ผลของการเติมยิปซั่มและดินขาวต่อเฟสและสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัล

น.ส.อัณศยา เอกสาธิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF GYPSUM AND KAOLIN ADDITION ON PHASES AND PROPERTIES OF CALCIUM SILICATE HYDRATE PRODUCTS UNDER HYDROTHERMAL CONDITIONS

Miss Aunsaya Eksatit

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการเติมยิปซั่มและดินขาวต่อเฟสและสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัล
โดย	น.ส.อัณศยา เอกสาธิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คะชิมา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.พิศิษฐ เกษี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อัณศยา เอกสาธิต : ผลของการเติมยิปซั่มและดินขาวต่อเฟสและสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัล. (EFFECT OF GYPSUM AND KAOLIN ADDITION ON PHASES AND PROPERTIES OF CALCIUM SILICATE HYDRATE PRODUCTS UNDER HYDROTHERMAL CONDITIONS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างต่างๆ เนื่องจากเป็นเฟสหลักที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานเฟสต่างๆในวัสดุก่อสร้างทำให้เกิดความแข็งแรงขึ้น ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการเติมดินขาวและยิปซั่มต่อเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si ชิ้นงานที่เตรียมได้จะเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลในปริมาณสูงขึ้น ส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานเพิ่มขึ้น การเติมยิปซั่มจะเร่งให้เกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ซึ่งจะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดสูงขึ้น แต่เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S) มากกว่า 0.025 จะส่งผลทำให้เกิดเฟสแอนไฮไดรต์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ความต้านแรงดัดมีค่าลดลง ในขณะที่การเติมดินขาวจะช่วยส่งเสริมการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์แต่จะยับยั้งการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับควอตซ์ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลลดลง ส่งผลให้ความต้านแรงดัดจึงมีค่าลดลง เมื่อเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มพบว่า สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้จะขึ้นกับชนิดของสารตัวเติมที่ควบคุมปฏิกิริยา โดยยิปซั่มจะควบคุมการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเติมดินขาวในปริมาณน้อย การเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้เฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์มีปริมาณที่สูงขึ้น แต่เมื่อชิ้นงานนั้นมีการเติมดินขาวในปริมาณที่สูง ดินขาวจะเริ่มควบคุมการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับยิปซั่มส่งผลให้เกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ได้ดีขึ้นแต่จะยับยั้งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล โดยในกรณีที่เตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ จะทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์ไม่พบพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในระบบ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดัดสูง ในขณะที่ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง จะมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานในปริมาณสูง ส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดมีค่าต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2561 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

5972098623 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: CALCIUM SILICATE HYDRATE, HYDROTHERMAL, GYPSUM, KAOLIN

Aunsaya Eksatit : EFFECT OF GYPSUM AND KAOLIN ADDITION ON PHASES AND PROPERTIES OF CALCIUM SILICATE HYDRATE PRODUCTS UNDER HYDROTHERMAL CONDITIONS. Advisor: Asst. Prof. KARN SERIVALSATIT

Calcium silicate hydrate phases are primarily binding phases in building materials and responsible for the strength of the materials. In this present study, the effects of kaolin and gypsum addition on phase formation and properties of the calcium silicate hydrate products under hydrothermal condition at 180 °C were investigated. As increasing Ca/Si ratio, the amount of calcium silicate hydrate gel and tobermorite increased, resulting in an increase in the bending strength of the specimens. Adding gypsum accelerated the formation of tobermorite and calcium silicate hydrate gel which improved the bending strength of the specimens. However, the bending strength of the specimens decreased as the ratio of S/(Si+S) over 0.025 due to the presence of excess anhydrite. Although the addition of kaolin enhanced the formation of tobermorite, it hindered the reaction between calcium hydroxide and quartz. As a result, the amount of calcium silicate hydrate gel decreased, leading to a decrease in bending strength. For the case of both kaolin and gypsum addition, the properties of the specimens depended on the amount of the additives. Gypsum could control the reaction of starting materials if kaolin was added in a small amount. Increasing the amount of gypsum enhanced the bending strength of the specimens. As the large amount of kaolin was added, the reaction was controlled by kaolin, resulting in an increase in the formation of tobermorite. However, the formation of calcium silicate hydrate gel was delayed. For the specimens with low Ca/(Si+S+Al) ratio, the reaction of starting materials was complete. Therefore, no portlandite was observed in the specimens. As a result, the specimen with high bending strength could be fabricated. In contrast, for the specimens with high Ca/(Si+S+Al) ratio, the starting materials could not react completely. The large amount of portlandite remained in the specimens, resulting in low bending strength of the specimens.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Ceramic Technology	Student's Signature .....
Academic Year:	2018	Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากได้รับการแนะนำและได้รับความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัยจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับสถานที่ทำการทดลองและอุปกรณ์เครื่องมือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งแนะแนวทางในการเขียนวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบริษัท เอสซีจี ผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง จำกัด ที่สนับสนุนงบประมาณการทำวิจัยและความอนุเคราะห์สนับสนุนวัตถุดิบสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นผู้ดูแลด้านงานสัญญาทำงานวิจัย และด้านการเงินการบัญชี ให้โครงการได้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างราบรื่น

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ช่วยเหลือในทุกๆด้าน และให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัยในครั้งนี้

อัณศยา เอกสาธิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญรูปภาพ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ป

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ 3

1.2 เป้าหมายของโครงงานวิจัย 3

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 4

2.1.1 โครงสร้างผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 4

2.1.2 กระบวนการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 5

2.1.3 เฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 6

2.1.4 สมบัติเชิงกลของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 7

2.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 9

2.2.1 หลักการไฮโดรเทอร์มัล 9

2.2.2 หม้อนึ่งความดันไอ 9

2.3 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 13

2.3.1 ผลของการเติมยิปซั่มต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 13

2.3.2 ผลของการเติมดินขาวต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 17
3.1 วัสดุและสารเคมีต่างๆ 17
3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ 17
3.1.2 องค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ 18
3.1.3 โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบ 19
3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง 20
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ 20
3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของตัวอย่างที่เตรียมได้ 22
3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส 22
3.3.2 การวิเคราะห์พันธะของสาร 22
3.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 22
3.3.4 การทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 22
บทที่ 4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง 24
4.1 ผลของอัตราส่วน Ca/Si ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ 24
4.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 24
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 27
4.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 28
4.1.4 สรุปผลการทดลองผลของอัตราส่วน Ca/Si ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ 29
4.2 ผลของการเติมยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ 29
4.2.1 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 30
4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 30
4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 32
4.2.2 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 33
4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 34
4.2.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 35
4.2.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 35
4.2.3 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 36
4.2.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 37
4.2.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 38
4.2.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 38
4.2.4 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 39
4.2.4.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 40
4.2.4.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 41
4.2.4.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 41
4.2.5 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 42
4.2.5.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 43
4.2.5.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 43
4.2.5.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 44
4.2.6 สรุปผลการทดลองผลการเติมยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ 45
4.3 ผลของการเติมดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ 45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.1 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 46
4.3.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ..... 46
4.3.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน..... 47
4.3.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค..... 48
4.3.2 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 49
4.3.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ..... 50
4.3.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน..... 51
4.3.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค..... 51
4.3.3 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 52
4.3.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ..... 53
4.3.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน..... 54
4.3.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค..... 55
4.3.4 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 56
4.3.4.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ..... 57
4.3.4.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน..... 58
4.3.4.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค..... 59
4.3.5 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 60
4.3.5.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ..... 61
4.3.5.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน..... 62

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.5.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 63
4.3.6 สรุปผลการทดลองผลของการเติมดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ 64
4.4 ผลของการเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมยิปซั่ม และชิ้นงานที่เติมดินขาว 64
4.4.1 ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ 66
4.4.1.1 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 66
4.4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 67
4.4.1.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 69
4.4.1.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 70
4.4.2 ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง 71
4.4.2.1 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 72
4.4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 73
4.4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 75
4.4.2.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 76
4.4.3 สรุปผลการทดลองการเติมดินขาวและยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ 77
4.5 ผลของการเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ 78
4.5.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) 78
4.5.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 79
4.5.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 81
4.5.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 83
4.5.2 ผลของการเติมยิปซั่มของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ 84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.2.1 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่อ อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 84
4.5.2.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 85
4.5.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 87
4.5.2.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 88
4.5.2.2 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่อ อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 89
4.5.2.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 90
4.5.2.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 92
4.5.2.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 94
4.5.2.3 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่อ อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 95
4.5.2.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 96
4.5.2.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 97
4.5.2.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 99
4.5.3 ผลของการเติมดินขาวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ 100
4.5.3.1 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่อ อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 100
4.5.3.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 101
4.5.3.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 103
4.5.3.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 105

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.3.2 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 106
4.5.3.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 107
4.5.3.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 108
4.5.3.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 110
4.5.3.3 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 111
4.5.3.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 112
4.5.3.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 113
4.5.3.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 115
4.5.4 ผลของการเติมยิปซั่มของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง 116
4.5.4.1 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 117
4.5.4.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 118
4.5.4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 119
4.5.4.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 121
4.5.4.2 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 122
4.5.4.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 123
4.5.4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 125
4.5.4.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 127

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.4.3 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 128
4.5.4.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 129
4.5.4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 130
4.5.4.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 132
4.5.5 ผลของการเติมดินขาวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง 133
4.5.5.1 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 134
4.5.5.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 135
4.5.5.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 136
4.5.5.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 138
4.5.5.2 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 139
4.5.5.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 140
4.5.5.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 142
4.5.5.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 144
4.5.5.3 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 145
4.5.5.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ 146
4.5.5.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน 148
4.5.5.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค 150

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.6 สรุปผลการทดลองผลการเติมดินขาวและยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้. 151

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 153

บรรณานุกรม 156

ภาคผนวก ก. ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) และ Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 160

ภาคผนวก ข. ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) และ Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 198

ประวัติผู้เขียน 236

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 5

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซิลิกอน-ออกซิเจน เตตทระฮีดรอน.....6

รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงเฟสของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่อุณหภูมิและอัตราส่วน Ca/Si ค่าต่างๆ 7

รูปที่ 2.4 หม้อนึ่งความดันไอ.....10

รูปที่ 2.5 หม้อนึ่ง.....11

รูปที่ 2.6 แผงควบคุมการทำงาน 11

รูปที่ 2.7 วาล์ระบายความดัน 12

รูปที่ 2.8 ระบบหล่อเย็น 12

รูปที่ 2.9 การแทนที่ของไอออน Al ในโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต 15

รูปที่ 3.1 องค์ประกอบเฟส (ก) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ข) ทราย (ค) ดินขาว และ (ง) ยิปซั่ม 19

รูปที่ 3.2 โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบ (ก) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ข) ทราย (ค) ดินขาว (ง) ยิปซั่ม 20

รูปที่ 4.1 ผลวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ (ก) ในช่วง 2-theta เท่ากับ 5 ถึง 50 องศา (ข)เฉพาะช่วง 2-theta เท่ากับ 22-38 องศา 25

รูปที่ 4.2 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ 26

รูปที่ 4.3 โครงสร้างของซิลิกอน-ออกซิเจน เตตทระฮีดรอน 26

รูปที่ 4.4 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ 28

รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si (ก) 0.2 (ข) 0.4 (ค) 0.6 (ง) 0.8 และ (จ) 1.0.....29

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.6 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆ 31

รูปที่ 4.7 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆ.....32

รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) อัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05 33

รูปที่ 4.9 ผลวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ.....34

รูปที่ 4.10 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆ.....35

รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 ศึกษาที่อัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05 36

รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 ศึกษาที่อัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ 37

รูปที่ 4.13 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 และเติมยิปซั่มในอัตรส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ.....38

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05 39

รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ 40

รูปที่ 4.16 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 เมื่อเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ.....41

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05 42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.18 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 เมื่อเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ.....43

รูปที่ 4.19 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 เมื่อเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆ.....44

รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 เมื่อเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05.....45

รูปที่ 4.21 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....47

รูปที่ 4.22 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....48

รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15.....49

รูปที่ 4.24 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....50

รูปที่ 4.25 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....51

รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15.....52

รูปที่ 4.27 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....54

รูปที่ 4.28 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....55

รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15.....56

รูปที่ 4.30 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....58

รูปที่ 4.31 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....59

รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15.....60

รูปที่ 4.33 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....62

รูปที่ 4.34 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ.....63

รูปที่ 4.35 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15.....64

รูปที่ 4.36 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05.....68

รูปที่ 4.37 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05.....70

รูปที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al)เท่ากับ 0.4 (ก) ไม่เติมสารตัวเติม (ข) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05.....71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.39 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 74

รูปที่ 4.40 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05.....76

รูปที่ 4.41 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 (ก) ไม่เติมสารตัวเติม (ข) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค)เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05.....77

รูปที่ 4.42 ผลวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่างๆ เติม ดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125.....81

รูปที่ 4.43 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่างๆ เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 82

รูปที่ 4.44 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) (ก) 0.4 (ข) 0.6 (ค) 0.8 (ง) 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125.....83

รูปที่ 4.45 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....87

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.46 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ.....88

รูปที่ 4.47 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05.....89

รูปที่ 4.48 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....92

รูปที่ 4.49 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ.....93

รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05.....94

รูปที่ 4.51 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....97

รูปที่ 4.52 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ.....98

รูปที่ 4.53 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05.....99

รูปที่ 4.54 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....103

รูปที่ 4.55 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....104

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.56 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15 105

รูปที่ 4.57 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....108

รูปที่ 4.58 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....109

รูปที่ 4.59 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15 110

รูปที่ 4.60 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....113

รูปที่ 4.61 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....114

รูปที่ 4.62 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15 116

รูปที่ 4.63 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....119

รูปที่ 4.64 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.65 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05.....122

รูปที่ 4.66 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมดินขาวในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....125

รูปที่ 4.67 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 126

รูปที่ 4.68 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05.....127

รูปที่ 4.69 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 5 และเติมดินขาวในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....130

รูปที่ 4.70 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 131

รูปที่ 4.71 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05.....133

รูปที่ 4.72 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ.....136

รูปที่ 4.73 ค่าความต้านแรงดัดในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 137

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.74 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15 139

รูปที่ 4.75 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 142

รูปที่ 4.76 ค่าความต้านแรงดัดในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 143

รูปที่ 4.77 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15 145

รูปที่ 4.78 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 148

รูปที่ 4.79 ค่าความต้านแรงดัดในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 149

รูปที่ 4.80 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15 151

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น 18

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตการศึกษาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) 21

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตการศึกษาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S) 21

ตารางที่ 3.4 ขอบเขตการศึกษาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เติมดินขาวอัตราส่วน Al/(Si+S=Al) และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) 21

ตารางที่ 4.1 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทรายในแต่ละอัตราส่วน Ca/Si 24

ตารางที่ 4.2 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 30

ตารางที่ 4.3 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 33

ตารางที่ 4.4 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 36

ตารางที่ 4.5 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 39

ตารางที่ 4.6 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 42

ตารางที่ 4.7 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 46

ตารางที่ 4.8 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.9 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 52

ตารางที่ 4.10 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 56

ตารางที่ 4.11 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 60

ตารางที่ 4.12 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05.....67

ตารางที่ 4.13 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05.....72

ตารางที่ 4.14 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) ค่าต่างๆ และเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาว ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับAl/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 79

ตารางที่ 4.15 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาว ที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ 85

ตารางที่ 4.16 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ.....90

ตารางที่ 4.17 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ.....95

ตารางที่ 4.18 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่ม ในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 101

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.19 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่างๆ.....106

ตารางที่ 4.20 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่างๆ.....111

ตารางที่ 4.21 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่ม ในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 117

ตารางที่ 4.22 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ.....123

ตารางที่ 4.23 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ.....128

ตารางที่ 4.24 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่ม ในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ 134

ตารางที่ 4.25 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่างๆ.....140

ตารางที่ 4.26 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่างๆ.....146

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) และน้ำ (H_2O) ซึ่งเป็นเฟสที่มีความสำคัญในผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างเช่น ปูนซีเมนต์[1] คอนกรีตมวลเบา (autoclaved aerated concrete)[2] และไฟเบอร์ซีเมนต์บอร์ด (fiber cement board)[3, 4] เนื่องจากเป็นเฟสที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานเฟสต่างๆในวัสดุก่อสร้าง ก่อให้เกิดความต้านแรงดัดของผลิตภัณฑ์ขึ้น[5-7]

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสามารถพบได้หลายชนิดขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมี อุณหภูมิ เวลา[8] และความดัน เช่น เฟสไจโรไลท์ (gyrolite, $Ca_4(Si_6O_{15})(OH)_2 \cdot 3H_2O$) พบเมื่อทำการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 330 องศาเซลเซียส เฟสทรัสคอตไตท์ (truscottite, $Ca_{14}(Si_{24}O_{15})(OH_2)$) พบเมื่อทำการไฮโดรเทอร์มัลในช่วงอุณหภูมิ 180 ถึง 350 องศาเซลเซียส เฟสโทเบอร์โมไรท์ (tobermorite, $Ca_5(OH)_2Si_6O_{16} \cdot 4H_2O$) พบเมื่อทำการไฮโดรเทอร์มัลในช่วงอุณหภูมิ 120 ถึง 275 องศาเซลเซียส และเฟสโซนอตไลท์ (xonotlite, $Ca_6(Si_6O_{17})(OH)_2$) พบเมื่อทำการไฮโดรเทอร์มัลในช่วงอุณหภูมิ 165 ถึง 385 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป[9] เฟสที่กล่าวมาคือกลุ่มของเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีปริมาณซิลิกาสูง ซึ่งเป็นเฟสที่มีความต้านแรงดัด (bending strength) สูง โดยโทเบอร์โมไรท์จัดเป็นเฟสที่มีความต้านแรงดัดสูงสุด[10] ดังนั้นเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีปริมาณซิลิกาสูงที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอน (Ca/Si) มีผลอย่างมากต่อการกำหนดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ นอกจากนี้สารตัวเติมในสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตก็ถือเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยสารตัวเติมจะช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการให้แก่ผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามสารตัวเติมแต่ละชนิดจะส่งผลต่อสมบัติของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตแตกต่างกัน

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างมักมีการเติมดินขาวซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือ อะลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกาเพื่อช่วยในการขึ้นรูปทำให้ชิ้นงานหลังขึ้นรูปมีความต้านแรงดัดเพิ่มสูงขึ้น การเติมดินขาวเข้าไปในส่วนประกอบ อะลูมิเนียมไอออนจากดินขาวจะสามารถเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของซิลิกอนไอออนในโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้[11-14] ดังนั้นอัตราส่วน Ca/Si จึงนิยมเขียนในรูปอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อผลรวมของซิลิกอนและอะลูมิเนียม (Ca/(Si+Al)) และอัตราส่วนระหว่างอะลูมิเนียม

ต่อผลรวมของซิลิกอนและอะลูมิเนียม (Al/(Si+Al)) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่บอกถึงปริมาณอะลูมิเนียมไอออนที่แทนที่อยู่ในตำแหน่งของซิลิกอนไอออนในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

ยิปซั่มมักนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุก่อสร้าง โดยพบว่าการเติมยิปซั่มจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์[15] โดยเมื่อยิปซั่มละลายจะเกิดไอออนซัลเฟอร์อยู่ในสารละลาย ไอออนซัลเฟอร์จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของซิลิเกตไอออนที่ได้จากทรายในโครงสร้างสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต[16] ดังนั้นอัตราส่วน Ca/Si จึงนิยมเขียนในรูปอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อผลรวมของซิลิกอนและซัลเฟอร์ (Ca/(Si+S)) และอัตราส่วนระหว่างซัลเฟอร์ต่อผลรวมของซิลิกอนและซัลเฟอร์ (S/(Si+S)) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่บอกถึงปริมาณซัลเฟอร์ไอออนที่แทนที่อยู่ในตำแหน่งของซิลิกอนไอออนในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

ในการผลิตผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างมักมีการเติมดินขาวและยิปซั่มเข้าไปในสารประกอบร่วมกัน การเติมดินขาวและยิปซั่มคาดว่าจะส่งผลต่อการเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตแตกต่างจากการเติมดินขาวหรือยิปซั่มเพียงอย่างเดียว เนื่องจากไอออนอะลูมิเนียมจากดินขาวและไอออนซัลเฟอร์จากยิปซั่มสามารถเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของซิลิกอนไอออนได้ทั้งคู่[17]

จากที่กล่าวมาข้างต้นนอกจากอัตราส่วน Ca/Si จะส่งผลต่อการเกิดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต อัตราส่วน Al/(Si+Al) และ S/(Si+S) ก็มีความสำคัญต่อการเกิดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัลเช่นกัน ซึ่งเฟสที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาผลของการเติมดินขาวและยิปซั่มต่อเฟสที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัล รวมถึงทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ เพื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบเฟส และสมบัติของผลิตภัณฑ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาผลของการเติมดินขาวและยิปซั่มต่อเฟสที่เกิดขึ้นและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

1.2 เป้าหมายของโครงงานวิจัย

ทราบผลของอัตราส่วนระหว่างไฮเดรตไลม์ ดินขาว ทราย และยิปซั่ม ต่อองค์ประกอบเฟสและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้

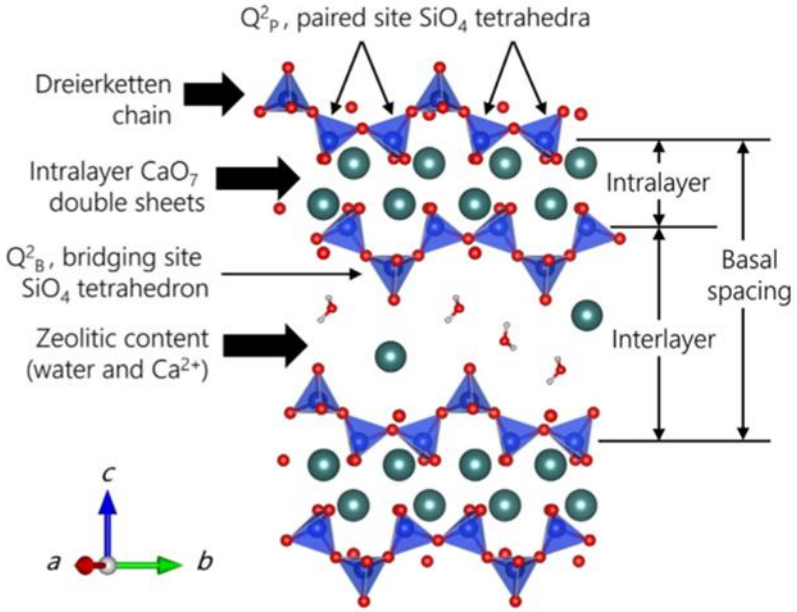
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

2.1.1 โครงสร้างผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate) คือ สารประกอบที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา ระหว่างไฮเดรตไลม์ (hydrated lime, $Ca(OH)_2$) ทราย และน้ำ เป็นองค์ประกอบสำคัญในวัสดุก่อสร้างหลายชนิด เช่น กระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ แคลเซียมซิลิเกตบอร์ด และอิฐมวลเบา เป็นต้น โดยเป็นองค์ประกอบหลักทำหน้าที่เชื่อมประสานองค์ประกอบอื่นๆเข้าด้วยกันก่อให้เกิดแข็งแรงแก่ชิ้นงาน เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีน้ำหนักเบา แข็งแรง และ ทนความร้อน จึงถือว่าเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อความต้านแรงดัดของผลิตภัณฑ์ก่อสร้างโดยตรง สำหรับโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนั้นจะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย แผ่นแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide sheet) ถูกประกบด้วยสายโซ่ซิลิเกต (silicate chain) ซึ่งในหนึ่งหน่วยย่อยของสายโซ่ซิลิเกตประกอบด้วยแพร์ซิลิกาเตตระฮีดรอน (pair silica tetrahedron) ซึ่งประกอบด้วยซิลิกาเตตระฮีดรอน 2 หน่วยที่มีลักษณะเหมือนกัน และต่อด้วยบริดจิ้งซิลิกาเตตระฮีดรอน (bridging silica tetrahedron) ซึ่งเป็นซิลิกาเตตระฮีดรอนที่เป็นตัวเชื่อมแพร์ซิลิกาเตตระฮีดรอนคู่อื่นๆ โดยจัดเรียงตัวแบบ dreierketten เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวดังรูปที่ 2.1 โดยอะตอมออกซิเจนจากแผ่นแคลเซียมออกไซด์ทั้งหมดจะแบ่งพันธะร่วมกับซิลิกาเตตระฮีดรอนจากสายโซ่ซิลิเกต แต่ไม่ใช่ซิลิเกตเตตระฮีดรอนทุกหน่วยที่จะเชื่อมต่อกับแผ่นแคลเซียมออกไซด์ บริดจิ้งซิลิกาเตตระฮีดรอนจะไม่เชื่อมต่อกับแผ่นแคลเซียมออกไซด์ โดยบริดจิ้งซิลิกาเตตระฮีดรอนประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ แทนที่จะเป็นอะตอมออกซิเจนทั้งหมด จึงทำให้ใน 1 หน่วยเซลล์ จะมีสูตรเคมีคือ $(Si_3O_8(OH))^{-5}$ และเมื่อรวมกับอะตอมแคลเซียมที่ใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกับซิลิกาเตตระฮีดรอนแล้วก็จะมีสูตรเคมีเป็น $Ca_4(Si_3O_8(OH))^{-2}$ และเพื่อให้ประจุสมดุลจึงทำให้อะตอมแคลเซียมที่อยู่ระหว่างชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (interlayer) ถูกเหนี่ยวนำและทำให้เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต[18-20]

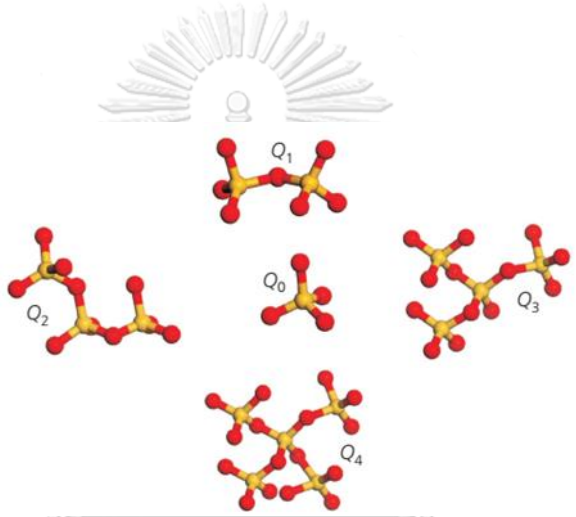


รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต[21]

2.1.2 กระบวนการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

D. Hou และคณะ[20] ได้ทำการศึกษากระบวนการเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต พบว่าการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเริ่มจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) ที่ละลายออกจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงไปในน้ำ ไอออนดังกล่าวจะจับกับไอออนของซิลิกอน (Si^{4-}) จากทราย จนทำให้เกิดการตกตะกอนกลายเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต โดยในช่วงแรกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเริ่มต้นจากการสร้างพันธะของซิลิเกตซึ่งโครงสร้างของซิลิเกตจะแทนด้วยสัญลักษณ์ Q^n เมื่อ n แทนด้วยจำนวนอะตอมของออกซิเจนที่เชื่อมต่อระหว่างซิลิกอน-ออกซิเจนเตตทระฮีดรอน (Si-O tetrahedron) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 4 ลักษณะของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตทระฮีดรอนที่จำนวนอะตอมของออกซิเจนที่เชื่อมต่อระหว่างเตตทระฮีดรอนต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเริ่มต้นจากมอนอเมอร์ (monomer,Q^0) ของซิลิเกต ซึ่งเป็นการจับพันธะระหว่างอะตอมของซัลเฟอร์สร้างพันธะกับอะตอมของออกซิเจน 4 อะตอม จากนั้นซิลิเกต 2 หน่วยจะจับกันกลายเป็นไดเมอร์ (dimer,Q^2) และเริ่มจับกันกลายเป็นสายโซ่ยาว (chain,Q^3 และ Q^4) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ โดยมีไอออนของแคลเซียมและโมเลกุลของน้ำล่องลอยในระบบ ต่อมาสายโซ่โมเลกุลจะเริ่มจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มผลึกเล็กๆ (cluster) กลุ่มผลึกนี้จะรวมตัวกับกลุ่มผลึกรอบข้างและจัดเรียงตัวต่อกันเป็นสายโซ่ยาวที่มีกิ่งสาขาแยกออกจากโซ่ตรง (calcium silicate branch)

ท้ายที่สุดจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล จากนั้นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลก็จะเกิดการตกผลึก (crystallization) กลายเป็นเฟสต่างๆ ตามอัตราส่วน Ca/Si ที่ใช้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si มากกว่า 1 ขึ้นไป อะตอมของแคลเซียมที่มากเกินไปจะทำให้สายโซ่ซิลิเกตในโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดการสลายตัว (depolymerization) โดยอะตอมแคลเซียมจะเข้าไปทำลายพันธะของสายโซ่ซิลิเกตบริเวณบริดจิ้งซิลิกาเตตระฮีดรอน ส่งผลทำให้สายโซ่ซิลิเกตมีขนาดสั้นลง ซึ่งจะทำให้อะตอมของแคลเซียมของแผ่นแคลเซียมออกไซด์ที่จะสร้างพันธะกับออกซิเจนของสายโซ่ซิลิเกตจะสร้างพันธะได้น้อยลงจึงเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดได้น้อยส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง[20]



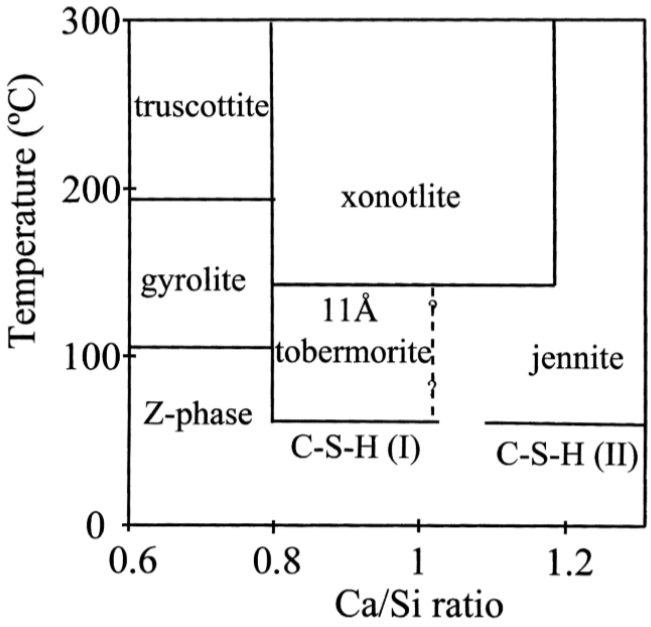
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซิลิกอน-ออกซิเจน เตตทระฮีดรอน[20]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.3 เฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนั้นมีเฟสมากกว่า 30 เฟส[22] ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อซิลิกอน (Ca/Si) อุณหภูมิ และความดันระหว่างการเกิดสารประกอบ เช่นเมื่ออัตราส่วน Ca/Si[23-26] อยู่ในช่วง 0.6 ถึง 0.8 จะเกิดเฟสไจโรไลต์(gyrolite, $Ca_2Si_3O_7(OH)_2 \cdot H_2O$) ที่อุณหภูมิประมาณ 106 ถึง 194 องศาเซลเซียส และเมื่ออัตราส่วน Ca/Si อยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1 จะเริ่มเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์ (tobermorite, $Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O$) ขึ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 65 องศาเซลเซียสขึ้นไป จนกระทั่งเมื่ออัตราส่วน Ca/Si อยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1.2 ที่อุณหภูมิมากกว่า 140 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะเกิดเฟสโซนอตไลต์ (xonotlite,$Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$) แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตแต่ละเฟสนั้นจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน เนื่องจากภายในช่องว่างระหว่างผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีอะตอมแคลเซียมอยู่ภายในซึ่งสามารถบรรจุอะตอมแคลเซียมในจำนวนที่ไม่ตายตัว ดังนั้นที่อัตราส่วน Ca/Si ค่าต่างๆ จึงส่งผล

ทำให้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีเฟสแตกต่างกัน และเฟสที่แตกต่างกันก็จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานแตกต่างกันอีกด้วย



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงเฟสของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่อุณหภูมิและอัตราส่วน Ca/Si ค่าต่างๆ[9]

2.1.4 สมบัติเชิงกลของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

ความต้านแรงดัดของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนั้นจะขึ้นกับความยาวของสายโซ่ซิลิเกต[20] โดยบริดจิ้งซิลิกาเตตระฮีดรอนจะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อสายโซ่ซิลิเกตข้างเคียงให้ต่อเป็นสายโซ่ยาว และอะตอมของแคลเซียมจะสร้างพันธะร่วมกับออกซิเจนจากซิลิเกตก่อให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตขึ้น ซึ่งความยาวของสายโซ่ซิลิเกตจะเปลี่ยนเมื่ออัตราส่วน Ca/Si เปลี่ยนแปลง โดยที่อัตราส่วน Ca/Si ที่แตกต่างกันก็จะก่อให้เกิดเฟสของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้มากกว่า 30 เฟส โดยแต่ละเฟสก็จะมีค่าความต้านแรงดัดที่แตกต่างกัน เช่น เฟสที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงจะมีความต้านแรงดัดต่ำ เช่นเฟสเฟสฮิลแบรนไดท์ (hillebrandite, $Ca_2(HSiO_4)OH$) และเฟสไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C_3SH, $Ca_6Si2O_7(OH)_6$) ในขณะที่เฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีปริมาณซิลิกาสูง เช่นเฟสไจโรไลท์ (gyrolite, $Ca_4(Si_6O_{15})(OH)_2{\cdot}3H_2O$) เฟสทรัสคอตไตท์ (truscottite, $Ca_{14}(Si_{24}O_{15})(OH_2)$) เฟสโทเบอร์โมไรท์ (tobermorite, $Ca_5(OH)_2Si_6O_{16}{\cdot}4H_2O$) และเฟสโซนอตไลท์ (xonotlite, $Ca_6(Si_6O_{17})(OH)_2$) จะมี

ความต้านแรงดัดสูง โดยในกลุ่มของเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีปริมาณซิลิกาสูงเหล่านี้ โทเบอร์โมไรท์จัดเป็นเฟสที่มีความต้านแรงดัดสูงสุด

C. Shan และคณะ[27] ได้ศึกษาความต้านแรงดัดของชิ้นงานในการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จากเถ้าลอย และควอซต์ ที่อัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.4 ถึง 4.5 ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ซึ่งเป็นหนึ่งในเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนั้นจะทำให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดัดสูงขึ้น โดยการเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si หรือเติมควอซต์ในปริมาณที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้เฟสโทเบอร์โมไรท์เกิดได้ในปริมาณที่สูงขึ้น การเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.7 ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีความต้านแรงดัดสูงที่สุดโดยจะมีค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 14 เมกะพาสคัล เนื่องจากที่อัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.7 จะอยู่ในช่วงที่เกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ แต่การเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si หรือเติมควอซต์ในปริมาณที่สูงเกินไปนั้นก็จะส่งผลเสียต่อชิ้นงานทำให้เฟสที่เกิดเปลี่ยนแปลงไปจึงส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดัดลดลง

H. Maenami และคณะ[28] ได้ศึกษาผลของปริมาณอะลูมิเนียมต่อความต้านแรงดัดของสารประกอบแคลเซียมซิลิกาไฮเดรตที่สังเคราะห์จาก ควอตซ์ แร่ดินขาวและปูนขาว ที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) ในช่วง 0.23 ถึง 0.25 และอัตราส่วน Al/(Si+Al) ในช่วง 0, 0.05, 0.24 และ 0.5 ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ถึง 20 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเวลาในการไฮโดรเทอร์มัลเพิ่มมากขึ้นความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมงความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะลดลง สาเหตุเกิดมาจากการเกิดไจโรไลต์ซึ่งเป็นหนึ่งในเฟสของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ชิ้นงานที่เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 จะมีความต้านแรงดัดสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 30 เมกะพาสคัล เมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะมีแนวโน้มลดลง สำหรับชิ้นงานที่เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) ในช่วง 0.24 ถึง 0.05 ซึ่งเป็นการเติมดินขาวที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาพบว่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานต่ำเนื่องจากชิ้นงานที่เกิดขึ้นจะมีไฮโดรการ์เนตเป็นเฟสหลัก ซึ่งจะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 ซึ่งมีโทเบอร์โมไรท์เป็นเฟสหลัก

2.2 กระบวนการไฮโดรเทรอร์มัล

2.2.1 หลักการไฮโดรเทอร์มัล

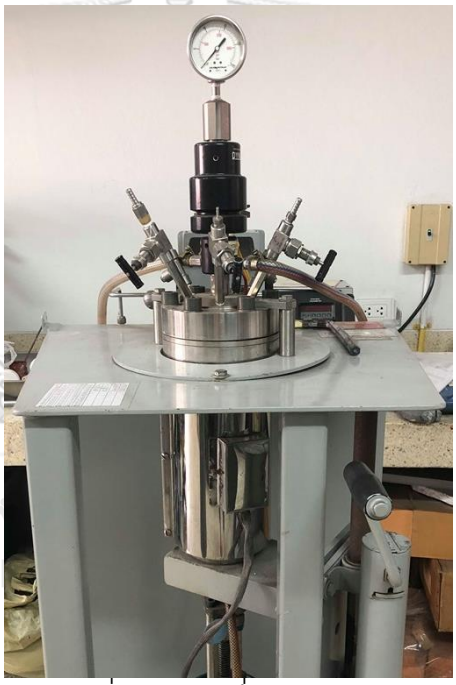
ในการผลิตผลิตภัณฑ์จำพวกคอนกรีตมวลเบา ไฟเบอร์ซีเมนต์ จะนิยมใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มัลในการสังเคราะห์เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถสังเคราะห์ชิ้นงานที่มีความบริสุทธิ์สูง ไม่เกิดการปนเปื้อนระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ อีกทั้งการสังเคราะห์ด้วยวิธีการนี้จะส่งผลทำให้ชิ้นงานเกิดเฟสที่เสถียรและยากที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสภายหลัง

การเตรียมด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal) เป็นกระบวนการสังเคราะห์ผลึกภายใต้การเกิดปฏิกิริยาของสารละลายในน้ำ โดยสาเหตุที่เลือกใช้น้ำเป็นตัวทำละลายนั้นเนื่องจากน้ำไม่เป็นพิษ และ ไม่ติดไฟ จึงไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานที่สังเคราะห์ โดยการสังเคราะห์สารด้วยกระบวนการนี้จะทำให้สารที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาได้นั้นกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องเกิดภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะเกิดภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูงในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิวิกฤตของน้ำที่อุณหภูมิ 374 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องทำการเตรียมในหม้อนึ่งอัดความดันไอ (Autoclave) ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัลความหนืด (viscosity) ของสารละลายจะต่ำจึงทำให้อนุภาคเกิดการแพร่ (diffusivity) ได้อย่างรวดเร็วทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยา อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการละลายของสารตั้งต้นและทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ไปทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ส่งผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและรวดเร็ว สำหรับข้อดีของการสังเคราะห์สารด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ได้แก่ กระบวนการนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ การใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ไม่สูงมากจะทำให้ประหยัดพลังงาน โดยหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่จำเป็นต้องนำไปเผาแคลไซน์ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง นอกจากนี้การสังเคราะห์ทำในระบบปิด จึงเป็นกระบวนการที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจึงสามารถขยายกำลังผลิตสู่ระบบอุตสาหกรรมได้นั่นเอง[29, 30]

2.2.2 หม้อนึ่งความดันไอ

หม้อนึ่งอัดความดันไอ (autoclave) คือภาชนะที่ทำจากเหล็กกล้าหรือเหล็กไร้สนิม ซึ่งได้รับการออกแบบและสร้างอย่างแข็งแรงเพื่อรับแรงดันได้สูงโดยที่เครื่องไม่เกิดความเสียหาย ดังรูปที่ 2.4 กลไกการทำงานของหม้อนึ่งอัดความดันไอ เริ่มจากการบรรจุน้ำหรือสารละลายพร้อมกับสารตั้งต้นในห้องนึ่ง (chamber) เมื่อปิดฝาเครื่องและตั้งค่าเริ่มต้นเครื่องจะเริ่มทำงานอัตโนมัติ

โดยกระบวนการทำงานของหม้อนึ่งอัดความดันไอแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ในช่วงแรกขดลวดความร้อนจะเริ่มเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องนึ่งให้สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้จนกระทั่งน้ำที่บรรจุภายในห้องนึ่งเดือดจนระเหยกลายเป็นไอ สังเกตอุณหภูมิและความดันภายในห้องนึ่งได้จากเกจวัดแรงดัน (pressure gate) ซึ่งความดันไอจากไอน้ำนี้จะเพิ่มความดันภายในเครื่องให้เพิ่มสูงขึ้น และจะส่งผลช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัตถุดิบ[31] จากนั้นกระบวนการจะเริ่มเข้าสู่ช่วงการยืนอุณหภูมิตามที่ต้องการโดยเครื่องจะสั่งการให้ยืนอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ในเวลาที่กำหนด และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทำงานตามเวลาตามที่ตั้งค่าไว้แล้วเครื่องจะเข้าสู่ขั้นตอนการลดอุณหภูมิและความดันภายในหม้อนึ่งให้เท่ากับบรรยากาศภายนอก เมื่ออุณหภูมิภายในหม้อนึ่งลดลงจึงสามารถนำชิ้นงานออกจากเครื่องถือว่าเสร็จสิ้นกระบวนการ



รูปที่ 2.4 หม้อนึ่งความดันไอ

ส่วนประกอบในหม้อนึ่งอัดความดันประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1. หม้อนึ่ง (chamber)

หม้อนึ่งเป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการใส่น้ำและชิ้นงาน โดยประกอบด้วยหม้อนึ่งชั้นใน (inner chamber) และ ผนังชั้นนอก (outer jacket) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าหรือเหล็กไร้สนิม ซึ่งได้รับการออกแบบและสร้างอย่างแข็งแรงเพื่อรับแรงดันได้สูงโดยที่เครื่องไม่เกิดความเสียหาย ดังรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 หม้อนึ่ง

2. ควบคุมการทำงาน (control system)

เป็นส่วนที่ใช้ในการระบุอุณหภูมิปัจจุบันและแสดงสถานการณ์ทำงานของเครื่องดังรูปที่ 2.6 โดยแสดงเป็นตัวเลข LED และมีปุ่มสำหรับการตั้งค่ารูปแบบการทำงานของเครื่อง รวมทั้งตั้งค่าอุณหภูมิและเวลาตามที่ต้องการ หรือใช้สั่งเครื่องเริ่มทำงานและหยุดทำงาน

รูปที่ 2.6 แผงควบคุมการทำงาน

3. วาว์ลระบายความดัน (control valve)

วาล์วระบายความดันทำหน้าที่ในการระบายความดันภายในหม้อนึ่งดังรูปที่ 2.7 โดยในช่วงเริ่มต้นของการทำงานของเครื่องนั้นควรปิดวาล์วให้แน่นเพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำภายในเครื่องระเหยออกจากเครื่องทำให้ความดันภายในเครื่องลดลงและมีค่าต่ำกว่าที่ต้องการ ซึ่งจะส่งผลต่อชิ้นงาน

โดยตรง และเมื่อกระบวนการทำงานของเครื่องเสร็จสิ้นแล้วก่อนที่จะเปิดฝาเครื่องเพื่อนำชิ้นงานออกจากเครื่อง จำเป็นที่จะต้องเปิดวาล์วเพื่อระบายความดันภายในเครื่องออกก่อน เพราะหากไม่ระบายความดันออกนั้นจะไม่สามารถเปิดฝาเครื่องได้เนื่องจากแรงดันภายดันจะดันไม่ให้ฝาสามารถเปิดได้

รูปที่ 2.7 วาล์ระบายความดัน

4. ระบบหล่อเย็น (water cooling system)

เมื่อหม้อนึ่งอัดความดันไอทำงาน การเพิ่มอุณหภูมิภายในหม้อนึ่งจะส่งผลทำให้บริเวณต่างๆ ของเครื่องจะสะสมความร้อนไว้มาก ระบบหล่อเย็นจะทำหน้าที่ในการควบคุมและป้องกันตัวเครื่องหม้อนึ่งให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม ถ่ายเทความร้อนจากเครื่องไม่ให้ร้อนเกินไปในระหว่างการทำงานเพื่อไม่ให้เครื่องเกิดความเสียหาย แสดงส่วนระบบหล่อเย็นดังรูปที่ 2.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.8 ระบบหล่อเย็น

2.3 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

2.3.1 ผลของการเติมยิปซั่มต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

ยิปซั่มมักนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุก่อสร้าง โดยพบว่าการเติมยิปซั่มจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและเฟสโทเบอร์โมไรท์ โดยยิปซั่มนั้นไม่ได้ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของไฮเดรตไลม์หรือทรายแต่อย่างใด แต่ยิปซั่มมีความสามารถในการละลายที่ดีกว่าทราย เมื่อยิปซั่มละลายจะเกิดไอออนซัลเฟอร์อยู่ในสารละลาย ไอออนซัลเฟอร์จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของไอออนซิลิเกตภายในโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้เร็วขึ้น[21] ดังนั้นอัตราส่วน Ca/Si จึงนิยมเขียนในรูปอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อผลรวมของซิลิกอนและซัลเฟอร์ (Ca/(Si+S)) และอัตราส่วนระหว่างซัลเฟอร์ต่อผลรวมของซิลิกอนและซัลเฟอร์ (S/(Si+S)) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่บอกถึงปริมาณไอออนซัลเฟอร์ที่แทนที่อยู่ในตำแหน่งของไอออนซิลิกอนในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งปริมาณของยิปซั่มที่ใช้จะมีผลต่อการเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตพิจารณาจากอัตราส่วน S/(Si+S) เช่น ที่อัตราส่วน S/(Si+S) ในช่วง 0.01 ถึง 0.05 ซัลเฟอร์จะเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ ส่งผลทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการเติมยิปซั่มในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นนั้นไม่เสถียรและอาจเกิดการเปลี่ยนเฟสซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติความต้านแรงดัดของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้[32]

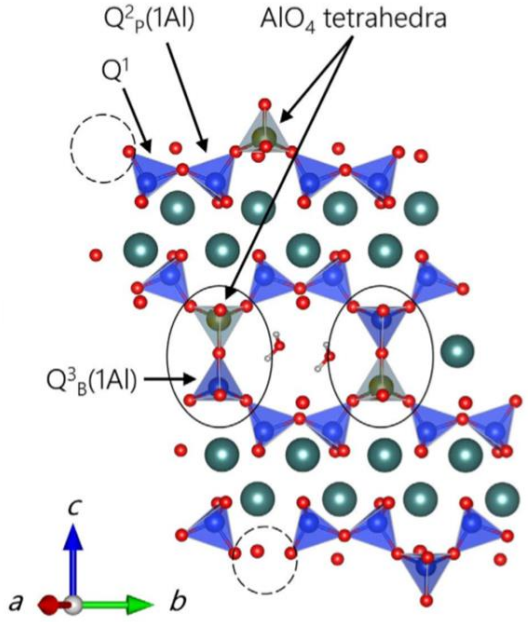
K. Baltakys และคณะ[16] ได้ศึกษาผลของการเติมยิปซั่มในการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจาก ทราย แคลเซียมออกไซด์และยิปซั่ม ที่อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.83 และ 1 ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยศึกษาอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.0125 และ 0.025 จากผลการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการสังเคราะห์แคลเซียมซัลเฟตจะเข้าไปในโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และในช่วงท้ายของการสังเคราะห์โครงสร้างจะมีการจัดเรียงตัวตกผลึกใหม่ (re-crystallize) กลายเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีความเป็นผลึกสูงขึ้น และในระหว่างกระบวนการตกผลึกใหม่ ไอออนซัลเฟตจะเกิดการละลายออกมาและเกิดการทำปฏิกิริยากับไอออนแคลเซียมกลายเป็นแอนไฮไดรต์ (anhydrite, $CaSO_4$) ในที่สุด โดยการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.83 และ S/(Si+S) เท่ากับ 0.0125 ไอออนซัลเฟตจากยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ ซึ่งการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วนนี้จะทำ

ให้เฟสโทเบอร์โมไรท์ไม่เปลี่ยนเฟสกลายเป็นเฟสโซนอตไลท์ แต่เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.025 จะเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ แอนไฮไดรต์ และโซนอตไลท์อยู่ร่วมกัน ในขณะที่การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมไฮเดรตที่อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1 พบว่าการเติมยิปซั่มเพียงเล็กน้อยก็จะช่วยเร่งการเกิดโทเบอร์โมไรท์

2.3.2 ผลของการเติมดินขาวต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างมักมีการเติมดินขาวซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือ อะลูมินา (Al_2O_3) และซิลิกาเพื่อช่วยในการขึ้นรูปทำให้ชิ้นงานหลังขึ้นรูปมีความต้านแรงดัดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งไอออนอะลูมิเนียมจากดินขาวจะเข้าไปมีผลต่อการเกิดโทเบอร์โมไรท์ การเติมดินขาวเข้าไปในส่วนประกอบอะลูมิเนียมไอออนจากดินขาวจะสามารถเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของไอออนซิลิกอนในโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้[25] ดังรูปที่ 2.9 ดังนั้นอัตราส่วน Ca/Si จึงนิยมเขียนในรูปอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อผลรวมของซิลิกอนและอะลูมิเนียม (Ca/(Si+Al)) และอัตราส่วนระหว่างอะลูมิเนียมต่อผลรวมของซิลิกอนและอะลูมิเนียม (Al/(Si+Al)) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่บอกถึงปริมาณไอออนอะลูมิเนียมที่แทนที่อยู่ในตำแหน่งของไอออนซิลิกอนภายในโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งปริมาณของดินขาวที่ใช้มีผลต่อการเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตพิจารณาจากอัตราส่วน Al/(Si+Al) เช่น เมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) อยู่ในช่วง 0 ถึง 0.15 อะลูมิเนียมจะเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ จนกระทั่งเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) มากกว่า 0.24 แคลเซียมจะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมบนผิวของอนุภาคดินขาวและเกิดเป็นเฟสไฮโดรการ์เนต ซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปเป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.9 การแทนที่ของไอออน Al ในโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต[21]

S.Shaw และคณะ[9] ได้ศึกษากระบวนการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์กับโซนอตไลต์ภายใต้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณอะลูมิเนียมที่เข้ามาแทนที่ในระบบ โดยการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากสารละลายไฮเดรตไลม์ที่อิ่มตัวกับเจลแอลคอกไซด์ (alkoxide gel) ใน อัตราส่วน Al/(Si+Al) ในช่วง 0 ถึง 1.5 ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 235 ถึง 310 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการสังเคราะห์เป็นเวลา 3 ถึง 5 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณไอออนอะลูมิเนียมที่เข้าไปแทนที่ในระบบจะส่งผลให้เกิดไฮโดรการ์เนต โดยอัตราการเกิดการตกผลึกจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณอะลูมิเนียมในระบบสูงและสังเคราะห์สารที่อุณหภูมิสูง โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการสังเคราะห์ 48 ชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิกับเวลานี้จะเกิดเพียงเฟสโทเบอร์โมไรต์ขึ้นในระบบ แต่เมื่อสังเคราะห์ที่อุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นจะเกิดเฟสโทเบอร์โมไรต์และโซนอตไลต์ผสมกัน โดยเฟสโทเบอร์โมไรต์จะเสถียรมากกว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมินาที่ใช้และลดอุณหภูมิลง ในขณะที่เฟสโซนอตไลต์จะเสถียรมากกว่าเมื่อลดปริมาณอะลูมินาที่ใช้และเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น

H. Maenami และคณะ[28] ได้ศึกษาผลของปริมาณอะลูมิเนียมในระบบต่อการเกิดไฮโดรการ์เนตและความต้านแรงดัดของสารประกอบแคลเซียมซิลิกาไฮเดรตที่สังเคราะห์จากควอตซ์ แร่ดินขาวและปูนขาว ที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) ในช่วง 0.23 ถึง 0.25 และอัตราส่วน

