

ตารางที่ ก - 10 ค่าความคงทนของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกรันบ้ำหลอมเหล็ก

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
5LS	7 Days	Compressive strength(MPa)	4.81	6.60	5.71	6.37	5.87	5.87	0.70
		Weigth loss(%)	0.82	0.52	0.67	0.67	0.67	0.67	0.11
	28 Days	Compressive strength(MPa)	2.54	2.58	4.09	3.07	3.07	3.07	0.62
		Weigth loss(%)	5.67	5.24	5.14	5.34	5.34	5.34	0.2
7.5LS	7 Days	Compressive strength(MPa)	5.37	6.01	5.69	5.37	5.61	5.61	0.27
		Weigth loss(%)	0.59	0.03	0.31	0.31	0.31	0.31	0.20
	28 Days	Compressive strength(MPa)	3.72	4.70	3.88	4.10	4.10	4.10	0.37
		Weigth loss(%)	5.12	5.88	5.59	5.53	5.53	5.53	0.27
10LS	7 Days	Compressive strength(MPa)	5.88	4.85	5.37	5.37	5.35	5.37	0.36
		Weigth loss(%)	0.11	0.79	0.34	0.34	0.32	0.34	0.32
	28 Days	Compressive strength(MPa)	4.29	3.50	3.97	3.92	3.92	3.92	0.28
		Weigth loss(%)	10.53	10.59	9.80	10.31	10.31	10.31	0.31
15LS	7 Days	Compressive strength(MPa)	5.82	5.67	5.75	5.37	5.65	5.65	0.17
		Weigth loss(%)	0.31	0.59	0.15	0.15	0.15	0.15	0.32
	28 Days	Compressive strength(MPa)	3.70	3.87	3.57	3.71	3.71	3.71	0.11
		Weigth loss(%)	11.49	10.43	9.98	10.61	10.61	10.61	0.55

ตารางที่ ก - 11 ค่าความคงทนของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกอนเศษแก้ว

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
5GC	7 Days	Compressive strength(MPa)	4.97	5.08	5.72	4.18	4.99	4.99	0.55
		Weigth loss(%)	1.28	1.17	1.54	1.35	1.33	1.33	0.14
	28 Days	Compressive strength(MPa)	5.99	6.14	6.54	7.54	6.55	6.55	0.60
		Weigth loss(%)	3.40	3.21	3.52	3.49	3.40	3.41	0.12
7.5GC	7 Days	Compressive strength(MPa)	4.31	5.42	4.88	4.30	4.73	4.73	0.46
		Weigth loss(%)	0.18	0.11	0.05	0.36	0.17	0.18	0.12
	28 Days	Compressive strength(MPa)	8.20	7.23	8.15	9.06	8.35	8.20	0.65
		Weigth loss(%)	3.23	3.01	3.02	3.75	3.13	3.23	0.31
10GC	7 Days	Compressive strength(MPa)	6.68	7.08	6.47	6.60	6.71	6.71	0.23
		Weigth loss(%)	0.20	0.40	0.31	0.56	0.36	0.37	0.13
	28 Days	Compressive strength(MPa)	7.43	8.16	7.13	9.25	8,84	8.16	0.90
		Weigth loss(%)	3.20	2.96	3.13	2.83	2.63	2.95	0.23
15GC	7 Days	Compressive strength(MPa)	7.71	7.76	7.67	7.31	7.61	7.61	0.18
		Weigth loss(%)	1.32	1.03	1.18	1.19	1.18	1.18	0.10
	28 Days	Compressive strength(MPa)	13.04	13.21	12.71	13.12	13.12	13.04	0.19
		Weigth loss(%)	2.99	3.04	2.96	2.98	2.98	2.99	0.03



ตารางที่ ก - 12 ค่าความคงทนของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของไดอะทอไมต์

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
5DI	7 Days	Compressive strength(MPa)	3.35	3.58	5.16	4.43	4.13	4.13	0.72
		Weigth loss(%)	3.79	3.72	4.33	4.51	3.78	4.03	0.36
	28 Days	Compressive strength(MPa)	8.70	8.72	7.10	7.12	7.91	7.91	0.80
		Weigth loss(%)	5.01	4.95	5.31	5.87	5.26	5.28	0.36
7.5DI	7 Days	Compressive strength(MPa)	5.57	4.32	4.44	5.00	4.83	4.83	0.50
		Weigth loss(%)	3.52	4.49	3.80	4.54	4.07	4.08	0.44
	28 Days	Compressive strength(MPa)	8.09	8.60	7.80	9.61	8.53	8.53	0.69
		Weigth loss(%)	5.58	5.82	6.55	6.65	6.11	6.14	0.46
10DI	7 Days	Compressive strength(MPa)	5.91	6.25	6.74	5.93	6.21	6.21	0.34
		Weigth loss(%)	2.70	2.80	2.90	2.95	2.83	2.84	0.10
	28 Days	Compressive strength(MPa)	9.02	9.33	9,20	10.08	9.41	9.41	0.40
		Weigth loss(%)	5.71	5.23	6.88	6.99	6.11	6.18	0.76
15DI	7 Days	Compressive strength(MPa)	5.74	5.49	5.18	4.56	5.24	5.24	0.44
		Weigth loss(%)	3.55	3.13	3.17	2.82	3.18	3.17	0.26
	28 Days	Compressive strength(MPa)	8.55	8.01	8.61	8.36	8.26	8.36	0.24
		Weigth loss(%)	4.39	4.75	5.63	5.13	6.04	5.19	0.66