Al/(Si+Al) ในช่วง 0 ถึง 0.5 ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ถึง 20 ชั่วโมง พบว่าเมื่อ อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะยังคงเป็นเฟสหลัก และเมื่อสังเคราะห์เป็นช่วงเวลา 2 ถึง 5 ชั่วโมง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสโทเบอร์โมไรต์ โดยเฟสโทเบอร์โมไรต์จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์นานขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความต้านแรงดัดสูงถึง 30 เมกะพาสคัล แต่เมื่อใช้เวลาสังเคราะห์นานมากกว่า 5 ชั่วโมงขึ้นไป ความต้านแรงดัดของผลิตภัณฑ์จะลดลงเนื่องจากการเกิดเฟสไจโรไลท์ในผลิตภัณฑ์ ในขณะที่เมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) มากกว่า 0.24 ขึ้นไป จะเกิดเฟสไฮโดรการ์เนตเพียงเฟสเดียวเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลให้ความต้านแรงดัดของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 15 ถึง 20 เมกะพาสคัล ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยังคงแข็งแรง ในขณะที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) มากกว่า 0.05 ขึ้นไปจะมีแนวโน้มทำให้ความต้านแรงดัดของผลิตภัณฑ์ลดลง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Ca/Si มีผลต่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/Si ในช่วงที่ต่ำกว่า 1 เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีความแข็งแรงต่ำ นอกจากนี้การเติมสารตัวเติมดินขาวมากกว่าที่อัตราส่วน Al/(SI+Al) เท่ากับ 0.24 จะส่งผลทำให้เกิดเฟสไฮโดรการ์เนต ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นในงานวิจัยจึงศึกษาผลของการเติมดินขาวในช่วงอัตราส่วน Al/(Si+Al) ในช่วง 0 ถึง 0.15 นอกจากนี้ในงานวิจัยก็สนใจที่จะศึกษาผลของการเติมยิปซั่ม เนื่องจากการเติมยิปซั่มจะทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น โดยทำการศึกษาในช่วงอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0 ถึง 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีต่าง ๆ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากบริษัท สยามผลิตภัณฑ์ปูนขาว จำกัด ดินขาว CR จากบริษัท อิมเมอรี่ส์ เซรามิคส์ (ประเทศไทย) จำกัด ทรายร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมชจากบริษัท ฮีโร่ซายน์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด และยิปซั่มจากบริษัท นอริตาเก้ เอสซีจี พลาสเตอร์ จำกัด

3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray fluorescence, XRF) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยจะอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีเอกซ์ โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ซึ่งธาตุที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ แล้วคายพลังงานออกมาในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้นมีธาตุใดอยู่ในตัวอย่างที่ทดสอบ โดยการเตรียมตัวอย่างในการนำไปวิเคราะห์ ทำได้โดยการบดตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ให้เป็นผงละเอียดในเครื่องบดอนุภาคแบบบอลล์มิลล์ (ball mill) จากนั้นชั่งกรดบอริก (boric acid) และผงตัวอย่างด้วยอัตราส่วนสามต่อหนึ่งแล้วเทลงในโกร่งอะเกต จากนั้นเติมสารละลายอะซีโตน (acetone) บดสารให้เข้ากัน และนำผงตัวอย่างที่บดอัดขึ้นรูปเป็นแท่งกลมขนาด 30 มิลลิเมตร โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.1 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 98.67 ทราย ซึ่งประกอบด้วยซิลิการ้อยละ 99.33 เป็นองค์ประกอบหลัก ดินขาวจะประกอบด้วยอะลูมินา ร้อยละ 42.16 และซิลิกา ร้อยละ 56.27 เป็นองค์ประกอบหลัก ในส่วนของยิปซั่มประกอบด้วยซัลเฟต ร้อยละ 53.90 และแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 45.40 เป็นองค์ประกอบหลัก

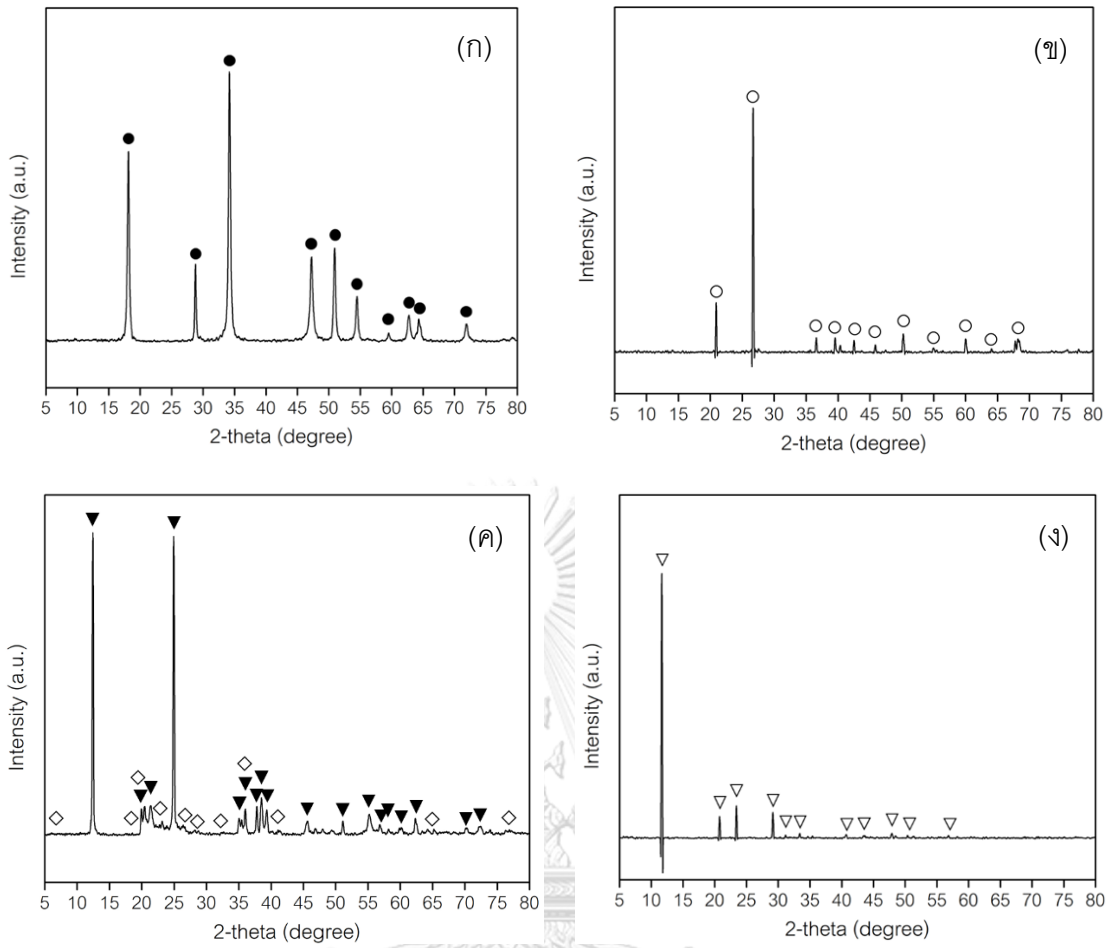
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น

องค์ประกอบทางเคมี (%)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์	ทราย	ดินขาว	ยิปซั่ม
CaO	98.67	0.48	0.18	45.40
SiO_2	0.33	99.33	56.27	0.39
Al_2O_3	0.19	0.01	42.16	0.14
SO_3	0.02	0	0.01	53.90
อื่นๆ	0.81	0.18	1.39	0.17
LOI (%)	24.94	0.34	14.67	20.93

3.1.2 องค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ

การตรวจสอบองค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ จะใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกัน ซึ่งองค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในมุมที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถวิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ โดยการเตรียมตัวอย่างในการนำไปวิเคราะห์ทำได้โดยการบดตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ให้เป็นผงละเอียดในเครื่องบดอนุภาคแบบบอลล์มิลล์ จากนั้นนำผงตัวอย่างที่บดบรรจุบนแผ่นเตรียมตัวอย่าง สำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของสารตั้งต้นได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่ม แสดงดังรูปที่ 3.1 พบว่าองค์ประกอบเฟสของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะพบเฟสพอร์ตแลนไดต์ ($Ca(OH)_2$, JCPDS no. 01-072-0156) เพียงเฟสเดียว ทรายจะพบเฟสควอซต์ (SiO_2, JCPDS no. 01-078-2315) เพียงเฟสเดียวเช่นกัน ในส่วนของดินขาวจะพบเฟสเกาลินไนต์ ($Al_2(Si_2O_5)OH_4$, JCPDS no. 01-080-0886)และคลอไรต์ ($Mg_2Al_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$, JCPDS no. 00-013-0003) และยิปซั่มจะพบเฟสยิปซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$, JCPDS no. 00-006-0047) เพียงเฟสเดียว



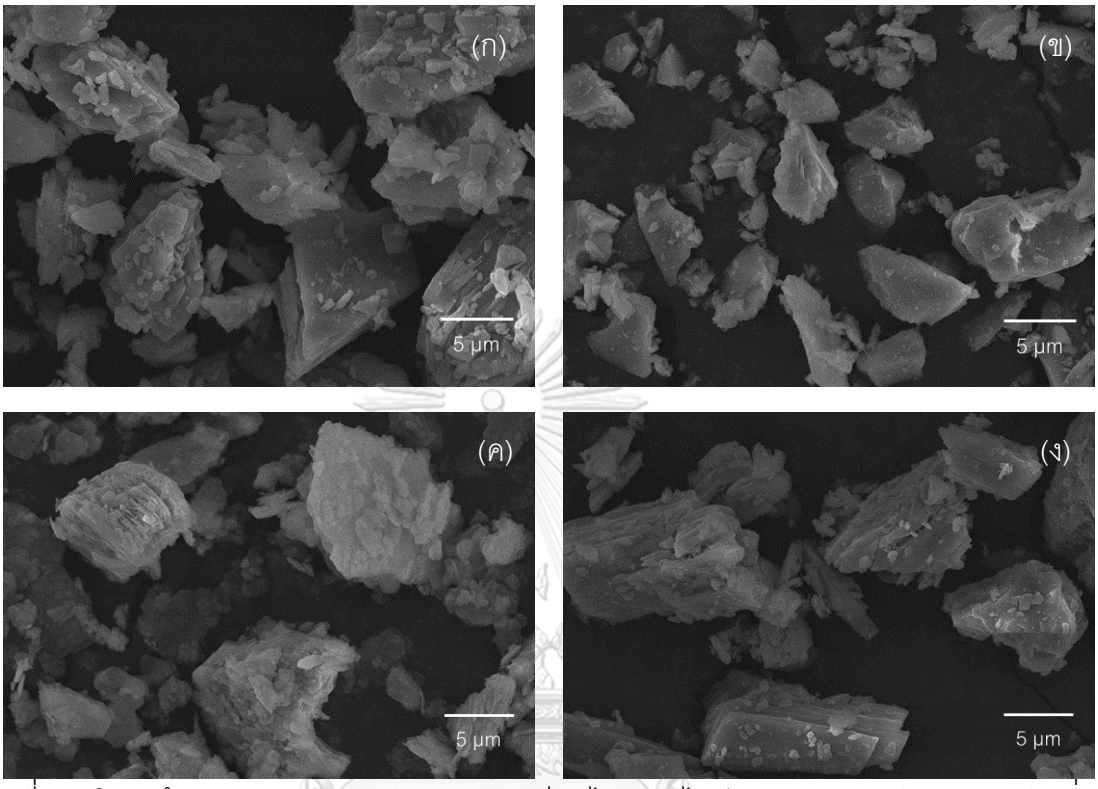
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบเฟส (ก) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ข) ทราย (ค) ดินขาว และ (ง) ยิปซั่ม
(● : portlandite, ○ : quartz, ▼ : kaolinite, ◇ : chlorite, ▽ : gypsum)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.3 โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบ

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบ ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่ม โดยการนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน อาศัยหลักการสร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง โดยการเตรียมตัวอย่างในการนำไปวิเคราะห์ทำได้โดยการทุบชิ้นงานตัวอย่างเป็นชิ้นเล็ก จากนั้นนำตัวอย่างที่เป็นชิ้นเล็กติดบนภาชนะรองรับและเนื่องจากชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการทดสอบนั้นไม่นำไฟฟ้าจึงต้องนำชิ้นงานไปผ่านการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทอง สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่ม แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยลักษณะผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีขนาดอนุภาคประมาณ 10 ไมโครเมตร ในส่วนของทรายจะมีขนาดอนุภาค

ประมาณ 5 ถึง 7 ไมโครเมตร สำหรับดินขาวจะมีขนาดอนุภาคประมาณ 5 ถึง 10 ไมโครเมตร และสุดท้ายผลึกของยิปซั่มมีขนาดอนุภาคประมาณ 7 ถึง 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.2 โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบ (ก) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ข) ทราย (ค) ดินขาว (ง) ยิปซั่ม

3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/Si เริ่มจากการนำแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และทราย ชั่งน้ำหนักส่วนผสมตามอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 สำหรับการศึกษาการเติมดินขาวจะชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 และเติมดินขาวตามอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1 และ 0.15 ดังตารางที่ 3.2 เมื่อศึกษาผลของการเติมยิปซั่มจะชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 และเติมยิปซั่มตามอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.0125, 0.025, 0.0375 และ 0.05 ดังตารางที่ 3.3 และสุดท้ายการศึกษาการเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาวจะชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) 0.05, 0.1 และ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) 0.0125, 0.025 และ 0.05 ดัง

ตารางที่ 3.4 จากนั้นจะนำส่วนผสมทั้งหมดตามที่กล่าวข้างต้นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องบดอนุภาคแบบบอลล์มิลล์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อผสมส่วนผสมตามอัตราส่วนที่ต้องการตามที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว จากนั้นจะทำการเติมน้ำลงในส่วนผสมโดยควบคุมให้มีความชื้นร้อยละ 10 และบ่มไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำผงวัตถุดิบที่ผ่านการปรับความชื้นไปอัดเป็นชิ้นงานขนาด 10 x 9 x 60 มิลลิเมตร ด้วยความดัน 20 เมกะพาสคัล และนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส วิเคราะห์พันธะของสาร วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์การกระจายขนาดของรูพรุน และทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตการศึกษาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al)

อัตราส่วน Ca/(Si+Al)	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1
อัตราส่วน Al/(Si+Al)	0.05, 0.1, 0.15

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตการศึกษาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S)

อัตราส่วน Ca/(Si+S)	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1
อัตราส่วน S/(Si+S)	0.0125, 0.025, 0.0375, 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.4 ขอบเขตการศึกษาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เติมดินขาวอัตราส่วน Al/(Si+S=Al) และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al)

อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al)	0.4, 0.6, 0.8, 1
อัตราส่วน Al/(Si+S+Al)	0.05, 0.1, 0.15
อัตราส่วน S/(Si+S+Al)	0.0125, 0.025, 0.05

3.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆของตัวอย่างที่เตรียมได้

3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส

นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาบดด้วยเครื่องบดแบบสั่น (vibratory mill) จากนั้นนำผงตัวอย่างที่เตรียมได้มาวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น D8-Advance บริษัท Bruker โดยมีแหล่งกำเนิดแสงเอกซ์เรย์คือ Cu-Kα มีความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร ที่ค่าความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ อัตราการวิเคราะห์เฟสเป็น 0.2 องศาต่อวินาที และใช้ค่า 2-theta ตั้งแต่ 5 ถึง 80 องศา

3.3.2 การวิเคราะห์พันธะของสาร

นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาบดด้วยเครื่องบดแบบสั่น จากนั้นนำผงตัวอย่างที่เตรียมได้มาวิเคราะห์การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) รุ่น Thermo Nicolet 6700 บริษัท Thermo Fisher Scientific โดยกำหนดเลขคลื่นที่ต้องการวัดให้อยู่ในช่วง 400 ถึง 4000 cm^{-1}

3.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปตัดให้มีขนาด 10 x 9 x 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานมาติดลงบนแผ่นเทปคาร์บอน นำไปเคลือบผิวด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM-5410 บริษัท JEOL โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าขนาด 15 กิโลโวลต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.4 การทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาวัดค่าความต้านแรงดัดด้วยวิธี three-point bending โดยเครื่อง Instron testing machine โดยกำหนดระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน เท่ากับ 40 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้จากเครื่อง Instron testing machine คำนวณค่าความต้านแรงดัด โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\sigma = \frac{3FL}{2Bh^2} \qquad \text{สมการที่ 2.1}$$

โดยที่ σ คือ ค่าความต้านแรงดัด ($N.m^{-2}$)

F คือ แรงกระทำ (N)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (m)

B คือ ความกว้างของชิ้นงานบริเวณรอยแตก (m)

h คือ ความหนาของชิ้นงานบริเวณรอยแตก (m)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

4.1 ผลของอัตราส่วน Ca/Si ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้

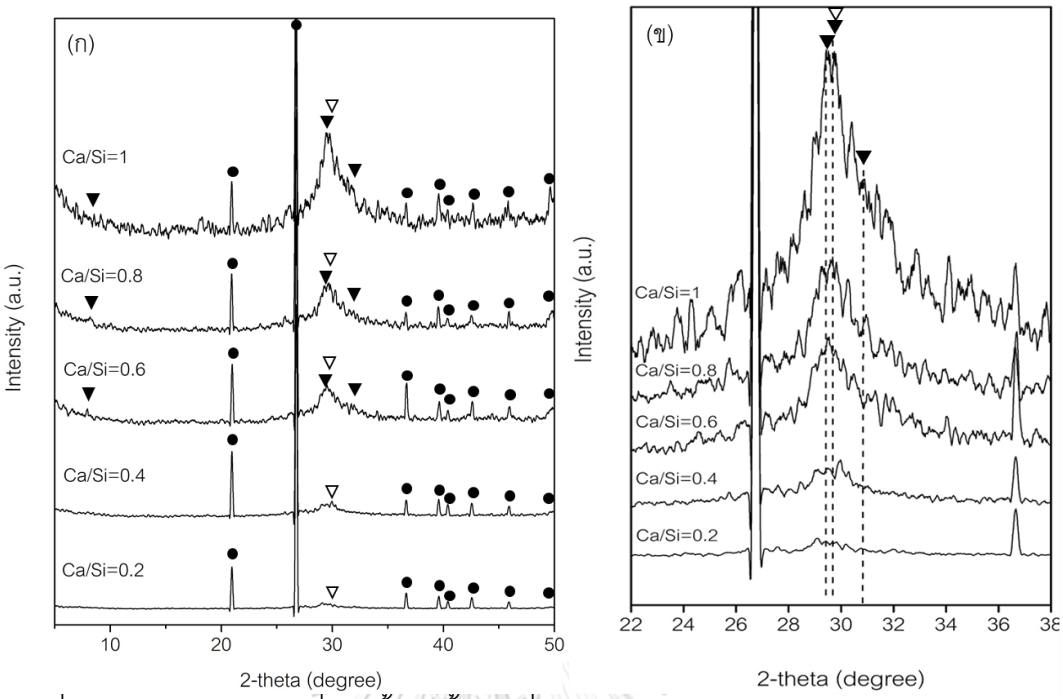
ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทรายเพื่อให้ได้อัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทรายในแต่ละอัตราส่วนแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และทรายในแต่ละอัตราส่วน Ca/Si

อัตราส่วน Ca/Si	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**
0.2	19.77	80.23
0.4	33.03	66.97
0.6	42.54	57.46
0.8	49.69	50.31
1.0	55.27	44.73

4.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

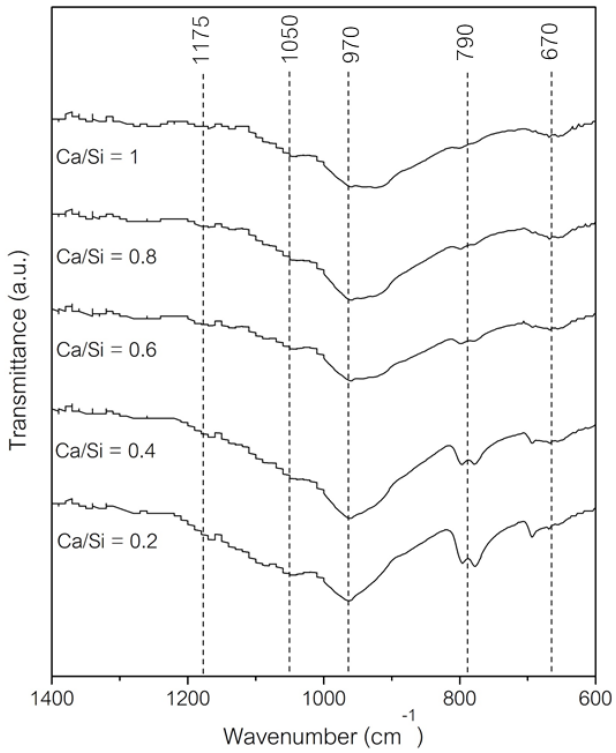
ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ เมื่อผ่านการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมงด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าจะเกิดเฟสของควอซต์ (SiO_2, JCPDS no. 01-078-2315) เป็นเฟสหลักในชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/Si ทุกอัตราส่วน สิ่งที่แตกต่างกันในแต่ละอัตราส่วนคือปริมาณและการเกิดเฟสของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต โดยชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.2 จะเกิดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีลักษณะเป็นเจลโดยเป็นเฟสที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ พิจารณาจากรูปที่ 4.1(ข) สังเกตได้จากลักษณะพีคที่มีฐานกว้างในช่วง 2-theta เท่ากับ 28-36 องศา และปริมาณเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลที่เกิดขึ้นนั้นจะมีปริมาณน้อย แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si มากกว่า 0.6 ขึ้นไปจะพบเฟสของโทเบอร์โมไรท์ ($Ca_5Si_6O_{17}\cdot 5H_2O$, JCPDS no. 19-1364) ร่วมกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดเป็นเฟสโทเบอร์โมไรท์



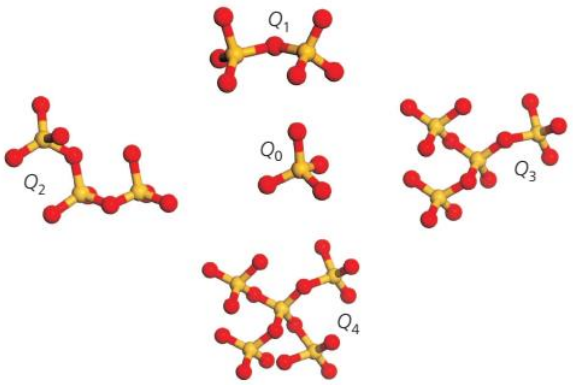
รูปที่ 4.1 ผลวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ (ก) ในช่วง 2-theta เท่ากับ 5 ถึง 50 องศา (ข)เฉพาะช่วง 2-theta เท่ากับ 22-38 องศา

(▼: tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel)

ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงอินฟราเรดเนื่องจากการสั่นของพันธะของชิ้นงานที่เตรียมได้จากอัตราส่วน Ca/Si อัตราส่วนต่างๆด้วยเครื่อง FTIR แสดงดังรูปที่ 4.2 ทุกชิ้นงานแสดงการดูดกลืนแสงของสารประกอบที่มีซิลิเกตเป็นองค์ประกอบ ซึ่งโครงสร้างของซิลิเกตจะแทนด้วยสัญลักษณ์ Q^n เมื่อ n แทนด้วยจำนวนอะตอมของออกซิเจนที่เชื่อมต่อระหว่างซิลิกอน-ออกซิเจนเตตทระฮีดรอน (Si-O tetrahedron) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 4 ลักษณะของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตทระฮีดรอนที่จำนวนอะตอมของออกซิเจนที่เชื่อมต่อระหว่างเตตทระฮีดรอนต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยกระบวนการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเริ่มต้นจากการจับกันของพันธะ Si-O ในรูปแบบของมอนอเมอร์ (Q^0) หลังจากนั้นมอนอเมอร์จะเริ่มจัดเรียงตัวเป็นเส้น (Q^1 และ Q^2) โดยจะจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ จนกระทั่งเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลจะทำให้พอลิเมอร์ที่จับกันเป็นสายโซ่จะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้าง (Q^3 และ Q^4) และพร้อมกันนั้นซิลิเกตจะใช้ออกซิเจนร่วมกับแผ่นแคลเซียมออกไซด์กลายเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งการเกิดโครงสร้างซิลิเกตแบบ Q^3 และ Q^4 จะส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น[33]



รูปที่ 4.2 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของซิลิกอน-ออกซิเจน เตตทระฮีดรอน[20]

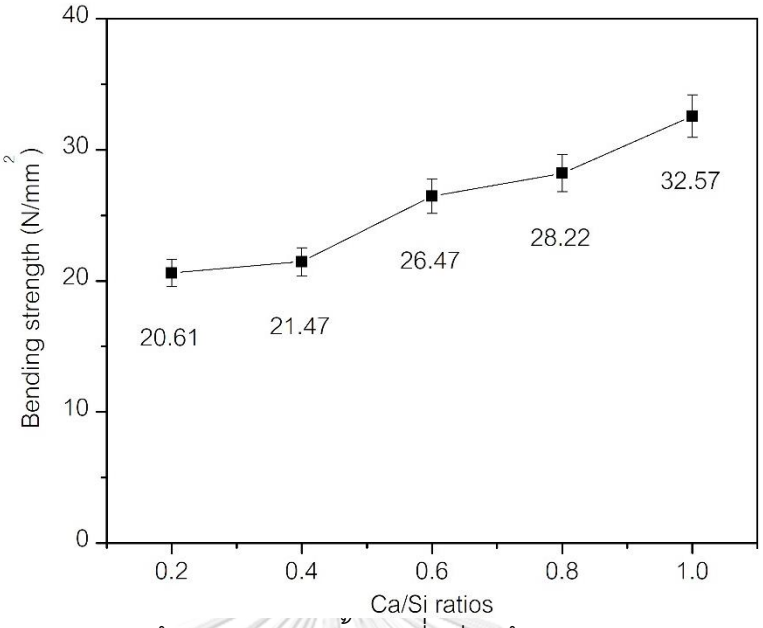
ชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.2 พบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่น (wavenumber) 1050 และ 970 cm^{-1} เนื่องจากการสั่นแบบยืด (stretching vibration) ของพันธะ Si-O ที่อยู่ในตำแหน่ง Q^2 แสดงดังรูปที่ 4.3 เมื่ออัตราส่วน Ca/Si เพิ่มขึ้นแถบการดูดกลืนแสงจะมีลักษณะกว้างขึ้นและเลื่อนไปยังเลขคลื่นต่ำลง แสดงถึงปริมาณการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์แบบเส้นระหว่างซิลิกอน-ออกซิเจนเตตทระฮีดรอนซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวแบบ Q^2 มีปริมาณลดลง นอกจากนี้ยังพบดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่น 790 cm^{-1} เนื่องจากการสั่นแบบยืดของพันธะ

Si-O ที่ตำแหน่ง Q^1 ซึ่งการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งนี้จะลดลงเมื่ออัตราส่วน Ca/Si เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วน Ca/Si มากกว่า 0.6 ขึ้นไป จะพบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1175 cm^{-1} เนื่องจากการสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O ที่อยู่ในตำแหน่ง Q^3 การดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน Ca/Si เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์ระหว่างซิลิกอน-ออกซิเจนเตตทระฮีดรอนมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออัตราส่วน Ca/Si เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์แบบเส้นที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือก็คือพันธะ Si-O ที่อยู่ในตำแหน่ง Q^1 และ Q^2 จะมีปริมาณลดลงและเกิดการจัดเรียงตัวเชื่อมต่อกันกลายเป็นโครงสร้างที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือการที่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดการจัดเรียงตัวกลายเป็นเฟสโทเบอร์โมไรท์นั่นเอง นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดเนื่องจากการสั่นของพันธะ Si-O-Si แบบงอ (bending vibration) ที่เลขคลื่น 670 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่พบในเฟสโทเบอร์โมไรท์เช่นกัน[34]

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.4 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.2 มีค่าเท่ากับ 20.61 เมกะพาสคัล เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si เพิ่มขึ้นจะเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลในปริมาณที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานสูงขึ้น โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si จนถึง 1.0 ชิ้นงานที่เตรียมได้มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุดคือ 32.57 เมกะพาสคัล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

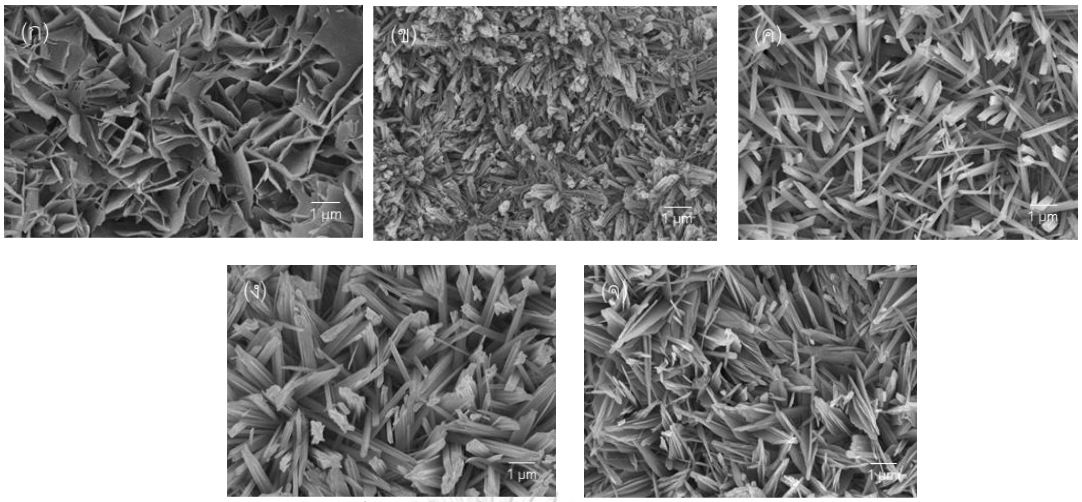


รูปที่ 4.4 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ

4.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.2 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.4 ลักษณะผลึกจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นลักษณะแท่งสั้น และหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si มากกว่า 0.4 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีความเป็นแท่งมากขึ้นและสานกันอย่างหนาแน่นส่งผลให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมได้สูงขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si (ก) 0.2 (ข) 0.4 (ค) 0.6 (ง) 0.8 และ (จ) 1.0

4.1.4 สรุปผลการทดลองผลของอัตราส่วน Ca/Si ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้

จากการศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/Si ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si เฟสโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.2 ลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.4 ลักษณะผลึกจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นลักษณะแท่งสั้น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si จะส่งผลทำให้ผลึกแท่งหนาแน่นและสานกันมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2 ผลของการเติมยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ ซึ่งไอออนซัลเฟอร์สามารถเกิดการแทนที่ในตำแหน่งของไอออนซิลิกอนได้ ดังนั้นการเขียนอัตราส่วน Ca/Si จึงถูกเปลี่ยนมาเขียนในรูปของ Ca/(Si+S) ซึ่งการทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 และศึกษาผลของปริมาณยิปซั่มที่เติมในส่วนผสมในรูปอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.0375 และ 0.05

4.2.1 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 และ S/(Si+S) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.0375 และ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.2

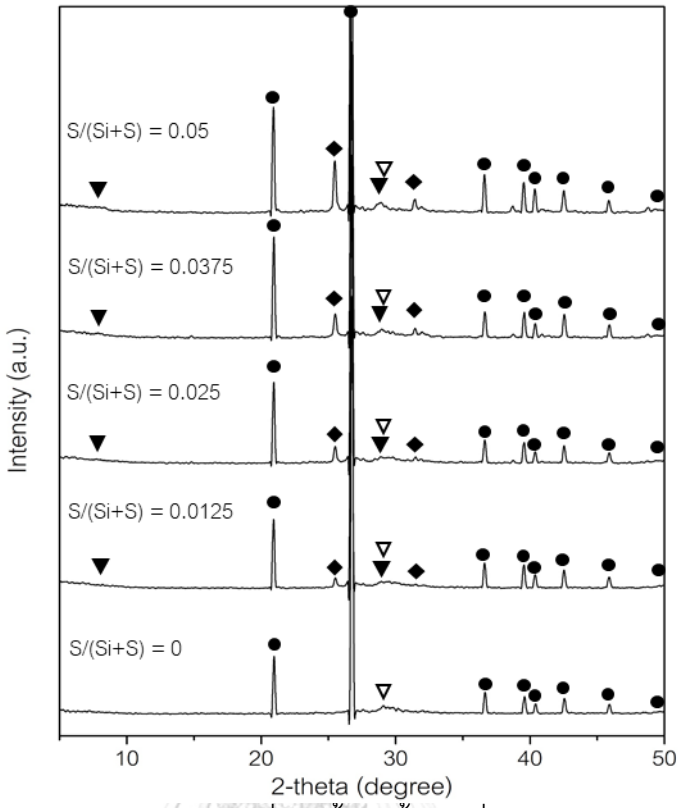
ตารางที่ 4.2 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2

อัตราส่วน S/(Si+S)	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
0	19.77	80.23	0
0.0125	18.10	78.71	3.20
0.025	16.60	77.28	6.13
0.0375	15.04	75.83	9.14
0.05	13.50	74.39	12.11

4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 และเติมยิปซั่มในปริมาณอัตราส่วน S(Si+S) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.6 จากผลศึกษาองค์ประกอบเฟสยังไม่สามารถสรุปผลของปริมาณยิปซั่มต่อการเกิดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้ เนื่องจากทำการทดลองที่อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 ซึ่งเกิดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตเพียงเล็กน้อย ทำให้สังเกตเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นได้ไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นพีคของเฟสแอนไฮไดรต์ ($CaSO_4$, JCPDS no. 00-003-0368) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่มากขึ้นหรือเพิ่มอัตราส่วน S/(Si+S) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณยิปซั่มที่เติมมากเกินไป ทำให้ไอออนซัลเฟอร์ไม่สามารถละลายเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของซิลิกอนไอออนได้หมด จึงเหลือเป็นเฟสแอนไฮไดรต์เกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



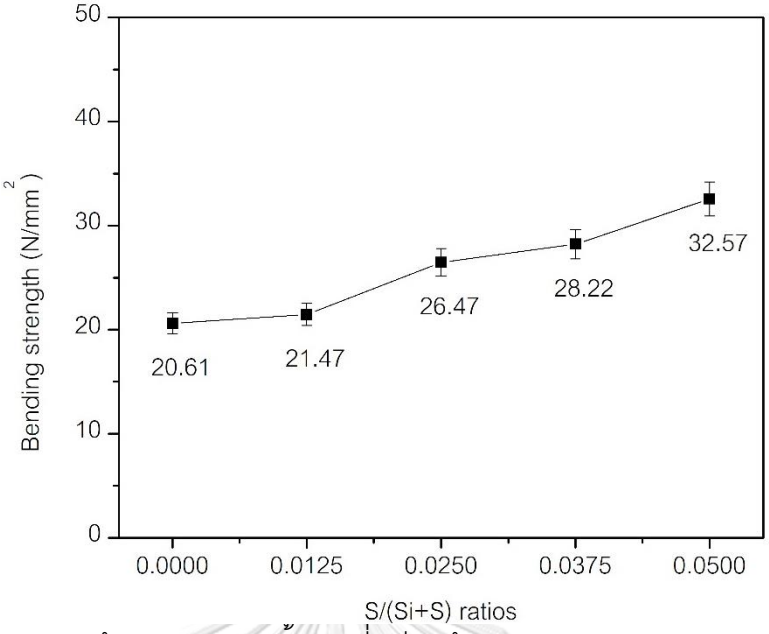
รูปที่ 4.6 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◆ : anhydrite)

4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 20.61 เมกะพาสคัล เมื่อเติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนเมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วนสูงสุดที่อัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 32.57 เมกะพาสคัล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

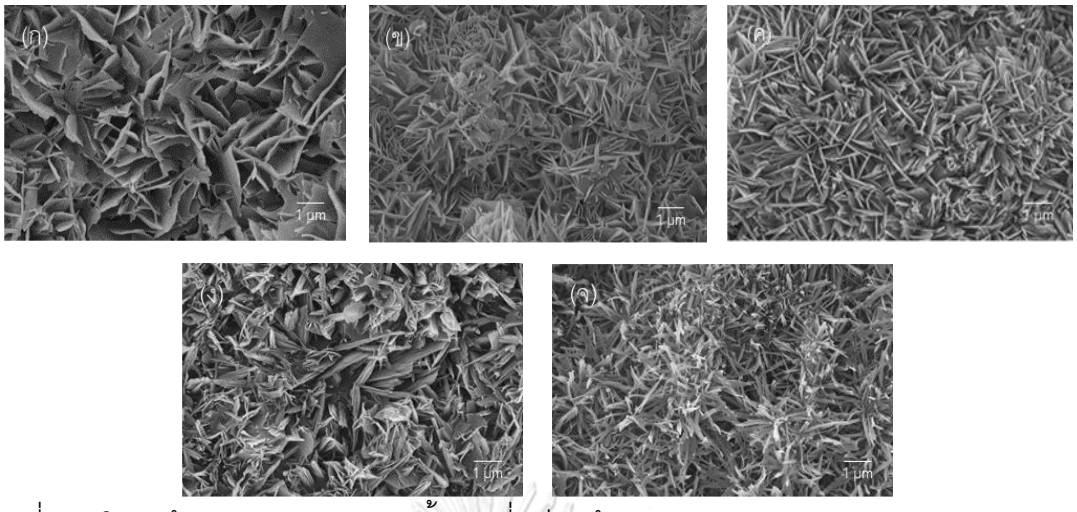


รูปที่ 4.7 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆ

4.2.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.2 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าลักษณะเมื่อไม่มีการเติมยิปซั่ม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกัน แต่เมื่อเติมยิปซั่มเพิ่มเป็นอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.0125 รูปร่างของผลึกจะเปลี่ยนไปจากผลึกแบบแผ่นเป็นผลึกแท่ง และเมื่อเพิ่มปริมาณยิปซั่มเป็นอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.025 และ 0.0375 ความหนาของแท่งผลึกจะเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของแท่งผลึกจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณยิปซั่มเป็น S/(Si+S) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) อัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05

4.2.2 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 และ S/(Si+S) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.0375 และ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.3

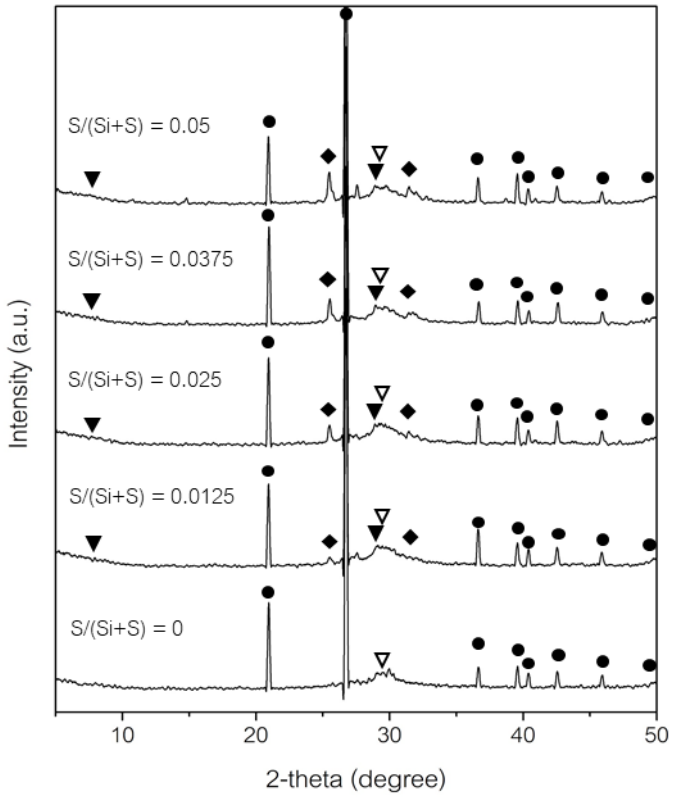
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.3 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4

อัตราส่วน S/(Si+S)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
0	33.03	66.97	0
0.0125	31.56	65.77	2.67
0.025	30.25	64.63	5.12
0.0375	28.87	63.48	7.65
0.05	27.51	62.34	10.15

4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในปริมาณอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.9 จากผลศึกษาองค์ประกอบเฟส จะเห็นได้ว่าเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดมีความชัดเจนกว่าการศึกษาที่อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.2 เมื่อพิจารณาพีคที่เกิดขึ้นที่ 2-theta เท่ากับ 29 องศา เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S) มากกว่า 0.0125 ขึ้นไป พบว่าเริ่มเกิดพีคบริเวณดังกล่าวชัดเจนขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ นอกจากนี้ยังพบเฟสแอนไฮไดรต์เพิ่มมากขึ้น เมื่อเติมปริมาณยิปซั่มเพิ่มมากขึ้นหรือเพิ่มอัตราส่วน S/(Si+S) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณยิปซั่มที่เติมมากเกินไป ทำให้ไอออนซัลเฟอร์ไม่สามารถละลายเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของไอออนซิลิกอนได้หมด

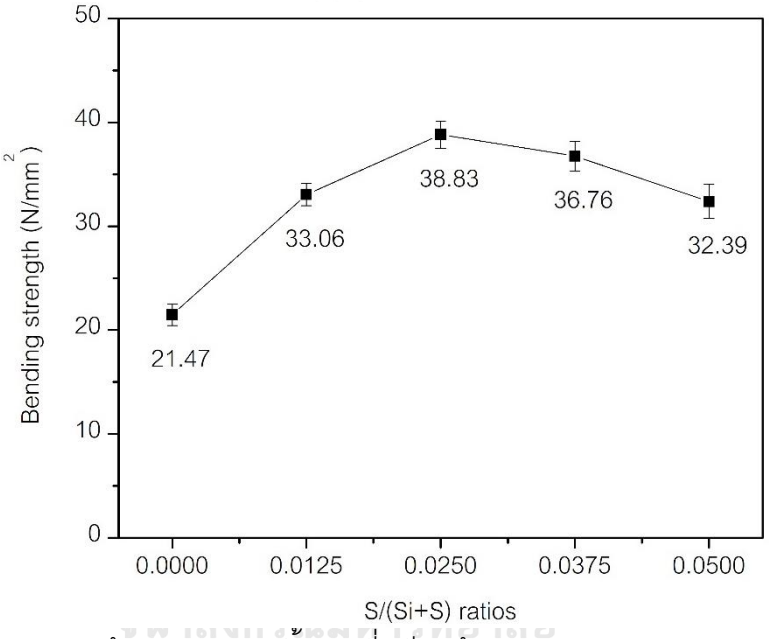


รูปที่ 2.9 ผลวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◆ : anhydrite)

4.2.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 21.47 เมกะพาสคัล เมื่อเติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.025 ค่าความต้านแรงดัดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 38.83 เมกะพาสคัล และเมื่อเติมยิปซั่มเพิ่มขึ้นจากนี้ค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณแอนไฮไดรต์ที่เพิ่มมากเกินไป

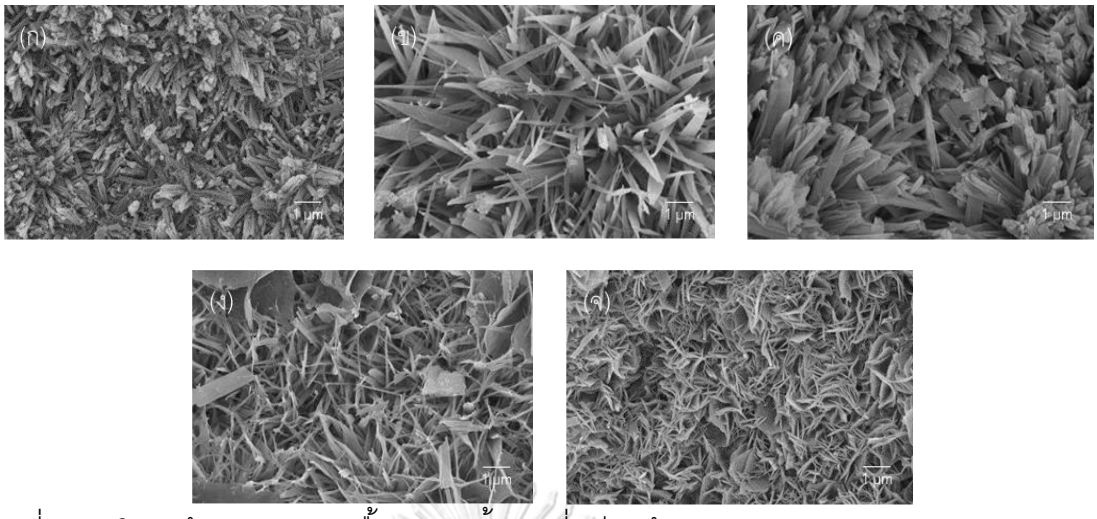


รูปที่ 4.10 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆ

Chulalongkorn University

4.2.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.11 ลักษณะผลึกของชิ้นงานที่ไม่มีการเติมยิปซั่มจะมีลักษณะเป็นแท่งสั้นๆ เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.0125 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแท่งสานกัน เมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.025 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแท่งหนาขึ้น จนกระทั่งเมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/(Si+S) เป็น 0.05 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดเล็กๆสานกัน



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.4 ศึกษาที่อัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05

4.2.3 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 และ S/(Si+S) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.0375 และ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.4

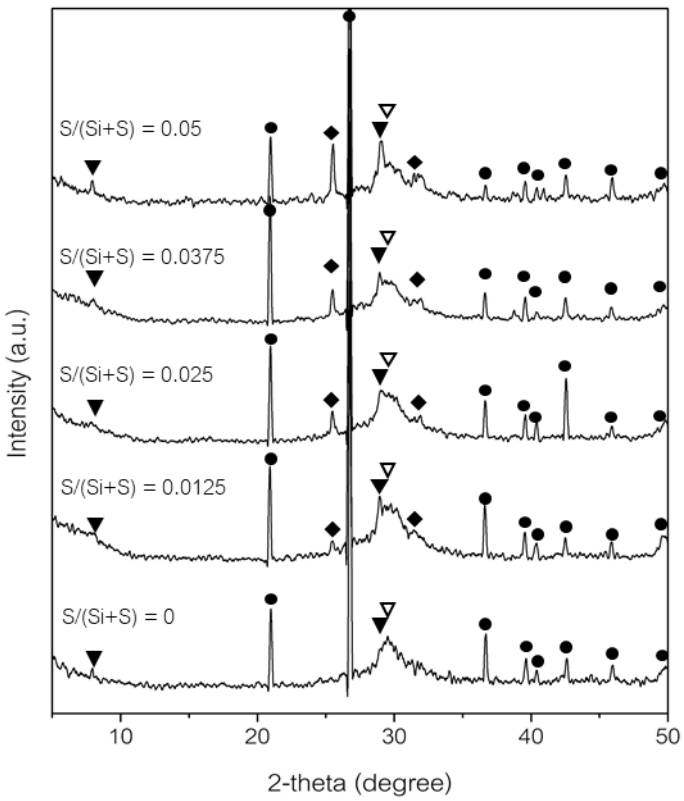
ตารางที่ 4.4 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อัตราส่วน S/(Si+S)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
0	42.54	57.46	0
0.0125	41.23	56.48	2.29
0.025	40.07	55.53	4.40
0.0375	38.84	54.58	6.58
0.05	37.63	53.64	8.74

4.2.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 และเติมยิปซั่มในปริมาณอัตราส่วน S(Si+S) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติมยิปซั่ม จะเกิดพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา และจะพบว่าพีคสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือพีคที่ 2-theta ประมาณ 30 องศา ซึ่งก็คือตำแหน่งพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล แต่เมื่อเติมยิปซั่มเข้าไปในระบบพีคที่ 2-theta เท่ากับ 30 องศา นั้นจะมีความสูงลดลง และเริ่มเกิดพีคที่ 2-theta เท่ากับ 29 องศาแทน ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์และจะยิ่งชัดเจนขึ้นเมื่ออัตราส่วน S/(S+Si) เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าเมื่อมีการเติมยิปซั่มเข้าไปในระบบจะส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีการจัดเรียงตัวกลายเป็นผลึกโทเบอร์โมไรท์เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการเพิ่มอัตราส่วน S/(S+Si) ก็ยังส่งผลให้เกิดแอนไฮไดรต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

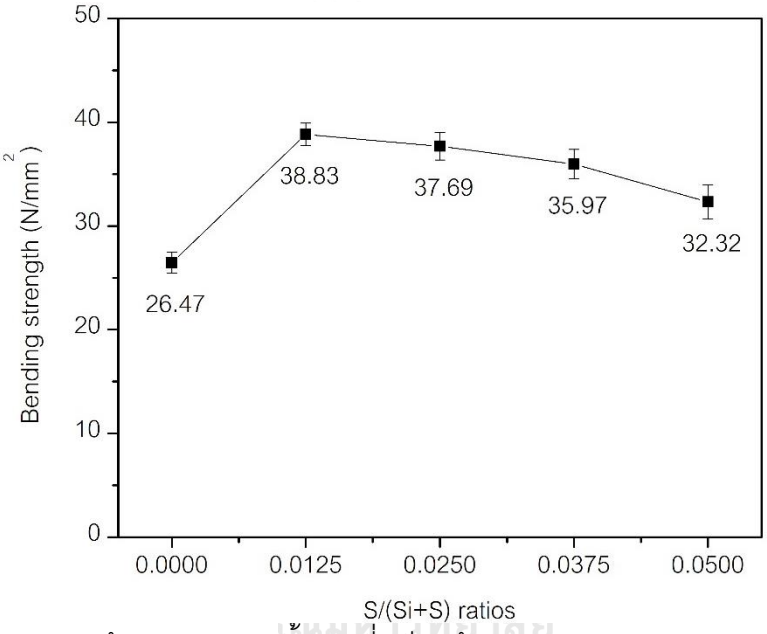


รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 ศึกษาที่อัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◆ : anhydrite)

4.2.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 26.47 เมกะพาสคัล เมื่อเติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.0125 ค่าความต้านแรงดัดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 38.83 เมกะพาสคัล ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณโทเบอร์โมไรท์ และเมื่อเติมยิปซั่มเพิ่มขึ้นจากนี้ค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณแอนไฮไดรต์ที่เพิ่มมากเกินไป

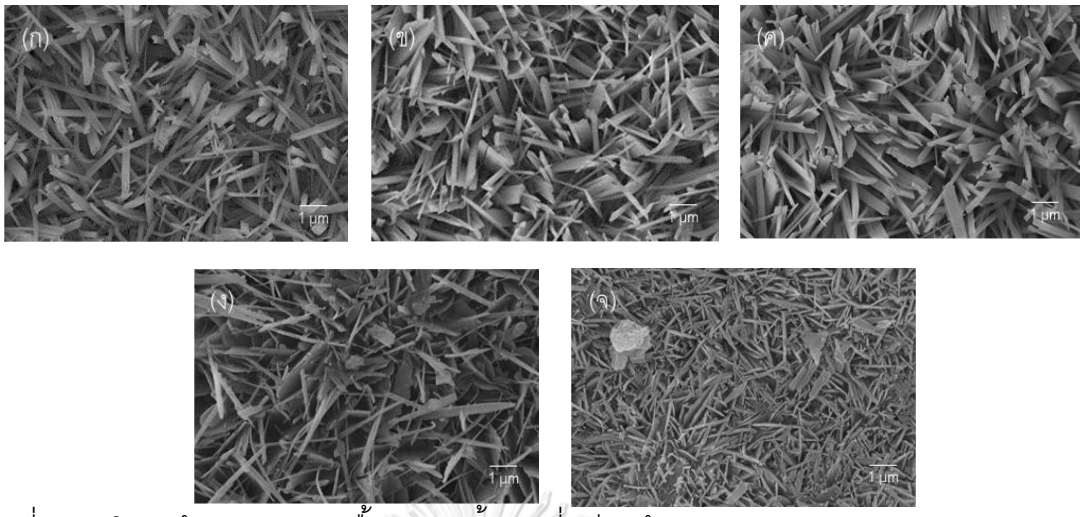


รูปที่ 4.13 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 และเติมยิปซั่มในอัตรส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติมยิปซั่มจะมีลักษณะผลึกเป็นแท่งเข็มสานกัน ซึ่งเมื่อมีการเติมยิปซั่มจะเห็นว่าลักษณะของผลึกยังคงคล้ายคลึงจากเดิมแต่ผลึกที่ได้นั้นมีความชัดเจนขึ้นเมื่อสังเกตบริเวณปลายของผลึก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/(Si+S) สูงขึ้นจนถึง 0.05 ลักษณะผลึกจะเปลี่ยนแปลงไป โดยจะเกิดเป็นผลึกผสมระหว่างผลึกที่มีลักษณะเป็นแท่ง ผลึกที่มีลักษณะเป็นแผ่นและผลึกที่มีลักษณะเป็นก้อนกลม



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05

4.2.4 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 และ S/(Si+S) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.0375 และ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.5

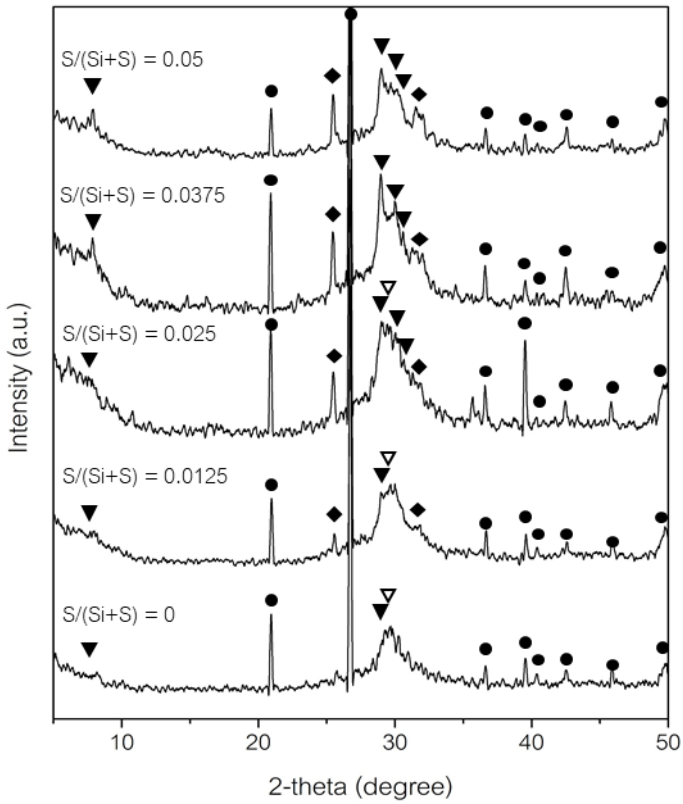
ตารางที่ 4.5 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อัตราส่วน S/(Si+S)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
0	49.69	50.31	0
0.0125	48.51	49.48	2.00
0.025	47.47	48.67	3.85
0.0375	46.37	47.86	5.77
0.05	45.28	47.06	7.67

4.2.4.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 และเติมยิปซั่มในปริมาณอัตราส่วน S(Si+S) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติมยิปซั่ม จะเกิดพีคที่เกิดขึ้นในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา จะพบว่าพีคสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือพีคที่ 2-theta ประมาณ 30 องศา ซึ่งก็คือตำแหน่งพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล แต่เมื่อเติมยิปซั่มเข้าไปในระบบพีคที่ 2-theta 30 องศา นั้นจะมีความสูงลดลง และเริ่มเกิดพีคที่ 2-theta เท่ากับ 29 องศาแทน ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์และจะยิ่งชัดเจนขึ้นเมื่ออัตราส่วน S/(S+Si) เพิ่มขึ้น โดยพีคที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 จะมีลักษณะที่สูงและชัดเจนกว่าพีคที่เกิดที่อัตราส่วน Ca/(Si+S) อื่นๆที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้อย่างเห็นได้ชัด จึงสรุปได้ว่าเมื่อมีการเติมยิปซั่มเข้าไปในระบบจะส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีการจัดเรียงตัวกลายเป็นผลึกโทเบอร์โมไรท์เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการเพิ่มอัตราส่วน S/(S+Si) ก็ยังส่งผลให้เกิดแอนไฮไดรต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

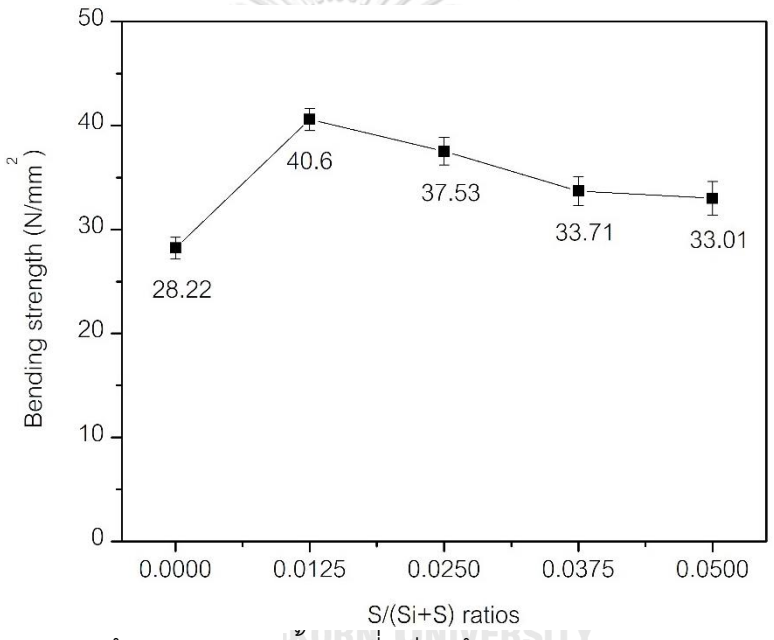


รูปที่ 4.15 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◆ : anhydrite)

4.2.4.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 28.22 เมกะพาสคัล เมื่อเติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.0125 ค่าความต้านแรงดัดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 40.60 เมกะพาสคัล และเมื่อเติมยิปซั่มเพิ่มขึ้นจากนี้ค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลง ถึงแม้ว่าปริมาณเฟสโทเบอร์โมไรท์จะมีปริมาณสูง แต่เนื่องจากปริมาณแอนไฮไดรต์ที่เพิ่มมากเกินไปจึงส่งผลให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง

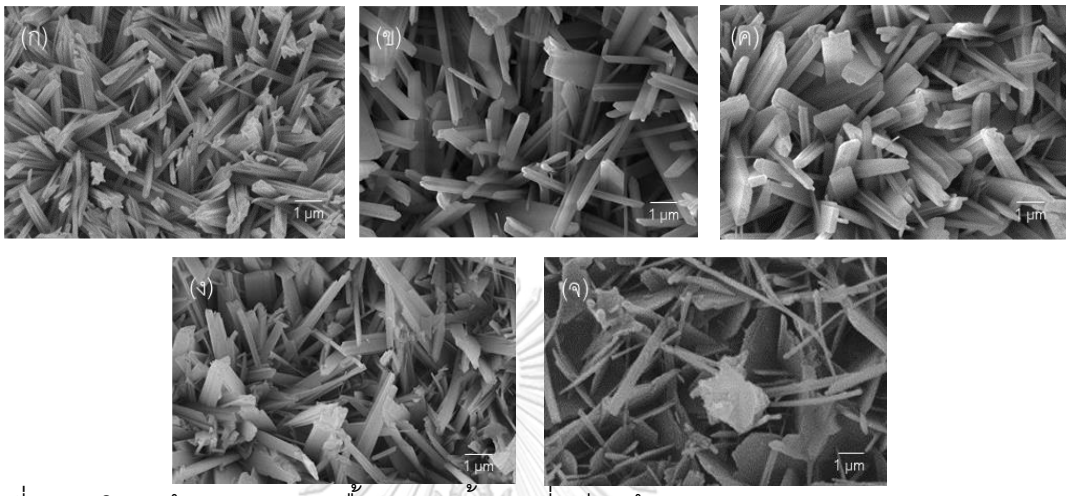


รูปที่ 4.16 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 เมื่อเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ

4.2.4.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.17 จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค พบว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติมยิปซั่มผลึกจะมีลักษณะเป็นแท่งสานกัน และมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 เมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/(Si+S) ความหนาของผลึกจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณยิปซั่มเป็นอัตราส่วน S/(Si+S) จาก 0.0375 ไป

จนถึง 0.05 ลักษณะผลึกของโทเบอร์โมไรท์จะมีความหนาลดลง และพบอนุภาคที่มีลักษณะกลม ซึ่งคืออนุภาคแอนไฮไดรต์อยู่ร่วมกัน



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05

4.2.5 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1 และ S/(Si+S) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.0375 และ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.6

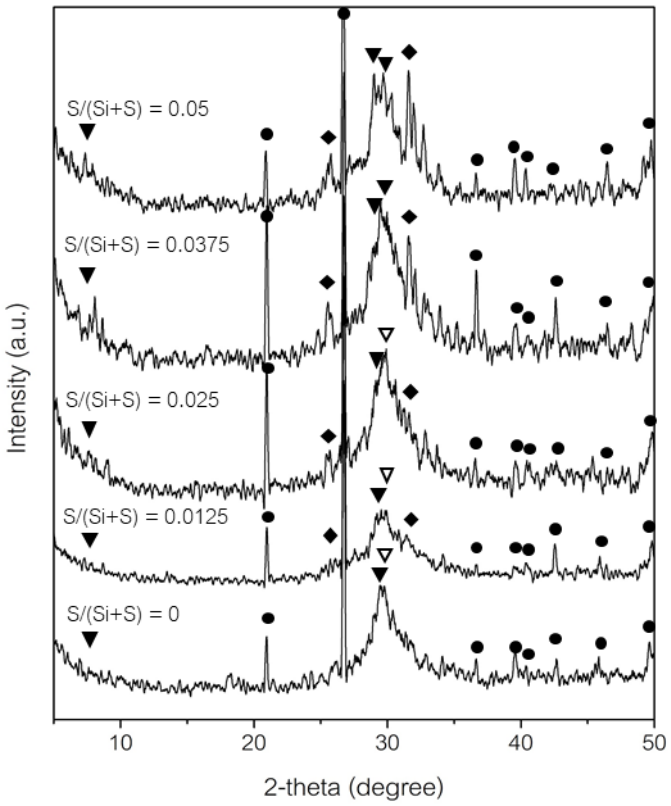
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.6 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มในแต่ละอัตราส่วน S/(Si+S) เมื่อกำหนด Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0

อัตราส่วน S/(Si+S)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
0	55.27	44.73	0
0.0125	54.20	44.02	1.78
0.025	53.26	43.32	3.43
0.0375	52.26	42.61	5.13
0.05	51.26	41.91	6.83

4.2.5.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 และเติมยิปซั่มในปริมาณอัตราส่วน S(Si+S) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.18 ลักษณะของพีคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลที่อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1 จะมีความสูงมากกว่าพีคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลที่พบในชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) อื่นๆที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ และเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมยิปซั่มจะเร่งให้เกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ได้ดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณยิปซั่มก็จะส่งผลให้เกิดเฟสแอนไฮไดรต์เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



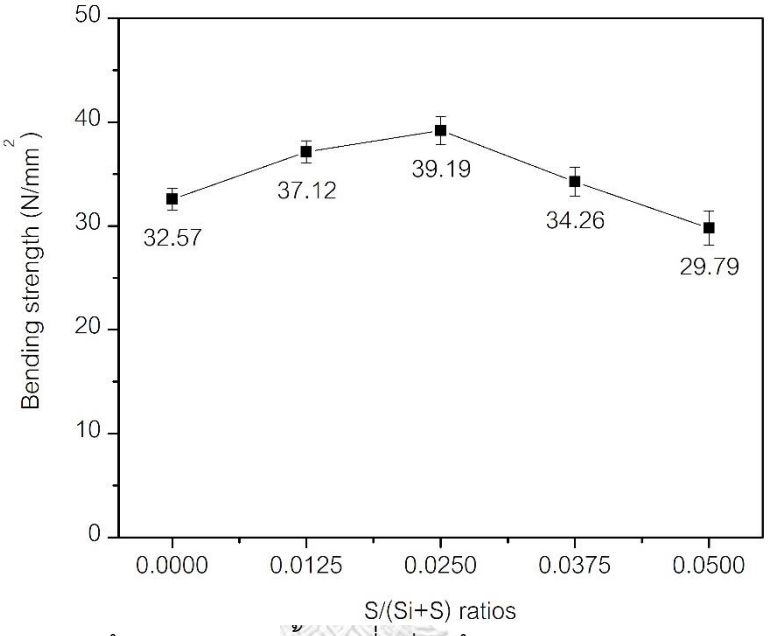
รูปที่ 4.18 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 เมื่อเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ค่าต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◆ : anhydrite)

4.2.5.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 32.57 เมกะพาสคัล เมื่อเติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้น จนอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.025 ค่าความต้านแรงดัดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 39.19 เมกะพาสคัล และเมื่อเติมยิปซั่มเพิ่มขึ้นจากนี้ค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลง ถึงแม้ว่าปริมาณเฟสโทเบอร์โมไรท์จะมีปริมาณสูง แต่เนื่องจากปริมาณแอนไฮไดรต์ที่เพิ่มมากเกินไปจึงส่งผลให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง

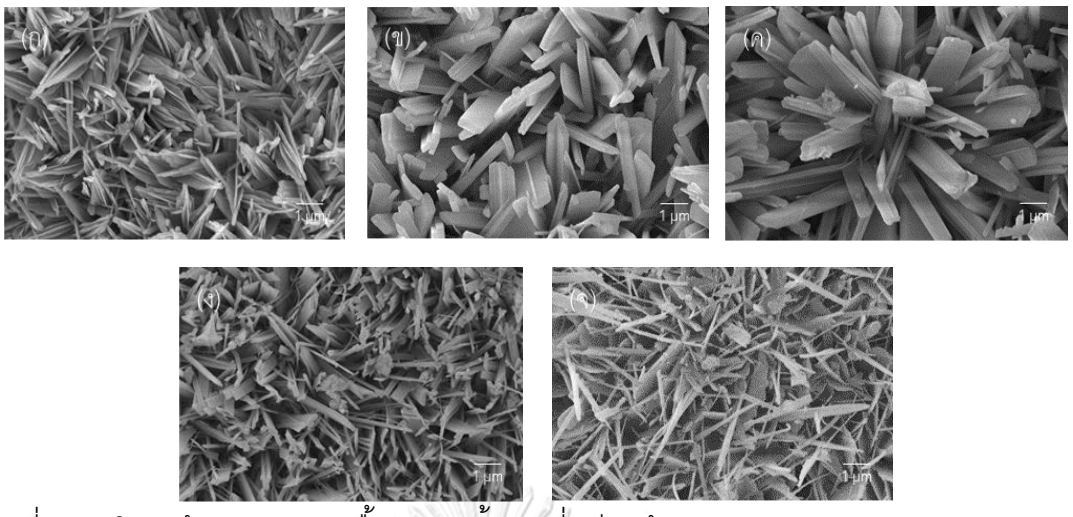


รูปที่ 4.19 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 เมื่อเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.5.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.20 จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค พบว่าลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการศึกษาที่อัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.6 และ 0.8 ลักษณะผลึกของชิ้นงานที่ไม่มีการเติมยิปซั่มจะมีลักษณะเป็นแท่งสานกัน เมื่อเพิ่มปริมาณยิปซั่มเป็นอัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.0125 ถึง 0.025 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีความหนาเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณยิปซั่มเป็นอัตราส่วน S/(Si+S) จาก 0.0375 ไปจนถึง 0.05 ความหนาของแท่งผลึกจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และจะเกิดเป็นเฟสผสมระหว่างผลึกแบบแท่งกับผลึกทรงกลมซึ่งก็คือเฟสโทเบอร์โมไรท์กับแอนไฮไดรต์นั่นเอง



รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 1.0 เมื่อเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S) (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 (ง) 0.0375 และ (จ) 0.05

4.2.6 **สรุปผลการทดลองผลการเติมยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้**

จากการศึกษาผลของการเติมยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมยิปซั่ม ยิปซั่มจะเร่งให้เกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ได้ดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณยิปซั่มก็จะส่งผลให้เกิดเฟสแอนไฮไดรต์เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งส่งผลทำให้ที่อัตราส่วน S/(Si+S) ต่ำที่ 0.0125 และ 0.025 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเติมยิปซั่ม ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/(Si+S) เป็น 0.0375 และ 0.05 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะลดลงตามลำดับ เนื่องจากปริมาณแอนไฮไดรต์ที่เกิดขึ้นมีผลต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 **ผลของการเติมดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้**

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงาน ที่อัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ ซึ่งไอออนอะลูมิเนียมสามารถเกิดการแทนที่ในตำแหน่งของไอออนซิลิกอนได้ ดังนั้นการเขียนอัตราส่วน Ca/Si จึงถูกเปลี่ยนมาเขียนในรูปของ Ca/(Si+Al) ซึ่งการทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 และศึกษาผลของปริมาณดินขาวที่เติมในส่วนผสมในรูปอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15

4.3.1 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และยิปซั่มให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และ Al/(Si+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.7

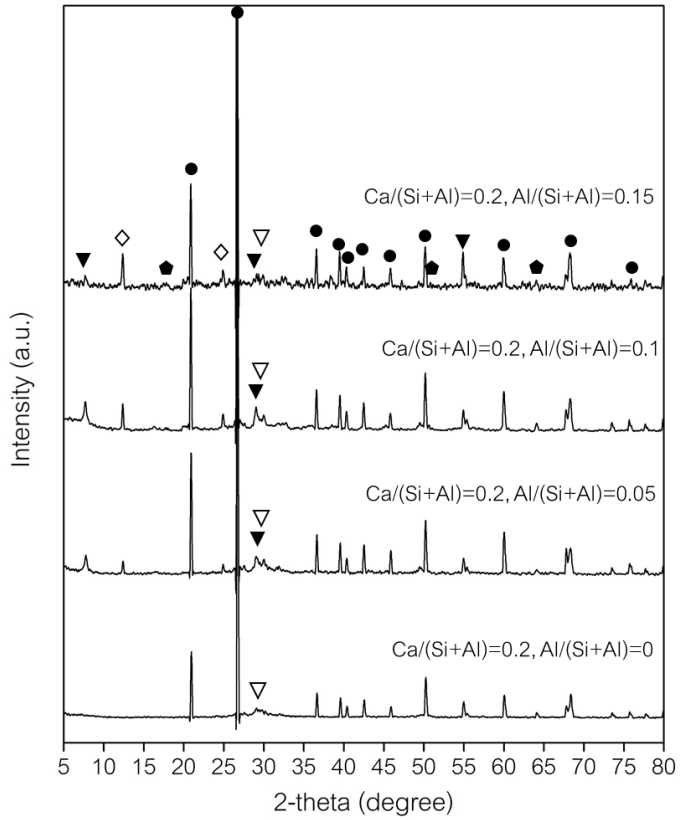
ตารางที่ 4.7 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2

อัตราส่วน Al/(Si+Al)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)
0	19.77	80.23	0
0.05	19.73	72.10	8.18
0.1	19.57	63.06	17.37
0.15	19.42	54.14	26.44

4.3.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และเติมดินขาวในปริมาณอัตราส่วน Al(Si+Al) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.21 จากผลศึกษาองค์ประกอบเฟส พิจารณาพีคที่ 2-theta เท่ากับ 8 ซึ่งเป็นตำแหน่งพีคของเฟสโทเบอร์โมไรท์ พบว่าเมื่อมีการเติมดินขาวเข้าไปในระบบพีคของโทเบอร์โมไรท์ที่ 2-theta เท่ากับ 8 จะปรากฏชัดเจนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่ไม่มีการเติมดินขาว นอกจากนี้ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมดินขาวจะพบว่าพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา พีคที่สูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือพีคที่ 2-theta ประมาณ 30 องศา ซึ่งก็คือตำแหน่งพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล เมื่อเติมดินขาวเข้าไปในระบบการเติมดินขาวเข้าไปนั้นจะส่งผลให้พีคที่ 2-theta เท่ากับ 30 องศา จะมีความสูงลดลง ในขณะที่พีคที่ 2-theta เท่ากับ 29 องศา ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์จะยิ่งชัดเจนขึ้นเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นพีคของเฟสเกาลินไนท์ ($Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$, JCPDS no. 01-089-6538) และพอร์ตแลนไดต์ ($Ca(OH)_2$, JCPDS no. 01-087-0674) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่มากขึ้นหรือเพิ่มอัตราส่วน Al/(Si+Al)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



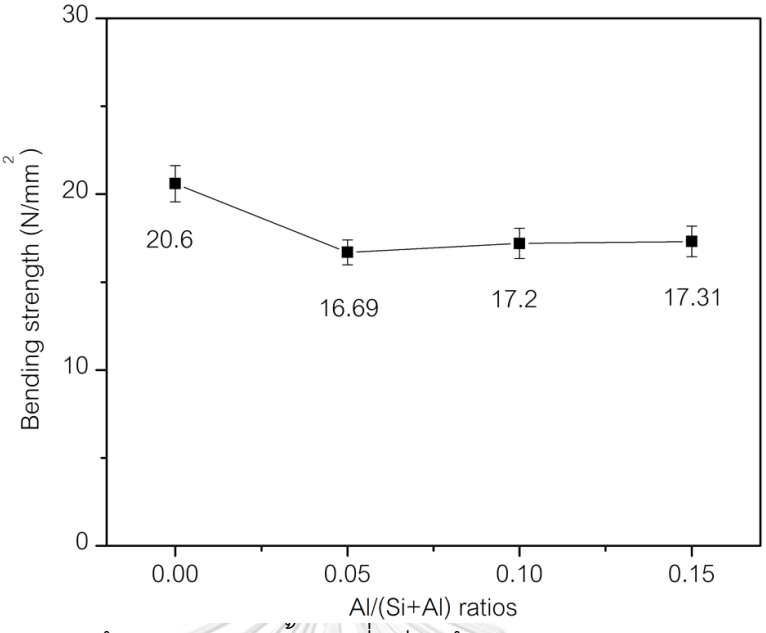
รูปที่ 4.21 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 20.6 เมกะพาสคัล เมื่อเติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากดินขาวที่หลงเหลือในระบบมีปริมาณอยู่สูง ที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 16.69, 17.2, 17.31 เมกะพาสคัลตามลำดับ

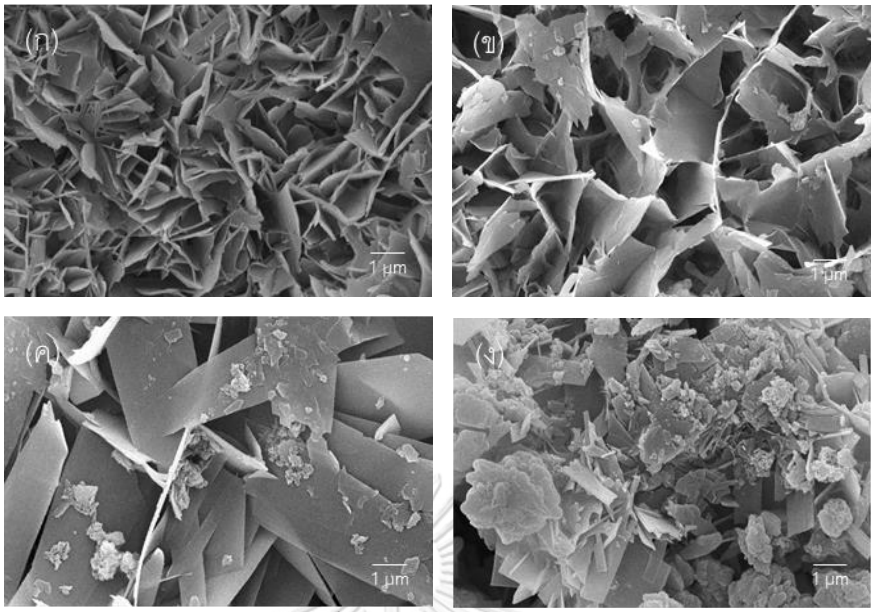


รูปที่ 4.22 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

4.3.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการเติมดินขาวเข้าไปในส่วนผสมผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกัน โดยเมื่อเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกันเช่นเดิมแต่จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึกโทเบอร์โมไรท์ เมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวเป็นอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.1 และ 0.15 ผลึกที่เกิดขึ้นยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่การเพิ่มปริมาณดินขาวจะส่งผลให้มีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึกโทเบอร์โมไรท์เพิ่มมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.3.2 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และ Al/(Si+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.8

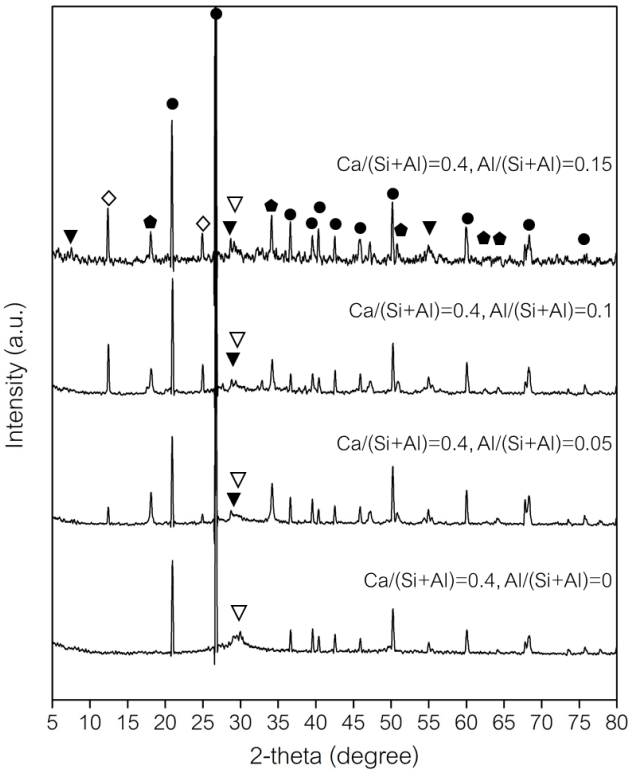
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.8 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4

อัตราส่วน Al/(Si+Al)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)
0	33.03	66.97	0
0.05	32.99	60.24	6.77
0.1	32.79	52.74	14.47
0.15	32.59	45.33	22.08

4.3.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวในปริมาณอัตราส่วน Al(Si+Al) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ28 ถึง 32 องศา พีคในช่วงนี้จะมีความชัดเจนกว่าการศึกษาที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+Al) จะเพิ่มการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จากผลศึกษาองค์ประกอบเฟสพบว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติมดินขาวจะพบว่าพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา พีคที่สูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือพีคที่ 2-theta ประมาณ 30 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล เมื่อเติมดินขาวเข้าไปในระบบการเติมดินขาวเข้าไปนั้นจะส่งผลทำให้พีคที่ 2-theta เท่ากับ 30 องศามีความสูงลดลง ในขณะที่พีคที่ 2-theta เท่ากับ 29 องศา ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์จะยิ่งชัดเจนขึ้นเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) เพิ่มขึ้น ถึงอย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมดินขาวเข้าไปในระบบจะเกิดเฟสเกาลินไนท์และพอร์ตแลนไดต์ขึ้น และพีคดังกล่าวจะเกิดชัดเจนขึ้นเมื่อเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) มากขึ้น

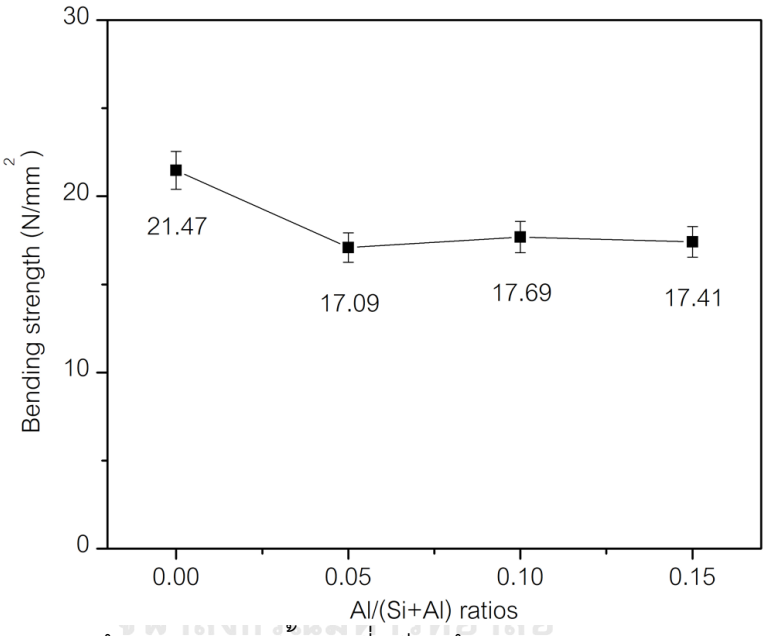


รูปที่ 4.24 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite)

4.3.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+S) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 21.47 เมกะพาสคัล เมื่อเติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลงที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1 ,0.15 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 17.09, 17.69, 17.41 เมกะพาสคัลตามลำดับ

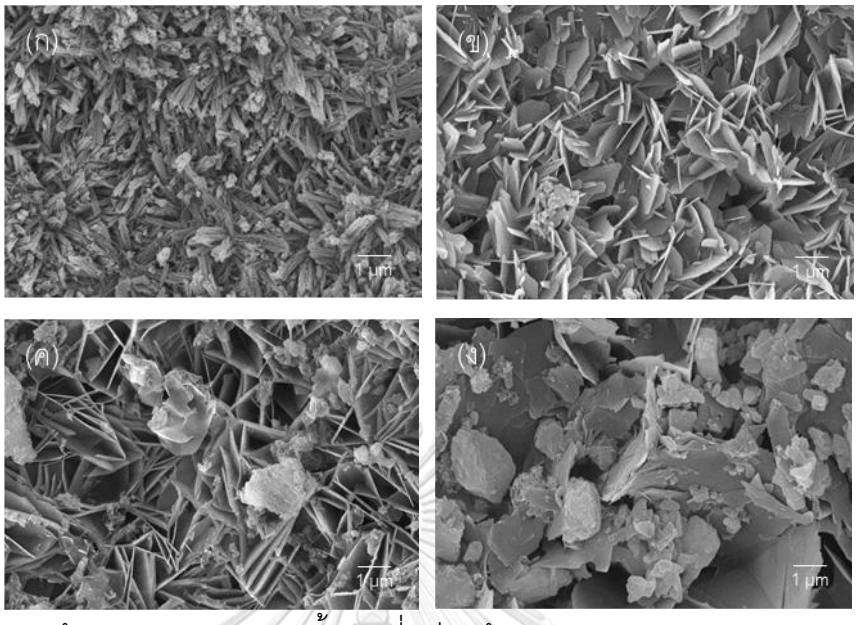


รูปที่ 4.25 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการเติมดินขาวผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสั้นๆ แต่เมื่อเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกันและมีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึก เมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกที่เกิดขึ้นยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นแต่มีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึกเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเติมดินขาวในปริมาณมากที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.15 ผลึกแผ่นที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่และมีอนุภาคเกาะที่ผิวผลึกเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.3.3 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และ Al/(Si+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

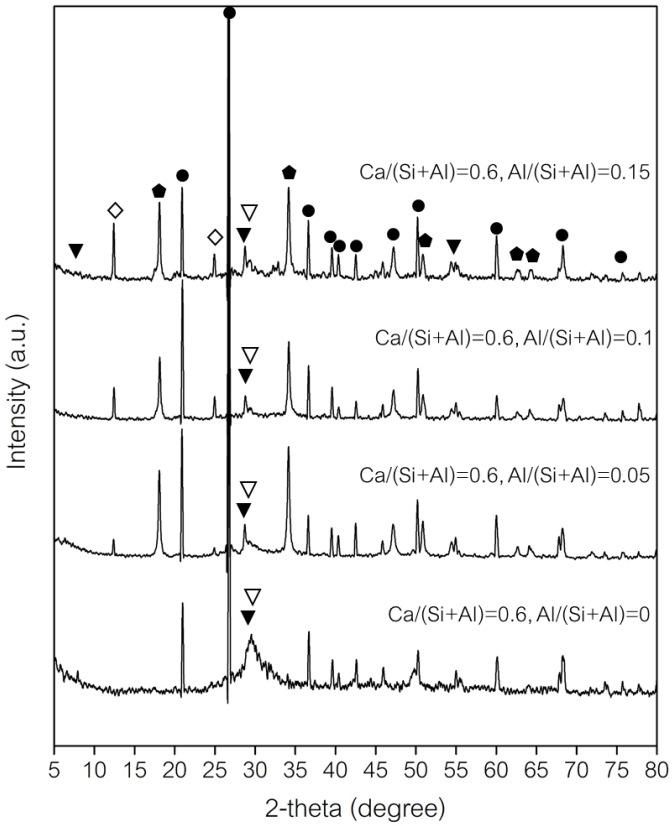
ตารางที่ 4.9 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6

อัตราส่วน Al/(Si+Al)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)
0	42.54	57.46	0
0.05	42.51	51.73	5.76
0.1	42.29	45.32	12.38
0.15	42.07	38.99	18.94

4.3.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และเติมดินขาวในปริมาณอัตราส่วน Al(Si+Al) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นมีความชัดเจนกว่าการศึกษาที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และ 0.4 โดยชิ้นงานที่ไม่มีการเติมดินขาว จะเกิดพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา และจะพบว่าพีคที่สูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือพีคที่ 2-theta ประมาณ 30 องศา ซึ่งก็คือตำแหน่งพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล เมื่อเติมดินขาวเข้าไปในระบบพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา พีคในช่วงนี้จะมีความสูงลดลงอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามการเติมดินขาวเข้าไปนั้นจะส่งผลให้พีคที่ 2-theta เท่ากับ 30 องศา มีความสูงลดลง ในขณะที่พีคที่ 2-theta เท่ากับ 29 องศา ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์จะยิ่งชัดเจนขึ้นเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าเมื่อมีการเติมดินขาวเข้าไปในระบบจะส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีการจัดเรียงตัวกลายเป็นผลึกโทเบอร์โมไรท์เพิ่มมากขึ้น แต่การเติมดินขาวเข้าไปในปริมาณมากนั้น ดินขาวจะเข้าไปเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคพอร์ตแลนไดต์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยากับควอซต์กลายเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล เมื่อมีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของพอร์ตแลนไดต์ดินขาวจะขัดขวางการละลายของพอร์ตแลนไดต์ส่งผลทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างพอร์ตแลนไดต์กับควอซต์เกิดได้ยากขึ้น [32] แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างพอร์ตแลนไดต์กับควอซต์จึงมีปริมาณลดลง อีกทั้งการเพิ่มอัตราส่วน Al/(Si+Al) ก็ยังส่งผลให้มีพอร์ตแลนไดต์และเกาลินไนท์เหลือมากเนื่องจากสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันได้น้อยลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



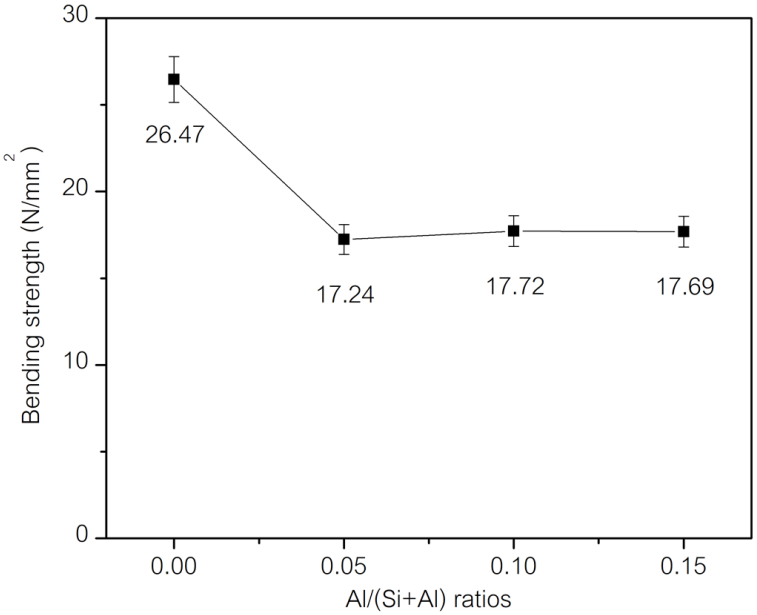
รูปที่ 4.27 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.28 ชิ้นงานที่ไม่ได้เติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 26.47 เมกะพาสคัล และเมื่อเติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเติมดินขาวจะส่งผลทำให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลลดลง เช่นเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้นที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.2 และ 0.4 โดยการศึกษาที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) สูงขึ้นทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานมีค่าเพิ่มเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) ต่ำ โดยที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1 ,0.15 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 17.24, 17.72, 17.69 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

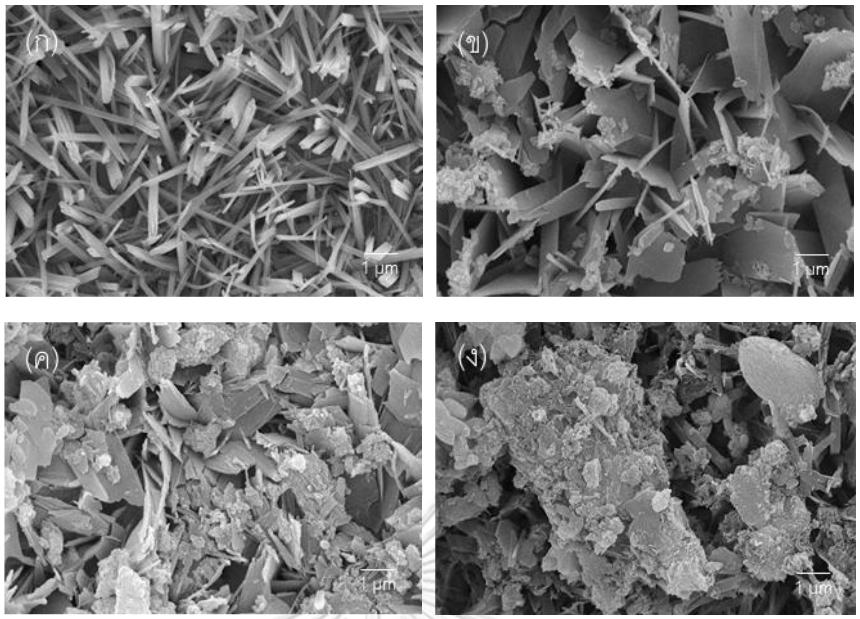


รูปที่ 4.28 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

4.3.3.3 **ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค**

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าลักษณะเมื่อไม่มีการเติมดินขาวผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสานกัน แต่เมื่อเติมดินขาวเพิ่มเป็นอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกันและยังมีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึก เมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวเป็นอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกที่เกิดขึ้นยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นแต่มีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึกเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเมื่อเติมดินขาวในปริมาณมากที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.15 ผลึกแผ่นที่เกิดขึ้นจะมีอนุภาคดินขาวปกคลุมเป็นจำนวนมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.6 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.3.4 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และ Al/(Si+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

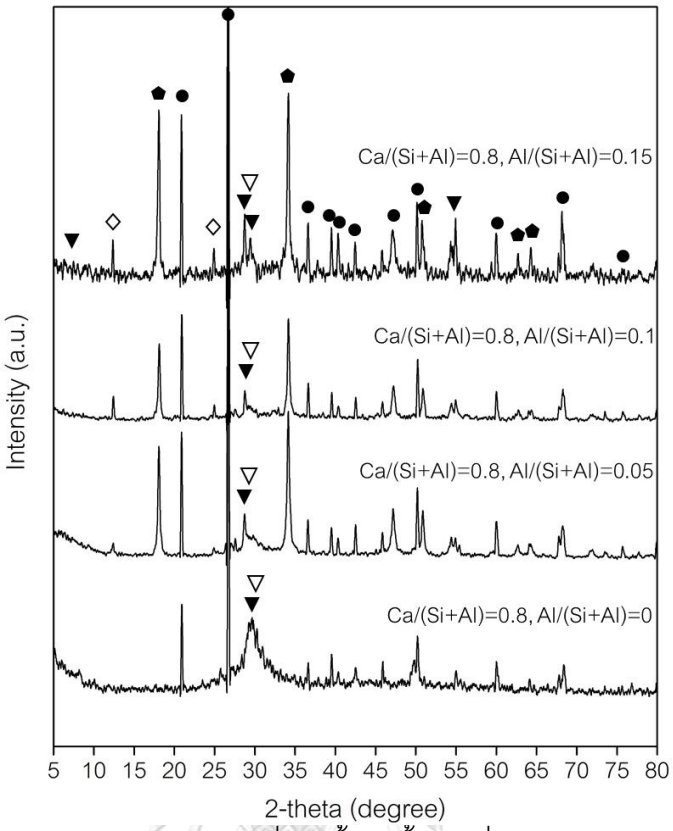
ตารางที่ 4.10 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8

อัตราส่วน Al/(Si+Al)	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์** (wt%)	**ทราย** (wt%)	**ดินขาว** (wt%)
0	49.69	50.31	0
0.05	49.68	45.32	5.00
0.1	49.46	39.73	10.81
0.15	49.23	34.20	16.57

4.3.4.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และเติมดินขาวในปริมาณอัตราส่วน Al(Si+Al) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติมดินขาว จะพบว่าพีคที่สูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วง2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา นั้นคือพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ในขณะที่เมื่อเติมดินขาวเข้าไปในระบบพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา พีคในช่วงนี้จะมีความสูงลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการเติมดินขาวเข้าไปนั้นจะส่งผลให้พีคที่ 2-theta เท่ากับ 30 ซึ่งเป็นพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีความสูงลดลง ในขณะที่พีคของโทเบอร์โมไรท์ที่ 2-theta เท่ากับ 29 จะยิ่งชัดเจนขึ้นและสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) เพิ่มขึ้น โดยพีคที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 จะมีลักษณะที่สูงและชัดเจนกว่าพีคที่เกิดที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) อื่นๆที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้อย่างเห็นได้ชัด จึงสรุปได้ว่าเมื่อมีการเติมดินขาวเข้าไปในระบบ ดินขาวจะเข้าไปเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคพอร์ตแลนไดต์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยากับควอซต์กลายเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล เมื่อมีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของพอร์ตแลนไดต์ดินขาวจะขัดขวางการละลายของพอร์ตแลนไดต์ส่งผลทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างพอร์ตแลนไดต์กับควอซต์เกิดได้ยากขึ้น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างพอร์ตแลนไดต์กับควอซต์จึงมีปริมาณลดลง ในขณะเดียวกันแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลที่เกิดขึ้นก็จะจัดเรียงตัวกลายเป็นผลึกโทเบอร์โมไรท์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วน Al/(Si+Al) นั้นจะส่งผลให้มีพอร์ตแลนไดต์และเกาลินไนท์เหลืออยู่ในระบบในปริมาณมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



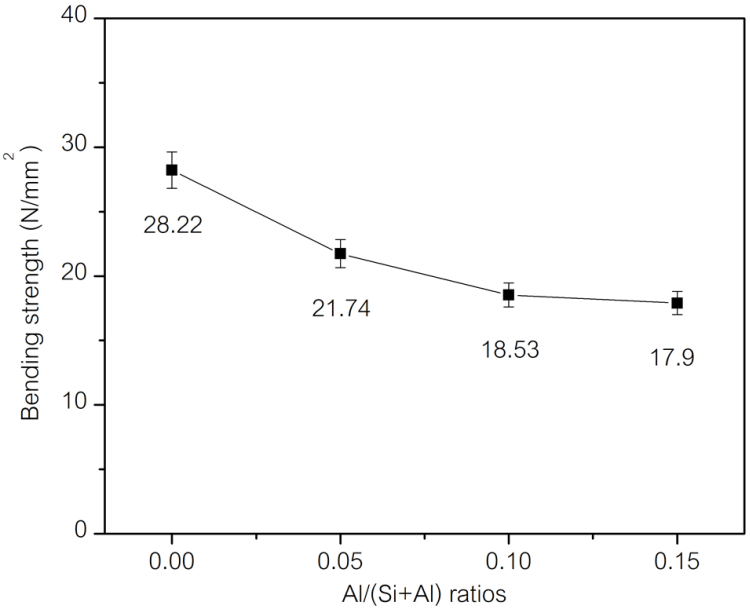
รูปที่ 4.30 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.4.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 28.22 เมกะพาสคัล เมื่อเติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลง โดยความต้านแรงดัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 21.74, 18.53, 17.9 เมกะพาสคัลตามลำดับ ถึงแม้ว่าเฟสโทเบอร์โมไรท์จะมีปริมาณสูงขึ้น แต่เนื่องจากการเติมดินขาวจะทำให้พอร์ตแลนไดต์และควอตซ์ทำปฏิกิริยากันได้น้อยลง จึงเกิดเฟสของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลง และมีพอร์ตแลนไดต์และเกาลินไนต์เหลืออยู่มากจึงส่งผลให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง

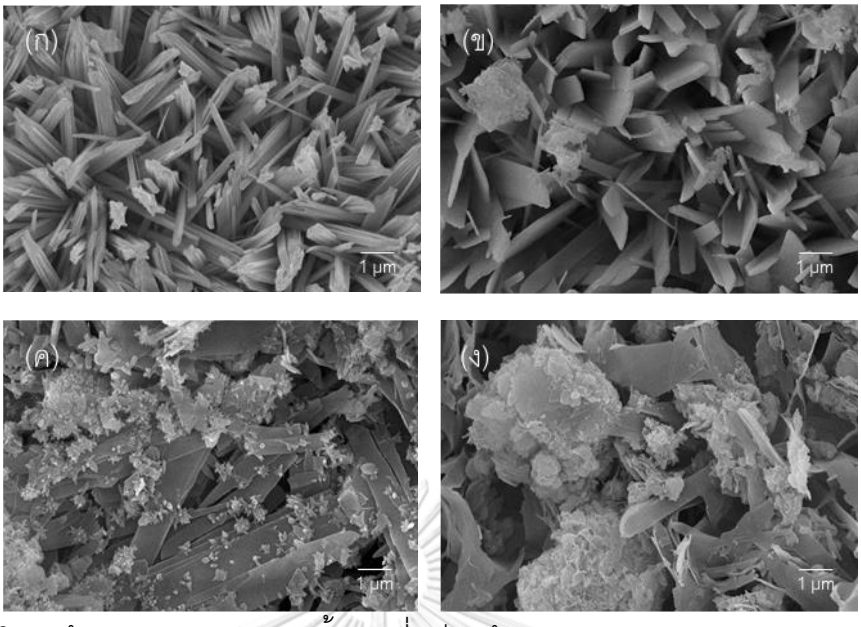


รูปที่ 4.31 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

4.3.4.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าลักษณะเมื่อไม่มีการเติมดินขาวผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสานกัน แต่เมื่อเติมดินขาวเพิ่มเป็นอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกันและยังมีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึก เมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกที่เกิดขึ้นยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นแต่มีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึกเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเมื่อเติมดินขาวในปริมาณมากที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.15 ผลึกแผ่นที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เป็นผลึกที่ไม่ชัดเจนเท่ากับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Al/(Si+Al) อื่นๆที่กล่าวมา อีกทั้งที่พื้นผิวผลึกยังมีอนุภาคดินขาวขนาดใหญ่ปกคลุมเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) เพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.3.5 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และ Al/(Si+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

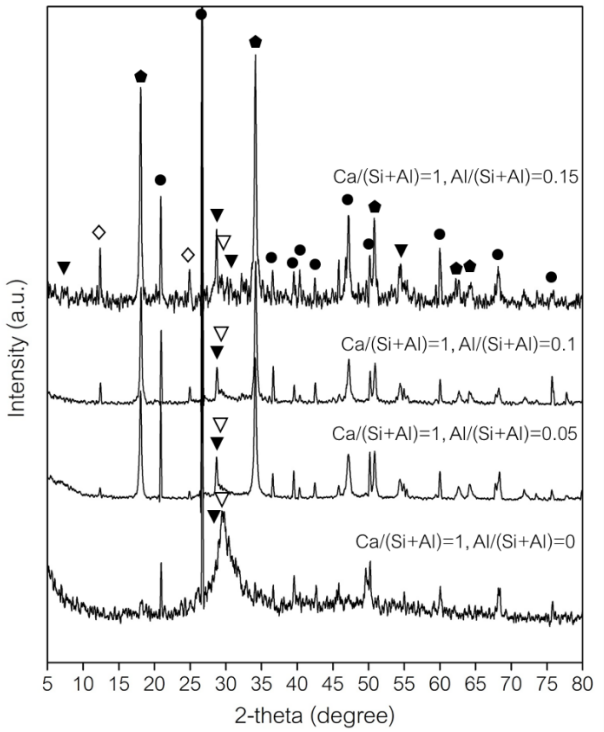
ตารางที่ 4.11 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย และดินขาวในแต่ละอัตราส่วน Al/(Si+Al) เมื่อกำหนด Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1

อัตราส่วน Al/(Si+Al)	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**
0	55.27	44.73	0
0.05	55.27	40.32	4.41
0.1	55.05	35.37	9.58
0.15	54.83	30.46	14.72

4.3.5.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวในปริมาณอัตราส่วน Al(Si+Al) ต่างๆด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบมีแนวโน้มเหมือนกับผลที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 0.8 นั่นคือการเติมดินขาวเข้าไปนั้นจะส่งผลให้พีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีความสูงลดลง ในขณะที่พีคของโทเบอร์โมไรท์จะยิ่งชัดเจนขึ้นและสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) เพิ่มขึ้น โดยดินขาวจะเข้าไปเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคพอร์ตแลนไดต์และขัดขวางการละลายของพอร์ตแลนไดต์ ส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดได้น้อยลง ในขณะเดียวกันแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลที่เกิดขึ้นก็จะเกิดการจัดเรียงตัวกลายเป็นผลึกโทเบอร์โมไรท์เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้พบเฟสโทเบอร์โมไรท์สูง อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วน Al/(Si+Al) นั้นจะส่งผลให้มีพอร์ตแลนไดต์และเกาลินไนท์เหลืออยู่ในระบบในปริมาณมาก โดยที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 พีคพอร์ตแลนไดต์จะมีความสูงกว่าพีคควอตส์ที่ 2-theta ประมาณ 21 องศา ซึ่งจากอัตราส่วนที่ผ่านมาพีคพอร์ตแลนไดต์จะมีความสูงน้อยกว่าพีคควอซต์เสมอ นั่นหมายความว่า ที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 จะเหลือพอร์ตแลนไดต์สูงที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



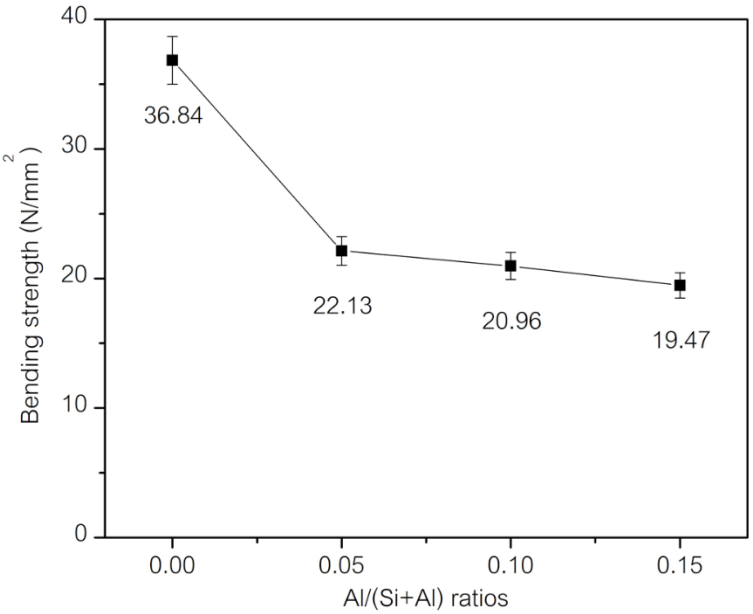
รูปที่ 4.33 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite)

4.3.5.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 36.84 เมกะพาสคัล เมื่อเติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลง โดยความต้านแรงดัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 22.13, 20.96, 19.47 เมกะพาสคัลตามลำดับ ถึงแม้ว่าเฟสโทเบอร์โมไรท์จะมีปริมาณสูงขึ้น แต่เนื่องจากดินขาวจะเข้าไปเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคพอร์ตแลนไดต์และขัดขวางการละลายของพอร์ตแลนไดต์ ส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดได้น้อยลงทำให้ให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

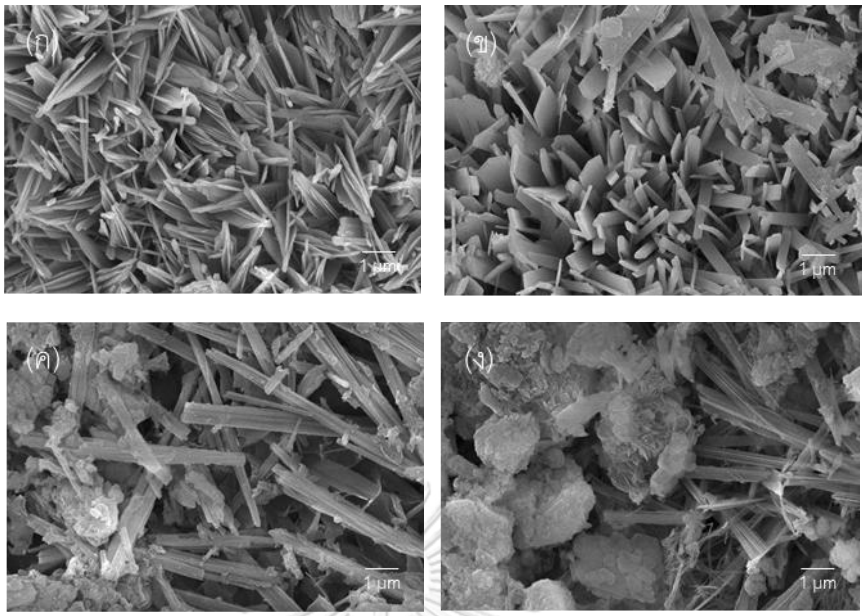


รูปที่ 4.34 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆ

4.3.5.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าลักษณะเมื่อไม่มีการเติมดินขาวผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสานกัน เมื่อเติมดินขาวเพิ่มเป็นอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแท่งสานกันเช่นเดิม แต่จะมีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึก ซึ่งแตกต่างจากอัตราส่วน Ca/(Si+Al) ที่ผ่านมา โดยเมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวเป็นอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกที่เกิดขึ้นยังคงมีลักษณะเป็นแท่งที่ยาวขึ้นแต่ลักษณะของแท่งที่เกิดขึ้นจะไม่หนาแน่นเท่ากับผลึกที่เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่เติมดินขาว และที่พื้นผิวของผลึกจะมีกลุ่มอนุภาคดินขาวเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเติมดินขาวในปริมาณมากที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.15 จะเกิดลักษณะผลึกเช่นเดียวกับที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.1 แต่ในกรณีนี้ที่พื้นผิวผลึกกลุ่มอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ปกคลุมเป็นจำนวนมากกว่าเดิม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.35 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.3.6 สรุปผลการทดลองผลของการเติมดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้

จากการศึกษาผลของการเติมดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ พบว่าการเติมดินขาวจะทำให้พีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีความสูงลดลง ในขณะที่พีคของโทเบอร์โมไรท์จะยิ่งชัดเจนขึ้น โดยดินขาวจะเข้าไปเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคพอร์ตแลนไดต์และขัดขวางการละลายของพอร์ตแลนไดต์ ส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดได้น้อยลง และเมื่ออัตราส่วน Al/(Si+Al) เพิ่มขึ้น จะพบพอร์ตแลนไดต์เหลือในระบบสูง สำหรับลักษณะของผลึกเมื่อเติมดินขาวผลึกจะมีลักษณะเป็นแท่งสานกัน แต่จะมีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึก และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Al/(Si+Al) ผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแท่งที่ยาวขึ้น แต่ลักษณะของแท่งที่เกิดขึ้นจะไม่หนาแน่นเท่ากับผลึกที่เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่เติมดินขาว

4.4 ผลของการเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมยิปซั่ม และชิ้นงานที่เติมดินขาว

จากที่กล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/Si ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ และศึกษาผลของตัวเติม ได้แก่ ผลของการเติมยิปซั่มโดยศึกษาในรูปผลของอัตราส่วน S/(Si+S) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ และผลของการเติมดินขาวโดยศึกษาในรูปผลของอัตราส่วน Al/(Si+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาผลของการเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาวในรูปผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) และ Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงาน ที่อัตราส่วน Ca/Si ต่างๆ โดยไอออนซัลเฟอร์และไอออนอะลูมิเนียมสามารถเกิดการแทนที่ในตำแหน่งของไอออนซิลิกอนภายในโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้ ดังนั้นการเขียนอัตราส่วน Ca/Si จึงถูกเปลี่ยนมาเขียนในรูปของ Ca/(Si+S+Al) ซึ่งการทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โดยศึกษาผลของปริมาณยิปซั่มที่เติมในส่วนผสมในรูปอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 และศึกษาผลของปริมาณดินขาวที่เติมในส่วนผสมในรูปอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15

จากผลการทดลองสามารถแบ่งกลุ่มผลการทดลองที่มีผลที่คล้ายคลึงกันได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ เท่ากับ 0.4 กับ 0.6 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง เท่ากับ 0.8 กับ 1 ซึ่งจะศึกษาโดยการนำชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มมาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค กับชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียว และ ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.1 ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ

ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และ 0.6 โดยเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15 และ เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียว และชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการทดลองที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ในช่วงนี้จะมีผลที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังนั้นในการรายงานผลการทดลองจึงเลือกชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยผลการทดลองอื่นๆนั้นจะรายงานในภาคผนวก ก.