ตารางที่ ก - 13 ค่าความทนทานต่อการละลายน้ำของวัสดุบดข้างอิงที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็น  
ระยะเวลา 28 วัน

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
100HH	Weigth loss(%)	2 Hours	3.63	3.80	3.60	3.60	3.64	3.65	0.08
		8 Hours	3.59	3.80	3.60	3.60	3.67	3.65	0.09
		24 Hours	3.76	4.20	4.20	4.00	4.01	4.03	0.18
	Water absorption (%)	2 Hours	15.50	16.00	15.10	15.20	15.40	15.43	0.34
		8 Hours	15.30	16.00	15.10	15.20	15.50	15.42	0.33
		24 Hours	16.10	17.60	17.60	16.90	16.90	17.03	0.65
90HH-10PC	Weigth loss(%)	2 Hours	4.86	4.92	4.87	4.90	4.70	4.85	0.09
		8 Hours	5.00	5.00	4.92	5.00	4.79	4.94	0.09
		24 Hours	5.24	5.25	5.15	5.30	5.05	5.20	0.10
	Water absorption (%)	2 Hours	22.60	24.30	22.50	23.20	22.00	22.93	0.89
		8 Hours	23.20	24.70	22.70	23.70	22.50	23.36	0.90
		24 Hours	24.30	26.00	23.80	25.10	23.70	24.57	0.96

ตารางที่ ก - 14 ค่าความทนทานต่อการละลายน้ำของวัสดุบดข้างอิงที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน (ต่อ)

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD	
90HH- 9PC-1CAC	Weigh loss(%)	2 Hours	5.34	5.20	5.20	5.30	5.25	5.26	0.06
		8 Hours	5.45	5.20	5.20	5.30	5.25	5.28	0.10
		24 Hours	5.67	5.50	5.60	5.60	5.56	5.59	0.06
	Water absorption (%)	2 Hours	24.30	23.50	23.60	24.10	23.80	23.87	0.32
		8 Hours	24.80	23.50	23.60	24.10	23.80	23.97	0.51
		24 Hours	25.80	24.90	25.50	25.50	25.20	25.36	0.34

ตารางที่ ก - 15 ค่าความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกั่ว  
 เบ้าหลอมเหล็กที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
5LS	Weigth loss(%)	2 Hours	4.57	4.95	5.32	5.00	4.96	4.96	0.27
		8 Hours	4.73	5.08	5.43	5.10	5.08	5.08	0.25
		24 Hour	4.95	5.38	5.74	5.40	5.37	5.37	0.28
	Water absorption (%)	2 Hours	21.30	23.10	23.50	22.90	22.70	22.72	0.84
		8 Hours	22.10	23.70	24.00	23.40	23.30	23.29	0.74
		24 Hours	23.10	25.10	25.40	24.80	24.60	24.59	0.89
7.5LS	Weigth loss(%)	2 Hours	4.27	4.38	4.44	4.30	4.35	4.35	0.07
		8 Hours	4.41	4.49	4.58	4.50	4.49	4.49	0.06
		24 Hours	4.74	4.80	4.91	4.80	4.81	4.81	0.06
	Water absorption (%)	2 Hours	18.8	19.40	19.00	18.80	19.00	19.01	0.24
		8 Hours	19.5	19.90	19.60	19.70	19.60	19.64	0.16
		24 Hours	20.9	21.30	21.00	21.00	21.00	21.03	0.13

ตารางที่ ก – 16 ค่าความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกั่ว  
 เบ้าหลอมเหล็กที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน (ต่อ)

MIX		1	2	3	4	5	AVG	SD	
10LS	Weigth loss(%)	2 Hours	4.63	4.81	4.83	5.00	5.00	4.85	0.15
		8 Hours	4.84	4.97	4.99	5.00	4.95	4.95	0.06
		24 Hours	5.19	5.31	5.35	5.30	5.29	5.29	0.06
	Water absorption (%)	2 Hours	20.00	20.10	20.60	21.30	21.20	20.63	0.62
		8 Hours	20.90	20.80	21.30	21.30	21.00	21.04	0.24
		24 Hours	22.40	22.20	22.80	22.60	22.50	22.48	0.23
15LS	Weigth loss(%)	2 Hours	4.55	4.49	4.57	4.60	4.55	4.55	0.04
		8 Hours	4.72	4.59	4.69	4.70	4.67	4.67	0.05
		24 Hours	5.00	4.89	5.01	5.00	4.97	4.97	0.05
	Water absorption (%)	2 Hours	18.90	18.90	19.80	19.50	19.30	19.27	0.39
		8 Hours	19.60	19.30	20.30	19.90	19.80	19.79	0.38
		24 Hours	20.80	20.60	21.70	21.20	21.00	21.06	0.43