4.4.1.1 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

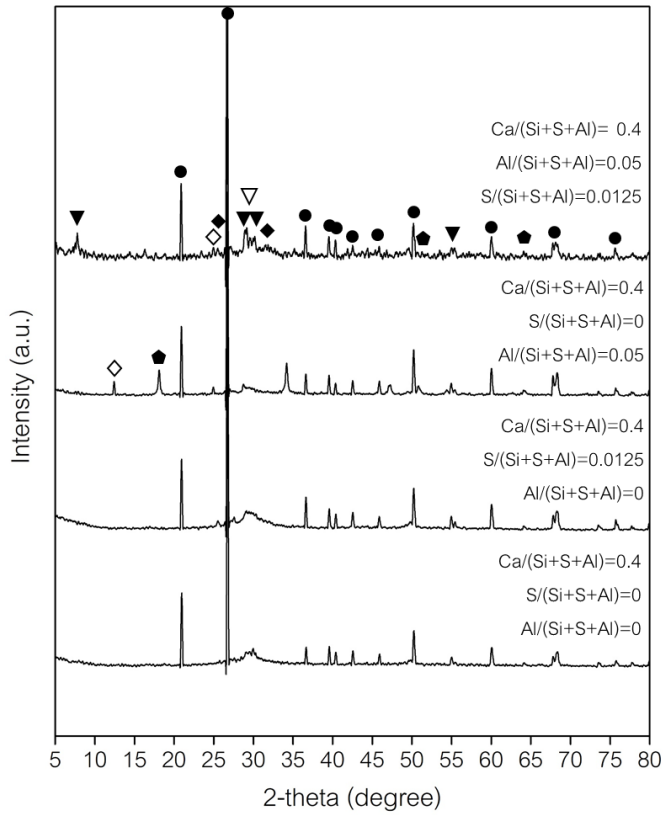
ตารางที่ 4.12 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	33.03	66.97	0	0
Ca/(Si+S+Al) =0.4, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0	31.56	65.77	0	2.67
Ca/(Si+S+Al) =0.4, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) =0.05	32.99	60.24	6.77	0
Ca/(Si+S+Al) =0.4, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) =0.05	31.60	59.09	6.74	2.56

4.4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.36 พบว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และไม่ได้เติมสารตัวเติมใดๆ จะเกิดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ต่อมาชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ลักษณะพีคจะเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อเติมยิปซั่มเข้าไปในระบบพีคที่ 2-theta เท่ากับ 29 องศาซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์จะปรากฏชัดเจนขึ้นเนื่องจากยิปซั่มจะเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ สำหรับชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เมื่อเติมดินขาวเข้าไปในระบบการเติมดินขาวเข้าไปนั้นจะส่งผลทำให้พีคที่ 2-theta เท่ากับ 30 องศาหรือพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีความสูงลดลง ในขณะที่พีคที่ 2-theta เท่ากับ 29 องศาซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์จะยิ่งชัดเจนขึ้นเนื่องจากดินขาวจะเข้าไปยับยั้งการเกิด

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลแต่จะเร่งการเกิดเฟสของโทเบอร์โมไรท์ อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นได้ว่าตัวอย่างที่เติมยิปซั่มร่วมกับดินขาวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 นั้นจะมีพีคที่ชัดเจนกว่าชิ้นงานที่อัตราส่วนอื่นๆ และเมื่อพิจารณาพีคที่ 2 theta เท่ากับ 7 ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์ พบว่าพีคจะปรากฏชัดเจนขึ้นกว่าตัวอย่างอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้เนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่ไม่มาก จึงทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์ไม่พบพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในระบบ



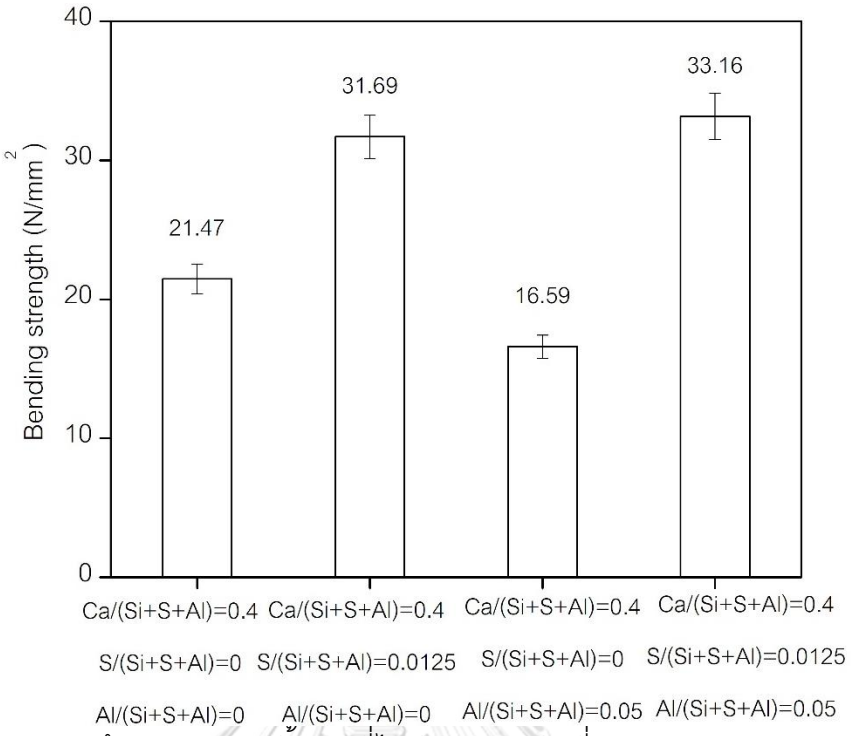
รูปที่ 4.36 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

4.4.1.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.37 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมตัวเติมใดๆมีค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 21.47 เมกะพาสคัล เมื่อเติมยิปซั่ม ยิปซั่มจะเร่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 31.69 เมกะพาสคัล ในขณะที่เมื่อเติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลง ถึงแม้ว่าเฟสโทเบอร์โมไรท์จะเกิดชัดเจนแต่เนื่องจากดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจึงลดลงทำให้ค่าความต้านแรงดัดมีค่าลดลงเหลือ 16.59 เมกะพาสคัล และเมื่อมีการเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 33.16 เมกะพาสคัล โดยการเติมยิปซั่มและดินขาวในปริมาณน้อยที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ จะส่งผลดีต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงานเนื่องจากยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในขณะที่ดินขาวก็จะทำให้เฟสโทเบอร์โมไรท์เกิดได้ดีและไม่เหลือพอร์ตแลนไดต์ที่เป็นสารตั้งต้นอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

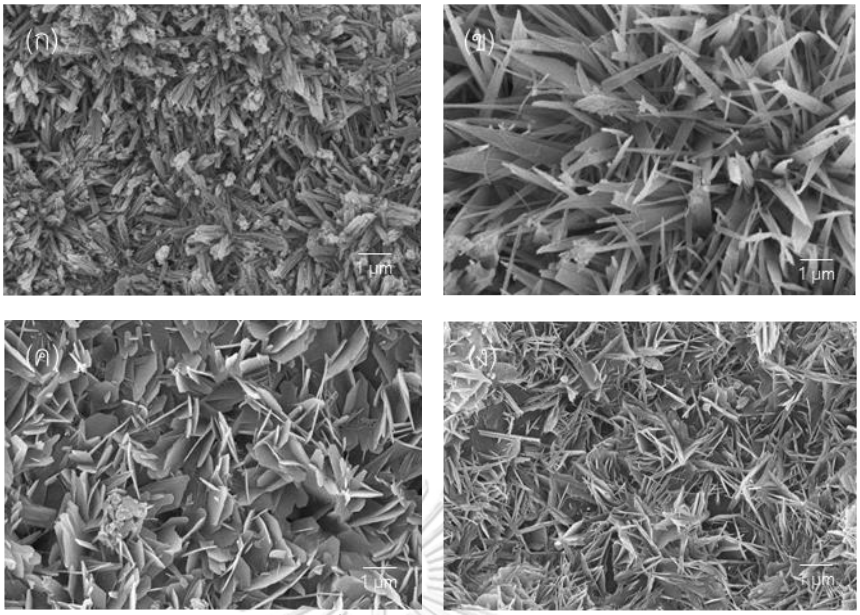


รูปที่ 4.37 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.1.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.38(ก-ง) จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆเข้าไปในส่วนผสมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al)เท่ากับ 0.4 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสั้น โดยเมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวขึ้นแต่ผลึกไม่หนาแน่น สำหรับกรณีที่เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ผลึกจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลายเป็นลักษณะแผ่น ในขณะที่เมื่อเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นแท่งผสมกับแผ่น โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดัดสูงนั่นเอง



รูปที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al)เท่ากับ 0.4 (ก) ไม่เติมสารตัวเติม (ข) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

4.4.2 ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง

ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และ 1 โดยเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15 และ เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียว และชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการทดลองที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ในช่วงนี้จะมีผลที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังนั้นในการรายงานผลการทดลองจึงเลือกชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยผลการทดลองอื่นๆนั้นจะรายงานในภาคผนวก ข.

4.4.2.1 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

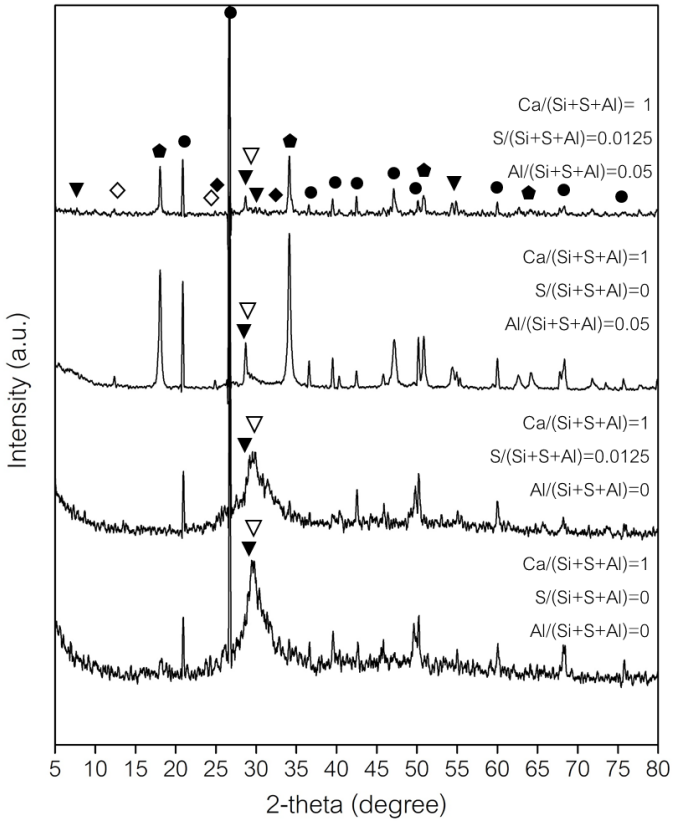
ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) =1, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	55.27	44.73	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0	54.20	44.02	0	1.78
Ca/(Si+S+Al)= 1, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.05	55.27	40.32	4.41	0
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	54.27	39.63	4.40	1.71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.39 เมื่อชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยที่ไม่เติมสารตัวเติม ซึ่งเป็นอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ที่สูงที่สุด จะพบว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์จะเกิดขึ้นในปริมาณที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) อื่นๆ ต่อมาชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เมื่อเติมยิปซั่มเข้าไปในระบบพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์จะปรากฏชัดเจนเนื่องจากยิปซั่มจะเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ แตกต่างจากชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 การเติมดินขาวจะส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัดและมีทั้งเฟสพอร์ตแลนไดต์และเกาลินไนต์หลงเหลือในระบบในปริมาณที่สูง เนื่องจากดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้น ทำให้การเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้ยากขึ้น ดังนั้นตัวอย่างที่เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก จึงมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานตัวอย่างในปริมาณสูง นอกจากนี้ยังมีการเติมยิปซั่มที่ช่วยเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ในปริมาณที่ไม่มากจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ถึงแม้จะมีการเติมยิปซั่มแล้วนั้นพีคของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ยังคงไม่สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.39 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

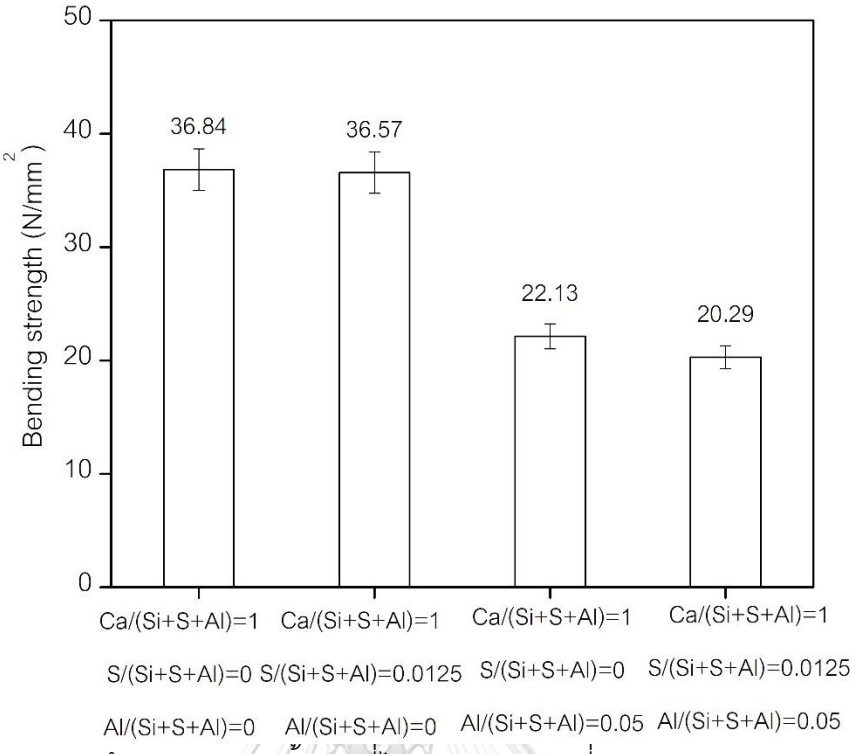
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 จากการศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานพบว่าชิ้นงานที่เตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะมีค่าความต้านแรงดัดสูงโดยมีค่าเท่ากับ 36.84 เมกะพาสคัล เมื่อเติมยิปซั่มค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าใกล้เคียงเท่ากับ 36.57 เมกะพาสคัล เนื่องจากการเติมยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าสูงขึ้นและการเติมในปริมาณเล็กน้อยจะทำให้แอนไฮไดรต์ยังเกิดในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก ในขณะที่เมื่อเติมดินขาวค่าความต้านแรงดัดมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจึงลดลงทำให้ค่าความต้านแรงดัดมีค่าต่ำเท่ากับ 22.13 เมกะพาสคัล และเมื่อมีการเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 20.29 เมกะพาสคัล ซึ่งกลายเป็นว่าการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดต่ำต่างจากผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ จะมีค่าความต้านแรงดัดที่ค่อนข้างสูง สาเหตุคาดว่าเกิดจากการที่มีพอร์ตแลนไดต์ในปริมาณสูง จึงทำให้ดินขาวเข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับควอซต์และทำปฏิกิริยาไม่หมดจึงส่งผลต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงาน อีกทั้งผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา ซึ่งเป็นช่วงของพีคโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลนั้นมีพีคที่ไม่สูงมากจึงทำให้มีค่าความต้านทางแรงดัดต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



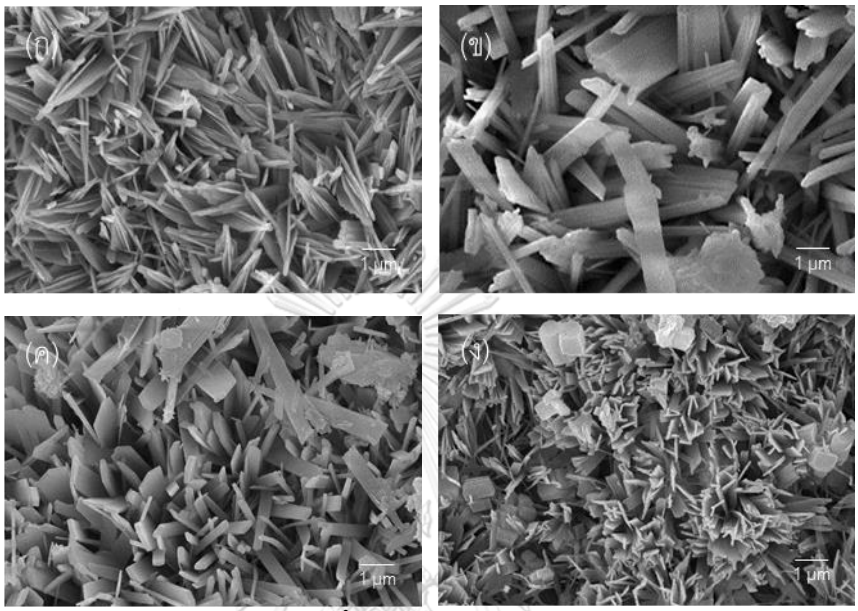
รูปที่ 4.40 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.2.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.41(ก-ง) ที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เมื่อไม่มีการเติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวสานกันหนาแน่น โดยเมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ผลึกแท่งที่เกิดขึ้นจะมีความหนาเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและสานกันอย่างหนาแน่นจึงส่งผลให้ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มมีความต้านแรงดัดสูง ในขณะที่เมื่อเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งบาง ซึ่งการเติมดินขาวที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) 1 จะแตกต่างจากชิ้นงานที่เติมดินขาวที่อัตราส่วน Ca/(Si+Al) อื่นๆที่จะมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นแผ่นบาง และเมื่อเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นผลึกแท่งสั้น นอกจากนี้ยังมีอนุภาคขนาดเล็ก

กระจายตัวอยู่บนผลึกอีกด้วย จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กลายเป็นชิ้นงานที่มีความต้านแรงดัดต่ำที่สุด



รูปที่ 4.41 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 (ก) ไม่เติมสารตัวเติม (ข) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค)เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.3 สรุปผลการทดลองการเติมดินขาวและยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้

จากการศึกษาผลของการเติมดินขาวและยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ พบว่าการเติมดินขาวและยิปซั่มร่วมกัน ในกรณีของการศึกษาชิ้นงานที่เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มโดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียว และชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียว จากผลการทดลองสามารถแบ่งกลุ่มผลการทดลองที่มีผลที่คล้ายคลึงกันได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ เท่ากับ 0.4 กับ 0.6 ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสพบว่าจะเกิดพีคของโทเบอร์โมไรท์ที่ชัดเจนกว่าชิ้นงานอื่นๆ นอกจากนี้เนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่ไม่มาก จึงทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์ไม่พบ

พอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในระบบ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดัดสูง โดยผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นแท่งผสมกับแผ่นจัดเรียงกันหนาแน่น ในส่วนของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่น Ca/(Si+S+Al) สูง เท่ากับ 0.8 กับ 1 ซึ่งใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก จึงมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานในปริมาณสูง ส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานมีค่าต่ำ ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นผลึกแท่งสั้น

4.5 ผลของการเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลการศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียว และชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียว สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ เท่ากับ 0.4 กับ 0.6 และชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง เท่ากับ 0.8 กับ 1 ซึ่งต่อมางานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะชิ้นงานที่เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มเท่านั้น โดยจะสรุปผลของอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 ผลของการเติมยิปซั่มโดยศึกษาในรูปอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025 และ 0.05 และศึกษาผลของการเติมดินขาวในรูปอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ ซึ่งจะแบ่งการสรุปผลเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ผลของการเติมดินขาวและยิปซั่มของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ และผลของการเติมดินขาวและยิปซั่มของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al)

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เติมยิปซั่มและดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) ค่าต่างๆ และเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาว ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับAl/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

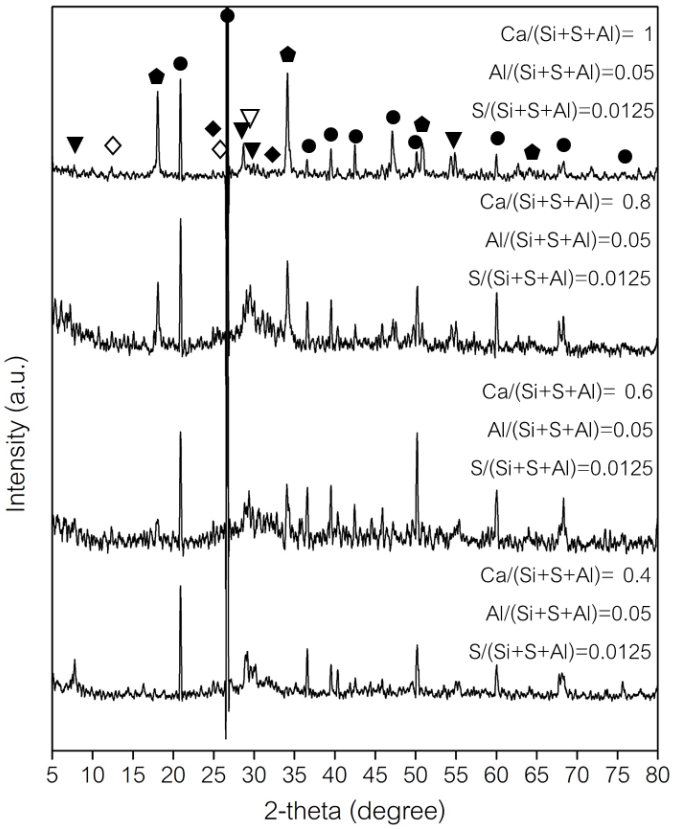
ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	31.60	59.09	6.74	2.56
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	41.28	50.78	5.74	2.20
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	48.57	44.51	4.99	1.92
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	54.27	39.63	4.40	1.71

4.5.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.42 เมื่อชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 นั้นจะมีพีคที่ชัดเจนกว่าชิ้นงานที่อัตราส่วนอื่นๆ และเมื่อพิจารณาพีคที่ 2-theta เท่ากับ 7 ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์ พบว่าพีคจะปรากฏชัดเจนขึ้นกว่าตัวอย่างอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้เนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่ไม่มาก จึงทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์ไม่พบพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในระบบ ต่อมาเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เป็น 0.6 ลักษณะของพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 36 องศา จะมีลักษณะที่คล้ายชิ้นงานที่เตรียมอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 แต่ลักษณะพีคที่ 2-theta เท่ากับ 7 จะไม่ชัดเจน หมายความว่าชิ้นงานนี้จะเกิดโทเบอร์โมไรท์ในปริมาณที่น้อย

กว่า นอกจากนี้ในชิ้นงานจะเหลือพอร์ตแลนไดต์ในปริมาณเล็กน้อยเนื่องจากการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงขึ้นหมายความว่าจะใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณสูงขึ้น สำหรับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 การเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) จะส่งผลทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลสูงขึ้นซึ่งสังเกตได้จากพีคที่ 2-theta เท่ากับ 30 องศาหรือพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะมีพีคที่สูงกว่าพีคที่ 2-theta เท่ากับ 29 องศาซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์อีกทั้งจากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงขึ้นก็จะพบพีคพอร์ตแลนด์ไดต์สูงมากขึ้นกว่าที่กล่าวมาอย่างชัดเจน และเมื่อเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 ซึ่งสูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาจะเห็นได้ว่าพีคพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 36 องศา ความสูงของพีคจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและพีคโทเบอร์โมไรท์ นอกจากนี้ชิ้นงานยังเหลือพอร์ตแลนด์ไดต์ในปริมาณที่สูงมากเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก จึงมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานตัวอย่างในปริมาณสูง และยังมีการเติมยิปซั่มที่ช่วยเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ในปริมาณที่ไม่มากจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ถึงแม้จะมีการเติมยิปซั่มแล้วนั้นพีคของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ยังคงไม่สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.42 ผลวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่างๆ เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125

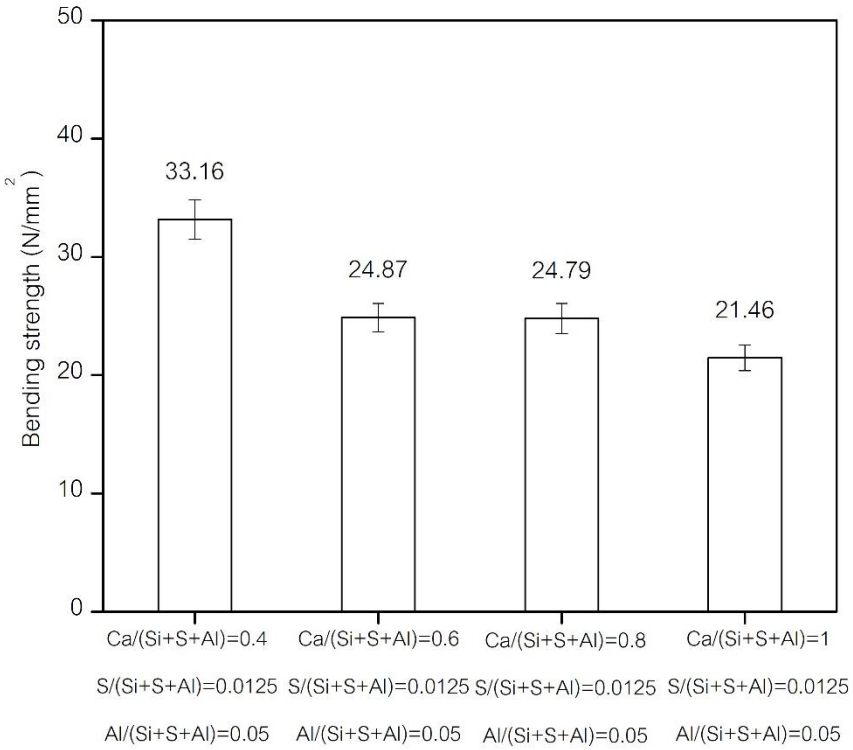
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.43 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 33.16 เมกะพาสคัล โดยการเติมยิปซั่มและดินขาวในปริมาณน้อยที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ จะส่งผลดีต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงานเนื่องจากยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลในขณะที่ดินขาวก็จะทำให้เฟสโทเบอร์โมไรท์เกิดได้ดีและไม่เหลือพอร์ตแลนไดต์ที่เป็นสารตั้งต้นอีกด้วย เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เป็น 0.6 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าลดลงเป็น 24.87 เมกะพาสคัล เนื่องจากชิ้นงานนี้เกิดโทเบอร์โมไรท์ลดลง

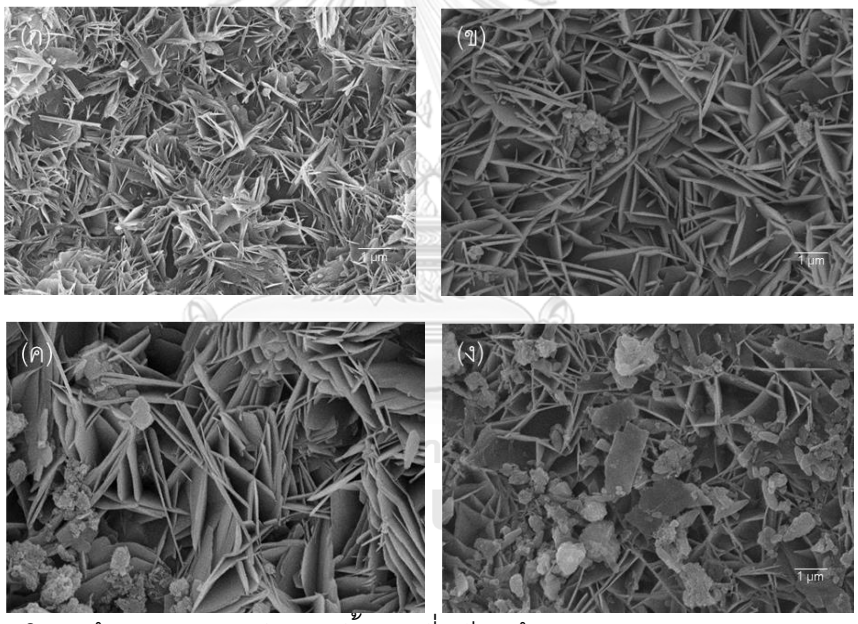
และยังเริ่มเหลือพอร์ตแลนไดต์ในระบบ หมายความว่าสารตั้งต้นนั้นทำปฏิกิริยาไม่หมดนั่นเอง สำหรับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะส่งผลทำให้ชิ้นงานที่ได้มีปริมาณเฟสโทเบอร์โมไรท์ลดลง และมีพอร์ตแลนไดต์เหลือเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความต้านแรงดัดเหลือ 24.79 เมกะพาสคัล สุดท้ายเมื่อเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 ซึ่งสูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษานั้นมีค่าความต้านแรงดัดเท่ากับ 21.46 เมกะพาสคัล ซึ่งกลายเป็นว่าการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดต่ำ ต่างจากผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ จะมีค่าความต้านแรงดัดที่ค่อนข้างสูง สาเหตุคาดว่าเกิดจากการที่สารตั้งต้นมีพอร์ตแลนไดต์ปริมาณสูง จึงทำให้ดินขาวเข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้น และทำปฏิกิริยาไม่หมดจึงส่งผลต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงาน อีกทั้งผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 องศา ซึ่งเป็นช่วงของพีคโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลนั้นมีพีคที่ไม่สูงมากจึงทำให้มีค่าความต้านทางแรงดัดต่ำ



รูปที่ 4.43 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่างๆ เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125

4.5.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.44 (ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นเล็ก เมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เป็น 0.6 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและจะมีอนุภาคเล็กซึ่งมีรูปร่างเหมือนพอร์ตแลนไดต์อยู่บนพื้นผิวของผลึก ต่อมาเมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เพิ่มเป็น 0.8 ผลึกก็ยังคงเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่อนุภาคพอร์ตแลนไดต์จะพบในปริมาณที่สูงขึ้น จนเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษา ลักษณะผลึกยังคงเป็นลักษณะแผ่น ที่มีอนุภาคพอร์ตแลนไดต์เกาะกระจายอยู่บนผิวผลึกอย่างหนาแน่น



รูปที่ 4.44 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) (ก) 0.4 (ข) 0.6 (ค) 0.8 (ง) 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125

4.5.2 ผลของการเติมยิปซั่มของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025 และ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ตามที่กำหนด ในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ที่ต่ำในช่วง 0.4 และ 0.6 โดยจะศึกษาการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ในช่วงนี้จะมีผลที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังนั้นในการรายงานผลการทดลองจึงเลือกชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยผลการทดลองของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 นั้นจะรายงานในภาคผนวก ก.

4.5.2.1 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.15 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาว ที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ

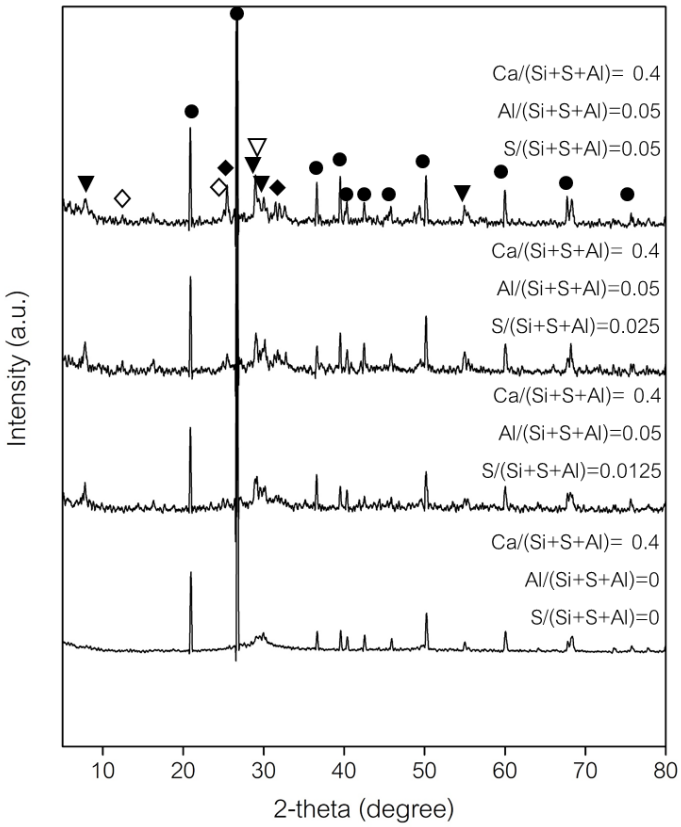
ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.05	27.48	55.71	6.67	10.14
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.05	30.21	57.95	6.72	5.12
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	31.60	59.09	6.74	2.56
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	33.03	66.97	0	0

4.5.2.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.45 พบว่าการศึกษาผลของการเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มนั้น ไอออนซัลเฟอร์จากยิปซั่มและไอออนอะลูมิเนียมจากดินขาวจะสามารถเกิดการแทนที่ในตำแหน่งของไอออนซิลิกอนภายในโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้เหมือนกัน จากผลการทดลองพบว่าปริมาณดินขาวและยิปซั่มที่เติมจะมีผลต่อการเกิดเฟส โดยในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.05 การเติมดินขาวในปริมาณที่น้อยนั้นจะส่งผลทำให้ยิปซั่มจะกลายเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 พบว่าที่ 2-theta ในช่วง

28 ถึง 32 จะเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมใดๆ และเมื่อพิจารณาพีคที่ 2 theta เท่ากับ 7 ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์ พบว่าจะปรากฏเป็นพีคที่สูง นอกจากนี้เนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณไม่มาก จึงทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์ไม่พบพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในระบบ ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เท่าเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 พีคโทเบอร์โมไรท์นั้นจะมีพีคที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเติมยิปซั่มในปริมาณมากจะทำให้ยิปซั่มที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาก็จะเกิดเป็นแอนไฮไดรต์ รวมทั้งเกิดเกาลินไนต์จากดินขาวในปริมาณเล็กน้อยเนื่องจากมีการเติมดินขาวในส่วนผสม และเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมากขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ซึ่งเป็นการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์จะยังคงชัดเจนอยู่ แต่เนื่องจากเติมยิปซั่มในปริมาณสูงมากตามที่ได้กล่าวข้างต้นชิ้นงานนี้จึงเกิดแอนไฮไดรต์สูงที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.45 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

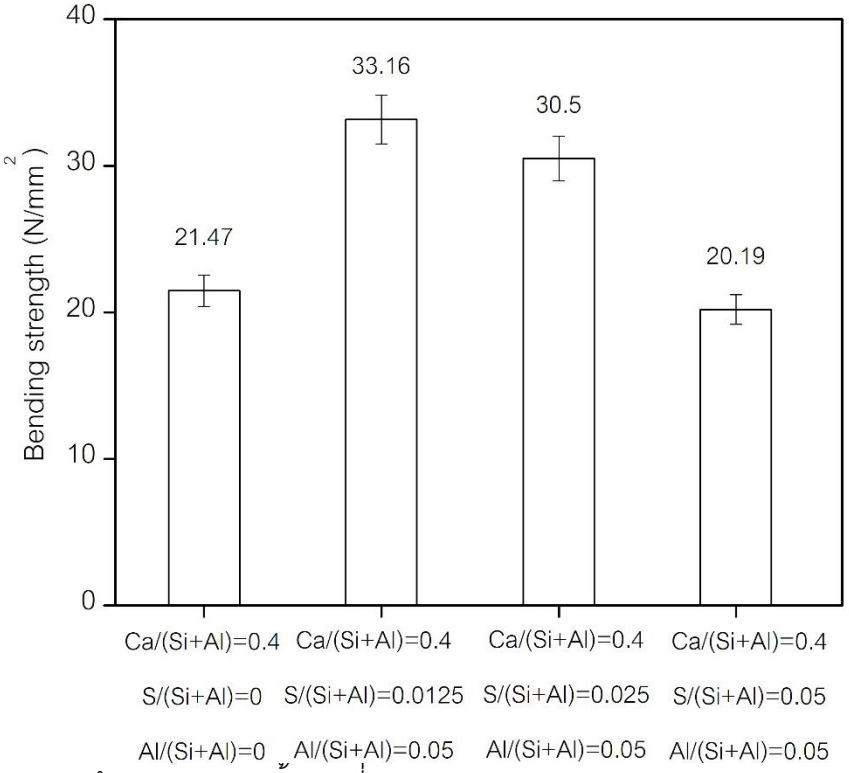
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.2.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.46 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 21.47 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 33.16 เมกะพาสคัลซึ่งถือว่ามีความต้านแรงดัดสูงที่สุด เนื่องจากการเติมยิปซั่มและดินขาวในปริมาณน้อยที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ จะส่งผลดีต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงานเนื่องจากยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในขณะที่ดินขาวก็จะทำให้เฟสโทเบอร์โมไรท์เกิดได้ดีและไม่เหลือพอร์ตแลนไดต์ที่เป็นสารตั้งต้นอีกด้วย แต่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดย

เตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 จะทำให้เหลือแอนไฮไดรต์ในปริมาณสูง ซึ่งมีผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานมีค่าลดลงเป็น 30.5 เมกะพาสคัล และสุดท้ายเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมากแอนไฮไดรต์ก็จะเกิดสูงยิ่งขึ้นก็จะทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลงชัดเจน โดยมีค่าเท่ากับ 20.19 เมกะพาสคัล



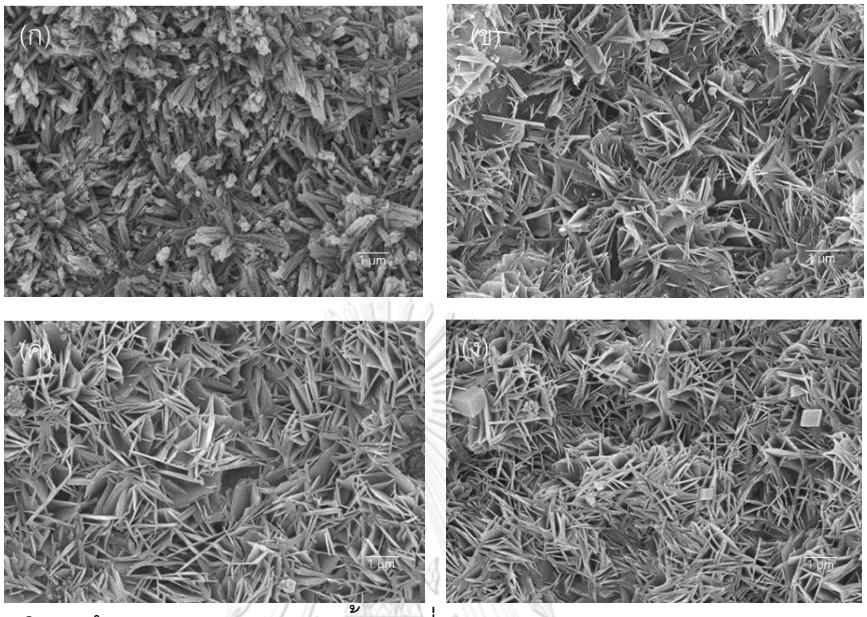
รูปที่ 4.46 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.2.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.47(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสั้น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ลักษณะผลึกจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งสั้นกลายเป็นผลึกแผ่น และเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกันอย่างหนาแน่น

เช่นเดิม และสุดท้ายเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมากแอนไฮไดรต์ก็จะเกิดสูงยิ่งขึ้น ผลึกยังคงเป็นแผ่นแต่จะมีอนุภาคแอนไฮไดรต์อยู่บนผิวผลึก



รูปที่ 4.47 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05

4.5.2.2 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

Chulalongkorn University

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ

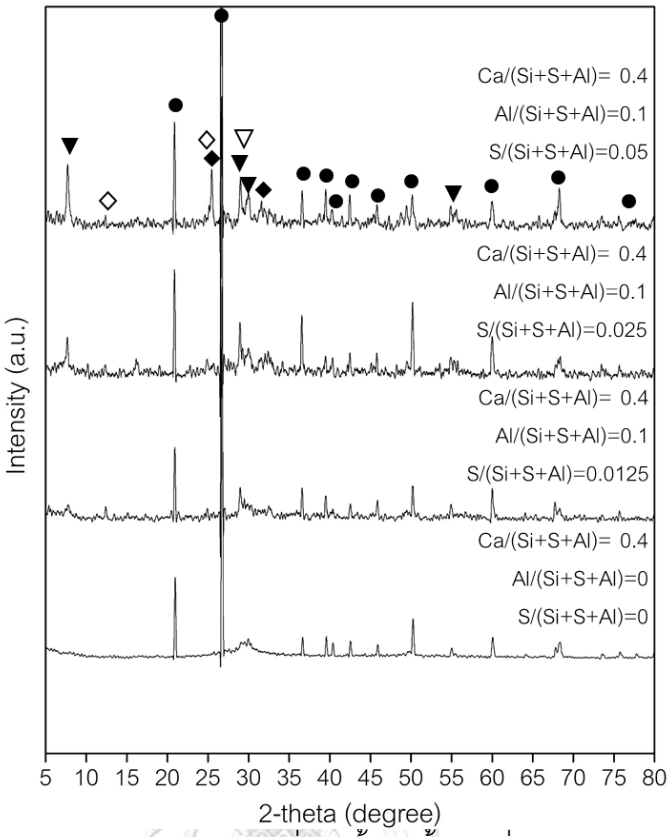
ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.1	27.31	48.39	14.21	10.08
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.1	30.03	50.55	14.34	5.09
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.1	31.41	51.64	14.40	2.55
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	33.03	66.97	0	0

4.5.2.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.48 จากที่กล่าวมาข้างต้นปริมาณดินขาวและยิปซั่มที่เติมจะมีผลต่อการเกิดเฟส โดยในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.05 การเติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เป็น 0.1 นั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานร่วมกับยิปซั่ม โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ซึ่งชิ้นงานนี้เติมดินขาวในปริมาณมาก ในขณะที่เติมยิปซั่มในปริมาณต่ำ จึงทำให้ในกรณีนี้ดินขาวเป็นตัวควบคุมการเกิดเฟส โดยดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาพีคที่เกิดขึ้นที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 พบว่าเฟสโทเบอร์โมไรท์ถึงจะเกิดชัดเจนแต่ปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ในขณะที่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้นโดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 เท่าเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 พบว่าการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้ทำให้ยิปซั่มจะเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานร่วมกับดินขาว ในกรณีนี้ยิปซั่มจึงเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ ในขณะที่ดินขาวก็จะหน่วงการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ดังนั้นจากกราฟองค์ประกอบเฟสจะพบว่าพีคในที่ 2-theta เท่ากับ 7 และพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 จะพบพีคโทเบอร์โมไรท์เป็นหลักและพีคนั้นสูงขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่อเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมากขึ้น ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ซึ่งเป็นการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษา ยิปซั่มจึงเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานแทนดินขาว ซึ่งส่งผลทำให้พีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์จะยังคงชัดเจนอยู่ แต่เนื่องจากเติมยิปซั่มในปริมาณสูงมากตามที่ได้กล่าวข้างต้นชิ้นงานนี้จึงเกิดแอนไฮไดรต์สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.48 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

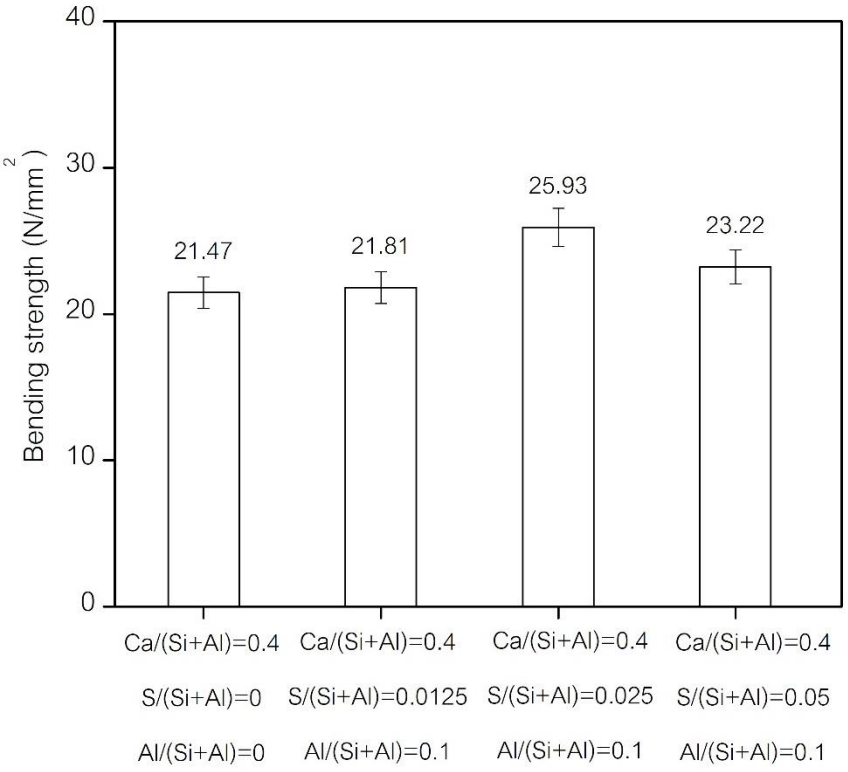
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.2.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.49 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 21.47 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 21.81 เมกะพาสคัล ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เติมดินขาวน้อยกว่าที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 เติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 นั้นจะมีความต้านแรงดัดลดลง เนื่องจากชิ้นงานนี้เฟสโทเบอร์โมไรท์มีปริมาณที่ลดลง เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al)

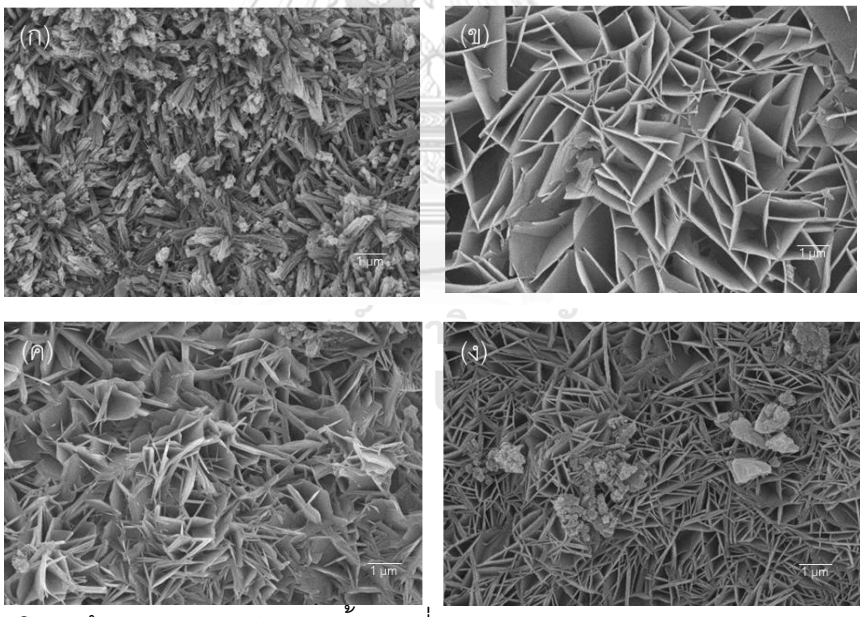
เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 จากที่กล่าวมาข้างต้นการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้ทำให้ยิปซั่มจะเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานร่วมกับดินขาว ในกรณีนี้ยิปซั่มจึงเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ส่งผลให้ค่าความต้านแรงดัดเพิ่มเป็น 25.93 เมกะพาสคัล และสุดท้ายเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมากแอนไฮไดรต์ก็จะเกิดสูงยิ่งขึ้นก็จะทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 23.22 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.49 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ

4.5.2.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.50(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสั้น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ลักษณะผลึกจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งสั้นกลายเป็นผลึกแผ่น และเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกันอย่างหนาแน่นเช่นเดิม และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 แอนไฮไดรต์จะเกิดปริมาณมากขึ้น โดยผลึกยังคงเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่จะมีอนุภาคแอนไฮไดรต์และเกาลินไนต์ปริมาณมากอยู่บนผิวผลึก



รูปที่ 4.50 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05

4.5.2.3 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.17

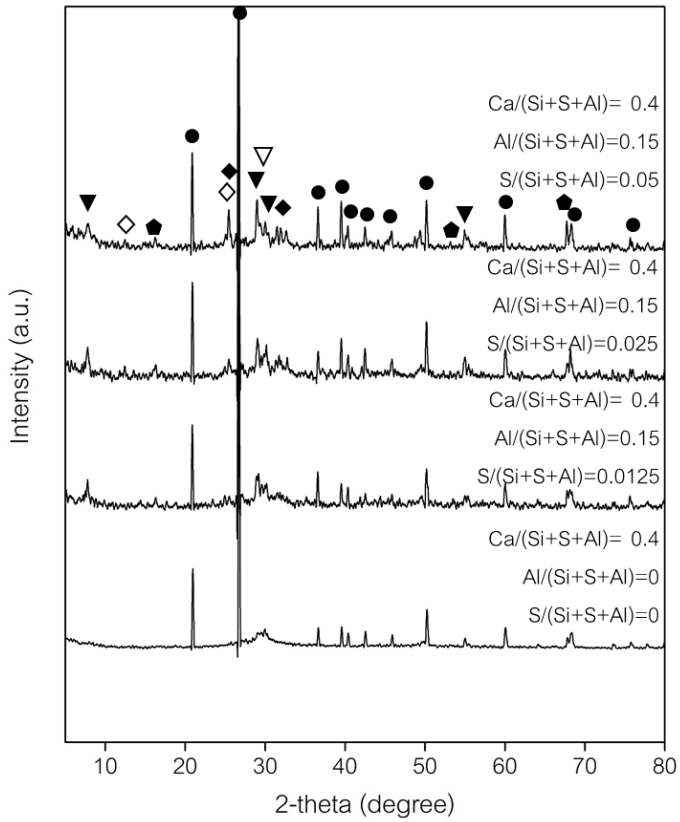
ตารางที่ 4.17 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ

ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.15	27.14	41.15	21.67	10.03
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.15	29.84	43.22	21.88	5.06
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.15	31.22	44.27	21.98	2.53
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	33.03	66.97	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.2.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.51 จากที่กล่าวมาข้างต้นปริมาณดินขาวและยิปซั่มที่เติมจะมีผลต่อการเกิดเฟส โดยในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.05 การเติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษา นั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ซึ่งชิ้นงานนี้เติมดินขาวในปริมาณมาก ในขณะที่เติมยิปซั่มในปริมาณต่ำ จึงทำให้ในกรณีนี้ดินขาวเป็นตัวควบคุมการเกิดเฟส โดยดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาพีคที่เกิดขึ้นที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 พบว่าเฟสโทเบอร์โมไรท์ถึงจะเกิดชัดเจนแต่ปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ในขณะที่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้นโดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 เท่าเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 พบว่าถึงแม้จะมีการเติมยิปซั่มเพิ่ม แต่เนื่องจากมีการเติมดินขาวในปริมาณที่สูงจึงทำให้ดินขาวยังคงควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานอยู่ ดินขาวจะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยส่วนโทเบอร์โมไรท์เกิดได้ชัดเจน ในขณะที่เนื่องจากเติมยิปซั่มในปริมาณสูงตามที่ได้กล่าวข้างต้นชิ้นงานนี้จึงเกิดแอนไฮไดรต์ และเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมากขึ้น ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 จะส่งผลทำให้ยิปซั่มจะเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานร่วมกับดินขาว ยิปซั่มจึงเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ ในขณะที่ดินขาวก็จะหน่วงการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ดังนั้นจากกราฟองค์ประกอบเฟสจะพบว่าพีคในที่ 2-theta เท่ากับ 7 และพีคในช่วง 2-theta เท่ากับ 28 ถึง 32 จะพบพีคโทเบอร์โมไรท์เป็นหลักและพีคนั้นสูงขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.51 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

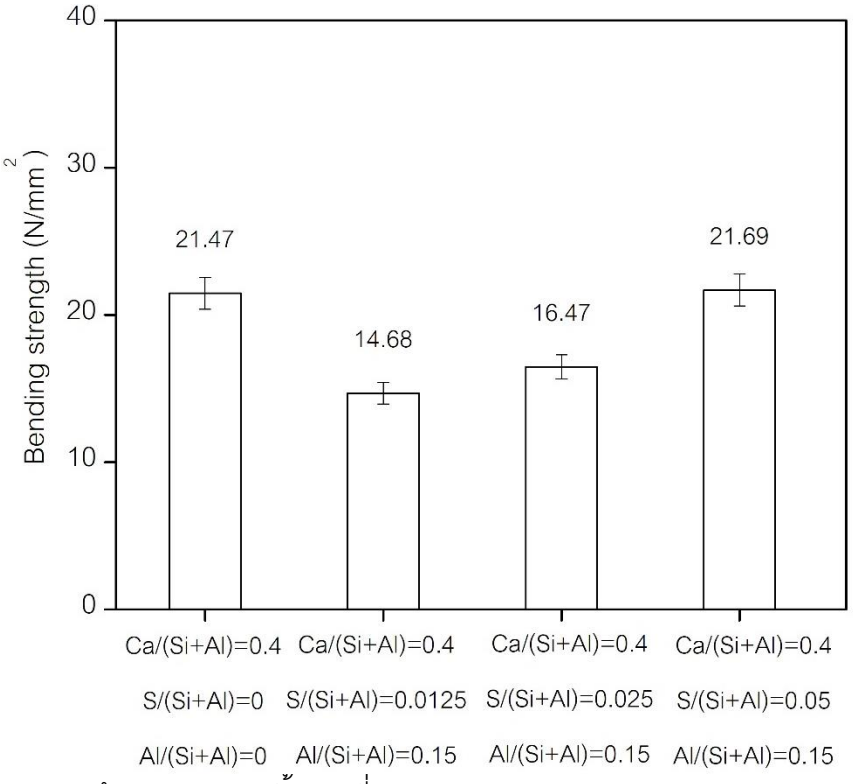
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.2.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.51 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 21.47 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ค่าความต้านแรงดัดกลับมีค่าลดลงเท่ากับ 14.68 เมกะพาสคัล เนื่องจากเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่มาก ดินขาวจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นจึงมีพอร์ตแลนไดต์เหลือในระบบ เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 จากที่กล่าวไว้ข้างต้น ดินขาวนั้นยังคงควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานอยู่ ซึ่งดินขาวจะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้

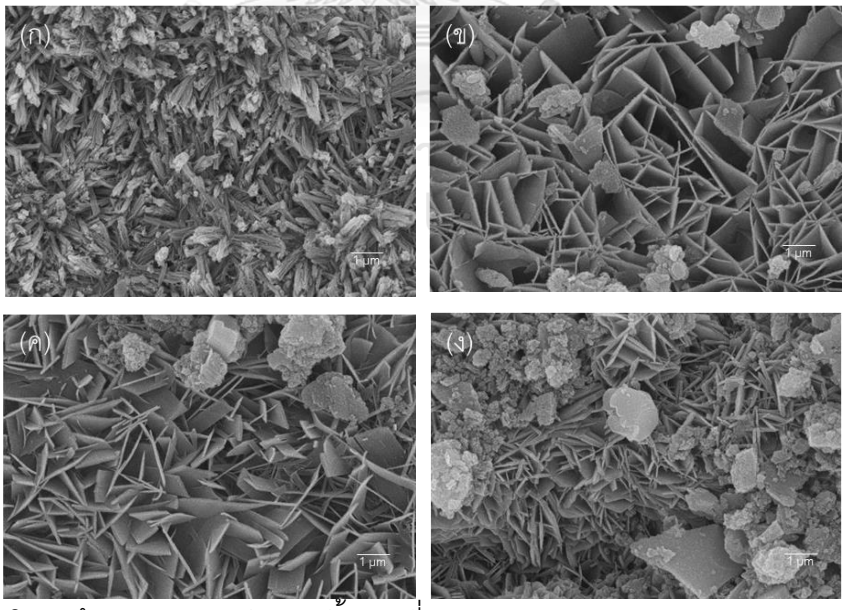
น้อยส่วนโทเบอร์โมไรท์เกิดได้ชัดเจน จึงส่งผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นเป็น 16.47 เมกะพาสคัล และสุดท้ายเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมากที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ยิปซั่มจะเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานร่วมกับดินขาว ยิปซั่มจึงเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ ในขณะที่ดินขาวก็จะหน่วงการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ดังนั้นจึงพบพีคโทเบอร์โมไรท์เป็นหลักและพีคนั้นสูงขึ้นอย่างชัดเจน ส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดมีค่าเท่ากับ 21.69 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.52 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ

4.5.2.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.53(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสั้น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ลักษณะผลึกจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งสั้นกลายเป็นผลึกแผ่น และมีอนุภาคดินขาวอยู่บนพื้นผิวของผลึกเนื่องจากชิ้นงานนี้มีการเติมดินขาวในปริมาณมาก และจากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบสามารถยืนยันได้ว่ามีดินขาวเหลือในระบบมาก จากนั้นเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกันอย่างหนาแน่นรวมทั้งมีอนุภาคแอนไฮไดรต์และดินขาวอยู่บนพื้นผิวผลึกเช่นเดิม และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 แอนไฮไดรต์จะเกิดสูงมากขึ้น โดยผลึกยังคงเป็นแผ่นแต่จะเป็นแผ่นขนาดเล็กที่สานกันอย่างหนาแน่นโดยมีอนุภาคแอนไฮไดรต์และดินขาวจำนวนมากอยู่บนผิวผลึก



รูปที่ 4.53 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05

4.5.3 ผลของการเติมดินขาวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ตามที่กำหนด ในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ที่ต่ำในช่วง 0.4 และ 0.6 โดยจะศึกษาการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ในช่วงนี้จะมีผลที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังนั้นในการรายงานผลการทดลองจึงเลือกชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยผลการทดลองของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 นั้นจะรายงานในภาคผนวก ก.

4.5.3.1 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05 และ 0.15 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.18 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่ม ในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

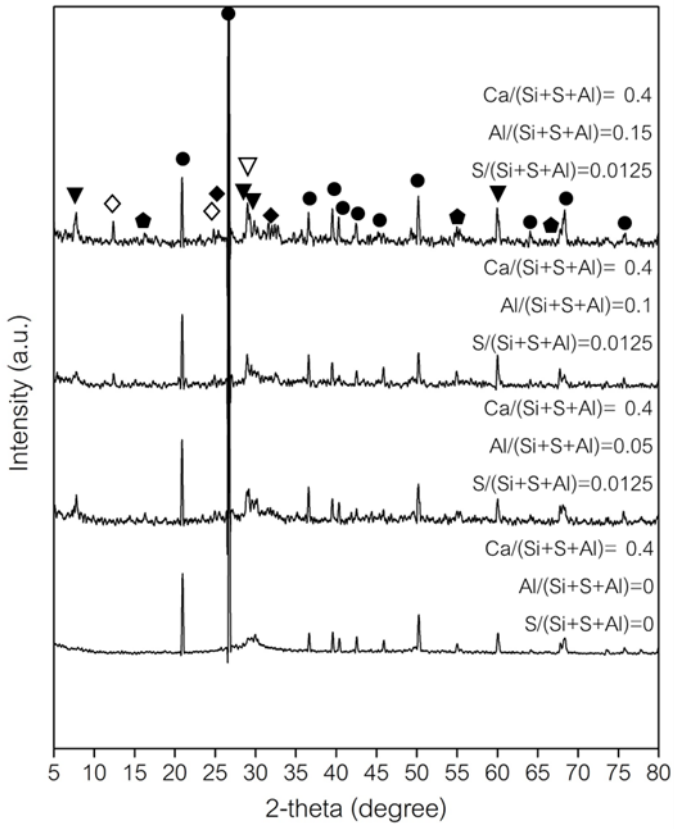
ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.15	27.14	41.15	21.67	10.03
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.1	31.41	51.64	14.40	2.55
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	31.60	59.09	6.74	2.56
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	33.03	66.97	0	0

4.5.3.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.54 ในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 โดยการเติมยิปซั่มในปริมาณที่น้อยนั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวกลายเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 พบว่าที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 จะเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมใดๆ และเมื่อพิจารณาพีคที่ 2 theta เท่ากับ 7 ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์ พบว่าจะปรากฏเป็นพีคที่สูง เนื่องจากชิ้นงานเติมดินขาวในปริมาณน้อยและเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็น

สารตั้งต้นในปริมาณไม่มาก จึงทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์ไม่พบพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในระบบ ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เท่าเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 การเติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานร่วมกับยิปซั่ม ในขณะที่เติมยิปซั่มในปริมาณต่ำ จึงทำให้ในกรณีนี้ดินขาวเป็นตัวควบคุมการเกิดเฟส โดยดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง ซึ่งผลของการเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 จะมีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เท่าเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 การเติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุด นั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง ในขณะเดียวเฟสโทเบอร์โมไรท์ก็จะเกิดชัดเจนขึ้น แต่ในกรณีนี้เมื่อมีการเติมดินขาวในปริมาณมาก ก็จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.54 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

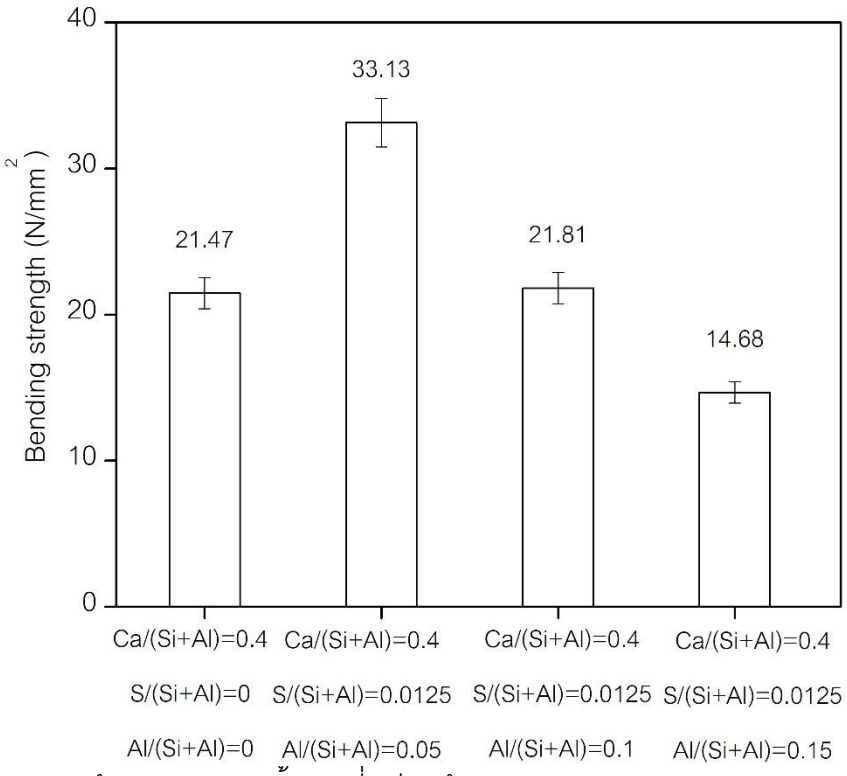
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.3.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.55 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 21.47 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 33.16 เมกะพาสคัลซึ่งถือว่ามีความต้านแรงดัดสูงที่สุด เนื่องจากการเติมยิปซั่มและดินขาวในปริมาณน้อยที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ จะส่งผลดีต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงานเนื่องจากยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในขณะที่ดินขาวก็จะทำให้เฟสโทเบอร์โมไรท์เกิดได้ดีและไม่เหลือพอร์ตแลนไดต์ที่เป็นสารตั้งต้นอีกด้วย แต่เมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดย

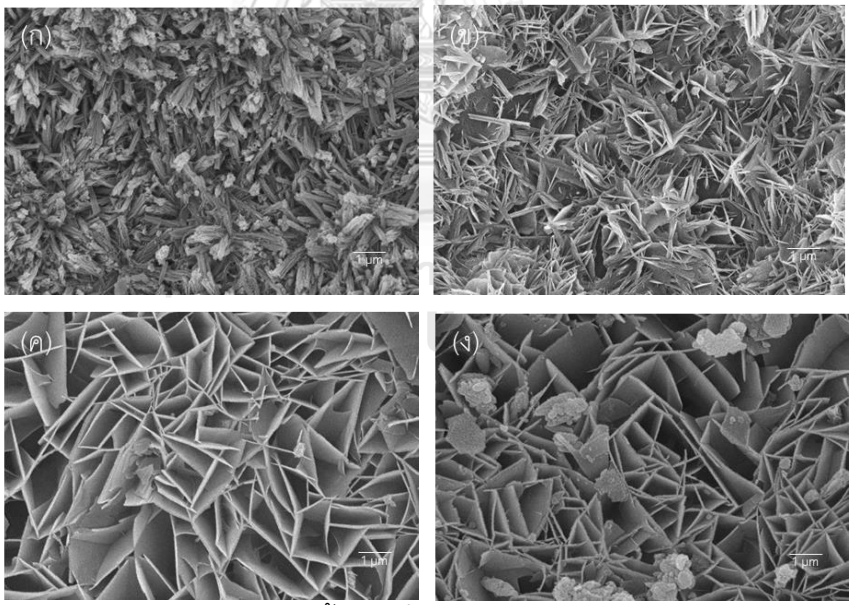
เตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 จะทำให้ดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง ซึ่งมีผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานมีค่าลดลงเป็น 21.81 เมกะพาสคัล และสุดท้ายเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงมากดินขาวก็จะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเช่นเดิม แต่ในกรณีนี้จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูงซึ่งเกิดจากการที่เติมดินขาวในปริมาณที่มากทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลงชัดเจน โดยมีค่าเท่ากับ 14.68 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.55 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

4.5.3.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.56(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสั้น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ลักษณะผลึกจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งสั้นกลายเป็นผลึกแผ่นขนาดเล็กๆสานกันอย่างหนาแน่น จากนั้นเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นสานกันเช่นเดิม แต่ผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบจะพบว่ามีเกาลินไนต์เหลือในชิ้นงานในปริมาณสูง ดังนั้นผลึกแผ่นจะมีอนุภาคเกาลินไนต์จำนวนมากอยู่บนผิวผลึก



รูปที่ 4.56 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.5.3.2 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05 และ 0.15 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.19

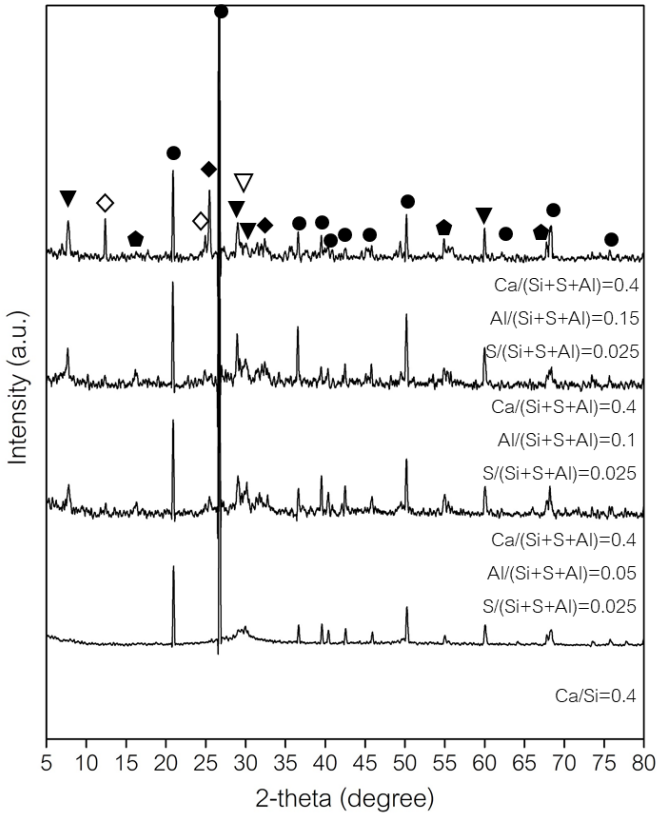
ตารางที่ 4.19 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่างๆ

ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.15	29.84	43.22	21.88	5.06
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.1	30.03	50.55	14.34	5.09
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.05	30.21	57.95	6.72	5.12
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	33.03	66.97	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.3.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.57 ในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 พบว่าที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 จะเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมใดๆ และเมื่อพิจารณาพีคที่ 2 theta เท่ากับ 7 ซึ่งเป็นพีคของโทเบอร์โมไรท์ พบว่าจะปรากฏเป็นพีคที่สูง ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 เท่าเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 การเติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานร่วมกับยิปซั่ม แต่เนื่องจากยิปซั่มที่เติมนั้นไม่ได้มีปริมาณน้อย จึงทำให้ในกรณีนี้ดินขาวกับยิปซั่มจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการเกิดเฟสร่วมกัน ซึ่งจะพบว่าพีคโทเบอร์โมไรท์นั้นจะมีพีคที่สูงขึ้นเนื่องจากยิปซั่มจะเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ในขณะเดียวกันการเติมดินขาว ดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง และเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 การเติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุด ตามที่ได้กล่าวมาข้งต้น ดินขาวจะเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง ในขณะเดียวเฟสโทเบอร์โมไรท์ก็จะเกิดชัดเจนขึ้น แต่ในกรณีนี้เมื่อมีการเติมดินขาวในปริมาณมาก ก็จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูง



รูปที่ 4.57 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

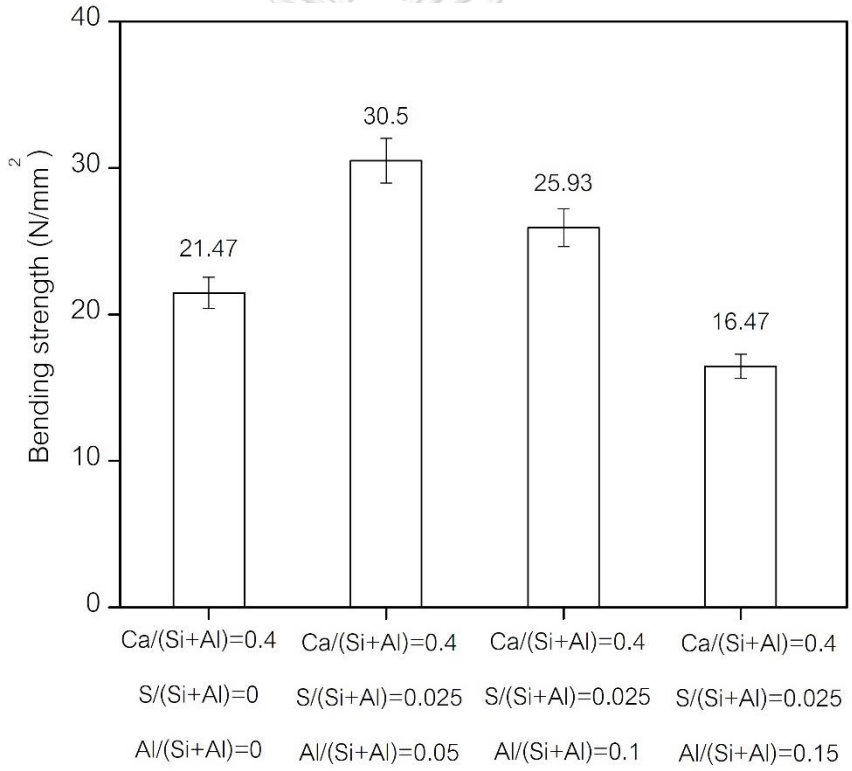
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.3.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.58 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 21.47 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 30.5 เมกะพาสคัลซึ่งถือว่ามีความต้านแรงดัดสูงที่สุด เนื่องจากการเติมดินขาวในปริมาณน้อยที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ จะส่งผลดีต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงานเนื่องจากดินขาวจะขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่

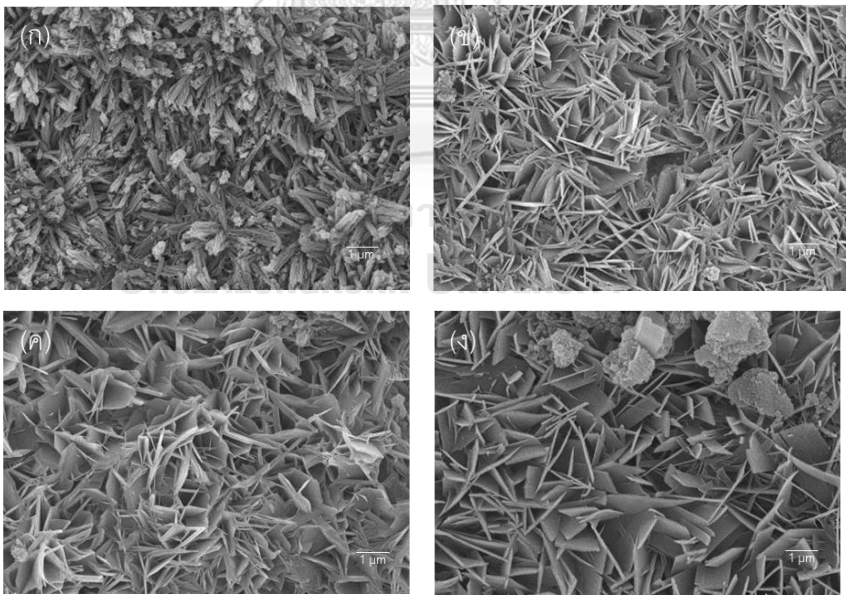
อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 เนื่องจากยิปซั่มที่เติมนั้นไม่ได้มีปริมาณน้อย จึงทำให้ในกรณีนี้ดินขาวกับยิปซั่มจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการเกิดเฟสร่วมกัน ดังนั้นถึงแม้การเติมดินขาวจะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง แต่ยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ จึงทำให้ความต้านแรงดัดลดลงเพียงเล็กน้อยเป็น 25.93 เมกะพาสคัลและสุดท้ายเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงมากดินขาวก็จะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเช่นเดิม แต่ในกรณีนี้จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูงซึ่งเกิดจากการที่เติมดินขาวในปริมาณที่มากทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลงชัดเจน โดยมีค่าเท่ากับ 14.68 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.58 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

4.5.3.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.59(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสั้น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ลักษณะผลึกจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งสั้นกลายเป็นผลึกแผ่นขนาดเล็กๆสานกันอย่างหนาแน่น จากนั้นเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกจะยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่ผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 แต่เติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบจะพบว่ามีเกาลินไนต์และแอนไฮไดรต์ในชิ้นงานในปริมาณสูงเนื่องจากชิ้นงานนี้เติมดินขาวและยิปซั่มค่อนข้างสูง ดังนั้นผลึกแผ่นจะมีอนุภาคของเกาลินไนต์และอนุภาคของแอนไฮไดรต์จำนวนมากอยู่บนผิวผลึก



รูปที่ 4.59 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.5.3.3 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05 และ 0.15 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.20

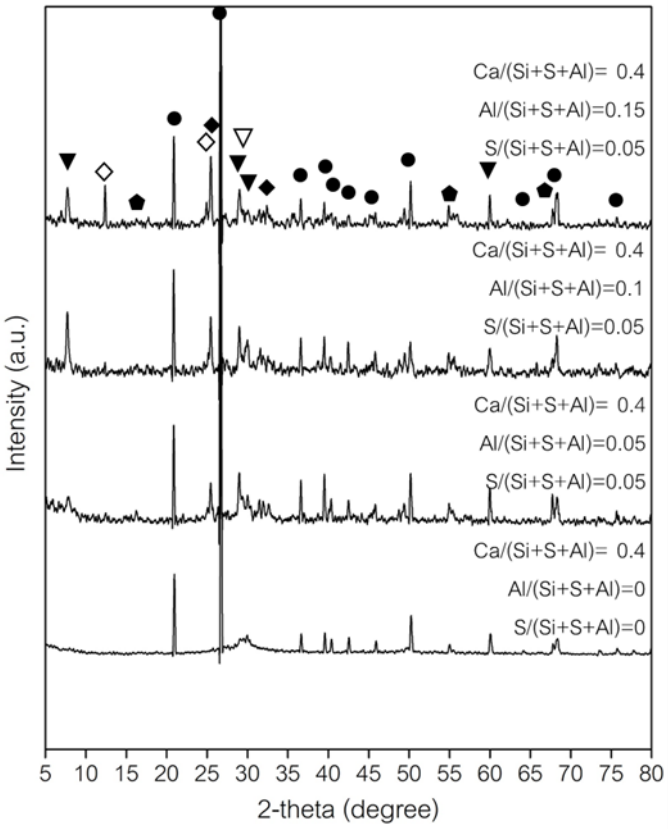
ตารางที่ 4.20 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่างๆ

ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.15	29.84	43.22	21.88	5.06
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.1	30.03	50.55	14.34	5.09
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.05	30.21	57.95	6.72	5.12
Ca/(Si+S+Al) = 0.4, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	33.03	66.97	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.3.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.60 ในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 พบว่าการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาจะส่งผลให้ยิปซั่มจะควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน จากการศึกษาผลของการเติมยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงาน พบว่าการเติมยิปซั่มในปริมาณสูงเกินไป ถึงแม้จะเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ในปริมาณที่สูงในขณะเดียวกันก็จะเกิดเฟสแอนไฮไดรต์ในปริมาณมาก ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เท่าเดิม เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ถึงแม้จะมีการเติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากชิ้นงานนี้เติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงจึงส่งผลทำให้ยิปซั่มจะยังคงควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน ซึ่งผลขององค์ประกอบเฟสในชิ้นงานนี้มีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เช่นเดียวกับชิ้นงานเติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ในกรณีนี้ยิปซั่มกับดินขาวจะทำหน้าที่ควบคุมการเกิดเฟสร่วมกัน ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นยิปซั่มที่เติมเข้าไปจะส่งผลทำให้เกิดแอนไฮไดรต์ในปริมาณที่สูงมาก ในขณะที่ดินขาวก็จะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง และก็จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูง



รูปที่ 4.60 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวในอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

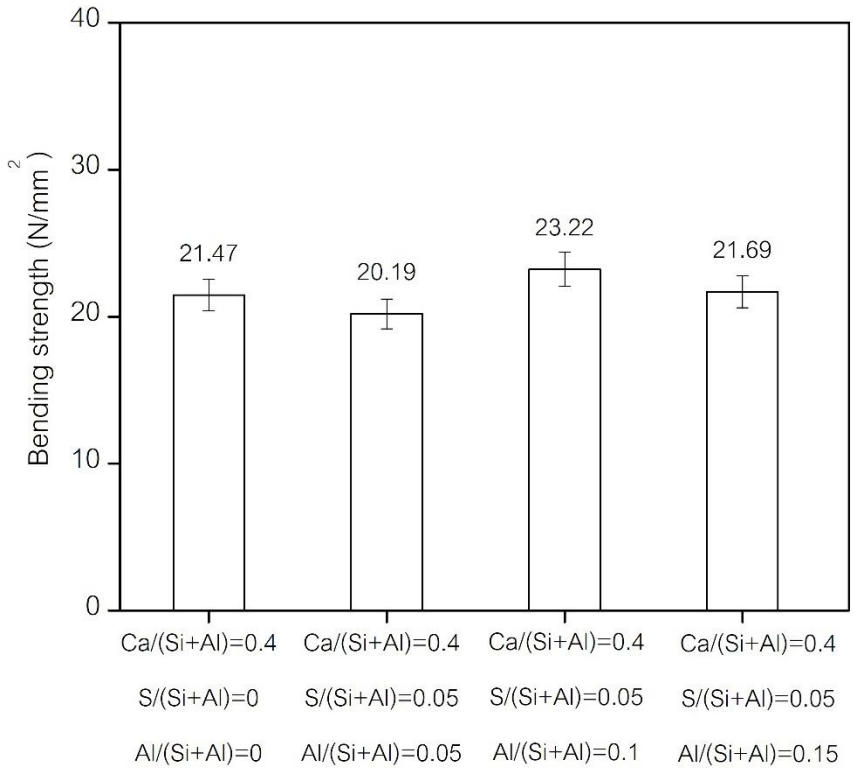
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.3.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.61 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 21.47 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าลดลง เท่ากับ 20.19 เมกะพาสคัล เนื่องจากการเติมยิปซั่มในปริมาณสูงเกินไป ถึงแม้จะเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ในปริมาณที่สูงในขณะเดียวกันก็จะเกิดเฟสแอนไฮไดรต์ในปริมาณมากจึงทำให้ความต้านแรงดัดมีค่าลดลง เมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้นโดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่

อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ซึ่งยิปซั่มจะยังคงควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน ดังนั้นค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 โดยมีค่าเท่ากับ 23.22 เมกะพาสคัล และสุดท้ายเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงมากนอกจากการเติมยิปซั่มในปริมาณสูงจะทำให้เกิดแอนไฮไดรต์ในปริมาณมากซึ่งจะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลงแล้วดินขาวก็จะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเช่นเดิม แต่ในกรณีนี้จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูงซึ่งเกิดจากการที่เติมดินขาวในปริมาณที่มากทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลงชัดเจน โดยมีค่าเท่ากับ 21.69 เมกะพาสคัล

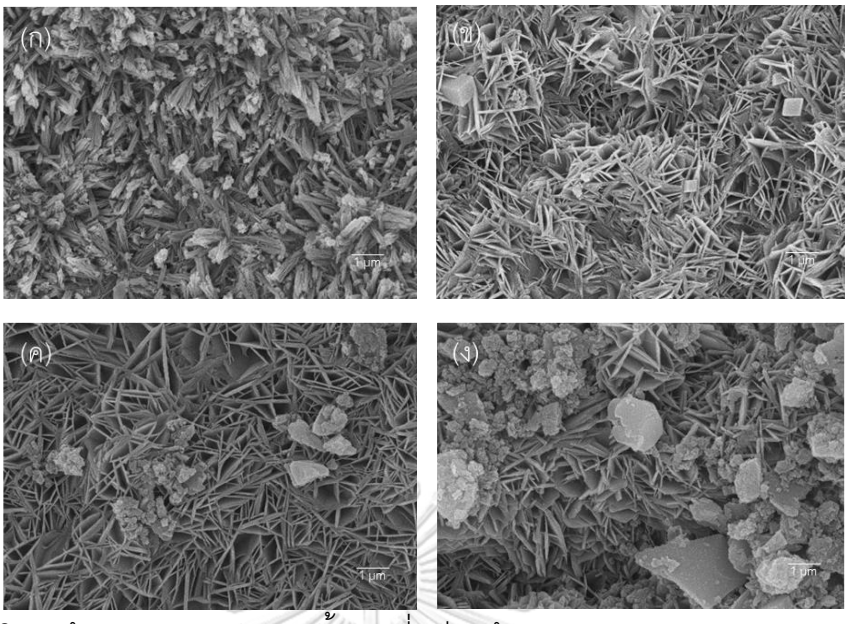


รูปที่ 4.61 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

4.5.3.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.62(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาว เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ซึ่งเป็นการเติมยิปซั่มในปริมาณสูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษา และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ลักษณะผลึกที่พบจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งสั้นกลายเป็นผลึกแผ่นขนาดเล็กๆสานกันอย่างหนาแน่น และเนื่องจากการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูง จึงพบอนุภาคแอนไฮไดรต์แทรกระหว่างผลึกแผ่นจากนั้นเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกจะยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่ผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีอนุภาคดินขาวกับอนุภาคแอนไฮไดรต์กระจายบนผิวของผลึกแผ่น และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 แต่เติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบจะพบว่ามีเกาลินไนต์และแอนไฮไดรต์ในชิ้นงานในปริมาณสูงเนื่องจากชิ้นงานนี้เติมดินขาวและยิปซั่มค่อนข้างสูง ดังนั้นผลึกแผ่นจะมีอนุภาคของเกาลินไนต์และอนุภาคของแอนไฮไดรต์จำนวนมากอยู่บนผิวผลึก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.62 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.5.4 ผลของการเติมยิปซั่มของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025 และ 0.05 ผลของการเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ตามที่กำหนด ในชิ้นงานที่เตรียมในช่วงอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ที่สูง เท่ากับ 0.8 และ 1 โดยจะศึกษาการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ในช่วงนี้จะมีผลที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังนั้นในการรายงานผลการทดลองจึงเลือกชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยผลการทดลองของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 นั้นจะระบุในภาคผนวก ข.

4.5.4.1 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.21

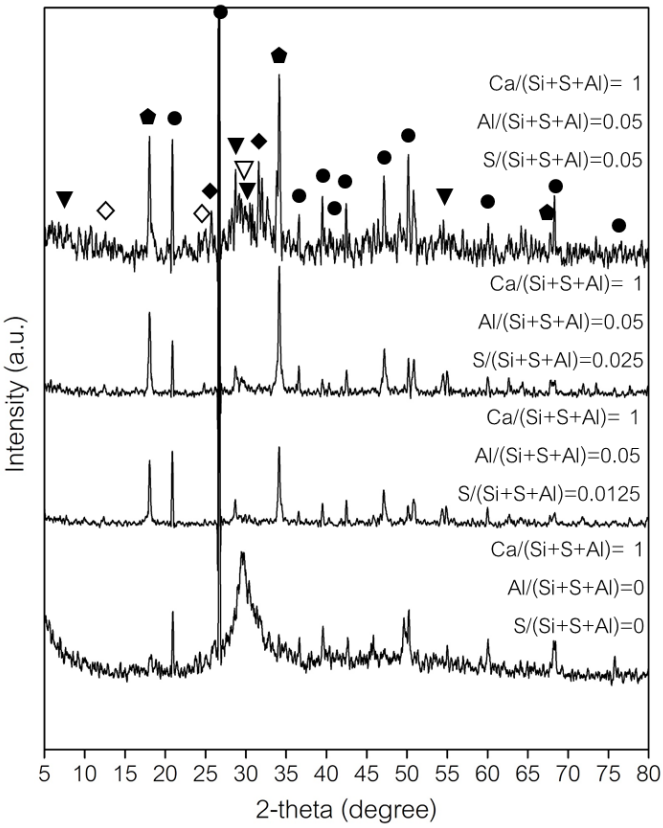
ตารางที่ 4.21 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่ม ในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.05	51.26	37.55	4.37	6.83
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.05	53.26	38.93	4.39	3.43
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	54.27	39.63	4.40	1.71
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	55.27	44.73	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.4.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.63 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณดินขาวและยิปซั่มที่เติมจะมีผลต่อการเกิดเฟส โดยในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.05 การเติมดินขาวในปริมาณที่น้อยนั้นจะส่งผลทำให้ยิปซั่มจะกลายเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 พบว่าที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 พีคในช่วงนี้ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมใดๆ นอกจากนี้เนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก จึงพบพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในระบบอยู่ในปริมาณมาก ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เท่าเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 พีคโทเบอร์โมไรท์นั้นจะมีพีคที่สูงขึ้นเล็กน้อย แต่โดยรวมจะมีลักษณะการเกิดเฟสคล้ายกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เนื่องจากยิปซั่มยังคงเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟส และการเติมยิปซั่มในช่วงนี้ยังคงช่วยเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ แต่ถึงอย่างนั้นกลับเร่งได้ไม่มากนัก และเมื่อเติมยิปซั่มเพิ่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ซึ่งเป็นการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์จะสูงมากเนื่องจากยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ แต่เนื่องจากเติมยิปซั่มในปริมาณสูงมากตามที่ได้กล่าวข้างต้นชิ้นงานนี้จึงเกิดแอนไฮไดรต์สูงที่สุดและเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมากจึงทำให้ชิ้นงานเหลือพอร์ตแลนไดต์ในระบบสูงมากเช่นกัน



รูปที่ 4.63 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

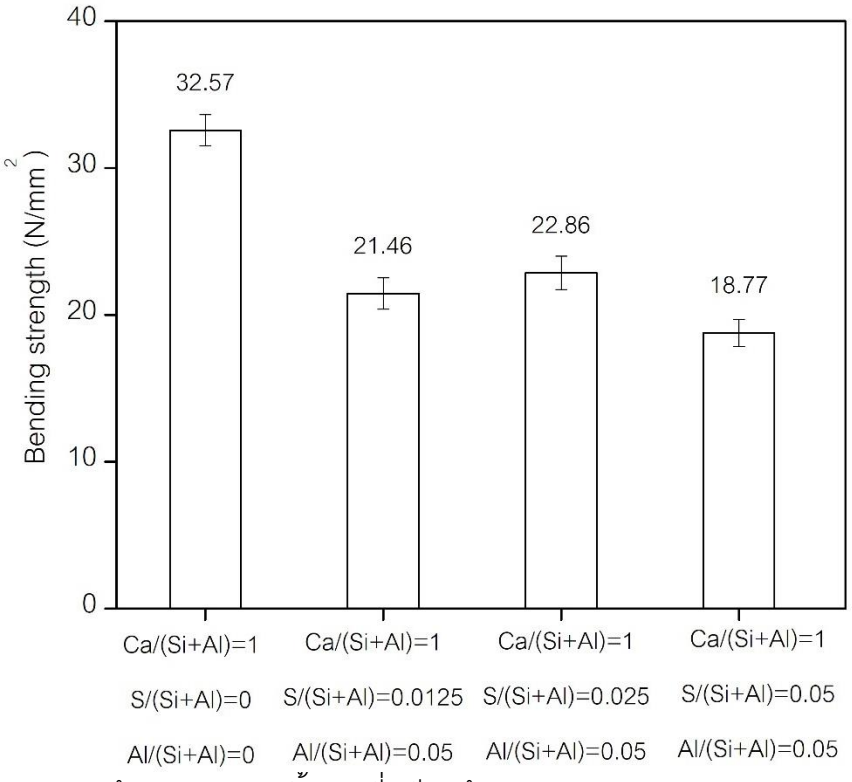
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.64 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 32.57 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเป็น 21.46 เมกะพาสคัล ซึ่งกลายเป็นว่าการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดต่ำ ต่างจากผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ ถึงแม้การเติมยิปซั่มและดินขาวในปริมาณน้อยจะส่งผลดีต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงาน แต่เนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 ซึ่งมีการใช้

พอร์ตแลนไดต์ในปริมาณที่สูง จึงทำให้ดินขาวเข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นและทำปฏิกิริยาไม่หมดจึงส่งผลทำให้ชิ้นงานมีพอร์ตแลนไดต์เหลือในปริมาณมากอีกทั้งพีคโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลนั้นมีพีคที่ไม่สูงมากดังนั้นความต้านแรงดัดของชิ้นงานจึงลดลง แต่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 จากผลองค์ประกอบเฟสมีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยพีคโทเบอร์โมไรท์นั้นจะมีพีคที่สูงขึ้นเล็กน้อย จึงทำให้ความต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นเป็น 22.86 เมกะพาสคัล ท้ายที่สุดเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมากแอนไฮไดรต์ก็จะเกิดสูงยิ่งขึ้น รวมทั้งมีพอร์ตแลนไดต์ในปริมาณที่สูงมากจึงทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 18.77 เมกะพาสคัล

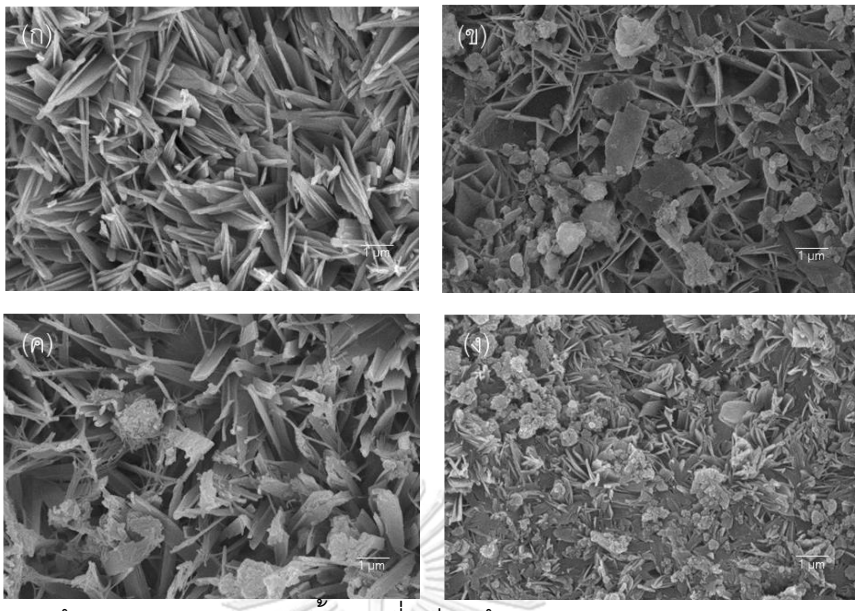


รูปที่ 4.64 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

4.5.4.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.65(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวสานกันอย่างหนาแน่น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ลักษณะผลึกที่พบจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งยาวกลายเป็นผลึกแผ่นสานกันอย่างหนาแน่น และเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจึงใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก ดังนั้นจึงพบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์บนผิวของผลึกแผ่นจำนวนมาก จากนั้นเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางปลายแหลม และมีอนุภาคพอร์ตแลนไดต์กับอนุภาคแอนไฮไดรต์กระจายบนผิวของผลึกแผ่น และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบจะพบว่ามีพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์ และแอนไฮไดรต์ในชิ้นงานในปริมาณสูง ดังนั้นผลึกแผ่นจึงพบอนุภาคของพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์และอนุภาคของแอนไฮไดรต์จำนวนมากอยู่บนผิวผลึก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.65 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05

4.5.4.2 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.22 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ

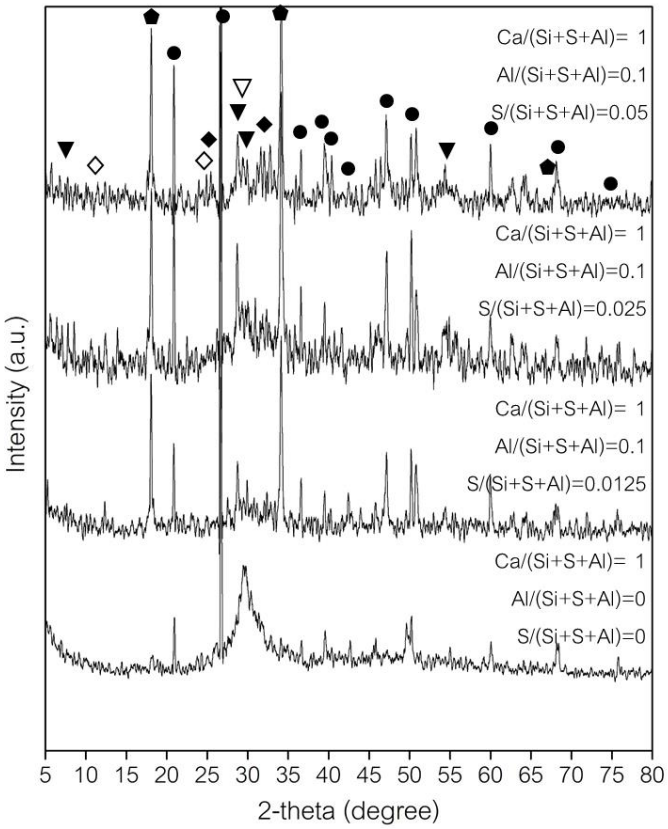
ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.1	51.06	32.67	9.48	6.80
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.1	53.05	34.01	9.53	3.41
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.1	54.05	34.69	9.56	1.70
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	55.27	44.73	0	0

4.5.4.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.66 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณดินขาวและยิปซั่มที่เติมจะมีผลต่อการเกิดเฟส โดยในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.05 ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 การเติมดินขาวในปริมาณที่มากในขณะที่เติมยิปซั่มในปริมาณน้อยนั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวกลายเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน จึงพบว่าที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 พีค ในช่วงนี้จะเปลี่ยนไปเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยที่ไม่เติมตัวเติม พบว่ากรณีที่ไม่เติมสารตัวเติมพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะมีพีคที่

ค่อนข้างสูงมาก แต่เมื่อเติมดินขาวและยิปซั่มพีคของโทเบอร์โมไรท์จะสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่พีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลลดลง ซึ่งสอดคล้องกับที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจากในกรณีดินขาวเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสเนื่องจากดินขาวจะขัดขวางการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและทำให้โทเบอร์โมไรท์เกิดได้ชัดเจนขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง จึงส่งผลทำให้มีพอร์ตแลนไดต์เหลือในปริมาณสูง ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 เท่าเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 หมายความว่ายิปซั่มจะเริ่มเข้ามาควบคุมการเกิดเฟสร่วมกับดินขาว จึงพบว่าเมื่อพิจารณาพีคโทเบอร์โมไรท์ที่ 2-theta เท่ากับ 29 นั้นจะมีพีคที่สูงขึ้น และพีคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลที่ 2-theta เท่ากับ 30 ก็จะมีพีคที่สูงขึ้นเล็กน้อยเช่นกันเนื่องจากยิปซั่มจะเข้ามาช่วยเร่งการเกิดโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล แต่ดินขาวจะเข้ามาขัดขวางการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล จึงเป็นสาเหตุที่พีคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีพีคที่สูงขึ้นเพียงเล็กน้อยและเมื่อเติมยิปซั่มเพิ่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ซึ่งเป็นการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์จะยังคงมีพีคที่สูงเนื่องจากยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ แต่เนื่องจากเติมยิปซั่มในปริมาณสูงมากตามที่ได้กล่าวข้างต้นชิ้นงานนี้จึงเกิดแอนไฮไดรต์สูงที่สุดและเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมากจึงทำให้ชิ้นงานเหลือพอร์ตแลนไดต์ในระบบสูงมากเช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.66 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมดินขาวในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

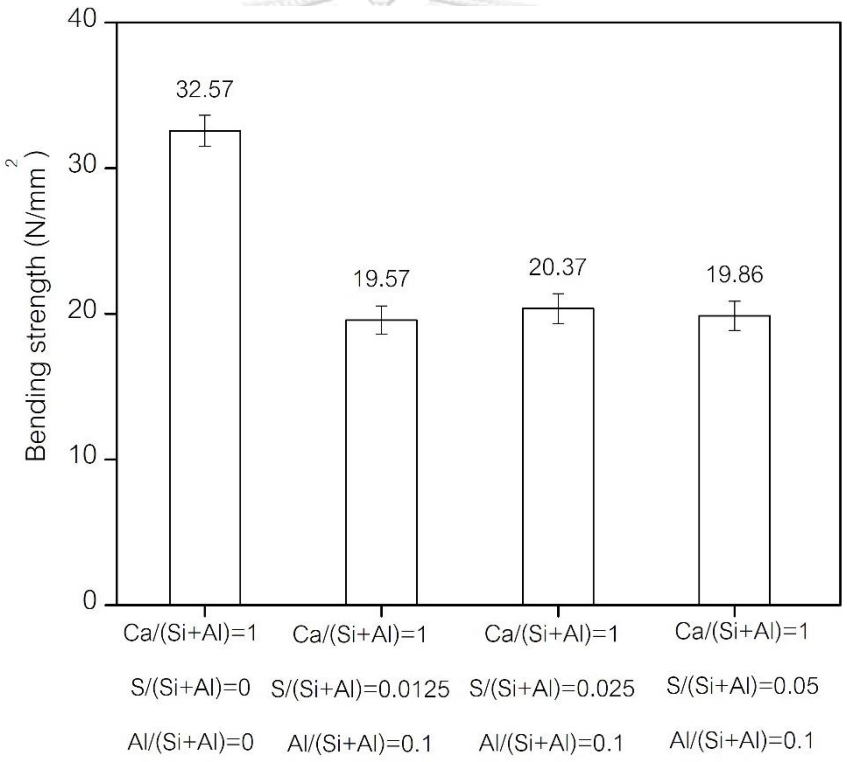
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.67 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 32.57 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเป็น 19.57 เมกะพาสคัล ซึ่งกลายเป็นว่าการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดต่ำ ต่างจากผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ อีกทั้งการเติมดินขาวในปริมาณที่สูงก็จะส่งผลให้ดินขาวเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นจึงทำให้ชิ้นงานมีพอร์ตแลนไดต์เหลือในปริมาณมาก

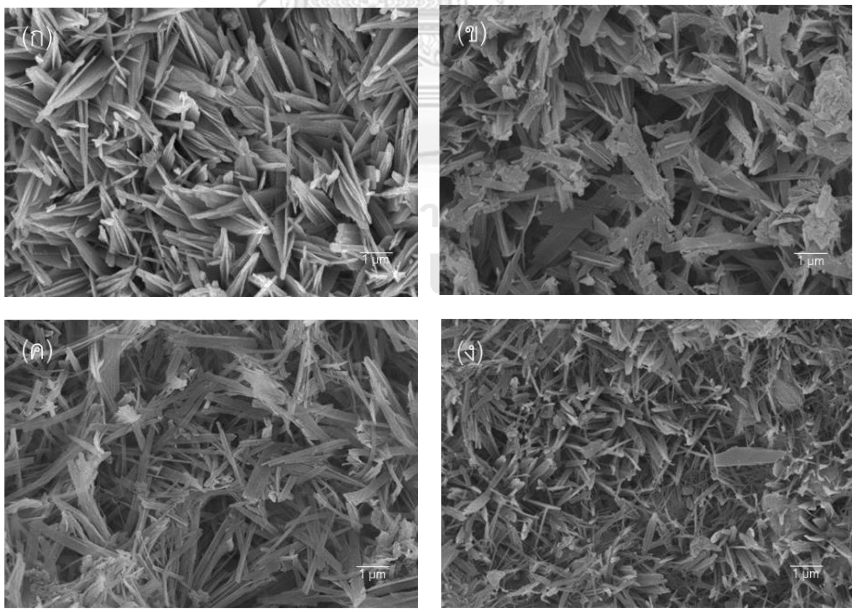
เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นความต้านแรงดัดของชิ้นงานจึงลดลง แต่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 จากผลองค์ประกอบเฟสมีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยพีคโทเบอร์โมไรท์นั้นจะมีพีคที่สูงขึ้น จึงทำให้ความต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นเป็น 20.37 เมกะพาสคัล ท้ายที่สุดเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมาก แอนไฮไดรต์ก็จะเกิดสูงยิ่งขึ้น รวมทั้งมีพอร์ตแลนไดต์ในปริมาณที่สูงมากจึงทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 19.86 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.67 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

4.5.4.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.68(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวสานกันอย่างหนาแน่น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ลักษณะผลึกที่พบจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งยาวกลายเป็นผลึกแผ่นที่มีลักษณะผลึกไม่ชัดเจน และเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจึงใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก ดังนั้นจึงพบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์บนผิวของผลึกแผ่นจำนวนมาก จากนั้นเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง โดยจะมีอนุภาคพอร์ตแลนไดต์กับอนุภาคแอนไฮไดรต์อยู่บนผิวของผลึกแผ่นเล็กน้อย และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นจะเกิดผลึกแผ่นบางผสมกับผลึกเส้นบาง