ตารางที่ ก - 17 ค่าความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกอน  
เศษแก้วที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
5GC	Weigth loss(%)	2 Hours	3.96	4.13	4.11	3.76	3.94	3.98	0.15
		8 Hours	4.10	4.43	4.26	3.67	4.06	4.10	0.28
		24 Hours	4.23	4.58	4.42	3.73	4.19	4.23	0.32
	Water absorption (%)	2 Hours	17.30	17.70	17.20	17.00	17.00	17.23	0.28
		8 Hours	17.90	19.00	17.80	16.60	17.50	17.76	0.86
		24 Hours	18.50	19.60	18.50	16.80	18.10	18.30	1.00
7.5GC	Weigth loss(%)	2 Hours	2.77	2.84	2.75	2.80	2.72	2.78	0.05
		8 Hours	2.96	2.95	2.85	2.73	2.80	2.86	0.10
		24 Hours	3.14	3.18	3.12	2.80	2.99	3.05	0.15
	Water absorption (%)	2 Hours	11.80	11.70	11.20	11.40	11.20	11.45	0.26
		8 Hours	2.60	12.20	11.60	11.10	11.50	11.80	0.57
		24 Hours	13.30	13.10	12.70	11.40	12.30	12.57	0.77

ตารางที่ ก – 18 ค่าความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของตะกอน  
เศษแก้วที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน (ต่อ)

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
10GC	Weigth loss(%)	2 Hours	2.56	2.60	2.66	2.55	2.69	2.61	0.06
		8 Hours	2.73	2.69	2.71	2.51	2.76	2.68	0.10
		24 Hours	2.93	2.94	2.92	2.57	2.94	2.86	0.16
	Water absorption (%)	2 Hours	10.20	10.60	10.70	10.20	10.90	10.50	0.29
		8 Hours	10.90	10.90	10.90	10.10	11.10	10.78	0.41
		24 Hours	11.70	11.90	11.70	10.30	11.90	11.50	0.68
15GC	Weigth loss(%)	2 Hours	2.32	2.03	2.06	2.16	2.19	2.15	0.12
		8 Hours	2.26	2.11	2.26	2.78	2.35	2.35	0.25
		24 Hours	2.47	2.32	2.51	2.89	2.54	2.55	0.21
	Water absorption (%)	2 Hours	9.10	8.20	7.90	8.30	8.50	8.40	0.43
		8 Hours	8.80	8.50	8.70	10.70	9.20	9.17	0.88
		24 Hours	9.60	9.40	9.60	11.10	9.90	9.92	0.68

ตารางที่ ก – 19 ค่าความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของไดอะทอมไมต์ที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
5DI	Weigth loss(%)	2 Hours	5.06	4.61	4.72	4.67	4.67	4.75	0.18
		8 Hours	5.28	4.80	4.75	4.77	4.80	4.88	0.22
		24 Hours	5.43	5.03	4.97	4.90	4.98	5.06	0.21
	Water absorption (%)	2 Hours	22.30	21.00	21.80	20.70	20.90	21.35	0.66
		8 Hours	23.30	21.90	21.90	21.20	21.50	21.95	0.80
		24 Hours	23.90	22.90	22.90	21.70	22.30	22.77	0.82
7.5DI	Weigth loss(%)	2 Hours	4.39	4.12	3.96	4.07	4.01	4.11	0.17
		8 Hours	4.54	4.32	4.15	4.17	4.17	4.27	0.17
		24 Hours	4.78	4.52	4.35	4.30	4.36	4.46	0.20
	Water absorption (%)	2 Hours	19.70	18.40	18.20	17.80	17.90	18.42	0.78
		8 Hours	20.40	19.30	19.10	18.30	18.60	19.14	0.83
		24 Hours	21.50	20.20	20.00	18.80	19.40	20.00	0.99



ตารางที่ ก – 20 ค่าความทนทานต่อการละลายน้ำของส่วนผสมยิปซัมที่มีส่วนผสมของไดอะทอมไมต์ที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน (ต่อ)

MIX			1	2	3	4	5	AVG	SD
10DI	Weigth loss(%)	2 Hours	3.82	3.68	3.85	3.84	3.80	3.80	0.07
		8 Hours	4.07	3.95	4.13	3.99	4.04	4.04	0.07
		24 Hours	4.28	4.10	4.29	4.13	4.20	4.20	0.09
	Water absorption (%)	2 Hours	16.20	15.40	16.50	18.00	16.50	16.54	0.93
		8 Hours	17.30	16.60	17.70	18.70	17.60	17.57	0.77
		24 Hours	18.20	17.20	18.40	19.30	18.30	18.28	0.77
15DI	Weigth loss(%)	2 Hours	3.69	4.09	3.81	3.61	3.93	3.83	0.19
		8 Hours	4.10	4.13	3.91	3.93	4.07	4.03	0.10
		24 Hours	4.59	4.26	4.04	4.08	4.19	4.23	0.22
	Water absorption (%)	2 Hours	16.30	17.90	16.80	16.80	17.50	17.06	0.62
		8 Hours	18.10	18.00	17.30	18.30	18.10	17.97	0.40
		24 Hours	20.30	18.60	17.90	19.00	18.70	18.88	0.88

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข - 1 แสดงค่า  $2\theta$ , intensity และ hkl ของแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไฮเดรตไฮดรอกไซด์ไฮเดรต (Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate) ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก JCPDS (International Centre for Diffraction Data) หมายเลข 00-041-1451

Pattern : 00-041-1451		Radiation = 1.540598					Quality : High				
Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> 26H <sub>2</sub> O		2 $\theta$	i	h	k	l	2 $\theta$	i	h	k	l
Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate Ettringite, syn		9.091	100	1	0	0	*77.926	2	6	3	0
		9.987	4	1	0	1	78.459	1	6	1	10
		12.283	1	1	0	2	80.353	1	6	3	4
		15.784	76	1	1	0	81.926	1	4	2	14
		17.832	12	1	1	2	*81.926	1	5	4	6
		18.243	6	2	0	0	83.395	1	6	3	6
		18.911	17	1	0	4	85.762	1	7	1	9
		20.050	1	2	0	2	86.235	1	4	2	15
		22.111	3	2	0	3	88.592	2	7	1	10
		22.944	31	1	1	4	*88.592	2	4	4	12
		24.212	4	2	1	0	88.796	1	6	4	3
		24.724	7	2	0	4	90.569	1	8	1	6
		25.614	23	2	1	2	96.313	1	5	5	8
		27.284	5	2	1	3	*96.313	1	4	4	14
		27.507	21	3	0	0	96.937	1	8	2	5
		28.766	1	3	0	2	*96.937	1	7	3	7
		29.645	4	1	1	6					
		31.867	6	2	2	0					
		32.268	25	3	0	4					
		32.977	1	2	2	2					
		33.204	7	3	1	0					
		33.459	1	0	0	8					
		34.277	16	3	1	2					
		35.023	29	2	1	6					
		35.568	2	3	1	3					
		36.116	2	2	2	4					
		36.963	1	4	0	0					
		37.185	1	1	1	8					
		37.458	6	3	0	6					
		38.371	2	2	0	8					
		40.416	8	3	2	0					
		40.875	22	2	2	6					
		41.325	5	3	2	2					
		41.969	13	3	1	6					
		42.444	2	3	2	3					
		42.591	5	4	1	0					
		43.473	2	4	1	2					
		43.961	3	3	2	4					
		44.786	1	3	1	7					
		45.306	1	1	1	10					
		46.011	2	4	1	4					
		46.687	11	5	0	0					
		47.755	1	4	0	7					
		48.652	1	3	3	0					
		49.212	3	2	1	10					
		49.440	5	3	3	2					
		49.786	3	4	2	1					
		50.375	4	4	2	2					
		51.161	1	0	0	12					
		*51.161	1	3	1	9					
		51.721	4	3	3	4					
		52.391	2	5	1	0					
		53.112	2	5	1	2					
		53.717	2	5	0	6					
		54.688	3	3	1	10					
		55.223	5	4	1	8					
		55.296	5	5	1	4					
		56.783	8	6	0	0					
		57.637	2	4	3	0					
		58.236	3	4	1	9					
		58.601	3	4	2	7					
		59.179	1	2	0	13					
		60.328	1	3	3	8					
		61.481	2	4	1	10					
		62.074	1	5	2	4					
		63.736	1	2	0	14					
		65.340	1	5	2	6					
		66.123	1	1	0	15					
		*66.123	1	2	1	14					
		67.417	1	5	3	0					
		69.173	1	4	4	4					
		70.238	1	6	0	9					
		71.779	1	5	0	12					
		72.224	2	6	2	4					
		73.329	1	2	0	0					
		74.065	2	4	2	12					
		*74.065	2	7	1	2					
		75.304	1	3	2	14					
		75.941	2	7	1	4					
		77.926	2	5	4	3					
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 1255.10									
S.G. : P31c (159)		Volume [CD] = 2335.62									
a = 11.22400		Dx = 1.785									
c = 21.40800		Dm = 1.770									
Z = 2											
Sample preparation: Sample synthesized from CaO + Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> in solution at 18 C.											
Color: Colorless											
Additional pattern: To replace 2-59, 9-414, 13-350, 31-251 and 37-1476.											
Temperature of data collection: Pattern taken at 15 C.											
Optical data: A=1.464, B=1.458, Sign=-											
General comments: Preferred orientation enhances hkl reflections.											
Additional pattern: See ICSD 16045 (PDF 72-646).											
Data collection flag: Ambient.											
E, Y., China Building Materials Academy, Beijing, China., Private Communication (1989)											
CAS Number: 12252-15-2											
Radiation : CuK $\alpha$ 1		Filter : Beta									
Lambda : 1.54060		d-sp : Diffractometer									
SS/FOM : F30=226(0.0025,53)											

ตารางที่ ข – 2 แสดงค่า  $2\theta$ , intensity และ hkl ของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก JCPDS (International Centre for Diffraction Data) หมายเลข 00-005-0586

Pattern : 00-005-0586		Radiation = 1.540598		Quality : High			
<p><b>CaCO<sub>3</sub></b></p> <p>Calcium Carbonate Calcite, syn</p>		2 $\theta$	i	h	k	l	
		23.022	12	0	1	2	
		29.406	100	1	0	4	
		31.418	3	0	0	6	
		35.966	14	1	1	0	
		39.402	18	1	1	3	
		43.146	18	2	0	2	
		47.124	5	0	2	4	
		47.490	17	0	1	8	
		48.513	17	1	1	6	
		56.555	4	2	1	1	
		57.402	8	1	2	2	
		58.075	2	1	0	10	
		60.678	5	2	1	4	
		60.987	4	2	0	8	
		61.345	3	1	1	9	
		63.060	2	1	2	5	
		64.678	5	3	0	0	
		65.599	3	0	0	12	
		69.231	1	2	1	7	
		70.238	2	0	2	10	
		72.870	2	1	2	8	
		73.729	1	3	0	6	
		76.300	1	2	2	0	
		77.177	2	1	1	12	
		80.933	1	3	1	2	
		81.547	3	2	1	10	
		82.113	1	0	1	14	
		83.767	3	1	3	4	
		84.788	1	2	2	6	
		86.483	1	1	2	11	
		93.072	1	2	0	14	
		94.701	3	4	0	4	
		95.011	4	3	1	8	
		96.165	2	1	0		
		97.647	1	2	1	13	
		99.161	2	3	0	12	
		102.242	1	3	2	1	
		102.952	1	2	3	2	
		103.899	1	1	3	10	
		104.124	3	1	2	14	
		105.846	2	3	2	4	
		106.145	4	0	4	8	
		107.333	1	0	2		
		109.561	2	4	1	0	
		110.483	2	2	2	12	
<p><b>Lattice:</b> Rhombohedral</p> <p><b>S.G.:</b> R-3c (167)</p> <p><b>a</b> = 4.98900</p> <p><b>c</b> = 17.06200</p> <p><b>Z</b> = 6</p>		<p><b>Mol. weight</b> = 100.09</p> <p><b>Volume [CD]</b> = 367.78</p> <p><b>Dx</b> = 2.711</p> <p><b>Dm</b> = 2.710</p> <p><b>I/Cor</b> = 2.00</p>					
<p><b>Optical data:</b> A=1.487, B=1.659, Sign=-</p> <p><b>Color:</b> Colorless</p> <p><b>Sample source or locality:</b> Sample from Mallinckrodt Chemical Works.</p> <p><b>Analysis:</b> Spectroscopic analysis: &lt;0.1% Sr; &lt;0.01% Ba; &lt;0.001% Al, B, Cs, Cu, K, Mg, Na, Si, Sn; &lt;0.0001% Ag, Cr, Fe, Li, Mn.</p> <p><b>Temperature of data collection:</b> Pattern taken at 26 C.</p> <p><b>General comments:</b> Other form: aragonite.</p> <p><b>General comments:</b> Pattern reviewed by Parls, J., McCarthy, G., North Dakota State Univ., Fargo, North Dakota, USA, <i>ICDD Grant-in-Aid</i> (1992).</p> <p><b>General comments:</b> Agrees well with experimental and calculated patterns.</p> <p><b>General comments:</b> Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed.</p> <p><b>Additional pattern:</b> See ICSD 16710, 20179, 28827, 18164, 18165 and 18166 (PDF 72-1214 and 72-1937); ICSD 73446 (PDF 81-2027); ICSD 79673 (PDF 83-577); ICSD 79674 (PDF 83-578).</p> <p><b>Data collection flag:</b> Ambient</p>							
<p>Swanson, Fuyat, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, volume II, page 51 (1953)</p> <p>CAS Number: 13397-26-7</p>							
<p><b>Radiation:</b> CuK<math>\alpha</math>1</p> <p><b>Lambda:</b> 1.54050</p> <p><b>SS/FOM:</b> F30= 57(0.0159,33)</p>		<p><b>Filter:</b> Beta</p> <p><b>d-sp:</b> Not given</p>					

ตารางที่ ข – 3 แสดงค่า  $2\theta$ , intensity และ hkl ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก JCPDS (International Centre for Diffraction Data) หมายเลข 00-044-1481

Pattern : 00-044-1481		Radiation = 1.540598		Quality : High		
<p><b>Ca(OH)<sub>2</sub></b></p> <p>Calcium Hydroxide Portlandite, syn</p>		<p><b>2<math>\theta</math></b></p> <p>18.008 28.672 34.102 36.527 47.121 50.813 54.358 56.092 59.426 62.634 64.233 *64.233 71.811 77.654 79.095 81.909 84.751 *84.751 86.197 93.209 96.029 98.882 *98.882 103.142 106.066 107.578 110.520 118.268</p>	<p><b>i</b></p> <p>72 27 100 1 30 1 14 1 3 2 7 1 7 6 1 2 2 5 5 2 3 2 2 2 1 1 2 2 1 1 1</p>	<p><b>h</b></p> <p>0 1 1 0 1 1 1 0 2 2 1 1 2 0 0 1 2 2 2 2 3 1 3 0 0 2 2 2 1 2 2 1</p>	<p><b>k</b></p> <p>0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1</p>	<p><b>l</b></p> <p>1 0 1 2 2 0 1 1 0 1 3 2 2 4 3 0 4 1 3 3 0 4 1 5 4 3 5 0</p>
<p>Lattice : Hexagonal</p> <p>S.G. : P-3m1 (164)</p> <p>a = 3.58990</p> <p>c = 4.91600</p> <p>Z = 1</p>		<p>Mol. weight = 74.09</p> <p>Volume [CD] = 54.87</p> <p>Dx = 2.242</p> <p>I/Cor = 2.90</p>				
<p>Color: White</p> <p>Sample source or locality: Sample obtained from □ Chemical Co.</p> <p>General comments: Average relative standard deviation in intensity of the ten strongest reflections for three specimen mounts = 2.2%.</p> <p>Additional pattern: Validated by a calculated pattern.</p> <p>Optical data: A=1.545, B=1.574, Sign=-</p> <p>Deleted and rejected by: Deleted by 4-733 which is satisfactory.</p> <p>Data collection flag: Ambient.</p>						
<p>Martin, K., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., ICDD Grant-in-Aid (1992)</p>						
<p>Radiation : CuK<math>\alpha</math>1</p> <p>Lambda : 1.54056</p> <p>SS/FOM : F25= 52(0.0167,29)</p>		<p>Filter : Monochromator crystal</p> <p>d-sp : Diffractometer</p> <p>Internal standard : Si</p>				

ตารางที่ ข – 4 แสดงค่า  $2\theta$ , intensity และ hkl ของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก JCPDS (International Centre for Diffraction Data) หมายเลข 00-017-0912

Pattern : 00-017-0912		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
CaO		2 $\theta$	i	h	k	l
Calcium Oxide		19.365	10			
		20.935	20			
		23.144	20			
		24.165	40			
		26.111	2			
		26.750	100			
		27.594	2			
		29.757	100			
		31.027	10			
		33.027	10			
		35.597	20			
		39.492	60			
		40.797	2			
		42.612	2			
		43.254	40			
		47.569	60			
		48.376	60			
		49.786	10			
		51.911	2			
		54.582	2			
		56.403	2			
		57.363	10			
		59.599	10			
		60.459	10			
		63.687	2			
		64.678	2			
		67.307	2			
		67.861	10			
		79.079	2			
		80.924	10			
		83.219	20			
		84.107	10			
		94.381	20			
		95.577	20			
Lattice : Not assigned		Mol. weight = 56.08				
S.G. : (0)						
Deleted and rejected by: Deleted by Set 19. Data collection flag: Ambient.						
Martí Tebar., Anales Real Soc. Espan. fis y quin., Series B, volume 51, page 31 (1955)						
Radiation : CuK $\alpha$		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54180		d-sp : Not given				

ตารางที่ ข – 5 แสดงค่า  $2\theta$ , intensity และ hkl ของแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก JCPDS (International Centre for Diffraction Data) หมายเลข 00-003-1084

Pattern : 00-003-1084		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
$\gamma$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> /2CaO SiO <sub>2</sub>  Calcium Silicate		2 $\theta$	i	h	k	l
		15.813	10			
		20.543	20			
		21.765	10			
		23.267	20			
		26.347	10			
		29.655	80			
		30.917	10			
		32.054	10			
		32.533	20			
		32.778	90			
		34.467	10			
		35.308	10			
		35.744	10			
		36.650	10			
		38.784	10			
		39.673	10			
		40.416	10			
		41.384	20			
		44.142	10			
		45.068	20			
		45.790	10			
		46.284	10			
		47.046	10			
		47.569	100			
		48.376	40			
		50.375	10			
		50.674	60			
		52.230	40			
		54.233	40			
		54.936	10			
		56.403	60			
		56.783	10			
		60.026	10			
		60.899	40			
		61.799	40			
		63.204	20			
		63.687	10			
		64.179	10			
		65.186	10			
		66.229	10			
		66.763	10			
		67.307	10			
		68.425	10			
		74.679	10			
		76.084	20			
		77.549	10			
		78.306	10			
		83.219	20			
		85.017	20			
		85.950	10			
		88.898	10			
		89.934	10			
Deleted and rejected by: Continuation of 3-1083. Deleted and rejected by: Delete: Berry parcel of October 29, 1957. Color: Colorless Optical data: A=1.642, B=1.645, Q=1.654, Sign=+, 2V=60° General comments: Firing 1 and 2: heated for 5 hours to 1600 C; held for 5 hours. General comments: Reference reports monoclinic. Transforms to orthorhombic above 675 C. Data collection flag: Ambient.		Mol. weight = 172.24				
Lattice : Not assigned S.G. : (255)		Dm = 2.970				
Clark, C., J. Am. Ceram. Soc., volume 29, page 25 (1946)						
Radiation : CoK $\alpha$ Lambda : 1.79020		Filter : Beta d-sp : Not given				

ตารางที่ ข – 6 แสดงค่า  $2\theta$ , intensity และ hkl ของแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (Calcium Sulfate Hydrate) ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก JCPDS (International Centre for Diffraction Data) หมายเลข 00-041-0225

Pattern : 00-041-0225		Radiation = 1.540598		Quality : Indexed		
<b>CaSO<sub>4</sub> · 0.62H<sub>2</sub>O</b>  Calcium Sulfate Hydrate		<b>2th</b>	<b>i</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
		14.751	80	2	0	0
		20.311	5	2	0	2
		20.771	5	2	1	1
		25.671	40	2	2	0
		26.762	5	3	1	0
		27.682	5	3	1	1
		29.312	10	2	2	2
		29.732	80	4	0	0
		31.792	100	2	0	4
		32.962	10	4	0	2
		33.262	5	3	2	1
		34.952	5	4	1	1
		37.582	5	1	1	5
		38.362	5	2	2	4
		39.702	10	4	2	0
		41.302	5	4	0	4
		42.262	20	4	2	2
		42.553	5	0	0	6
		44.623	5	3	3	3
		45.303	5	6	0	0
		46.543	5	4	3	1
		47.593	10	6	0	2
		49.273	30	4	2	4
		52.783	10	4	0	6
		54.083	20	6	0	4
		54.863	5	4	4	2
		55.113	10	6	2	0
		57.133	5	6	2	2
		60.054	5	2	0	8
		60.254	5	5	2	5
		60.804	5	4	4	4
		61.784	5	8	0	0
		62.954	5	6	2	4
		63.674	5	8	0	2
		63.874	5	6	0	6
		64.414	5	4	3	6
		66.414	5	4	0	8
		67.974	5	5	5	1
		72.035	5	6	2	6
		72.445	5	4	2	8
		73.785	5	8	2	2
		75.095	5	6	4	4
		75.915	5	6	5	1
		78.975	5	8	2	4
		79.835	5	10	0	0
		82.145	5	4	4	8
		83.656	10	6	6	0
		85.536	5	8	4	0
		86.586	5	10	0	4
		89.706	5	8	0	8
		91.207	10	10	2	0
		92.257	5	8	4	4
Lattice : Hexagonal S.G. : P3121 (152) a = 13.86200 c = 12.73900 Mol. weight = 147.31 Volume [CD] = 2119.91 Dx = 0.115						
Color: White Sample preparation: Dehydration of gypsum in H N O <sub>3</sub> (60%) at 36(3) C. Rehydration at pressure of water/pressure of oxygen=0.76 at 22 C. Temperature of data collection: Pattern made at 22 C and pressure of water=0.76. Analysis: Analysis (wt.%): CaO 38.0, S O <sub>3</sub> 54.4, H <sub>2</sub> O 7.6. Additional pattern: To replace 43-605. Data collection flag: Ambient.						
Pollmann, H., Kuzel, H.-J., Mineralogical Inst. of University, Erlangen, Germany., ICDD Grant-in-Aid (1989)						
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54051 SS/FOM : F30= 26(0.0077,149)		Filter : Beta d-sp : Diffractometer Internal standard : Si				

ตารางที่ ข - 7 แสดงค่า 2θ, intensity และ hkl ของยิปซัม (Gypsum) ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐาน จาก JCPDS (International Centre for Diffraction Data) หมายเลข 01-074-1433

Pattern : 01-074-1433		Radiation = 1.540598					Quality : Calculated				
Ca(SO <sub>4</sub> )(H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Calcium Sulfate Hydrate Gypsum		11.633	918	0	2	0	73.814	1	2	9	1
Lattice : Base-centered monoclinic		15.536	1	0	1	1	74.128	13	-3	8	3
S.G. : I2/c (0)		18.687	18	1	1	0	74.593	2	-1	11	2
Mol. weight = 172.17		20.731	999	-1	2	1	74.898	4	0	12	0
Volume [CD] = 495.15		23.388	122	0	4	0	*74.898	4	0	9	3
Dx = 2.310		25.014	1	1	3	0	75.183	2	-2	3	5
a = 5.67900	beta = 118.43	28.130	37	-1	1	2	75.627	1	-3	9	2
b = 15.20200		29.117	636	-1	4	1	76.050	9	-3	2	5
c = 6.52200		31.090	428	1	2	1	*76.236	17	0	6	4
a/b = 0.37357	Z = 4	31.163	292	0	0	2	76.551	13	-1	10	3
c/b = 0.42902	l/lcor = 1.68	32.074	82	-2	1	1	*76.551	13	3	6	1
ICSD collection code: 027221		32.775	11	-1	3	2	76.886	19	-1	2	5
ICSD space group comment: ICSD SG: I12/C1 IT is: 15 SG short form: I2/c		33.368	311	0	5	1	76.990	9	-4	6	2
Temperature factor: ATF		*33.368	311	0	2	2	*77.399	13	-2	8	4
Remarks from ICSD/CSD: REM TEM 294.		34.508	34	1	5	0	77.506	7	-1	12	1
Remarks from ICSD/CSD: REM M PDF 6-46, 33-311 (setting C2/c).		34.597	38	-2	0	2	*77.506	7	-3	7	4
Remarks from ICSD/CSD: REM B Space group given by author: I12/a1.		35.399	7	0	6	0	77.847	2	-4	4	4
Sample source or locality: Specimen from Hampshire, England, UK.		35.936	95	2	0	0	78.341	1	2	3	3
Additional pattern: See PDF 70-982, PDF 70-983, PDF 70-984, PDF 72-596, PDF 74-1904 and PDF 74-1905.		36.266	13	-2	3	1	79.693	22	-3	4	5
Data collection flag: Ambient.		36.518	59	-2	2	2	*79.693	22	2	8	2
		37.370	35	1	4	1	80.143	2	1	3	4
		37.895	2	2	2	0	80.437	6	-1	4	5
		39.328	4	0	4	2	80.994	1	4	4	0
		40.655	105	-1	5	2	*80.994	1	3	9	0
		42.183	14	-2	4	2	81.588	4	3	3	2
		43.321	123	2	4	0	81.921	6	-3	10	1
		43.486	85	-1	2	3	82.100	2	1	12	1
		43.604	113	-2	5	1	*82.100	2	-4	7	3
		*43.604	113	1	1	2	83.069	1	-4	1	5
		44.229	39	-2	1	3	*83.069	1	2	5	3
		44.577	6	0	7	1	83.325	8	-1	9	4
		45.509	22	1	7	0	*83.325	8	0	12	2
		46.209	4	1	6	1	83.811	12	-1	11	1
		46.404	21	2	1	1	*83.811	12	-4	6	4
		45.921	1	1	3	2	84.598	5	0	8	4
		47.509	7	-2	3	3	*84.598	5	0	1	5
		47.888	108	0	6	2	84.915	25	-3	10	3
		*47.888	108	0	1	3	*84.915	25	-3	10	3
		48.400	95	-1	4	3	85.197	19	1	13	0
		48.774	23	-3	1	2	*85.197	19	-2	12	2
		49.572	3	2	3	1	85.334	7	-4	8	2
		50.334	89	-2	6	2	85.435	5	-4	3	5
		50.691	45	-3	2	3	85.598	4	-3	6	5
		51.016	12	0	3	3	85.793	1	2	11	1
		51.160	23	-1	8	1	85.973	4	2	12	0
		51.331	78	2	6	0	86.423	1	-1	6	5
		51.833	3	-3	3	1	*86.423	1	3	5	2
		53.070	1	-2	7	1	86.733	4	-5	2	3
		*53.070	1	1	5	2	86.914	6	0	11	3
		53.698	8	-2	5	3	87.548	1	-3	11	2
		54.437	16	-3	2	3	87.724	1	4	1	1
		55.118	44	-3	4	1	88.020	1	-2	10	4
		55.484	2	3	1	0	88.901	1	-1	13	2
		*55.484	2	2	5	1	89.173	1	-5	3	2
		55.860	23	-1	6	3					
		56.766	69	-2	0	4					
		*56.766	69	0	9	1					
		57.556	3	1	9	0					
		*57.556	3	-3	5	2					
		58.193	20	-2	2	4					
		*58.193	20	0	8	2					
		58.294	15	3	3	0					
		58.670	7	-3	4	3					
		59.497	5	2	0	2					
		60.362	14	-2	8	2					
		60.735	3	1	1	2					
		60.870	13	-1	3	4					
		*60.870	13	0	10	0					
		61.247	8	2	8	0					
		61.471	6	1	7	2					
		61.896	2	-1	9	2					
		62.019	5	-2	7	3					
		*62.019	5	-3	6	1					
		62.232	3	-2	4	4					
		62.431	6	-3	1	4					
		63.750	7	2	7	1					
		*63.750	7	-1	10	1					
		64.116	1	-2	9	1					
		64.708	25	1	4	3					
		64.932	17	0	7	3					
		64.989	17	0	0	4					
		65.327	10	-1	8	3					
		*65.327	10	-3	6	3					
		65.795	18	-4	0	2					
		66.291	2	0	2	4					
		66.621	14	3	2	1					
		67.079	4	-4	2	2					
		67.525	5	4	1	3					
		68.691	34	1	10	1					
		*68.691	34	-2	6	4					
		69.189	2	-4	1	1					
		70.085	8	-4	3	3					
		*70.085	8	0	4	4					
		70.416	11	3	4	1					
		70.668	9	1	11	0					
		70.863	4	-4	4	2					
		71.010	12	-3	8	1					
		*71.010	12	1	6	3					
		71.173	20	2	6	2					
		71.328	9	3	7	0					
		71.743	2	-4	3	1					
		*71.743	2	1	9	2					
		71.981	1	-2	10	2					
		72.197	1	-2	9	3					
		72.714	1	-2	1	6					
		*72.714	1	2	10	0					
		72.981	2	4	7	4					
		73.657	1	-1	7	4					
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									
SS/FOM: F30=418(0.0019,37)											





### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิณศิริ อัมพพนารัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2530 สถานที่เกิด จังหวัด นครศรีธรรมราช จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวัสดุศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี 2553 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และจบการศึกษาในปี พ.ศ. 2556

#### การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติ

1. "Preparation of Industrial Waste-based Gypsum Binder". The 7th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress (MPSCG7), The Faculty of Science, National University of Singapore, Singapore. วันที่ 12-14 ธันวาคม 2554

2. "Improvement in Water Resistance and Compressive Strength of the Waste-based Gypsum Mix". International Congress on Ceramics (ICC4), Sheraton Chicago Hotel & Towers, USA. วันที่ 15-19 กรกฎาคม พ.ศ.2555

3. "Effects of Diatomite and Glass Cullet In the Waste-based Gypsum Building Materials." The 7th International Conference on Materials Science and Technology (MSAT7), Swissotel Le Concorde Hotel, Bangkok, Thailand. วันที่ 7-8 มิถุนายน พ.ศ. 2555

4. "Preparation of gypsum building materials based on flue-gas gypsum, ladle furnace slag and roof tile sludge". Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2012). The empress convention center, Chiangmai, Thailand. ในระหว่างวันที่ 11-13 มกราคม พ.ศ.2555 และการนำเสนอผลงานครั้งนี้ได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Proceeding

#### ผลงานตีพิมพ์

1. K.Touchuen, P.Umponpanarat, W.Buggakupta and W.Panpa. "Effects of Diatomite and Glass Cullet in the Waste-based-Gypsum Building Materials." Key Engineering Materials, Vol.545(2013) PP.122-128

2.P.Umponpanarat, W.Buggakupta and W.panpa. "Preparation of Gypsum Building materials based on Flue-Gas Gypsum, Ladle furnace Slag and Roof tile Sludge." Proceeding of Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2012).PP.1427-1430