รูปที่ 4.68 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05

4.5.4.3 ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ต่างๆ

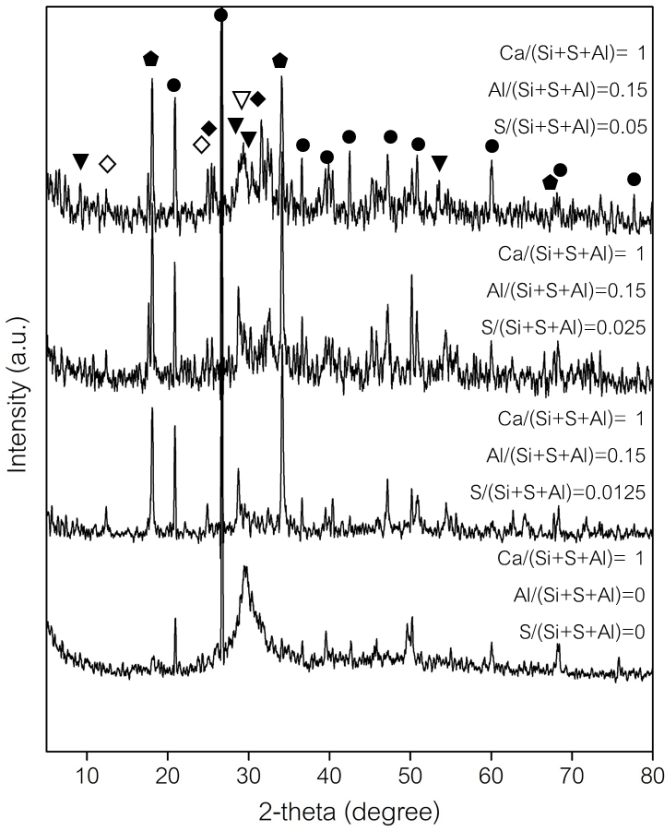
ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.15	50.85	27.83	14.54	6.77
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.15	52.84	29.13	14.63	3.40
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.15	53.84	29.79	14.68	1.69
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	55.27	44.73	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.4.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.69 การทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.0125, 0.025, 0.05 เนื่องจากเป็นการเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษา ดังนั้นดินขาวจึงเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ตามที่กล่าวมาข้างต้นจึงพบว่าที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 พีคในช่วงนี้จะเปลี่ยนไปเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยที่ไม่เติมตัวเติม พบว่ากรณีที่ไม่เติมสารตัวเติมพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะมีพีคที่ค่อนข้างสูงมาก แต่เมื่อเติมดินขาวและยิปซั่มพีคของโทเบอร์โมไรท์จะสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่พีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลลดลง เนื่องจากดินขาวเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟส โดยดินขาวจะขัดขวางการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและทำให้โทเบอร์โมไรท์เกิดได้ชัดเจนขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง จึงส่งผลทำให้มีพอร์ตแลนไดต์เหลือในปริมาณสูง ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 เท่าเดิม แต่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ดินขาวยังคงควบคุมการเกิดเฟส จึงพบว่าลักษณะพีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เตรียมด้วย Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 แต่พีคของโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะมีพีคที่สูงขึ้น เนื่องจากการเติมยิปซั่มที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ยิปซั่มเร่งการเกิดโทเบอร์โมไรท์แบะแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล สุดท้ายชิ้นงานที่เตรียมด้วย Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 เท่าเดิม และเติมยิปซั่มเพิ่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ซึ่งเป็นการเติมดินขาวและยิปซั่มในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษา ทั้งดินขาวและยิปซั่มจึงทำหน้าที่ควบคุมการเกิดเฟส โดยพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์จะยังคงมีพีคที่สูงเนื่องจากยิปซั่มจะช่วยเร่งการเกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ แต่เนื่องจากเติมยิปซั่มในปริมาณสูงมากตามที่ได้กล่าวข้างต้นชิ้นงานนี้จึงเกิดแอนไฮไดรต์สูงที่สุดและเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน

Ca/(Si+S+Al) สูงหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมากจึงทำให้ชิ้นงานเหลือพอร์ตแลนไดต์ในระบบสูงมากเช่นกัน



รูปที่ 4.69 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 5 และเติมดินขาวในอัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

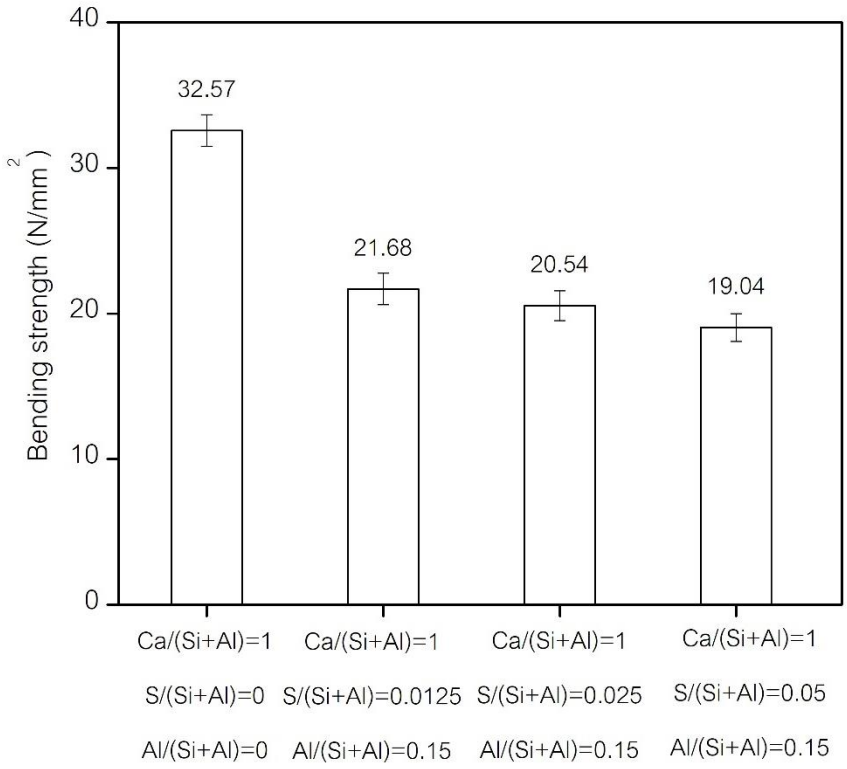
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.70 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 32.57 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเป็น 21.68 เมกะพาสคัล ซึ่งกลายเป็นว่าการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง

จะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดต่ำ ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่สูงและการเติมดินขาวในปริมาณที่สูงก็จะส่งผลให้ดินขาวเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ชิ้นงานมีพอร์ตแลนไดต์เหลือในปริมาณมาก ดังนั้นความต้านแรงดัดของชิ้นงานจึงลดลง แต่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 จากผลองค์ประกอบเฟสมีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ถึงแม้พีคโทเบอร์โมไรท์จะมีพีคที่สูงขึ้น แต่เนื่องจากชิ้นงานมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในระบบเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความต้านแรงดัดลดลงเป็น 20.54 เมกะพาสคัล ท้ายที่สุดเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงมากแอนไฮไดรต์ก็จะเกิดสูงยิ่งขึ้น รวมทั้งมีพอร์ตแลนไดต์ในปริมาณที่สูงมากจึงทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 19.04 เมกะพาสคัล

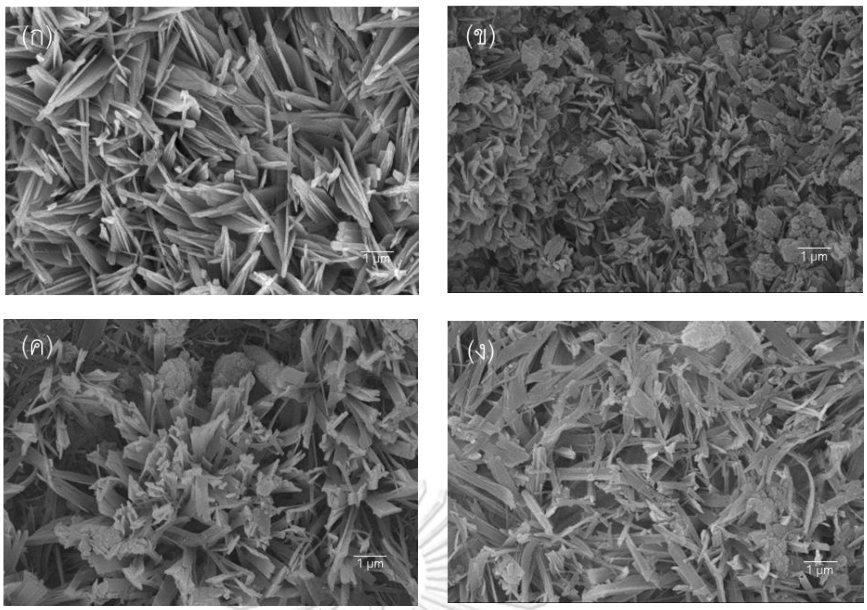


รูปที่ 4.70 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

4.5.4.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.71(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวสานกันอย่างหนาแน่น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ลักษณะผลึกที่พบจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งยาวกลายเป็นผลึกแผ่นสั้น และเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง จึงใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก ดังนั้นจึงพบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์บนผิวของผลึกแผ่นจำนวนมาก จากนั้นเมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 เช่นเดิม แต่เติมยิปซั่มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่จะมีลักษณะเป็นแผ่นยาวบาง และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ซึ่งเป็นการเติมดินขาวและยิปซั่มที่สูงที่สุดในช่วงขอบเขตการศึกษา โดยลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบจะพบว่ามีพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์ และแอนไฮไดรต์ในชิ้นงานในปริมาณสูง ดังนั้นผลึกแผ่นจึงพบอนุภาคของพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์และอนุภาคของแอนไฮไดรต์กระจายอยู่บนผิวผลึก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.71 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ (ก) 0 (ข) 0.0125 (ค) 0.025 และ (ง) 0.05

4.5.5 ผลของการเติมดินขาวของชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1 และ 0.15 ผลของการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) ตามที่กำหนด ในชิ้นงานที่เตรียมในช่วงอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ที่สูง เท่ากับ 0.8 และ 1 โดยจะศึกษาการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ในช่วงนี้จะมีผลที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังนั้นในการรายงานผลการทดลองจึงเลือกชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยผลการทดลองของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 นั้นจะระบุในภาคผนวก ข.

4.5.5.1 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05 และ 0.15 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.24

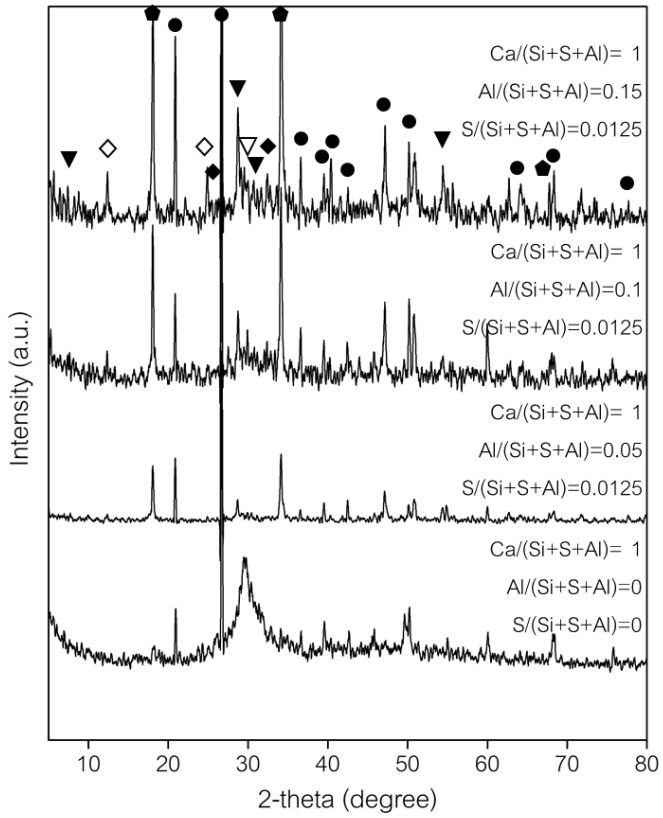
ตารางที่ 4.24 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่ม ในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.15	53.84	29.79	14.68	1.69
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.1	54.05	34.69	9.56	1.70
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	54.27	39.63	4.40	1.71
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	55.27	44.73	0	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.5.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.72 ในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 โดยการเติมยิปซั่มในปริมาณที่น้อยนั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวกลายเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 พบว่าที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 จะมีความสูงของพีคในช่วงนั้นลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมใดๆ เมื่อพิจารณาจะพบว่าพีคโทเบอร์โมไรท์จะสูงกว่าพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล เนื่องจากการที่ชิ้นงานมีการเติมดินขาวเข้าไป ดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลงและมีพอร์ตแลนไดต์เหลือในปริมาณที่สูง ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เท่าเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 การเติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน ในขณะที่เติมยิปซั่มในปริมาณต่ำ จึงทำให้ในกรณีนี้ดินขาวเป็นตัวควบคุมการเกิดเฟส โดยพีคโทเบอร์โมไรท์จะชัดเจนขึ้นเนื่องจากการเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้นดินขาวจะเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ สุดท้ายชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เท่าเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 การเติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุด นั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง ในขณะเดียวเฟสโทเบอร์โมไรท์ก็จะเกิดชัดเจนขึ้น แต่ในกรณีนี้เมื่อมีการเติมดินขาวในปริมาณมากก็จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูง และในทุกๆชิ้นงานที่มีการเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มจะมีพอร์ตแลนไดต์เหลือในระบบทั้งหมด



รูปที่ 4.72 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

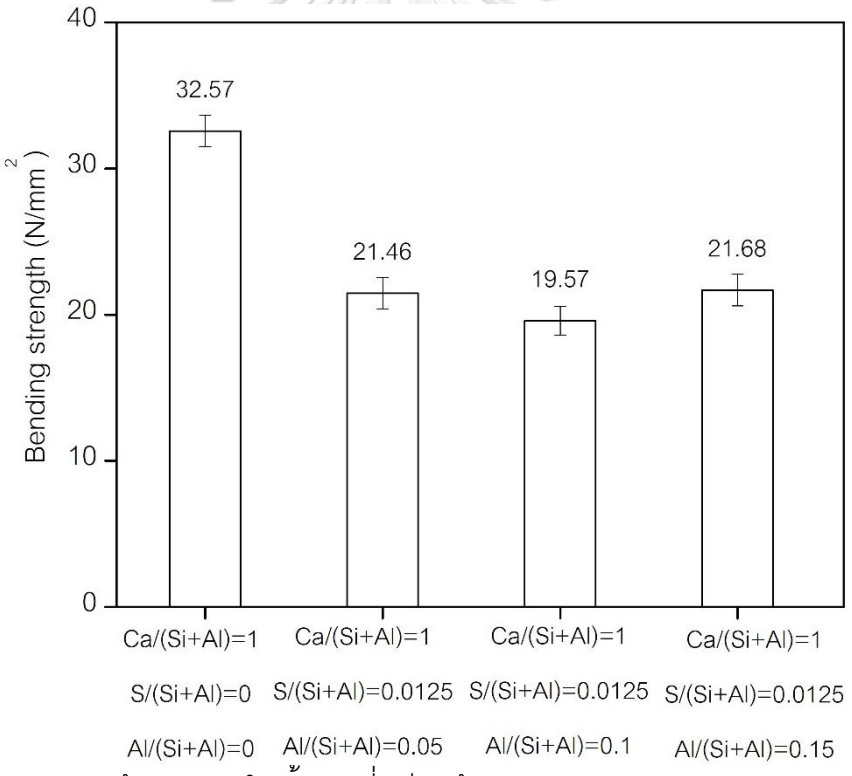
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.5.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.73 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 32.57 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเป็น 21.46 เมกะพาสคัล เนื่องจากการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่สูงและการเติมดินขาวในก็จะส่งผลให้ดินขาวเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงทำให้ความต้านแรงดัดต่ำ เมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และ

เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 จากผลองค์ประกอบเฟสถึงแม้เฟสโทเบอร์โมไรท์จะมีพีคที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 แต่การเติมดินขาวในปริมาณสูงจะทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดไม่สมบูรณ์มีสารตั้งต้นเหลืออยู่ในชิ้นงานปริมาณมาก ความต้านแรงดัดของชิ้นงานจึงมีค่าไม่แตกต่าง เท่ากับ 19.57 เมกะพาสคัล และเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงมากดินขาวก็จะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเช่นเดิม แต่ในกรณีนี้จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูงซึ่งเกิดจากการที่เติมดินขาวในปริมาณที่มากทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานไม่ได้เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 21.68 เมกะพาสคัล

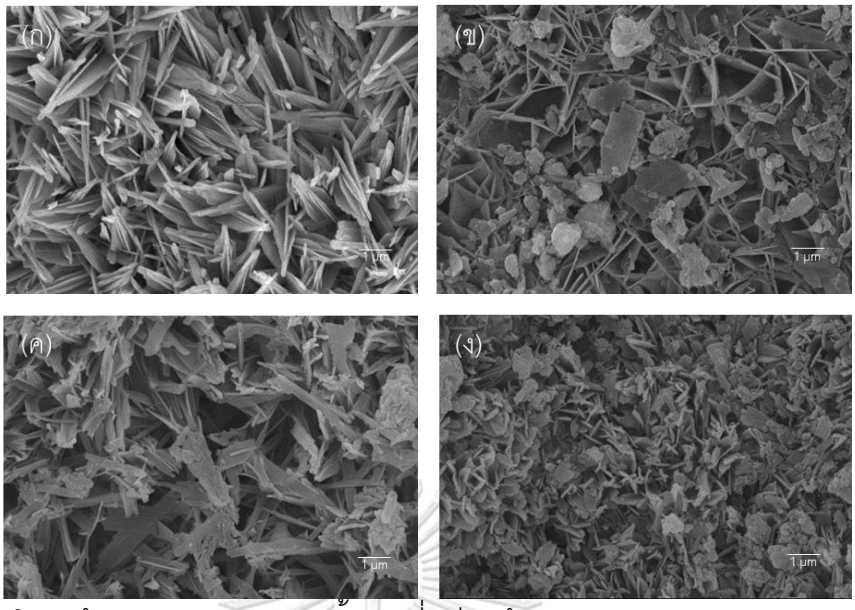


รูปที่ 4.73 ค่าความต้านแรงดัดในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

4.5.5.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.74(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวสานกันอย่างหนาแน่น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ลักษณะผลึกที่พบจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแผ่นที่สานกันอย่างหนาแน่น และเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง จึงใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก ดังนั้นจึงพบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์บนผิวของผลึกแผ่นจำนวนมาก จากนั้นเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกจะที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง และเนื่องจากชิ้นงานเติมดินขาวในปริมาณสูง จึงทำให้พบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์และดินขาวบนผิวผลึก และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ซึ่งเป็นการเติมดินขาวสูงที่สุดในช่วงขอบเขตการศึกษา โดยลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นสั้น ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบจะพบว่ามีพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์ และแอนไฮไดรต์ในชิ้นงานในปริมาณสูง ดังนั้นผลึกแผ่นจึงพบอนุภาคของพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์ และอนุภาคของแอนไฮไดรต์กระจายอยู่บนผิวผลึกจำนวนมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.74 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.5.5.2 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05 และ 0.15 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.25 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่างๆ

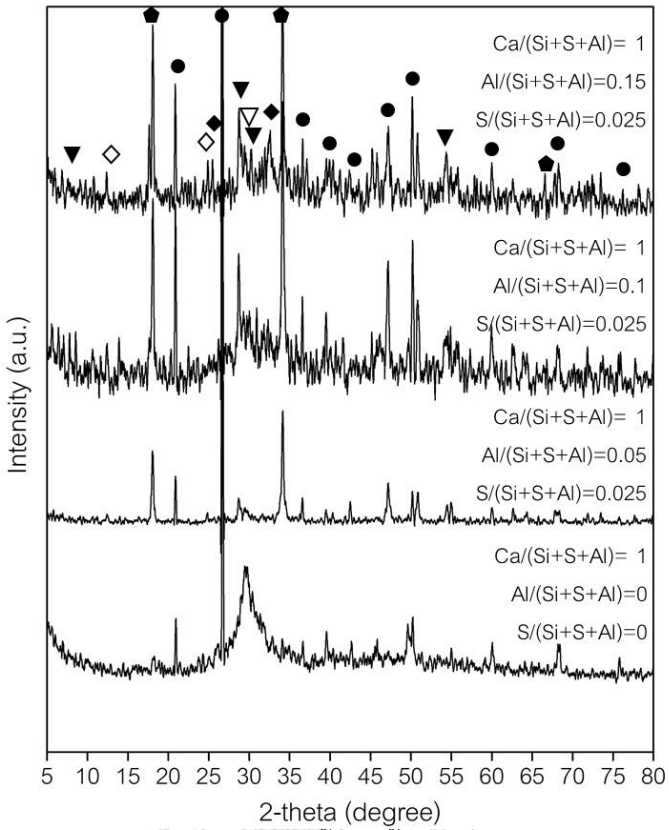
ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.15	52.84	29.13	14.63	3.40
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.1	53.05	34.01	9.53	3.41
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.05	53.26	38.93	4.39	3.43
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	55.27	44.73	0	0

4.5.5.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.75 ในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 โดยการเติมยิปซั่มในปริมาณที่ค่อนข้างสูงนั้นจะส่งผลทำให้ยิปซั่มกลายเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 พบว่าที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 ความสูงของพีคในช่วงนั้นจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมใดๆ เนื่องจากการที่ชิ้นงานมีการเติมยิปซั่มและดินขาวเข้าไป ยิปซั่มจะทำให้พีคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลชัดเจนขึ้น แต่ดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลงและมีพอร์ตแลนไดต์เหลือในปริมาณที่สูง ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 เท่าเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 การเติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเริ่มควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานร่วมกับยิปซั่ม โดยพีคโทเบอร์โมไรท์จะชัดเจนขึ้นเนื่องจากการเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้นดินขาวจะเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ แต่ก็จะมีพอร์ตแลนไดต์เหลือในระบบปริมาณสูงมาก สุดท้ายชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 เท่าเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 การเติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุด นั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง ในขณะเดียวเฟสโทเบอร์โมไรท์ก็จะเกิดชัดเจนขึ้น แต่ในกรณีนี้เมื่อมีการเติมดินขาวในปริมาณมากก็จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.75 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

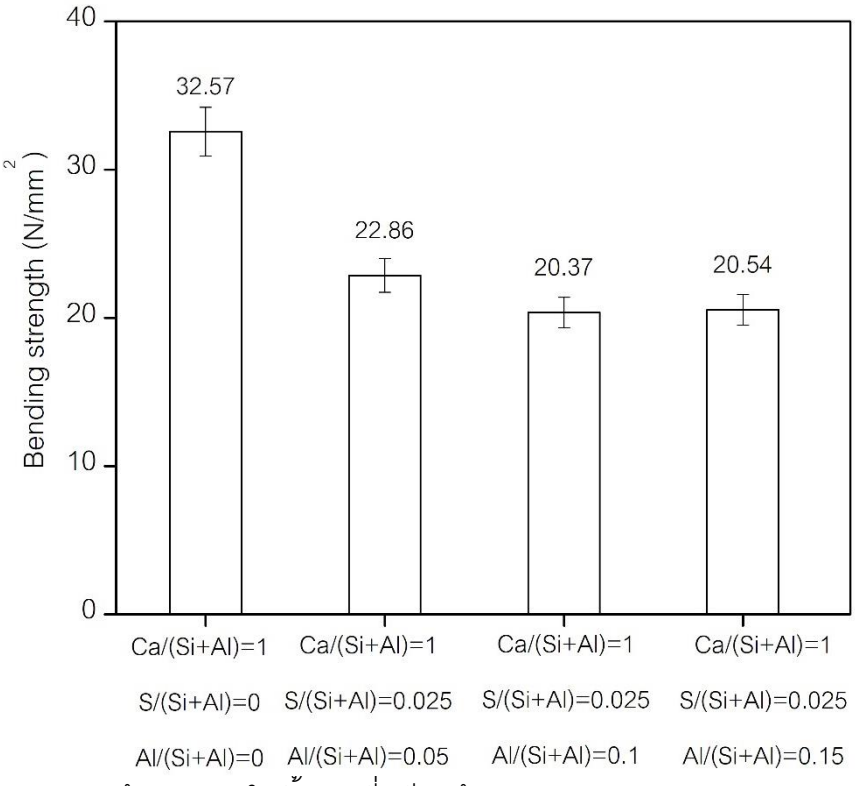
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.5.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.76 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 32.57 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเป็น 22.86 เมกะพาสคัล เนื่องจากการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่สูงและการเติมดินขาวในก็จะส่งผลให้ดินขาวเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงทำให้ความต้านแรงดัดต่ำ เมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และ

เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 จากผลองค์ประกอบเฟสถึงแม้เฟสโทเบอร์โมไรท์จะมีพีคที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 แต่การเติมดินขาวในปริมาณสูงจะทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดไม่สมบูรณ์มีสารตั้งต้นเหลืออยู่ในชิ้นงานปริมาณมาก ความต้านแรงดัดของชิ้นงานจึงมีค่าไม่แตกต่าง เท่ากับ 20.37 เมกะพาสคัล และเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงมากดินขาวก็จะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเช่นเดิม แต่ในกรณีนี้จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูงซึ่งเกิดจากการที่เติมดินขาวในปริมาณที่มากทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานไม่ได้เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 20.54 เมกะพาสคัล

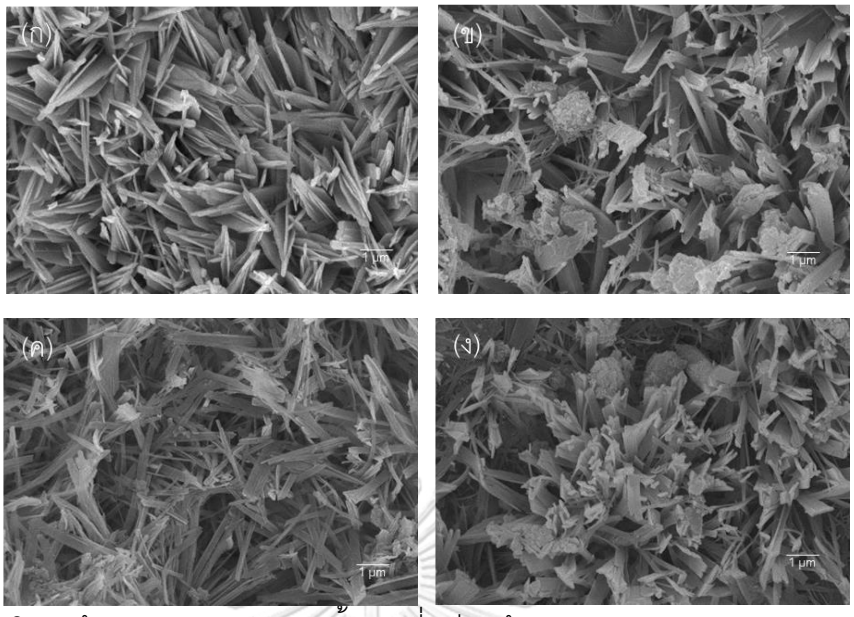


รูปที่ 4.76 ค่าความต้านแรงดัดในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

4.5.5.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.77(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวสานกันอย่างหนาแน่น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ลักษณะผลึกที่พบจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งเป็นผลึกแผ่นบาง และเนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจึงใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก ดังนั้นจึงพบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์บนผิวของผลึกแผ่นจำนวนมาก จากนั้นเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกจะที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางเช่นเดิม แต่ความกว้างของแผ่นผลึกจะลดลง และเนื่องจากชิ้นงานเติมดินขาวในปริมาณสูง จึงทำให้พบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์และดินขาวบนผิวผลึก และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ซึ่งเป็นการเติมดินขาวสูงที่สุดในช่วงขอบเขตการศึกษา โดยลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบจะพบว่ามีพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์ และแอนไฮไดรต์ในชิ้นงานในปริมาณสูง ดังนั้นผลึกแผ่นจึงพบอนุภาคของพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์และอนุภาคของแอนไฮไดรต์กระจายอยู่บนผิวผลึกจำนวนมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.77 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.5.5.3 ผลของอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05 และ 0.15 จากนั้นจะศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ต่างๆ

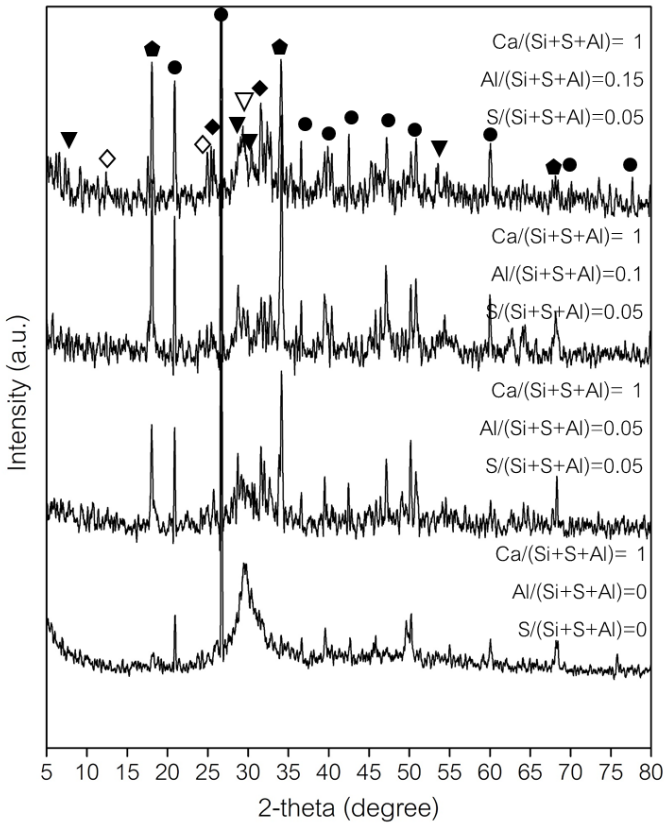
ตัวอย่างที่ศึกษา	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)	ทราย (wt%)	ดินขาว (wt%)	ยิปซั่ม (wt%)
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.15	52.84	29.13	14.63	3.40
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.1	53.05	34.01	9.53	3.41
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.05	53.26	38.93	4.39	3.43
Ca/(Si+S+Al) = 1, S/(Si+S+Al) =0, Al/(Si+S+Al) = 0	55.27	44.73	0	0

4.5.5.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.78 ในการทดลองนี้จะศึกษาการเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0, 0.05, 0.1 และ 0.15 โดยการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงนั้นจะส่งผลทำให้ยิปซั่มกลายเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานเมื่อเติมดินขาวในปริมาณต่ำ โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 พบว่าที่ 2-theta ในช่วง 28 ถึง 32 ลักษณะพีคจะเปลี่ยนแปลงไป โดยจากเดิมชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลที่ 2-theta เท่ากับ 30 จะมีพีคที่สูงกว่าพีคของโทเบอร์โมไรท์ที่ 2-theta เท่ากับ 29 เมื่อเติมดินขาวกับยิปซั่มร่วมกัน ยิปซั่มซึ่งเป็นตัวควบคุมการเกิดเฟสจะทำให้เฟส

โทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีพีคที่สูง แต่ดินขาวจะขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นทำให้มีพอร์ตแลนไดต์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลือในระบบสูงทำให้พีคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีความสูงลดลง และทำให้โทเบอร์โมไรท์มีพีคที่ชัดเจนขึ้น ดังนั้นพีคโทเบอร์โมไรท์จึงมีพีคสูงกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล นอกจากนี้การเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงก็จะทำให้เกิดแอนไฮไดรต์ในปริมาณมาก ต่อมาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เท่าเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ยิปซั่ม พีคโทเบอร์โมไรท์นั้นจะมีพีคที่สูงขึ้นเล็กน้อย แต่โดยรวมจะมีลักษณะการเกิดเฟสคล้ายกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เนื่องจากยิปซั่มยังคงเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟส และการเติมยิปซั่มในช่วงนี้ยังคงช่วยเร่งการเกิดเฟสโทเบอร์โมไรท์ แต่ถึงอย่างนั้นกลับเร่งได้ไม่มากนัก เนื่องจากดินขาวจะเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยานั่นเอง สำหรับการเติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุด นั้นจะส่งผลทำให้ดินขาวจะเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดเฟสของชิ้นงานร่วมกับยิปซั่ม ดินขาวจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลเกิดได้น้อยลง ในขณะเดียวเฟสโทเบอร์โมไรท์ก็จะเกิดชัดเจนขึ้น แต่ในกรณีนี้เมื่อมีการเติมดินขาวและยิปซั่มในปริมาณมาก ก็จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบและเกิดแอนไฮไดรต์ในปริมาณสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.78 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

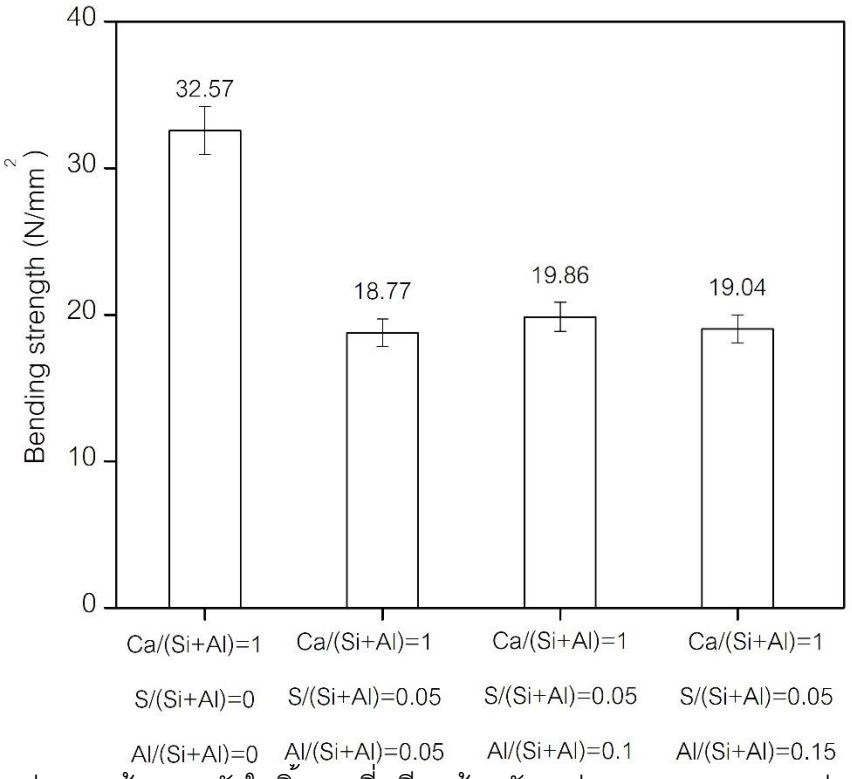
(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.5.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน

ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.79 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 โดยไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเท่ากับ 32.57 เมกะพาสคัล เมื่อมีการเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเป็น 18.77 เมกะพาสคัล การถึงแม้เติมยิปซั่มจะช่วยเพิ่มความต้านแรงดัดให้กับชิ้นงานตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แต่การเติมยิปซั่มในปริมาณสูงจะทำให้แอนไฮเดรต์เกิดในปริมาณมาก อีกทั้งการเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจะใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่สูง และการเติมดินขาวก็จะส่งผลให้ดินขาวเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น

ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงทำให้ความต้านแรงดัดต่ำ เมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 การเติมดินขาวในปริมาณสูงจะทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดไม่สมบูรณ์มีสารตั้งต้นเหลืออยู่ในชิ้นงานปริมาณมาก ความต้านแรงดัดของชิ้นงานจึงมีค่าไม่แตกต่าง เท่ากับ 19.86 เมกะพาสคัล และเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตศึกษา ดินขาวก็จะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเช่นเดิม แต่ในกรณีนี้จะมีเกาลินไนต์หลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณสูงซึ่งเกิดจากการที่เติมดินขาวในปริมาณที่มากทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานไม่ได้เพิ่มขึ้นและแอนไฮไดรต์ก็จะเกิดในปริมาณที่สูงเนื่องจากชิ้นงานนี้เติมยิปซั่มในปริมาณสูง ความต้านแรงดัดของชิ้นงานจึงมีค่าต่ำ โดยมีค่าเท่ากับ 19.04 เมกะพาสคัล

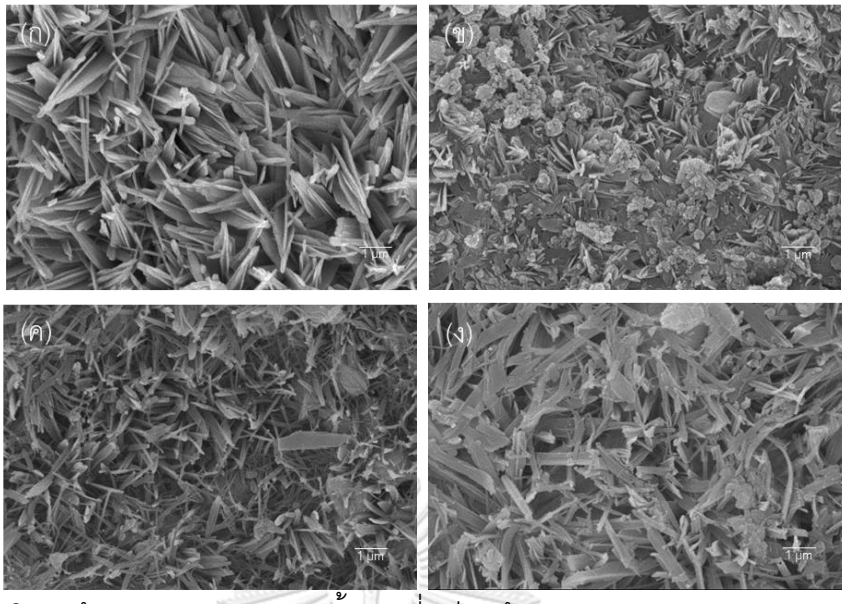


รูปที่ 4.79 ค่าความต้านแรงดัดในชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วนAl/(Si+S+Al) ค่าต่างๆ

4.5.5.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้ง 4 ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.80(ก-ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และไม่เติมสารตัวเติม ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวสานกันอย่างหนาแน่น เมื่อเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ลักษณะผลึกที่พบจะเปลี่ยนแปลงจากผลึกแท่งเป็นผลึกแผ่นเล็ก เนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงจึงใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก อีกทั้งยังเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาจึงเกิดแอนไฮไดรต์ในชิ้นงาน ดังนั้นจึงพบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์และแอนไฮไดรต์บนผิวของผลึกแผ่นจำนวนมาก จากนั้นเมื่อเติมดินขาวในปริมาณที่สูงขึ้น โดยเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 เช่นเดิม แต่เติมดินขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางยาว และเนื่องจากชิ้นงานเติมดินขาวและยิปซั่มในปริมาณสูง จึงทำให้พบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์ อนุภาคแอนไฮไดรต์ และดินขาวบนผิวผลึกแผ่น และสุดท้ายชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 1 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 ซึ่งเป็นการเติมดินขาวสูงที่สุดในช่วงขอบเขตการศึกษา ลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางยาวเช่นเดิม ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบจะพบว่ามีพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์ และแอนไฮไดรต์ในชิ้นงานในปริมาณสูง ดังนั้นผลึกแผ่นจึงพบอนุภาคของพอร์ตแลนไดต์ เกาลินไนต์และอนุภาคของแอนไฮไดรต์กระจายอยู่บนผิวผลึกจำนวนมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.80 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(SI+S+Al) เท่ากับ 1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) (ก) 0 (ข) 0.05 (ค) 0.1 และ (ง) 0.15

4.5.6 สรุปผลการทดลองผลการเติมดินขาวและยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) พบว่าการเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) จะส่งผลทำให้มีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงาน เนื่องจากใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก ส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 จะมีพีคของเฟสโทเบอร์โมไรท์สูงและไม่มีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานจึงมีค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุด เท่ากับ 33.16 เมกะพาสคัล โดยผลึกจะมีรูปร่างเป็นแผ่น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ผลึกยังคงเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่จะพบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์บนผิวผลึกแผ่นในปริมาณที่สูงขึ้น ในส่วนของการศึกษาผลของการเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มจะแบ่งผลการทดลองเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ และอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง โดยเมื่อเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ เท่ากับ 0.4 และ 0.6 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณดินขาวและยิปซั่มที่เติมจะมีผลต่อการเกิดเฟส ผลของการเติมยิปซั่มนั้นจะขึ้นกับปริมาณดินขาวที่เติมด้วย เมื่อเติมดินขาวในปริมาณน้อย ยิปซั่มจะควบคุมการเกิดปฏิกิริยาโดยการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้เฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์มีปริมาณที่สูงขึ้น แต่เมื่อชิ้นงานนั้นมีการเติม

ดินขาวในปริมาณที่สูง ดินขาวก็จะเริ่มควบคุมการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับยิปซั่มส่งผลทำให้พีคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลลดลงแต่พีคของโทเบอร์โมไรท์จะยังคงชัดเจนอยู่ เช่นเดียวกับผลของการเติมดินขาว เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณน้อยดินขาวจะควบคุมการเกิดปฏิกิริยา เฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะลดลงในขณะที่เฟสโทเบอร์โมไรท์จะชัดเจนขึ้น แต่เมื่อชิ้นงานนั้นมีการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูง ยิปซั่มก็จะเริ่มควบคุมการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับดินขาวส่งผลทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์เกิดในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะขึ้นกับสารตัวเติมที่เป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยา โดยเมื่อดินขาวเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดปฏิกิริยา การเติมดินขาวในปริมาณมากจะส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดจะมีค่าลดลง ในขณะเดียวกันเมื่อยิปซั่มเป็นตัวเติมที่ควบคุมการเกิดปฏิกิริยา การเติมยิปซั่มในปริมาณที่เหมาะสมก็จะทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น สำหรับผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นจัดเรียงกันหนาแน่นในทุกกรณีที่เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม แตกต่างกันตรงที่เมื่อเติมดินขาวในปริมาณสูงจะมีอนุภาคเกาลินไนท์อยู่บนพื้นผิวผลึกโทเบอร์โมไรท์สูง ในขณะที่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณสูงก็จะมีอนุภาคแอนไฮไดรต์อยู่บนพื้นผิวผลึกโทเบอร์โมไรท์สูง แต่เมื่อเตรียมชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง เท่ากับ 0.8 และ 1 ซึ่งใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก จึงมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานในปริมาณมาก ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นมีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ แต่ในกรณีนี้จะมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานในปริมาณสูง จึงส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานมีค่าต่ำในทุกกรณี ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นผลึกแท่งบาง และเมื่อเติมดินขาวในปริมาณสูงก็จะมีอนุภาคเกาลินไนท์อยู่บนพื้นผิวผลึกโทเบอร์โมไรท์สูง ในขณะที่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณสูงก็จะมีอนุภาคแอนไฮไดรต์อยู่บนพื้นผิวผลึกโทเบอร์โมไรท์สูง

Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/Si และผลของการเติมดินขาวและยิปซั่มในอัตราส่วนต่างๆต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส วิเคราะห์พันธะของสาร วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงาน จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการศึกษาผลของอัตราส่วน Ca/Si ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si เฟสโทเบอร์โมไรท์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดของชิ้นงานเพิ่มขึ้น โดยลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นเมื่อเตรียมชิ้นงานด้วยอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 0.4 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/Si ผลึกจะเปลี่ยนแปลงกลายเป็นผลึกแท่งสานกันอย่างหนาแน่น โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/Si เท่ากับ 1 จะมีค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดเท่ากับ 32.57 เมกะพาสคัล

2. จากการศึกษาผลของการเติมยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ พบว่ายิปซั่มจะเร่งให้เกิดเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์ได้ดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมยิปซั่มมากเกินไปก็จะส่งผลทำให้เกิดเฟสแอนไฮไดรต์ โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/(Si+S) ที่ 0.0125 จนถึง 0.025 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเติมยิปซั่ม ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน S/(Si+S) สูงกว่า 0.025 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะลดลงเนื่องจากปริมาณแอนไฮไดรต์ที่เกิดขึ้นมีผลต่อความต้านแรงดัดของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S) เท่ากับ 0.8 และเติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S) เท่ากับ 0.0125 จะมีค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดเท่ากับ 40.6 เมกะพาสคัล

3. จากการศึกษาผลของการเติมดินขาวต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ พบว่าการเติมดินขาวจะทำให้พีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลมีความสูงลดลง ในขณะที่พีคของโทเบอร์โมไรท์จะยิ่งชัดเจนขึ้น โดยดินขาวจะเข้าไปเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคพอร์ตแลนไดต์และขัดขวางการละลายของพอร์ตแลนไดต์ ส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดได้น้อยลง ความต้านแรงดัดของชิ้นงานจึงลดลง สำหรับลักษณะของผลึกเมื่อเติมดินขาวผลึกจะมีลักษณะเป็นแท่งสานกัน แต่จะมีอนุภาคดินขาวเกาะบนพื้นผิวของผลึก โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Ca/(Si+Al) เท่ากับ 1 และเติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 จะมีค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดเท่ากับ 22.13 เมกะพาสคัล

4. จากการศึกษาผลของการเติมดินขาวและยิปซั่มต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมดินขาวและชิ้นงานที่เติมยิปซั่ม สามารถแบ่งกลุ่มผลการทดลองที่มีผลที่คล้ายคลึงกันได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ เท่ากับ 0.4 กับ 0.6 ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสพบว่าจะเกิดพีคของโทเบอร์โมไรท์ที่ชัดเจนกว่าชิ้นงานอื่นๆ นอกจากนี้เนื่องจากชิ้นงานเตรียมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำหรือใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่ไม่มาก จึงทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์ไม่พบพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในระบบ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดัดสูง โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 จะมีค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดเท่ากับ 33.16 เมกะพาสคัล และผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นแท่งผสมกับแผ่นจัดเรียงกันหนาแน่น ในส่วนของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูงเท่ากับ 0.8 กับ 1 ซึ่งใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก จึงมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานในปริมาณสูง ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านแรงดัดต่ำ และผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นผลึกแท่งสั้น โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 และเติมยิปซั่มร่วมกับดินขาวที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และอัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05 จะมีค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุดเท่ากับ 33.16 เมกะพาสคัล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5. จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) และผลของการเติมสารตัวเติมของชิ้นงานที่เติมดินขาวและยิปซั่มร่วมกัน พบว่าการเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) จะส่งผลทำให้มีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานลดลง โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.4 จะมีพีคของเฟสโทเบอร์โมไรท์สูงและไม่มีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานจึงมีค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุด เท่ากับ 33.16 เมกะพาสคัล โดยผลึกจะมีรูปร่างเป็นแผ่น และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ผลึกก็ยังคงเป็นแผ่นเช่นเดิมแต่จะพบอนุภาคพอร์ตแลนไดต์บนผิวผลึกแผ่นในปริมาณที่สูงขึ้น ในส่วนของการศึกษาผลของการเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มจะแบ่งผลการทดลองเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ และอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง

5.1 ชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ เท่ากับ 0.4 และ 0.6 จากผลการทดลองพบว่าผลของการเติมยิปซั่มหรือดินขาวนั้นจะขึ้นกับปริมาณสารตัวเติมอีกตัวที่เติมด้วย เช่นเมื่อเติมดินขาว

ในปริมาณน้อย ยิปซั่มจะควบคุมการเกิดปฏิกิริยาโดยการเติมยิปซั่มในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้เฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและโทเบอร์โมไรท์มีปริมาณที่สูงขึ้น แต่เมื่อชิ้นงานนั้นมีการเติมดินขาวในปริมาณที่สูง ดินขาวก็จะเริ่มควบคุมการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับยิปซั่มส่งผลทำให้พีคแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลลดลงแต่พีคของโทเบอร์โมไรท์จะยังคงชัดเจนอยู่ เช่นเดียวกับผลของการเติมดินขาว ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) และ S/(Si+S+Al) จะส่งผลต่อการเกิดเฟสในลักษณะเดียวกับการเติมยิปซั่มและดินขาวเพียงอย่างเดียว โดยค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานจะขึ้นกับสารตัวเติมที่เป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยา โดยผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นจัดเรียงกันหนาแน่นในทุกกรณีที่เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม แตกต่างกันตรงที่เมื่อเติมดินขาวในปริมาณสูงจะมีอนุภาคเกาลินไนท์อยู่บนพื้นผิวผลึกโทเบอร์โมไรท์สูง ในขณะที่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณสูงก็จะมีอนุภาคแอนไฮไดรต์อยู่บนพื้นผิวผลึกโทเบอร์โมไรท์สูง

5.2 ชิ้นงานที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) สูง เท่ากับ 0.8 และ 1 ซึ่งใช้พอร์ตแลนไดต์เป็นสารตั้งต้นในปริมาณมาก จึงมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานในปริมาณสูง ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นมีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) ต่ำ แต่ในกรณีนี้จะมีพอร์ตแลนไดต์หลงเหลือในชิ้นงานในปริมาณสูง จึงส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานมีค่าต่ำทุกกรณี ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นผลึกแท่งบาง และเมื่อเติมดินขาวในปริมาณสูงก็จะมีอนุภาคเกาลินไนท์อยู่บนพื้นผิวผลึกโทเบอร์โมไรท์สูง ในขณะที่เมื่อเติมยิปซั่มในปริมาณสูงก็จะมีอนุภาคแอนไฮไดรต์อยู่บนพื้นผิวผลึกโทเบอร์โมไรท์สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

1. Allen AJ, Thomas JJ, Jennings HM. Composition and density of nanoscale calcium–silicate–hydrate in cement. Nature Materials. 2007;6:311-316.

2. Alexanderson J. Relations between structure and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. Cement and Concrete Research. 1979;9(4):507-514.

3. Chen M, Lu L, Wang S, Zhao P, Zhang W, Zhang S. Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing. Construction and Building Materials. 2017;143:280-288.

4. Soroushian P, Aouadi F, Chowdhury H, Nossoni A, Sarwar G. Cement-bonded straw board subjected to accelerated processing. Cement and Concrete Composites. 2004;26(7):797-802.

5. Hou D, Zhang J, Li Z, Zhu Y. Uniaxial tension study of calcium silicate hydrate (C–S–H): structure, dynamics and mechanical properties. Materials and Structures. 2015;48(11):3811-3824.

6. Maeda H, Ioku K, Ishida EH. Hydrothermal synthesis of tobermorite/hydroxyapatite composites. Materials Letters. 2008;62(17):3291-3293.

7. Richardson IG. The calcium silicate hydrates. Cement and Concrete Research. 2008;38(2):137-158.

8. Watanabe O, Kitamura K, Maenami H, Ishida H. Hydrothermal treatment of a silica sand complex with lime. Journal of the American Ceramic Society. 2004;84:2318-2322.

9. Shaw S, Clark SM, Henderson CMB. Hydrothermal formation of the calcium silicate hydrates, tobermorite ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O$) and xonotlite ($Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$): an in situ synchrotron study. Chemical Geology. 2000;167(1):129-140.

10. Jing Z, Jin F, Hashida T, Yamasaki N, Ishida EH. Influence of tobermorite formation on mechanical properties of hydrothermally solidified blast furnace slag. Journal of Materials Science. 2008;43(7):2356-2361.

11. Klimesch DS, Ray A. DTA-TGA evaluations of the $CaO–Al_2O_3–SiO_2–H_2O$ system treated hydrothermally. Thermochimica Acta. 1999;334(1):115-122.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

12. L'Hôpital E, Lothenbach B, Le Saout G, Kulik D, Scrivener K. Incorporation of aluminium in calcium-silicate-hydrates. Cement and Concrete Research. 2015;75:91-103.

13. Myers RJ, L'Hôpital E, Provis JL, Lothenbach B. Effect of temperature and aluminium on calcium (alumino)silicate hydrate chemistry under equilibrium conditions. Cement and Concrete Research. 2015;68:83-93.

14. Ríos CA, Williams CD, Fullen MA. Hydrothermal synthesis of hydrogarnet and tobermorite at 175 °C from kaolinite and metakaolinite in the $CaO–Al_2O_3–SiO_2–H_2O$ system: A comparative study. Applied Clay Science. 2009;43(2):228-237.

15. Mostafa NY, Shaltout AA, Omar H, Abo-El-Enein SA. Hydrothermal synthesis and characterization of aluminium and sulfate substituted 1.1nm tobermorites. Journal of Alloys and Compounds. 2009;467(1):332-337.

16. Baltakys K. Influence of gypsum additive on the formation of calcium silicate hydrates in mixtures with C/S = 0.83 or 1.0. Materials Science. 2009;27(4):1091-1101.

17. Mitsuda T, Taylor HFW. Influence of aluminium on the conversion of calcium silicate hydrate gels into 11 Å tobermorite at 90°C and 120°C. Cement and Concrete Research. 1975;5(3):203-209.

18. Bell NS, Venigalla S, Gill PM, Adair JH. Morphological forms of tobermorite in hydrothermally treated calcium silicate hydrate gels. Journal of the American Ceramic Society. 1996;79(8):2175-2178.

19. Cong X, Kirkpatrick RJ. 29Si MAS NMR study of the structure of calcium silicate hydrate. Advanced Cement Based Materials. 1996;3(3):144-156.

20. Hou D, Ma H, Li Z. Morphology of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel: a molecular dynamic study. Advances in Cement Research. 2015;27(3):135-146.

21. Geng G, Myers RJ, Li J, Maboudian R, Carraro C, Shapiro DA, et al. Aluminum-induced dreierketten chain cross-links increase the mechanical properties of nanocrystalline calcium aluminosilicate hydrate. Scientific Reports. 2017;7:1-10.

22. Chen JJ, Thomas JJ, Taylor HFW, Jennings HM. Solubility and structure of calcium silicate hydrate. Cement and Concrete Research. 2004;34(9):1499-1519.

23. He Y, Zhao X, Lu L, Struble LJ, Hu S. Effect of C/S ratio on morphology and

structure of hydrothermally synthesized calcium silicate hydrate. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed. 2011;26(4):770-773.

24. Hong SY, Glasser FP. Phase relations in the $CaO–SiO_2–H_2O$ system to 200 °C at saturated steam pressure. Cement and Concrete Research. 2004;34(9):1529-1534.

25. Luke K. Phase studies of pozzolanic stabilized calcium silicate hydrates at 180 °C. Cement and Concrete Research. 2004;34(9):1725-1732.

26. Renaudin G, Russias J, Leroux F, Frizon F, Cau-dit-Coumes C. Structural characterization of C–S–H and C–A–S–H samples—Part I: Long-range order investigated by Rietveld analyses. Journal of Solid State Chemistry. 2009;182(12):3312-3319.

27. Shan C, Jing Z, Pan L, Zhou L, Pan X, Lu L. Hydrothermal solidification of municipal solid waste incineration fly ash. Research on Chemical Intermediates. 2011;37(2):551-565.

28. Maenami H, Watanabe O, Ishida H, Mitsuda T. Hydrothermal solidification of kaolinite–quartz–lime mixtures. Journal of the American Ceramic Society. 2000;83(7):1739-1744.

29. Rabenau A. The Role of Hydrothermal Synthesis in Preparative Chemistry. Angewandte Chemie. 1985;24(12):1026-1040.

30. Rodrigues FA, Monteiro PJM. Hydrothermal synthesis of cements from rice hull ash. Journal of Materials Science Letters. 1999;18(19):1551-1552.

31. NocuÒ-Wczelik W. Effect of Na and Al on the phase composition and morphology of autoclaved calcium silicate hydrates. Cement and Concrete Research. 1999;29(11):1759-1767.

32. Herzog A, Mitchell JK. Reactions accompanying stabilization of clay with cement Journal of the Transportation Research Board. 1963(36):146-171.

33. Houston JR, Maxwell RS, Carroll SA. Transformation of meta-stable calcium silicate hydrates to tobermorite: reaction kinetics and molecular structure from XRD and NMR spectroscopy. Geochemical Transactions. 2009;10(1):1.

34. Yu P, Kirkpatrick RJ, Poe B, McMillan PF, Cong X. Structure of calcium silicate hydrate (C-S-H): near-, mid-, and far-infrared spectroscopy. Journal of the American

Ceramic Society. 1999;82(3):742-748.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.

ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) และ Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่อ
อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) และ Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียว และชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียว

1.1 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1.1

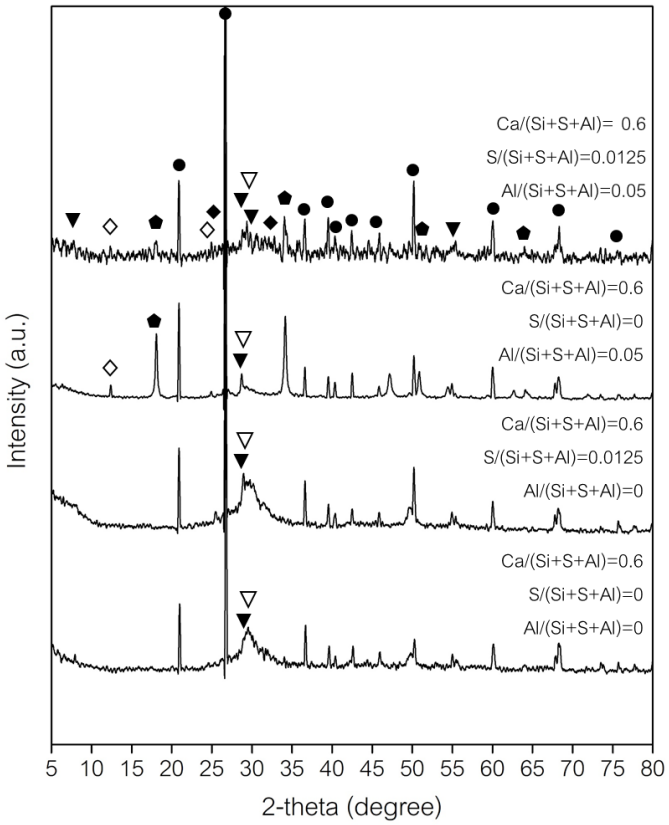
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 1.1 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	42.54	57.46	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.0125 Al/(Si+S+Al) = 0	41.23	56.48	0	2.29
Ca/(Si+S+Al) =0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) =0.05	42.51	51.73	5.76	0
Ca/(Si+S+Al) =0.6, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) =0.05	41.28	50.78	5.74	2.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

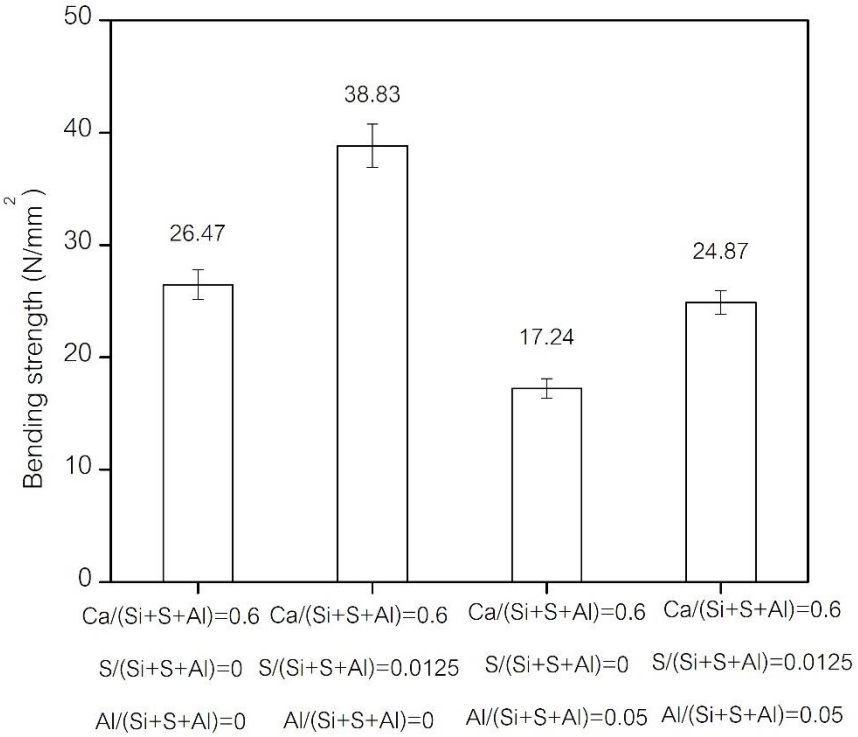
1.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ



รูปที่ 1.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

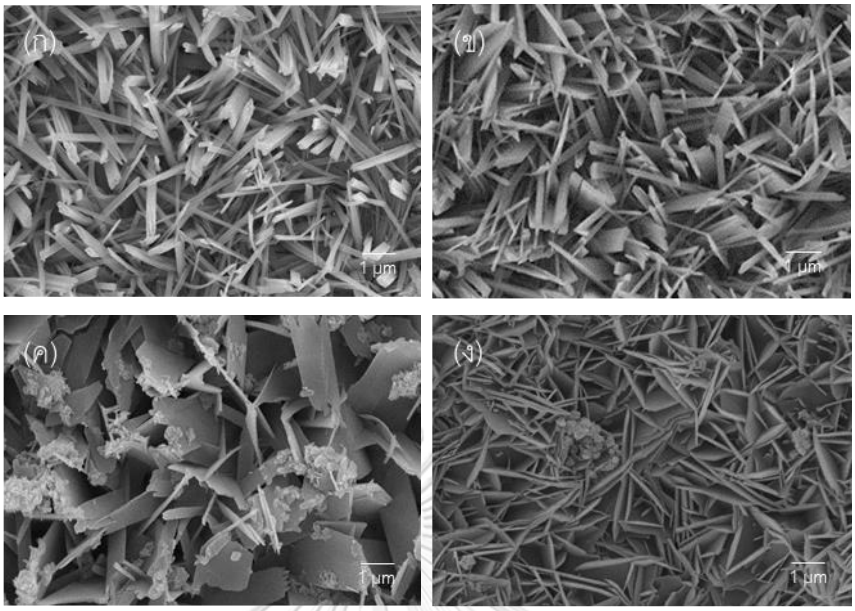
1.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 1.2 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 1.3 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

1.2 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

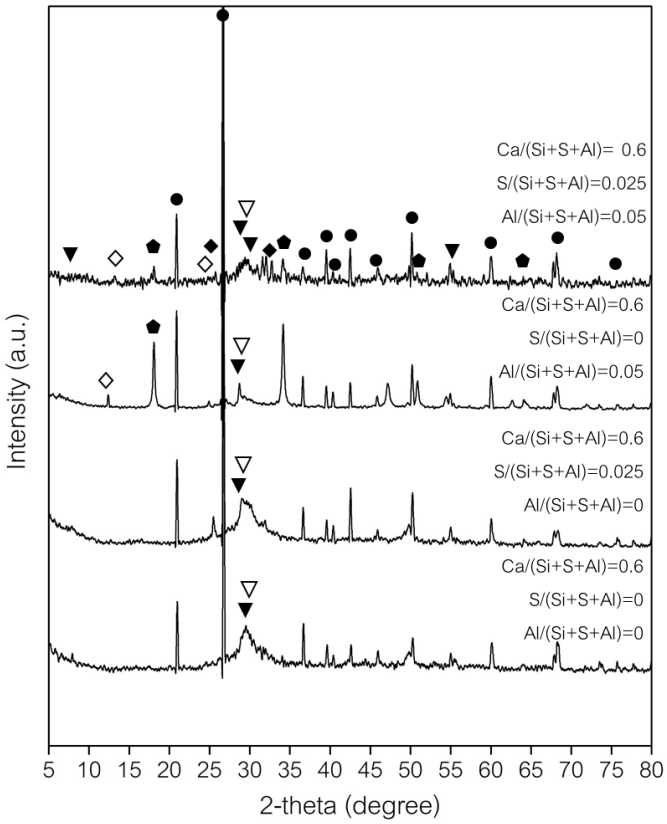
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	42.54	57.46	0	0
Ca/(Si+S+Al) =0.6, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0	40.07	55.53	0	4.40
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.05	42.51	51.73	5.76	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.05	40.04	49.84	5.72	4.40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

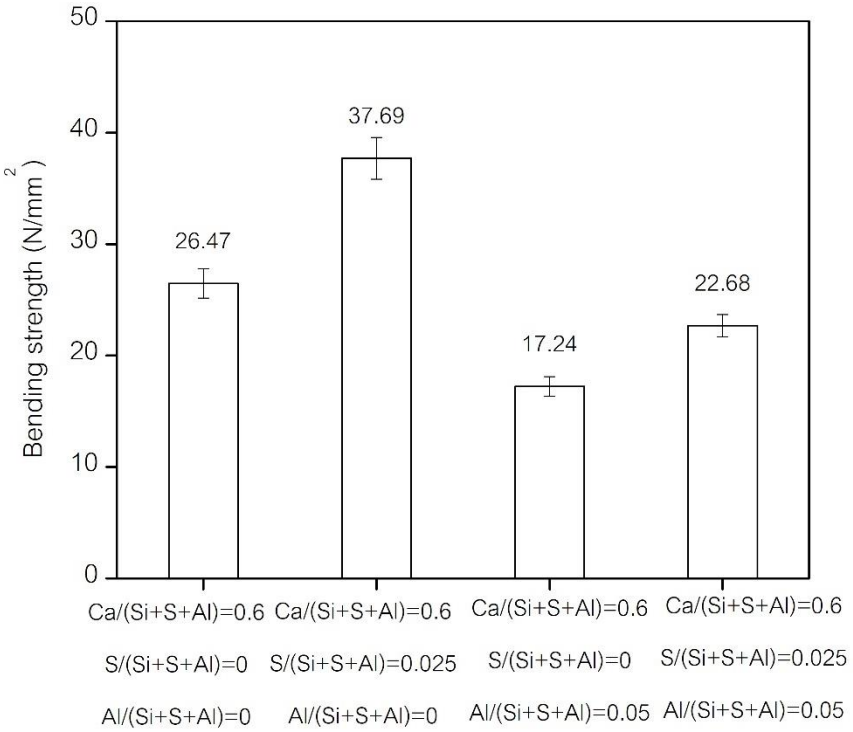


รูปที่ 1.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

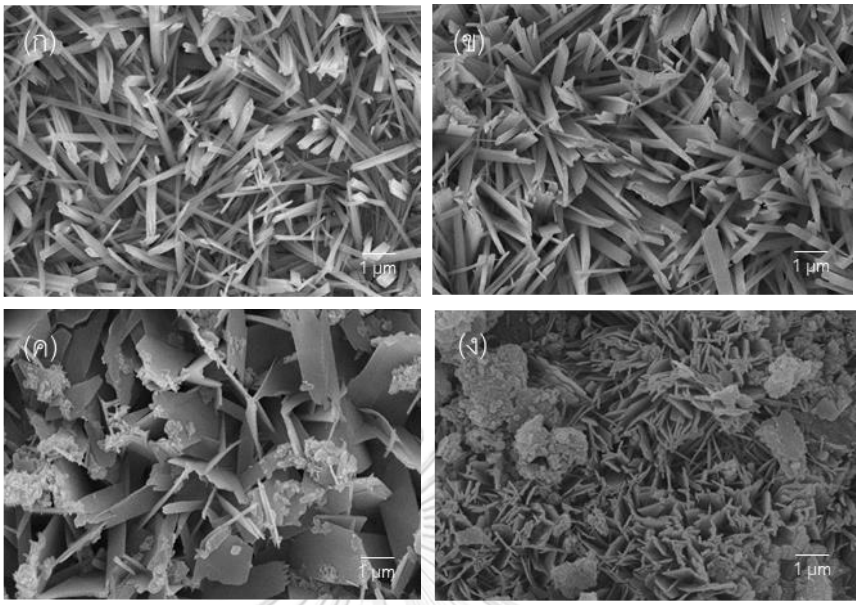
1.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 1.5 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 1.6 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

1.3 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

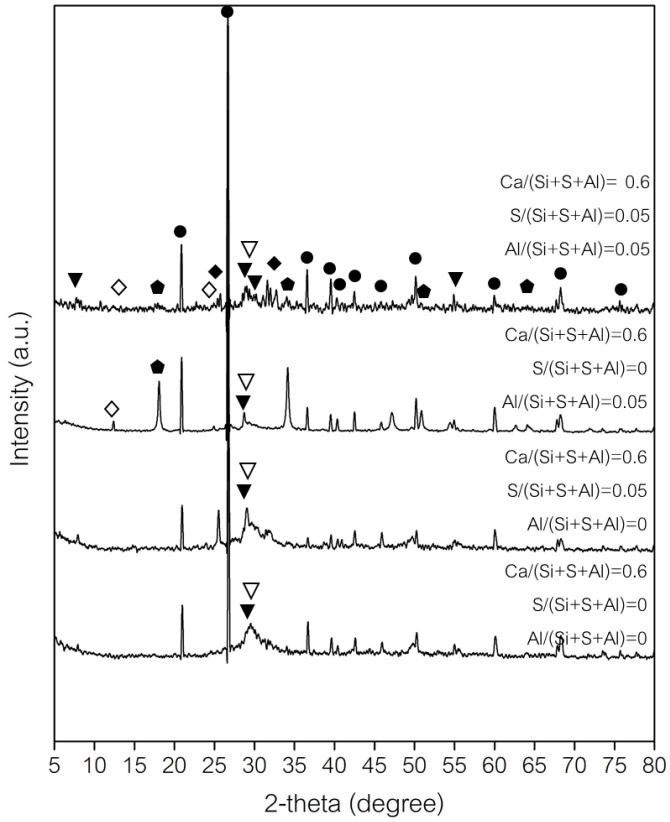
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) =0.6 S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	42.54	57.46	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0	37.63	53.64	0	8.74
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) =0.05	42.51	51.73	5.76	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.05	37.60	47.98	5.69	8.73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

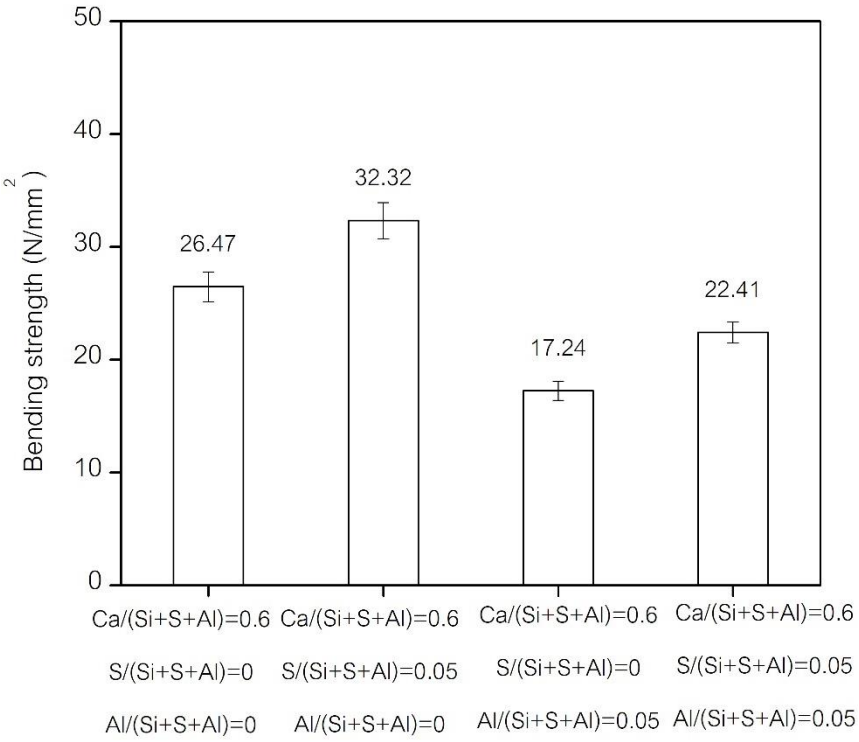


รูปที่ 1.7 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

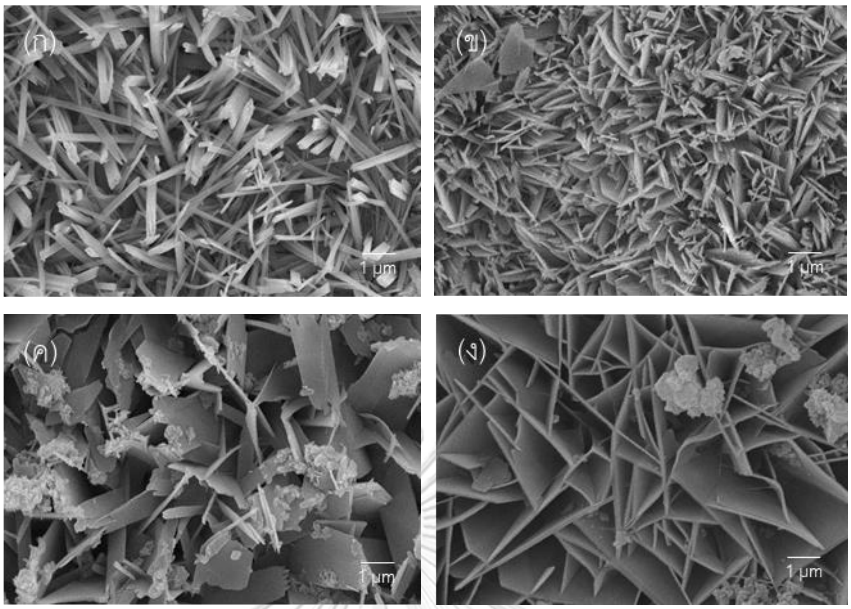
1.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 1.8 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 1.9 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

1.4 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1.4

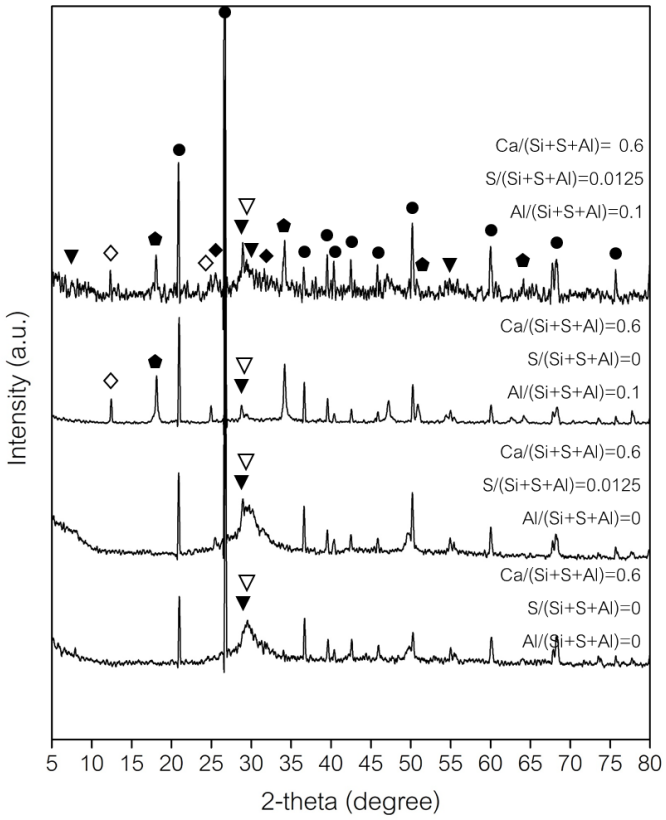
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.4 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) =0.6 S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	42.54	57.46	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al)= 0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0	41.23	56.48	0	2.29
Ca/(Si+S+Al) =0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) =0.1	42.29	45.32	12.38	0
Ca/(Si+S+Al) =0.6, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) =0.1	41.07	44.41	12.34	2.19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

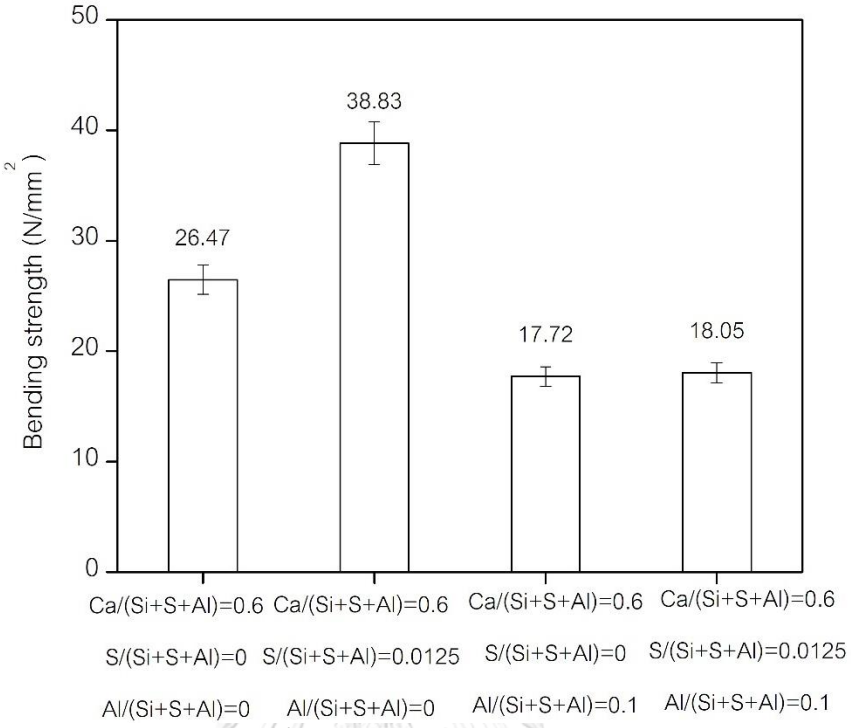


รูปที่ 1.10 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

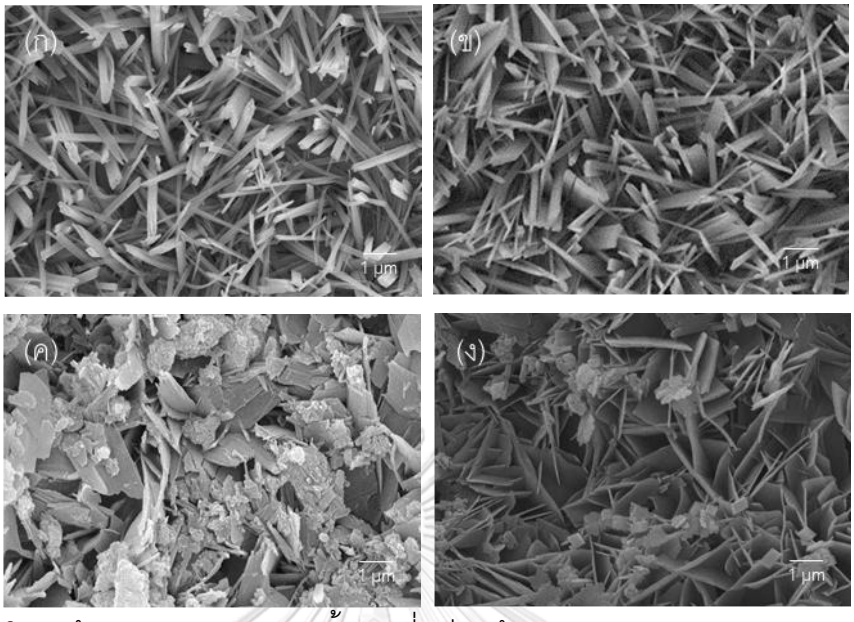
1.4.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 1.11 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 1.12 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

1.5 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1.5

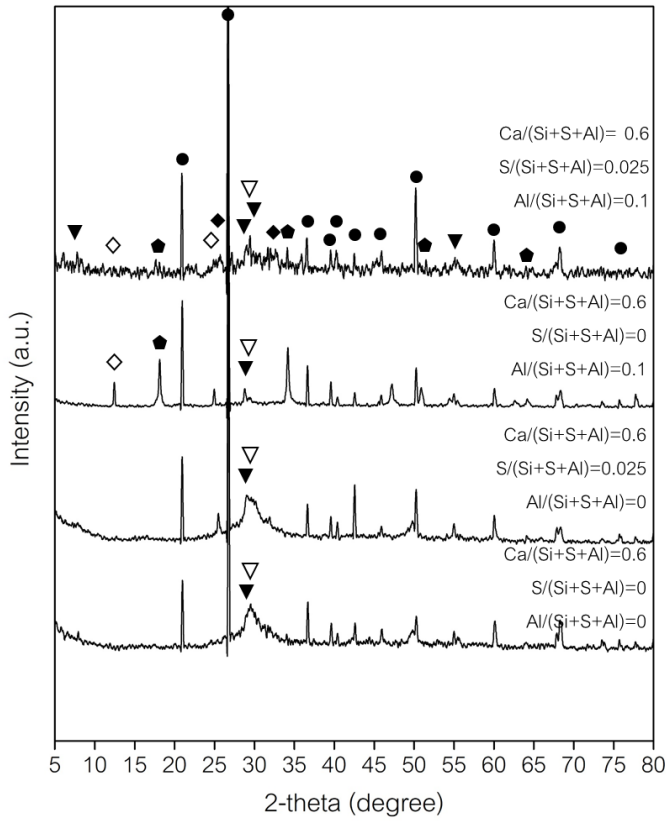
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.5 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) =0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	42.54	57.46	0	0
Ca/(Si+S+Al) =0.6, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0	40.07	55.53	0	4.40
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.1	42.29	45.32	12.38	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.1	39.84	43.50	12.29	4.37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.5.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

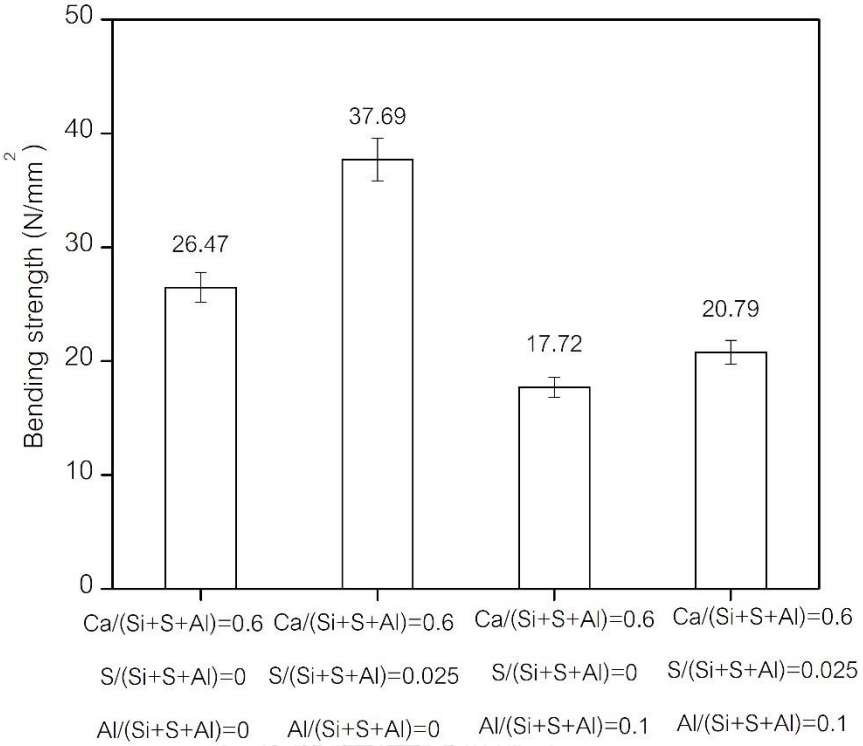


รูปที่ 1.13 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

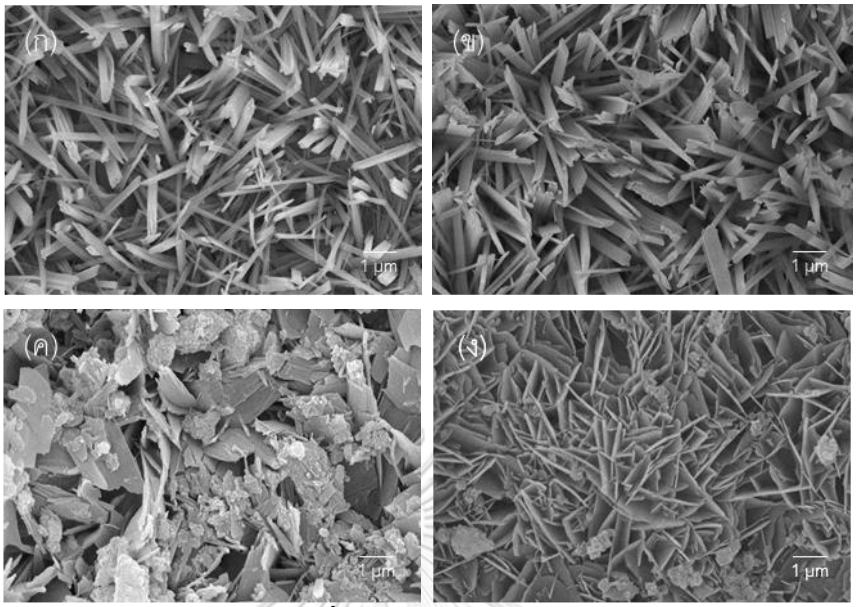
1.5.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 1.14 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.5.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 1.15 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 (ข) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 (ค) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

1.6 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1.6

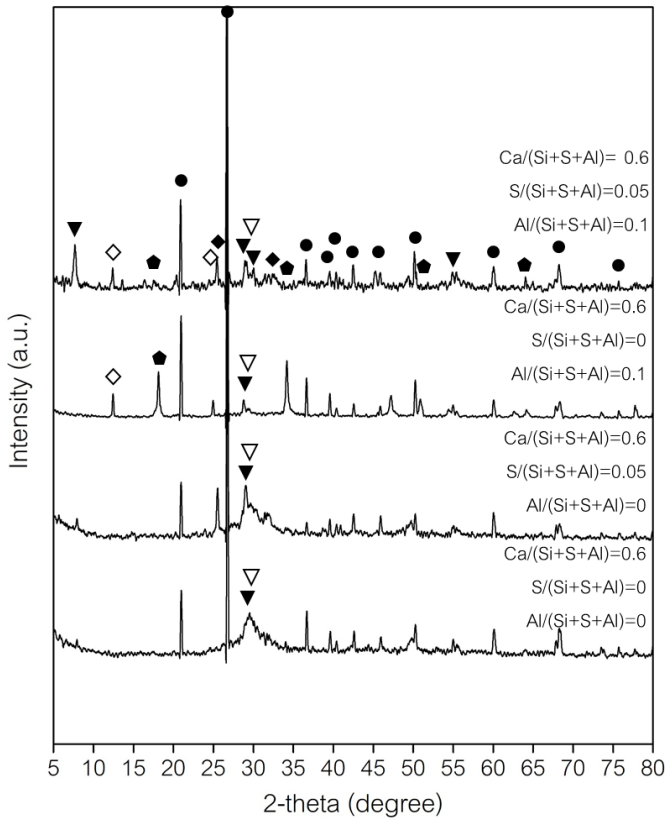
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.6 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) =0.6 S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	42.54	57.46	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0	37.63	53.64	0	8.74
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.1	42.29	45.32	12.38	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.1	37.41	41.70	12.20	8.69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.6.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

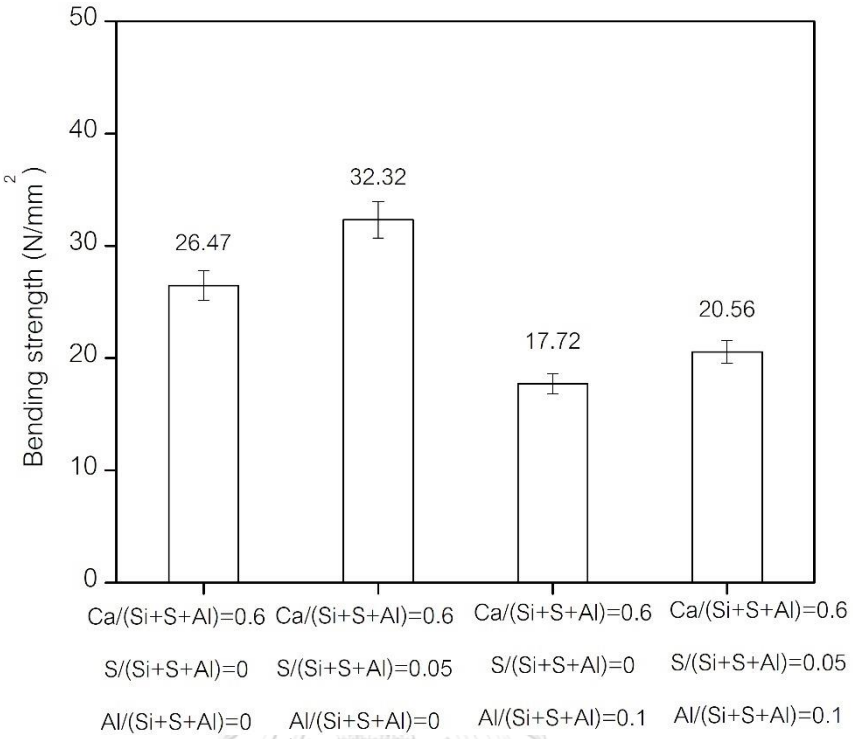


รูปที่ 1.16 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

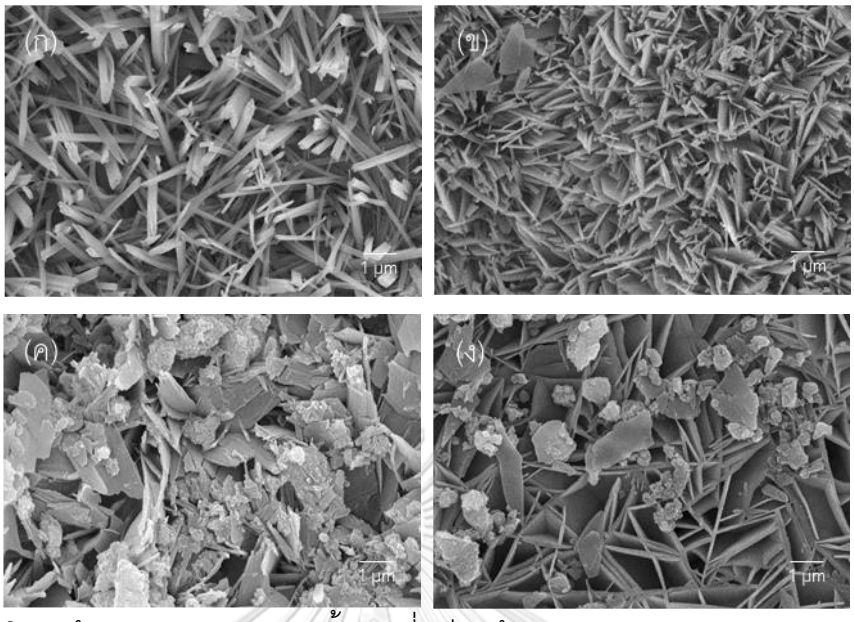
1.6.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 1.17 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.6.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 1.18 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

1.7 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1.7

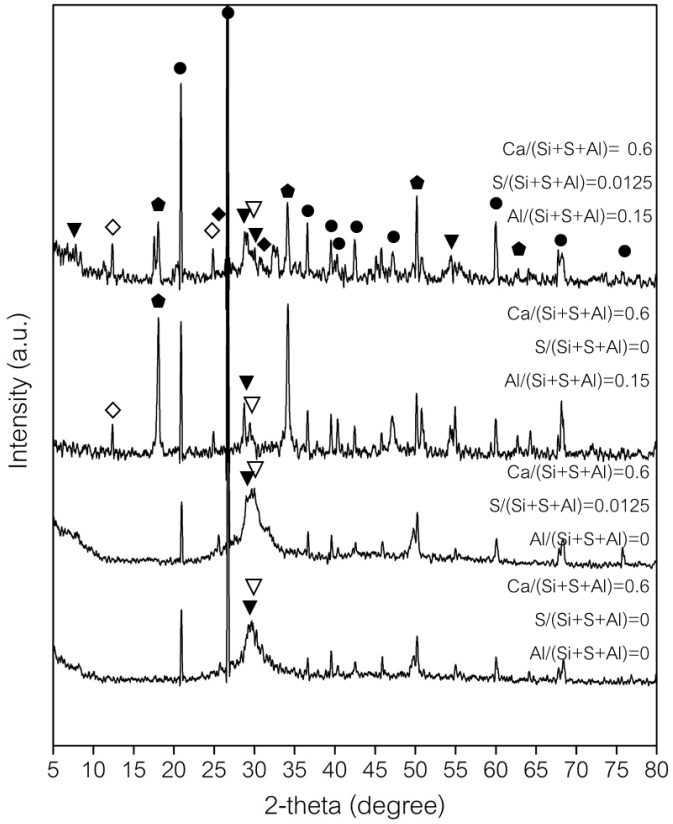
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.7 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	42.54	57.46	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0	41.23	56.48	0	2.29
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.15	42.07	38.99	18.94	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.15	40.85	38.10	18.87	2.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.7.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

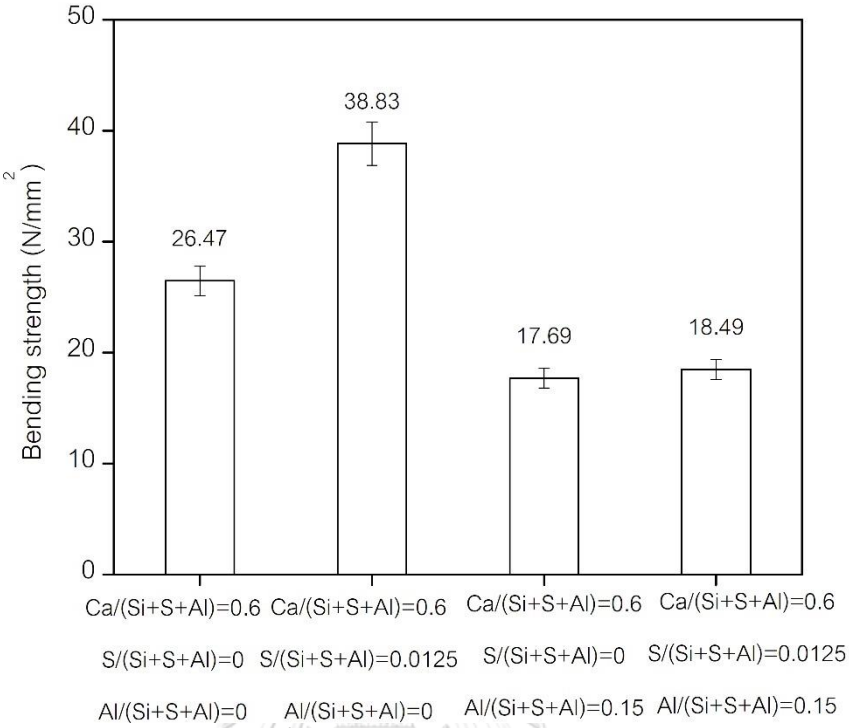


รูปที่ 1.19 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

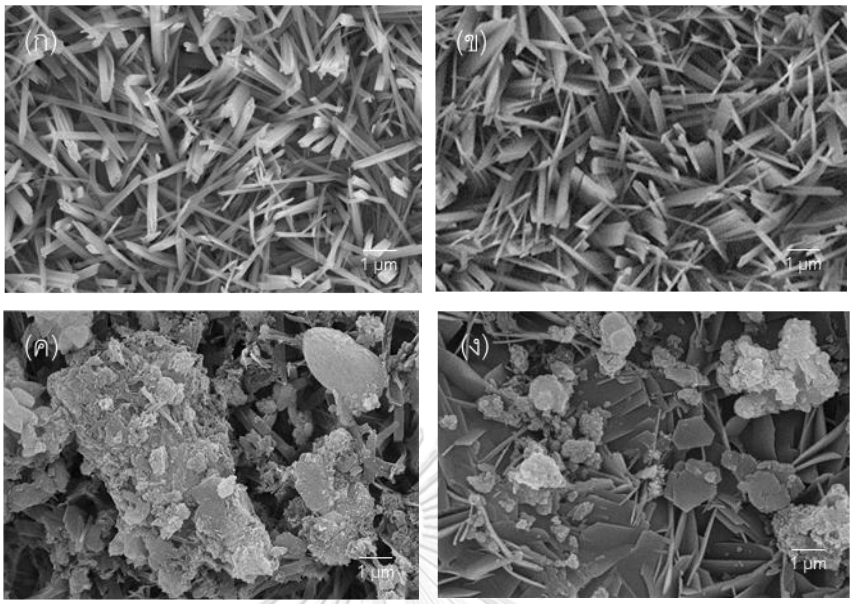
1.7.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 1.20 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.7.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 1.21 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

1.8 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

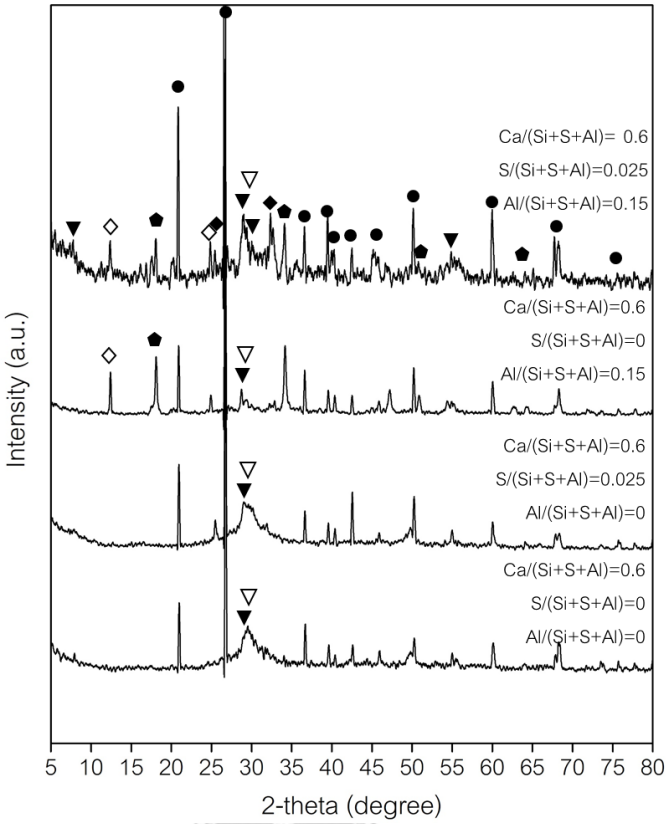
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1.8

ตารางที่ 1.8 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	42.54	57.46	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0	40.07	55.53	0	4.40
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.15	42.07	38.99	18.94	0
Ca/(Si+S+Al) =0.6, S/(Si+S+Al) =0.025, Al/(Si+S+Al) =0.15	39.63	37.23	18.79	4.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.8.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

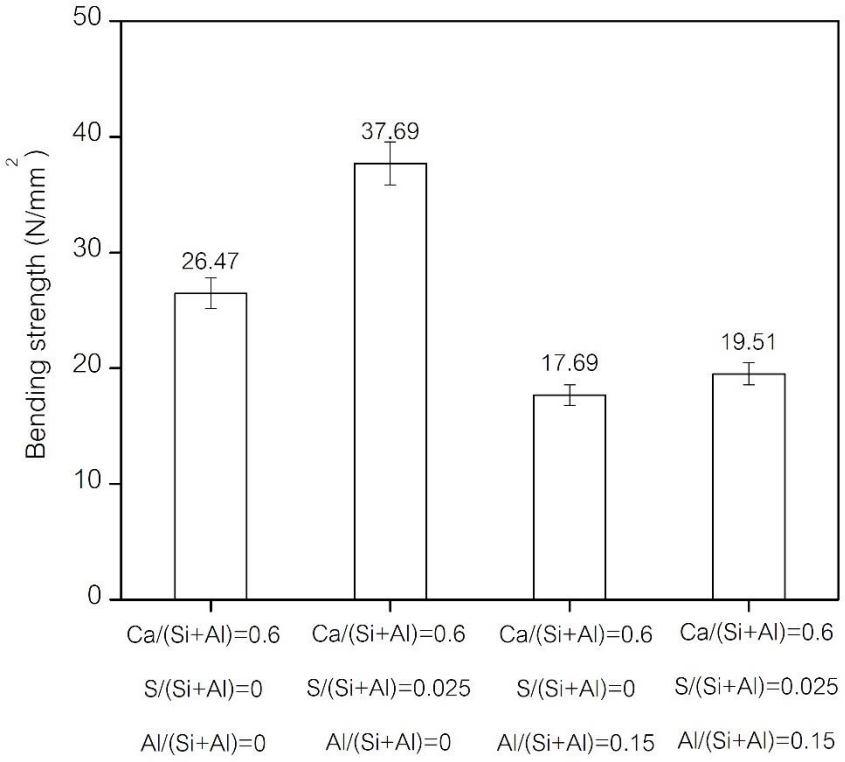


รูปที่ 1.22 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

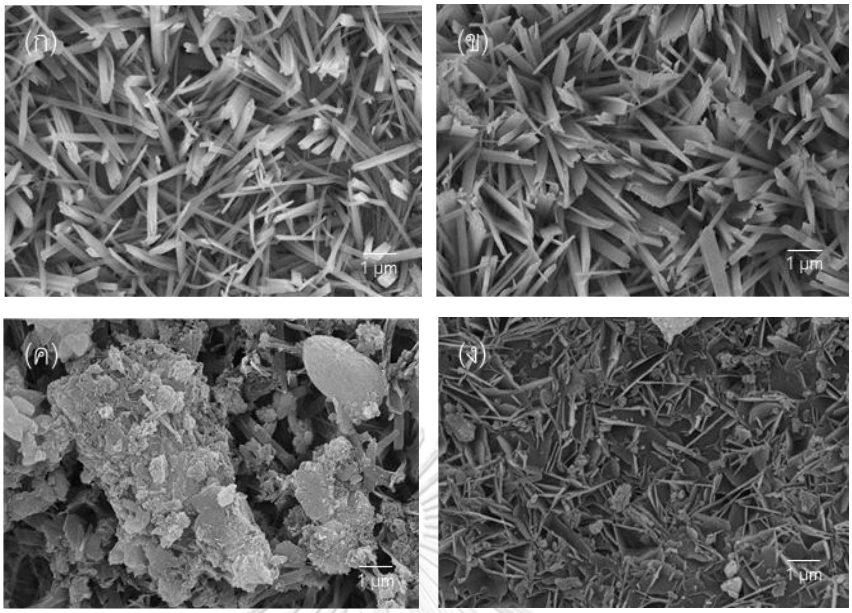
1.8.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 1.23 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.8.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 1.24 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

1.9 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1.9

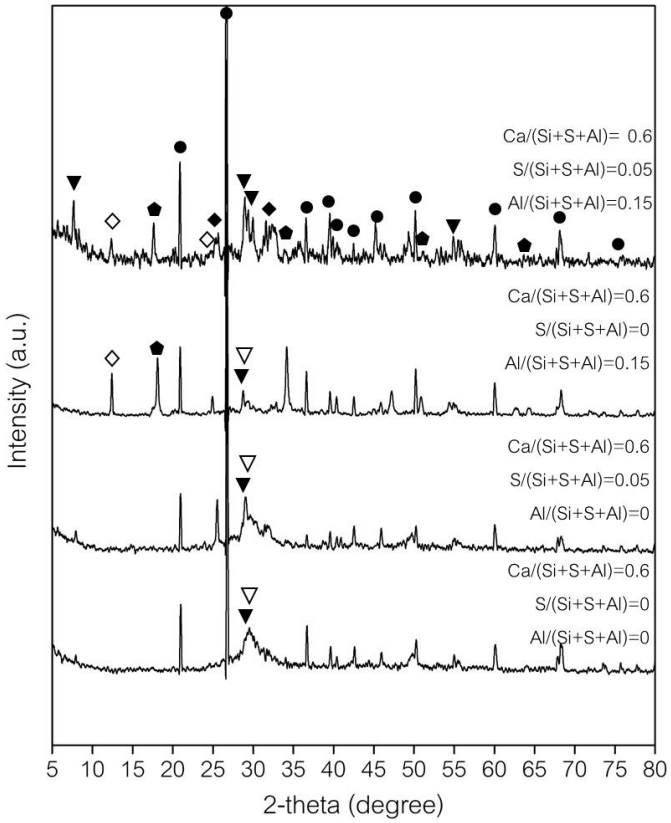
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.9 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	42.54	57.46	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0	37.63	53.64	0	8.74
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.15	42.07	38.99	18.94	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.6, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.15	37.22	35.49	18.64	8.64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.9.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

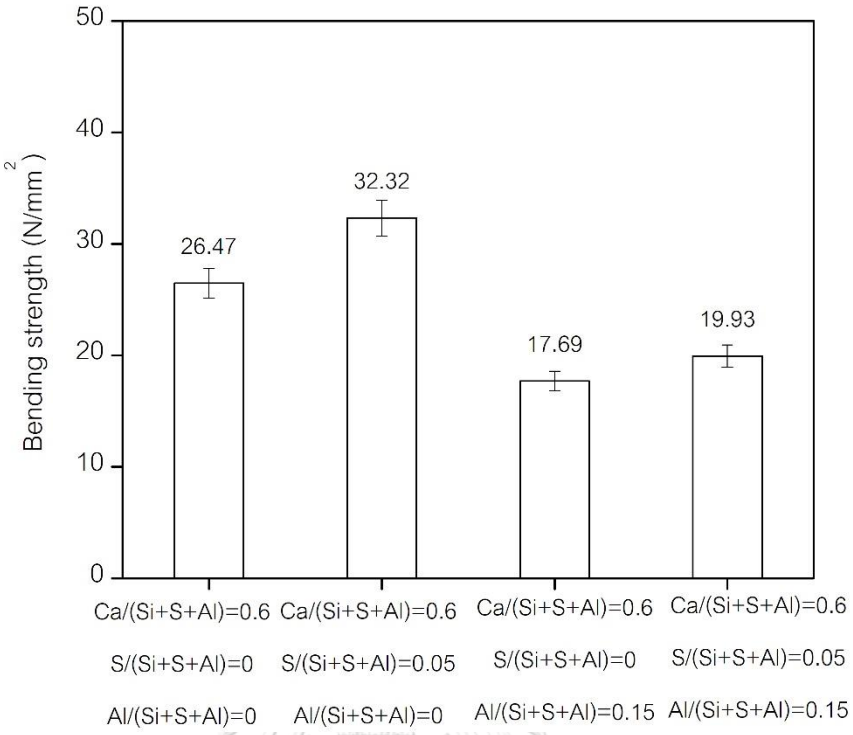


รูปที่ 1.25 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

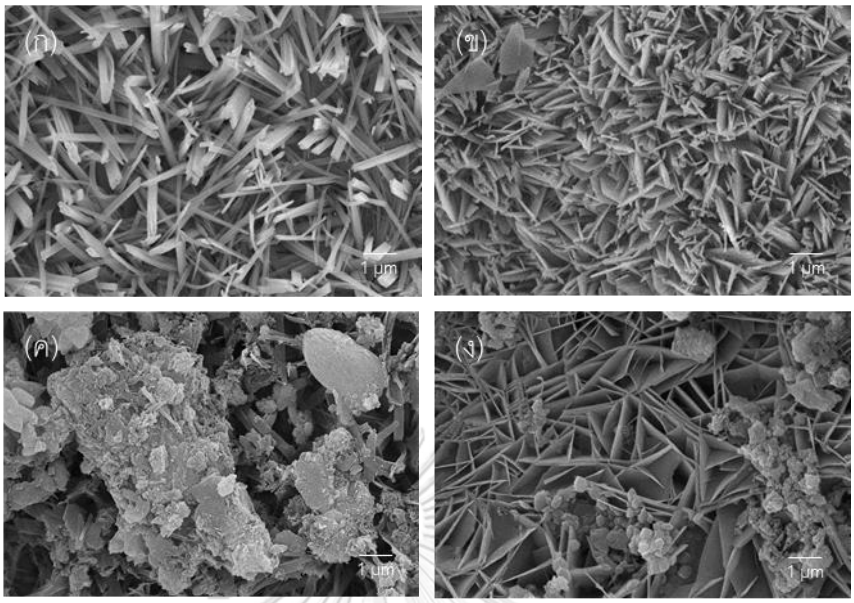
1.9.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 1.26 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.9.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 1.27 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.6 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.

ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) และ Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่อ
อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. ผลของอัตราส่วน S/(Si+S+Al) และ Al/(Si+S+Al) ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้เมื่ออัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8

ในการทดลองนี้ทำการผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ยิปซั่ม และดินขาวให้ได้อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, 0.1, 0.15 และ S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125, 0.025 และ 0.05 โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียว และชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียว

2.1 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.1

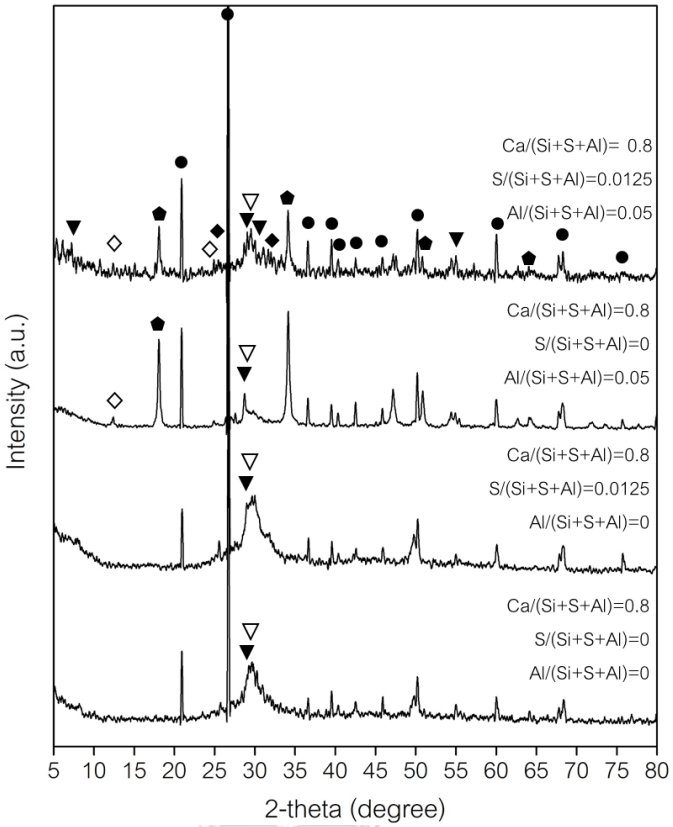
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.1 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	49.69	50.31	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0	48.51	49.48	2.00	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.05	49.68	45.32	5.00	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.05	48.57	44.51	4.99	1.92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

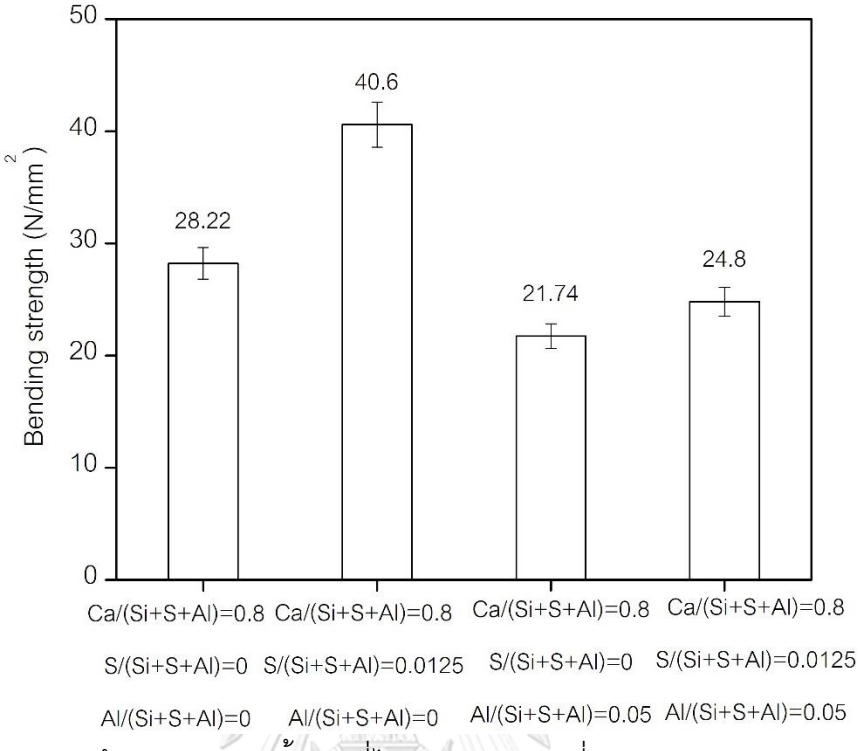


รูปที่ 2.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

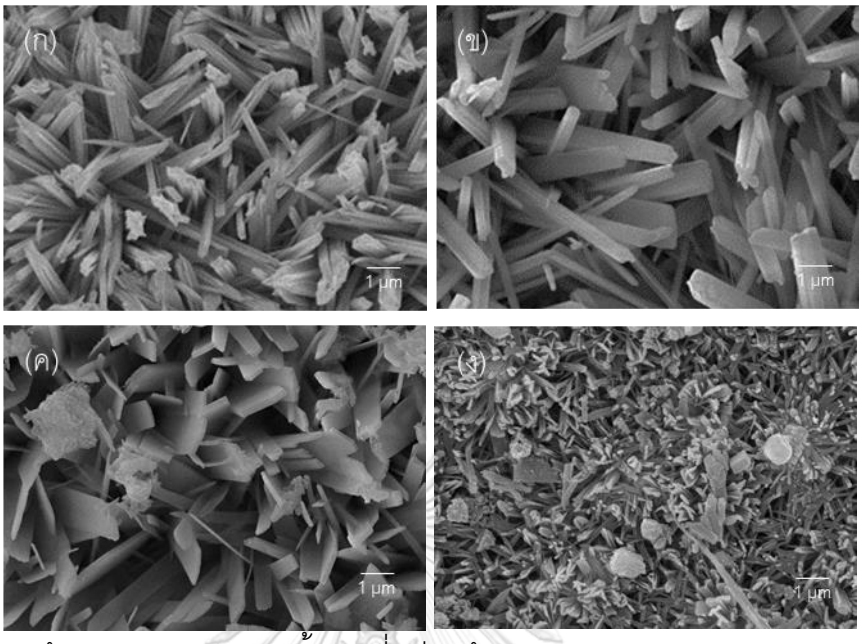
2.1.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

2.2 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

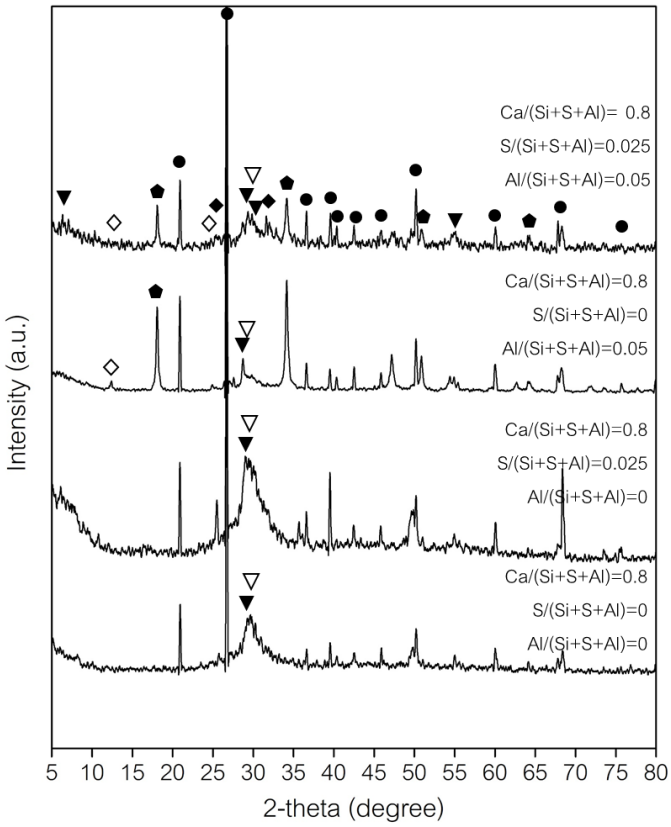
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.8 S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	49.69	50.31	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0	47.47	48.67	3.85	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.05	49.68	45.32	5.00	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.05	47.46	43.71	4.97	3.85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

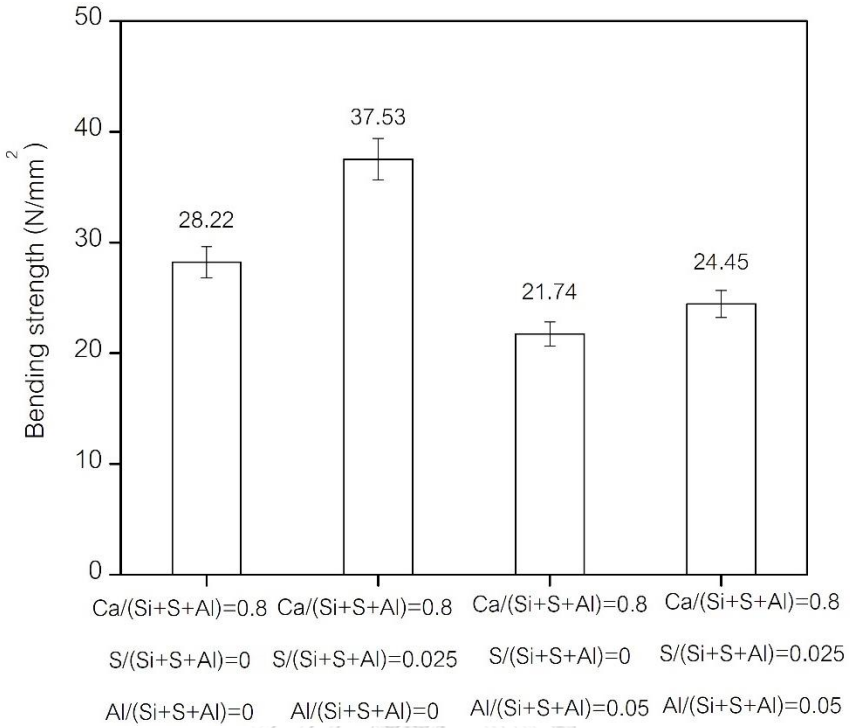


รูปที่ 2.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

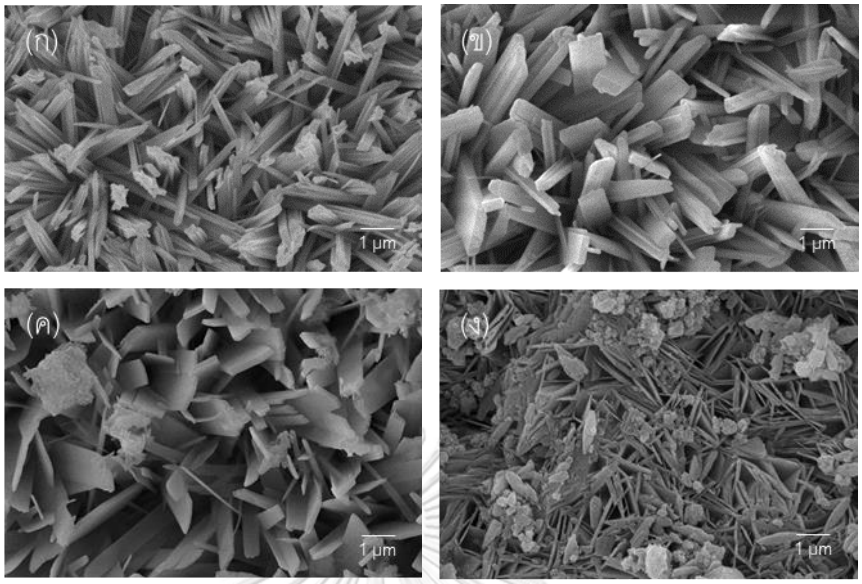
2.2.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.5 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

2.3 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

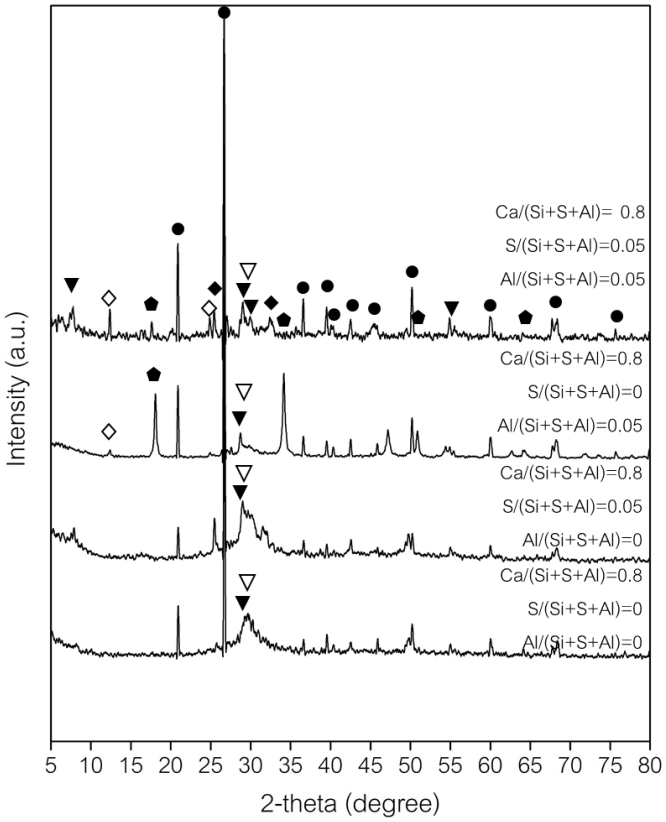
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และไม่มีการเติมสารตัวเติม ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	49.69	50.31	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0	45.28	47.06	7.67	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.05	49.68	45.32	5.00	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.05	45.26	42.13	4.95	7.66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

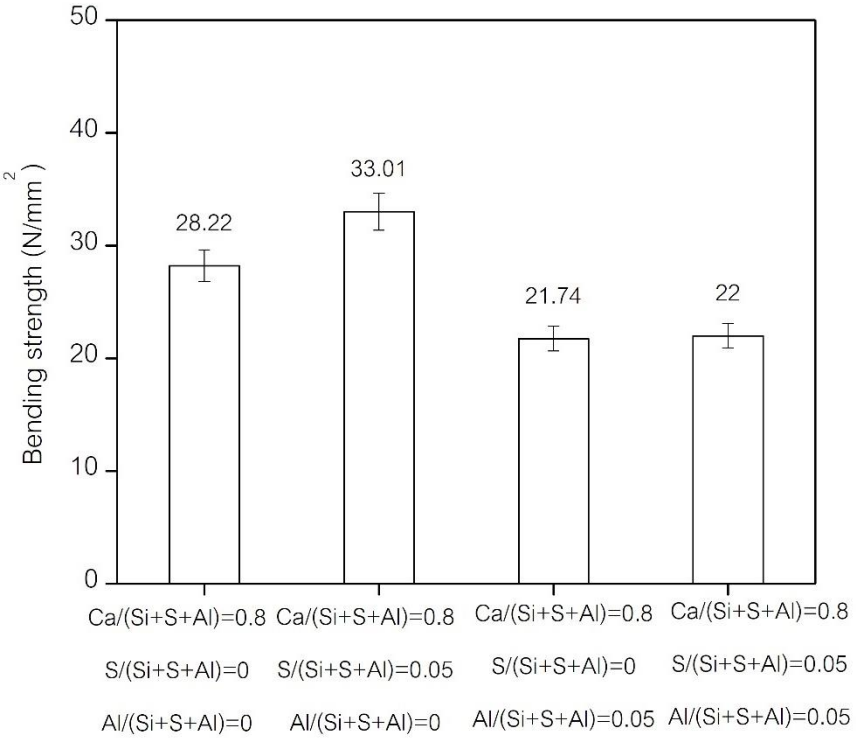


รูปที่ 2.7 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

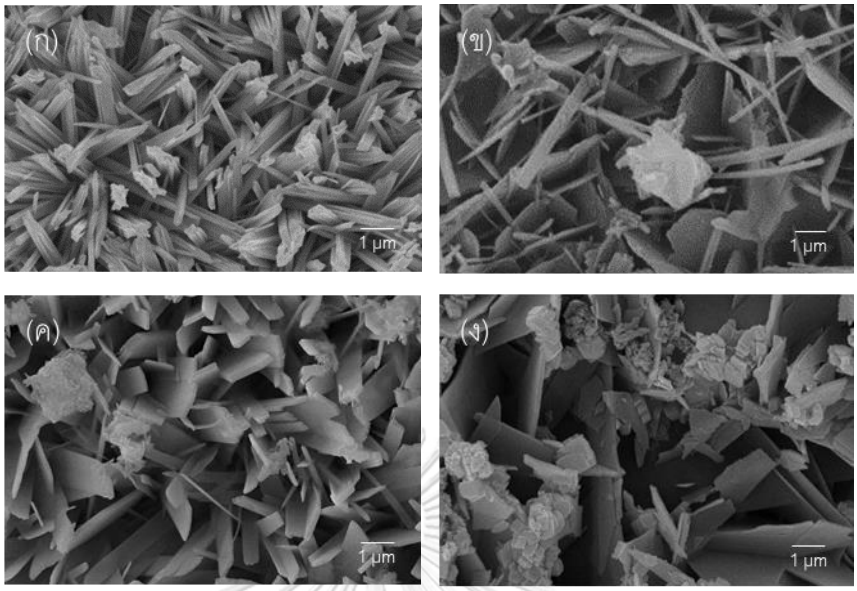
2.3.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.8 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05

2.4 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

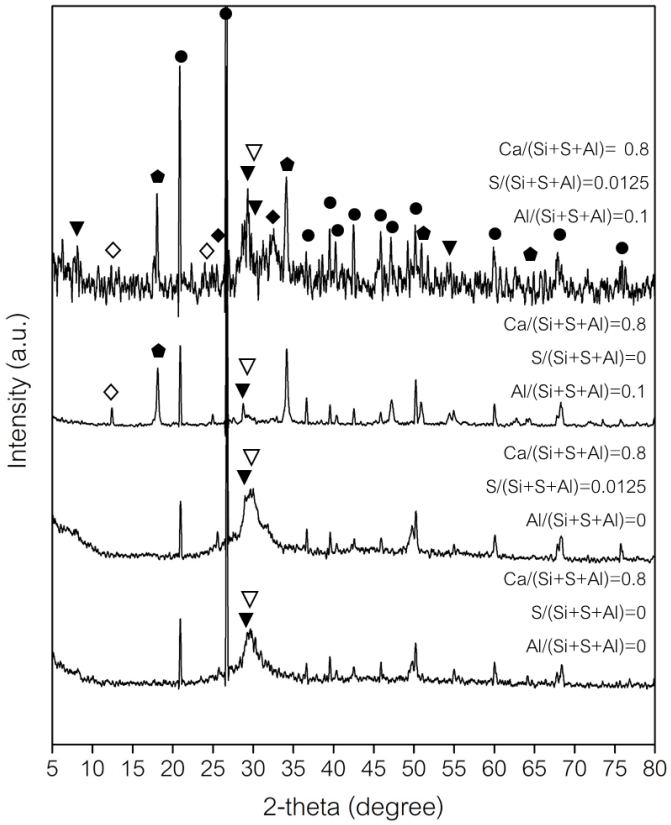
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	49.69	50.31	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0	48.51	49.48	2.00	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.1	49.46	39.73	10.81	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) =0.1	48.36	38.95	10.78	1.91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

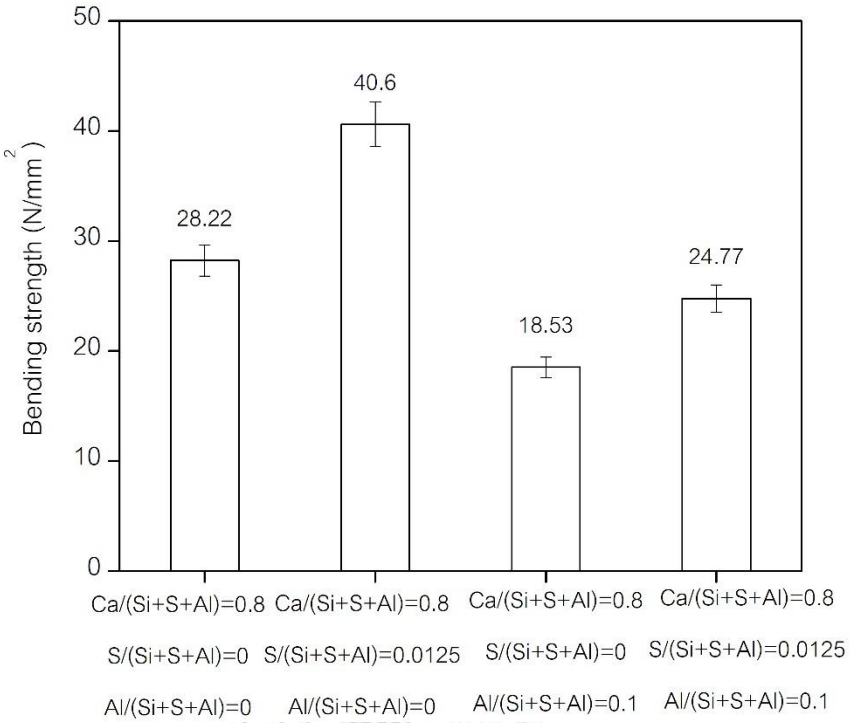


รูปที่ 2.10 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

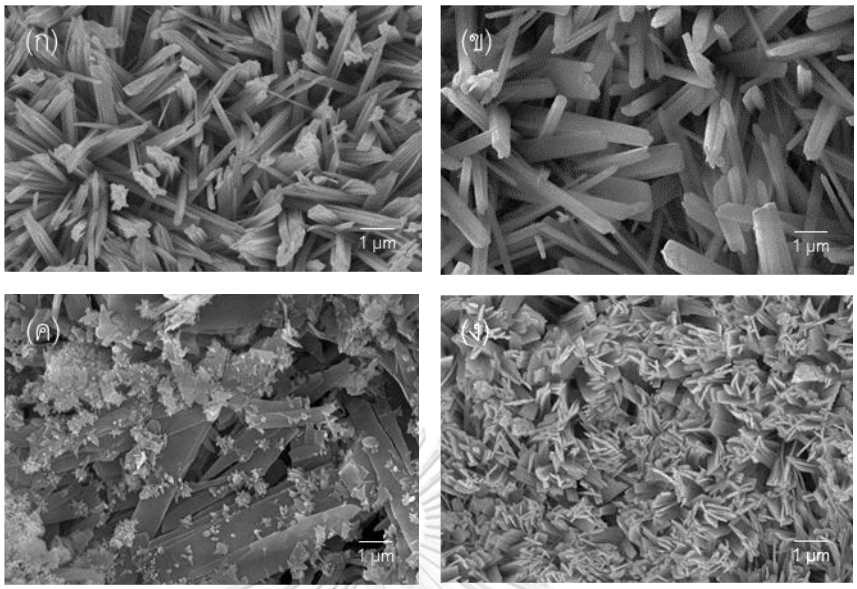
2.4.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.11 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.12 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

2.5 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

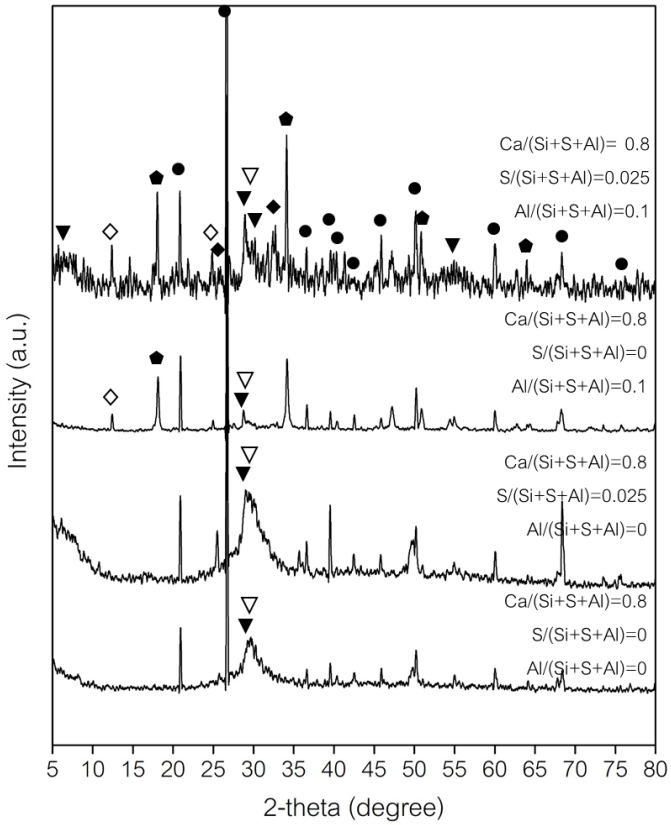
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.8 S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	49.69	50.31	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.025 Al/(Si+S+Al) = 0	47.47	48.67	3.85	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.1	49.46	39.73	10.81	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.1	47.25	38.18	10.74	3.83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

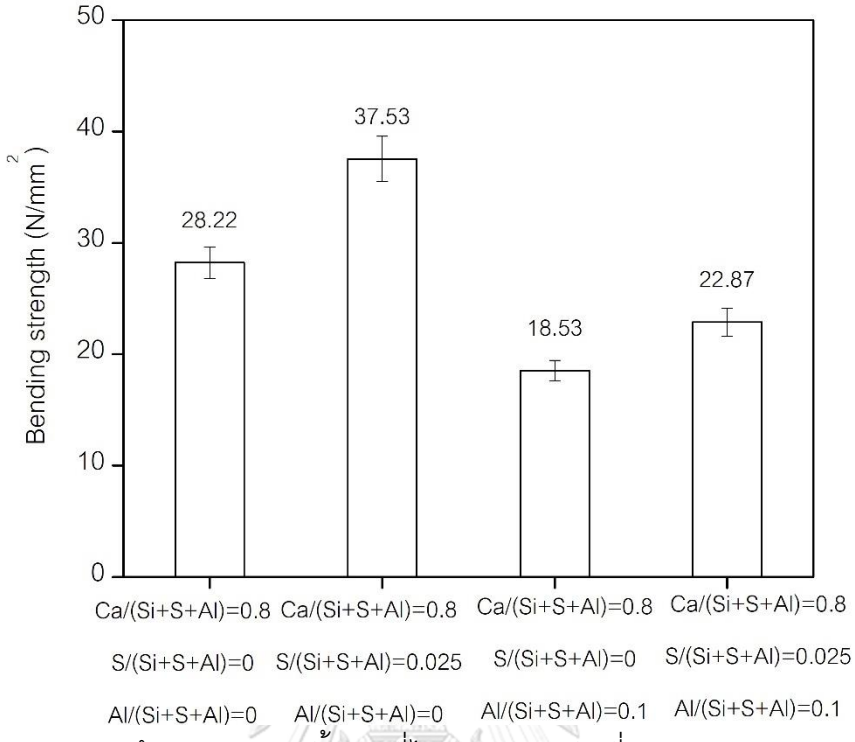


รูปที่ 2.13 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

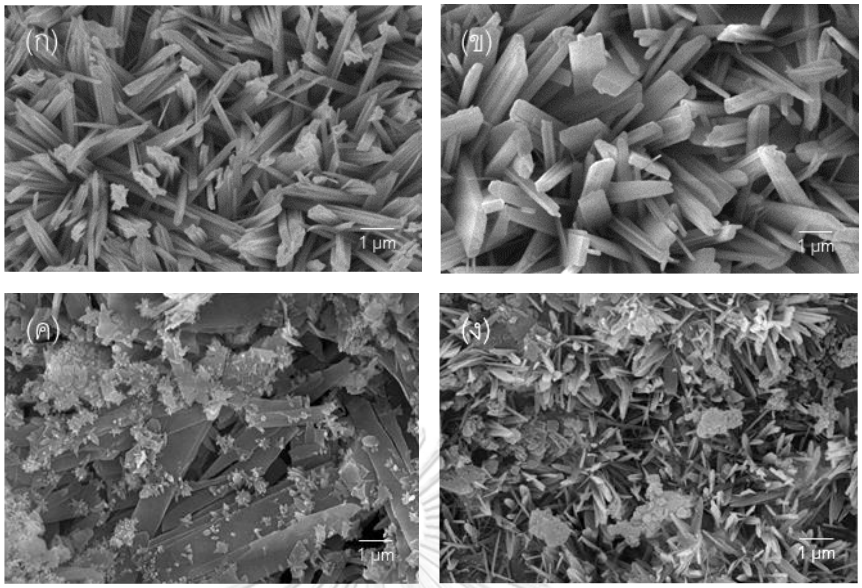
2.5.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.14 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

2.5 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

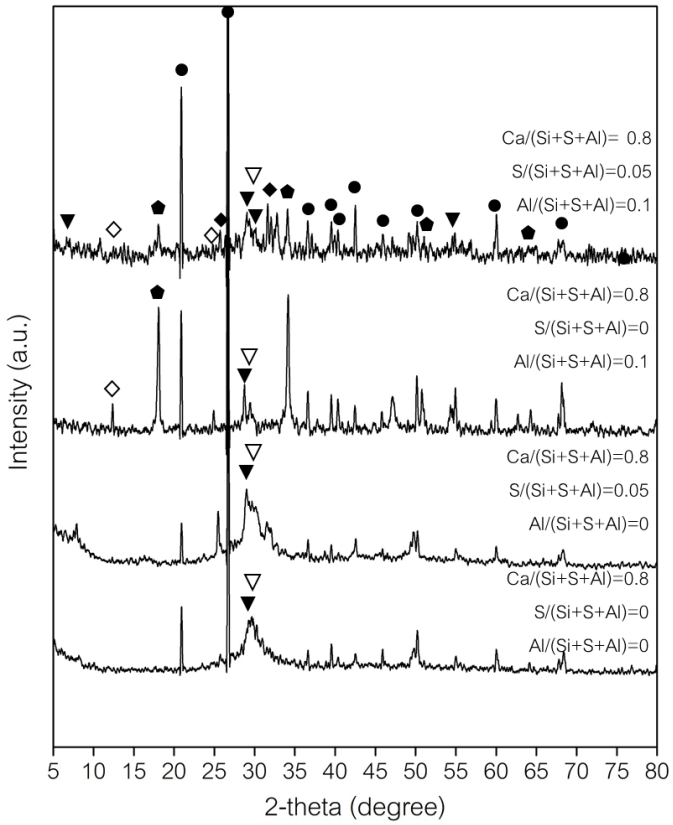
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) =0.8 S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	49.69	50.31	0	0
Ca/(Si+S+Al) =0.8, S/(Si+S+Al)=0.05, Al/(Si+S+Al) = 0	45.28	47.06	7.67	0
Ca/(Si+S+Al)=0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al)=0.1	49.46	39.73	10.81	0
Ca/(Si+S+Al) =0.8, S/(Si+S+Al) =0.05, Al/(Si+S+Al) =0.1	45.06	36.64	10.67	7.63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

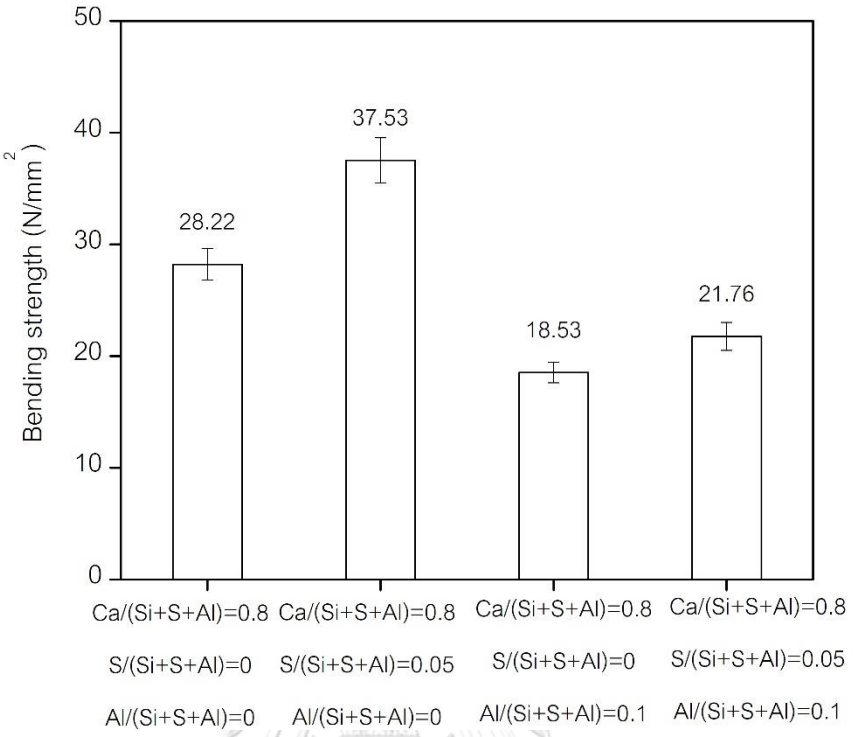


รูปที่ 2.16 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

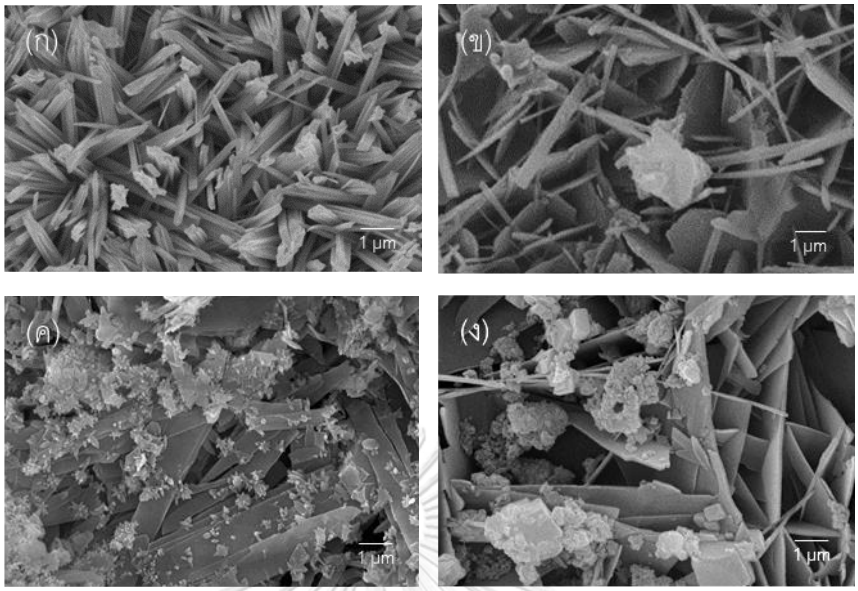
2.6.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.17 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.6.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.18 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 (ข) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.1

2.7 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

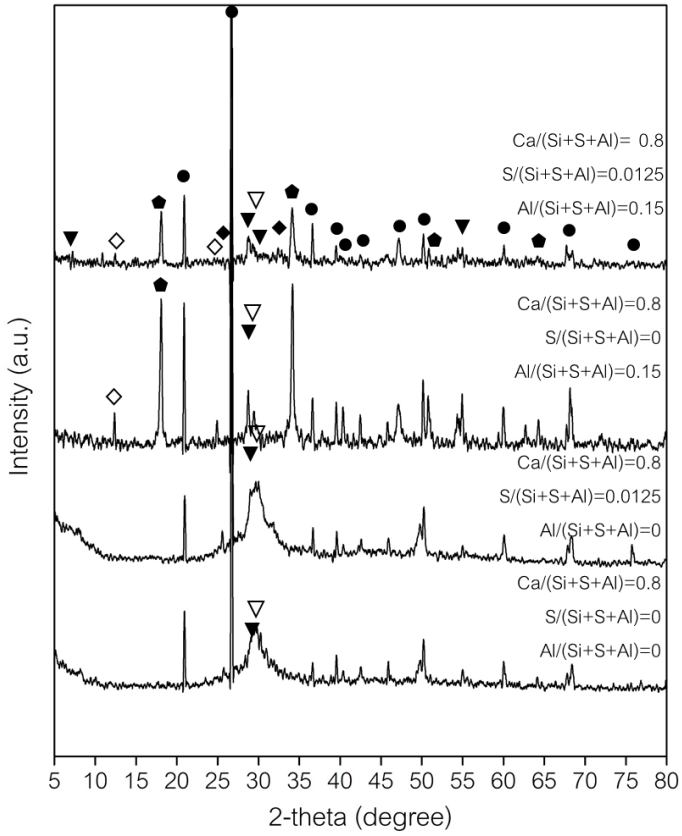
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.8 S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	49.69	50.31	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0	48.51	49.48	2.00	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) =0.15	49.23	34.20	16.57	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) =0.0125, Al/(Si+S+Al) = 0.15	48.14	33.44	16.52	1.91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

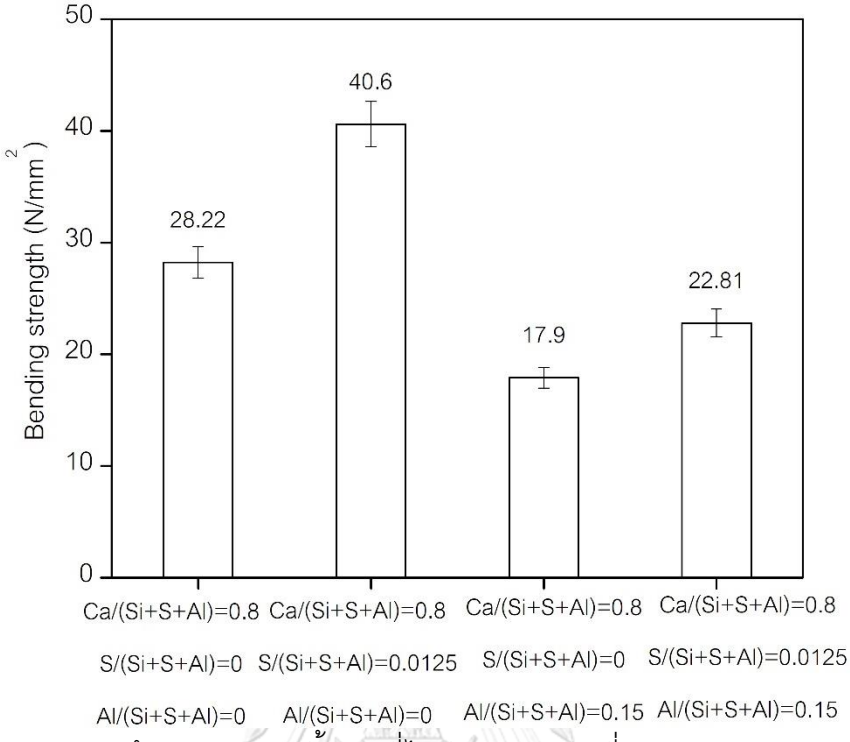


รูปที่ 2.19 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

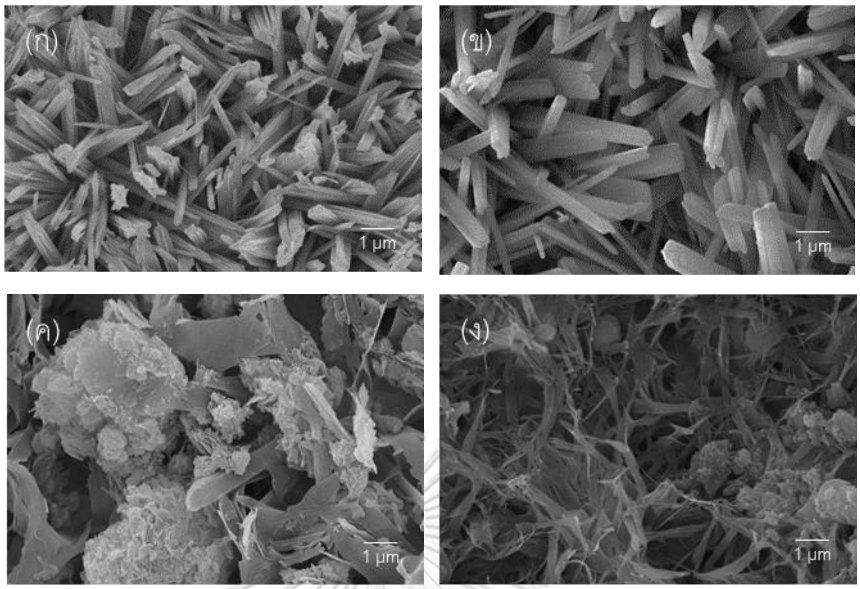
2.7.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.20 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.21 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 (ข) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 (ค) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.0125 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

2.8 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

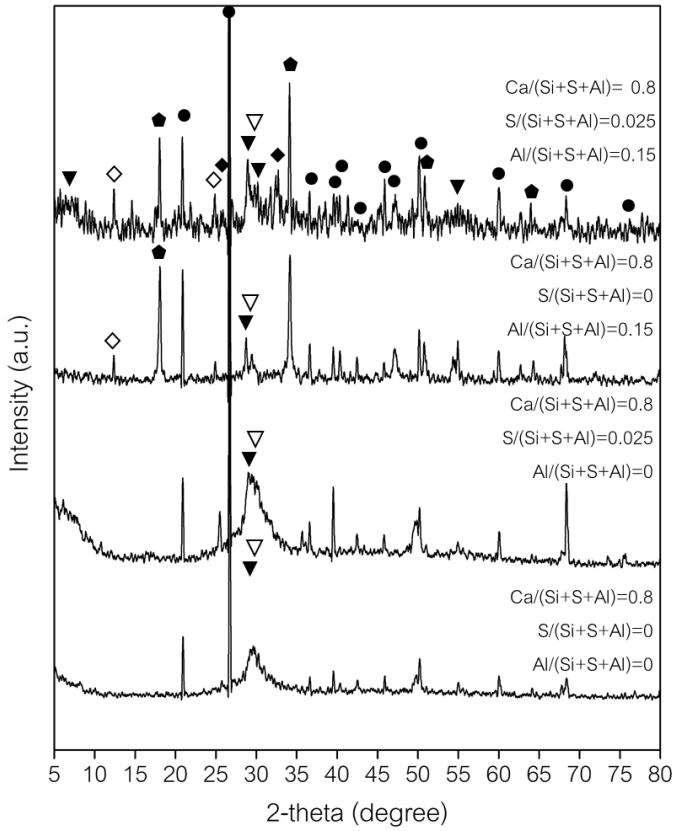
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.8 S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	49.69	50.31	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0	47.47	48.67	3.85	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.15	49.23	34.20	16.57	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.025, Al/(Si+S+Al) = 0.15	47.04	32.69	16.46	3.82

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

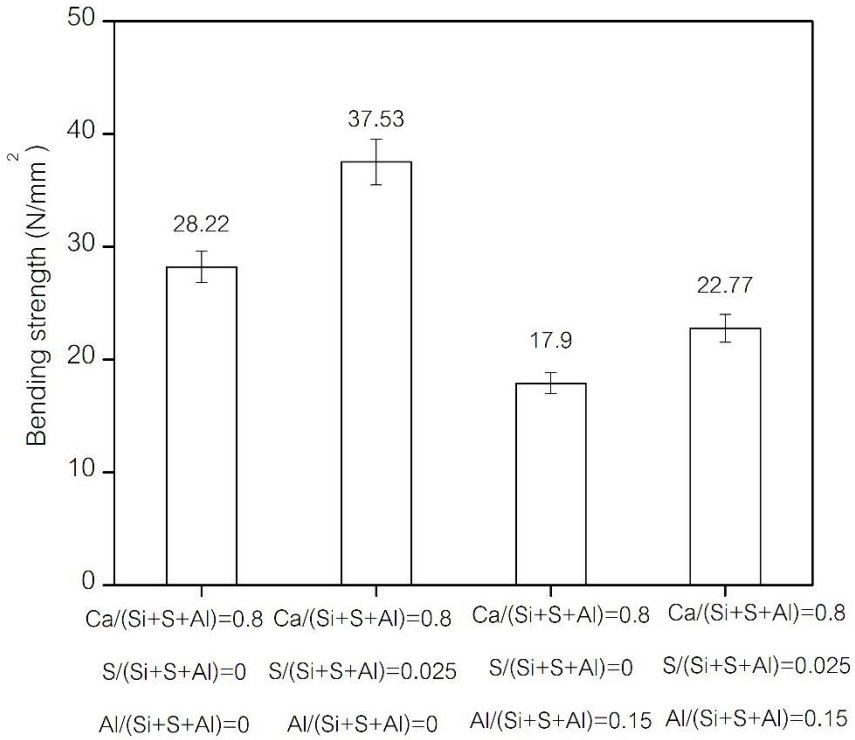


รูปที่ 2.22 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

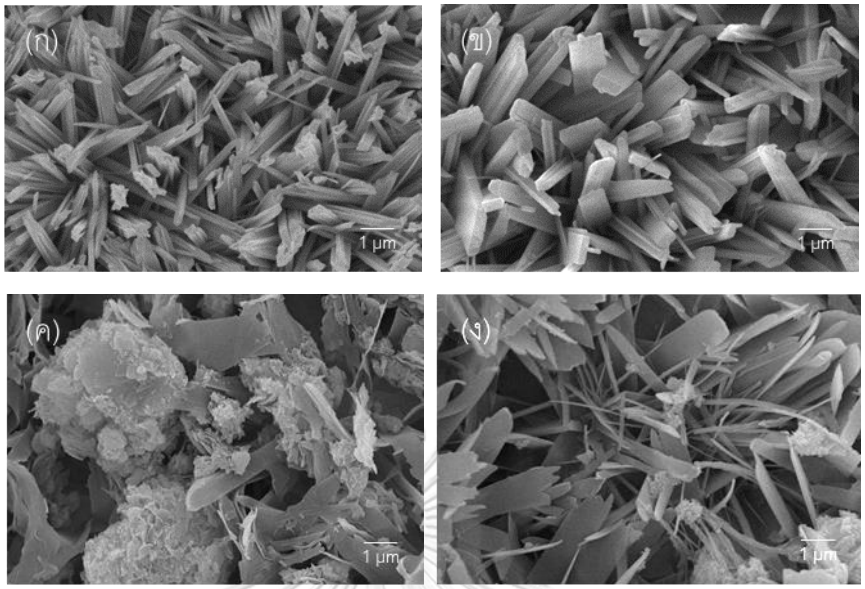
2.8.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.23 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.8.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.24 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 (ข) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 (ค) เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.025 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

2.9 สมบัติของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และ อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

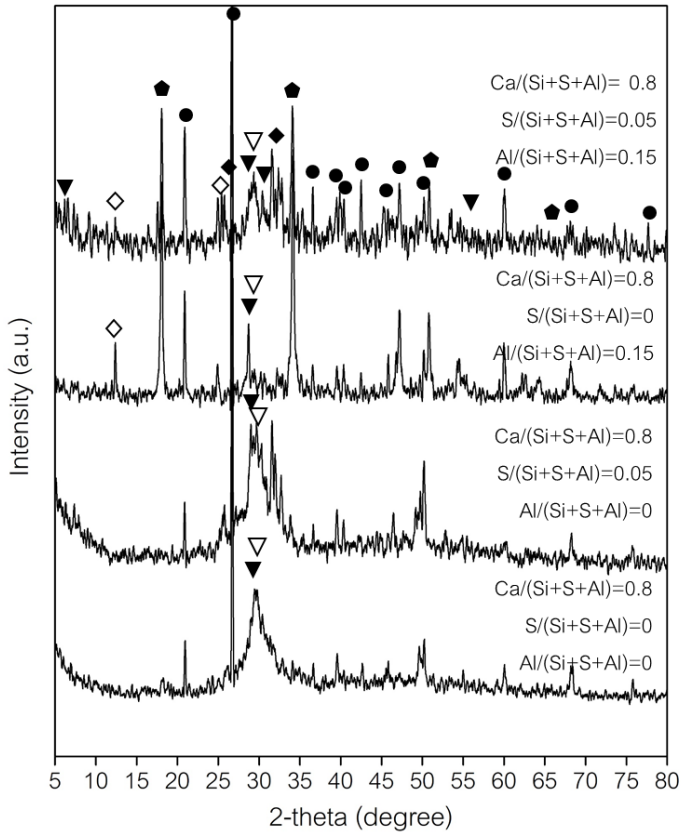
ศึกษาตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 ชิ้นงานที่เติมยิปซั่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 ชิ้นงานที่เติมดินขาวเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 และอัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 สุดท้ายชิ้นงานที่เติมสารตัวเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 โดยปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว และยิปซั่มที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทราย ดินขาว ยิปซั่มในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

ตัวอย่างที่ศึกษา	**แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (wt%)**	**ทราย (wt%)**	**ดินขาว (wt%)**	**ยิปซั่ม (wt%)**
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0	49.69	50.31	0	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0	45.28	47.06	7.67	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0, Al/(Si+S+Al) = 0.15	49.23	34.20	16.57	0
Ca/(Si+S+Al) = 0.8, S/(Si+S+Al) = 0.05, Al/(Si+S+Al) = 0.15	44.86	31.20	16.35	7.60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.9.1 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบ

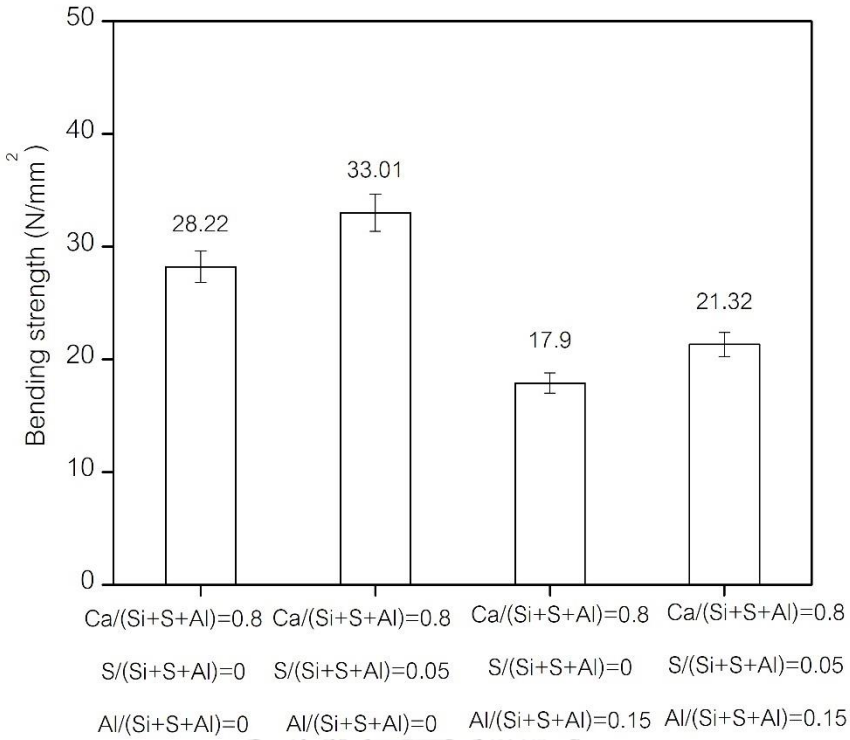


รูปที่ 2.25 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

(▼ : tobermorite, ● : quartz, ▽ : calcium silicate hydrate gel, ◇ : kaolinite, ⬟ : portlandite, ◆ : anhydrite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

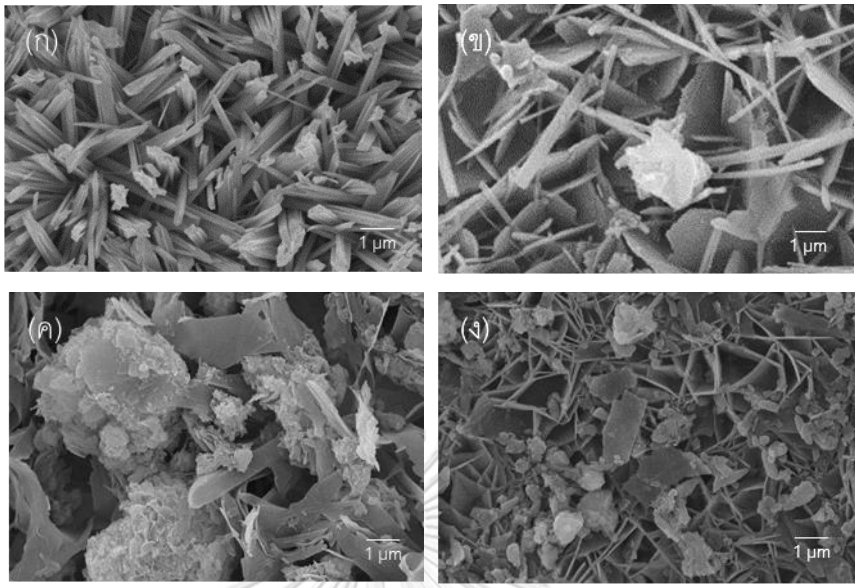
2.9.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดของชิ้นงาน



รูปที่ 2.26 ค่าความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่ไม่เติมสารตัวเติมที่อัตราส่วน Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8, เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15, เติมยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 และเติมดินขาวร่วมกับยิปซั่ม ที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.9.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.27 โครงสร้างจุลภาคบนผิวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วน (ก) Ca/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.8 (ข) เติมยิปซั่มที่อัkIตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 (ค) เติมดินขาวที่อัตราส่วน Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15 และ (ง) เติมดินขาวร่วมกับยิปซั่มที่อัตราส่วน S/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.05 กับ Al/(Si+S+Al) เท่ากับ 0.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อัณศยา เอกสาธิต
วัน เดือน ปี เกิด	3 มกราคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ แขนงวิชาเซรามิกและวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2559 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2559 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	234/559 ซ.นันทสิริ16 หมู่บ้านนันทวัน ถ.ศรีนครินทร์ อ.เมือง ต.บางเมือง สมุทรปราการ 10280.
ผลงานตีพิมพ์	Influences of Ca/Si ratio on phases and properties of hydrated lime and silica sand mixtures under hydrothermal condition. วารสารการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 44 (วทท44) จัดขึ้นที่ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค ในวันที่ 30 ตุลาคม 2561

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY