



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

Development of Cementitious Materials using Industrial Wastes as Construction Materials

นามผู้วิจัย นายณพล อยู่บรรพต

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังกาศ, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ \_\_\_\_\_ เดือน \_\_\_\_\_ พ.ศ. \_\_\_\_\_

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

Development of Cementitious Materials using Industrial Wastes as Construction Materials

โดย

นายณพล อยู่บรรพต

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อขอความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฉพล อยู่บรรพต 2554: การพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง  
ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng. 247 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ โดยเสนอ  
แนวทางในการออกแบบสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี  
ของออกไซด์หลัก เปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ใช้ควบคุมสมบัติของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้จากการศึกษาพบว่า สัดส่วน  
ผสม รูปแบบและอุณหภูมิการเผา ความละเอียดของวัตถุดิบตั้งต้น การบดละเอียดปูนเม็ด และปริมาณขี้ผึ้ง  
เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม

ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมที่เหมาะสมประกอบด้วย ตะกอนประปา ฟูนผง  
หินปูน และเปลือกหอยแครง อยู่ในช่วง 20 - 25%, 25 - 50% และ 5 - 70% สามารถผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่มี  
สารประกอบหลัก  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  และ  $C_4AF$  เทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) โดยมี  
ปริมาณโลหะหนักต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้ จากการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) และสังเกต  
โครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้เกิดปฏิกิริยา  
ไฮเดรชันในช่วงต้น และปฏิกิริยาพอซโซลานในระยะยาว เช่นเดียวกับที่เกิดใน OPC สำหรับในงานวิจัยนี้  
ออกแบบสัดส่วนผสมที่เป็นตัวแทนได้แก่ ตะกอนประปา ฟูนผงหินปูน เปลือกหอยแครงและปูนขาว ที่  
อัตราส่วน 25 : 50 : 5 : 20 เผาที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ  $7^{\circ}C$  ต่อนาที ที่อุณหภูมิสูงสุด  $1,450^{\circ}C$  ในการออกแบบ  
ผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์เพื่อทดสอบสมบัติทางด้านกายภาพ ด้านกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าและดินซีเมนต์  
และการศึกษากลไกปฏิกิริยาเคมี เพื่อศึกษาแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธาและ  
สิ่งแวดล้อม

ผลการทดลองพบว่ามอร์ต้ามีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม มอร์ต้าที่ผลิตจาก  
ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่ามอร์ต้ามาตรฐานที่ผลิตโดยใช้ OPC  
อย่างไรก็ตาม ดินซีเมนต์มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าเมื่อใช้ OPC นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์  
ยังมีค่าสูงขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นที่รวดเร็วของ  $C_3A$   
เกิดสารผลิตภัณฑ์ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Ettringite และต่อเนื่องด้วยปฏิกิริยา  $C_3S$  และ  $C_2S$   
เกิดสารผลิตภัณฑ์ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ผลการศึกษาการพัฒนาำลังของดินซีเมนต์สอดคล้องกับ  
ผลการทดสอบการวัดแรงดูดรวม (Total suction) และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ

Naphol Yoobanpot 2011: Development of Cementitious Materials using Industrial Wastes as Construction Materials. Doctor of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Supakij Nontananandh, D.Eng. 247 pages.

The main objective of this research was to produce new cementitious material using combination of industrial wastes. The study purposed a guideline to design mix proportions derived from potential wastes based on chemical composition analysis and then compared with criteria to control overall properties of cement. It was also found that appropriate mix proportion, burning pattern and temperature, fineness of raw materials and cement and gypsum content were essential factors affecting properties of cement produced.

Experimental results showed that appropriate mix proportion which contained water supply sludge, waste limestone powder and ark shell within a rang of 20 - 25%, 25 - 50% and 5 - 75% could produce cements having major compounds such as  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  and  $C_4AF$  comparable to those exist in OPC and having heavy metals lower than the allowable standard. Based on X-Ray Diffraction (XRD) analysis and Scanning Electron Microscope (SEM) observations, it was revealed that the produced cements possessed Hydration as initial reaction and Pozzolanic Reaction as long term reaction similarly to those found in OPC. In this study, a mixture of combined wastes such as water supply sludge, waste limestone powder ark shell and hydrated lime at a proportion of 25 : 50 : 5 : 20 was selected as a representative of mix using burning rate  $7^\circ C/min$ . and a maximum temperature of  $1,450^\circ C$  to produce cement in order to perform physical property tests, study on strength of mortars and soil cement and relevant development mechanisms for evaluation of possible applications in civil and environmental engineering.

Based on the experimental results, mortars gained in strength with curing time, however, having relatively lower in strength than those of OPC mortars. In addition, the soil stabilized with a waste-based cement markedly gained in strength higher than those stabilized with OPC. Additionally, soil cement strength was found to increase with an increase in cement fineness due to rapid initial reaction of  $C_3A$  to form Calcium Aluminate Hydrate (CAH) and Ettringite, and consequent reaction of  $C_3S$  and  $C_2S$  to form Calcium Silicate Hydrate (CSH). The results of strength development in soil cement were agreeable with results of total suction measurements and observations on change on microstructures of the cement stabilized soils.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ นนทนานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่ให้ความอนุเคราะห์อย่างยิ่งในการให้คำแนะนำปรึกษา ตรวจสอบแก้วิทยานิพนธ์และเมตตาอบรมสั่งสอน

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ นนทนานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่ให้ความอนุเคราะห์อย่างยิ่งในการให้คำแนะนำปรึกษา ตรวจสอบแก้วิทยานิพนธ์และเมตตาอบรมสั่งสอนตลอดมา พร้อมกันนี้ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ก่อโชค จันทรวงกูร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ โชติสังกาศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ มาณักฤษณะชลี ประธานกรรมการดำเนินการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวเลข วัฒนเวทิน ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้คำแนะนำเทคนิคการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง และเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง) จำกัด จังหวัดสระบุรี โดยคุณวรการ พงษ์ศิริกุล คุณนิสิต ยูรัตน์ และคุณทวิศักดิ์ แซ่มมณี ในการให้ความอนุเคราะห์วิเคราะห์สมบัติปูนซีเมนต์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสะอาด คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และอาจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ขอขอบคุณ นายเกียรติคุณ ทองแดง นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และนายกฤตย์คมขำ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ร่วมทำงานวิจัยด้วยกัน และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร ที่จัดสรรทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี 2552 และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่จัดสรรทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี 2553 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมจิตต์-คุณแม่อัปสร อยู่บรรพต ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม สั่งสอน และเมตตาต่อลูกอย่างไม่รู้ที่สุดเสมอมา และขอขอบพระคุณญาติพี่น้องทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจให้ บุญกุศลที่พึงบังเกิดจากงานวิจัยนี้ ขออุทิศแด่อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์อันดีงามอันเป็นหลักสำคัญในการดำเนินชีวิตอย่างถูกต้องต่อไป

ณพล อยู่บรรพต

พฤษภาคม 2554

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	45
อุปกรณ์	45
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์	81
สรุปและข้อเสนอแนะ	217
สรุป	217
ข้อเสนอแนะ	220
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	222
ภาคผนวก	233
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ	234
ภาคผนวก ข ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินซีเมนต์	244
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	247

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณกากอุตสาหกรรมในประเทศไทยที่นำกลับมาใช้ใหม่	7
2	ปริมาณน้ำจำหน่ายของการประปานครหลวง	9
3	ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน	13
4	สมบัติทั่วไปของ Eco-Cement	14
5	สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์	15
6	เปรียบเทียบค่าโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ	22
7	อัตราส่วนสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	29
8	เกณฑ์กำหนดเบื้องต้นในการคำนวณสัดส่วนผสม	55
9	รายละเอียดรูปแบบการเผา	58
10	รายละเอียดการบดปูนเม็ดที่ความละเอียดต่างๆ	62
11	เกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้ามาตรฐานตาม ASTM C109	65
12	แผนและระยะเวลาการดำเนินการวิจัย	80
13	ค่าความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของกากอุตสาหกรรม	82
14	ผลทดสอบการวัดขนาดผลของอนุภาคเถ้าลอย	83
15	องค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ	84
16	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของวัตถุดิบหลักตั้งต้น โดยวิธี Atomic Absorption	89
17	สัดส่วนผสมกรณีศึกษาที่ 1	90
18	การคำนวณค่าไฮเดรชัน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M1	91
19	สัญลักษณ์และจำนวนตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 1	91
20	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลังจากการเผา (แบ่งตามรูปแบบการเผา)	93
21	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลังจากการเผา (แบ่งตามสัดส่วนผสม)	96
22	สัดส่วนผสมกรณีศึกษาที่ 2	102
23	สัญลักษณ์และจำนวนตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 2	103
24	ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลังจากการเผาในกรณีศึกษาที่ 2	104

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
25	สัญลักษณ์และสัดส่วนผสมกรณีศึกษาที่ 3	106
26	สัญลักษณ์และสัดส่วนผสม กรณีศึกษาที่ 4	108
27	น้ำหนักของสารผลิตภัณฑ์รวมหลังการเผาในกรณีศึกษาที่ 4	109
28	ค่าไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของวัตถุดิบตั้งต้น	113
29	องค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ	114
30	สารประกอบหลัก $C_3S$ , $C_2S$ , $C_3A$ และ $C_4AF$ ของปูนเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ	114
31	ปริมาณสารประกอบหลักของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ XRD	116
32	องค์ประกอบทางเคมีของ OPC และ GCM	123
33	สารประกอบหลัก $C_3S$ , $C_2S$ , $C_3A$ และ $C_4AF$ ของ OPC และ GCM	123
34	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของสารเชื่อมประสาน GCM	128
35	ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของสารเชื่อมประสาน GCM	129
36	ค่ากำลังรับแรงอัดอ้อมอร์ต้าที่ผลิตจากตัวอย่าง S4 เมื่อผสมยิปซัมที่อัตราส่วนต่างๆ	131
37	ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ที่ความละเอียดต่างๆ	132
38	ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนสังเคราะห์ GCM ที่อายุการบ่มต่างๆ	133
39	แสดงปริมาณสารประกอบหลัก $C_3S$ และ $C_2S$ ของซีเมนต์เพสต์ปูน OPC และ GCM	144
40	แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ $Ca(OH)_2$ ของซีเมนต์เพสต์ปูน OPC และ GCM	145
41	องค์ประกอบทางเคมีของ BCM และ OPC	157
42	สารประกอบหลัก $C_3S$ , $C_2S$ , $C_3A$ และ $C_4AF$ ของ BCM และ OPC	157
43	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของสารเชื่อมประสาน BCM	160
44	ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของ BCM	160
45	ค่ากำลังอัดของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM เมื่อผสมยิปซัมที่อัตราส่วนต่างๆ	161

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
46	ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM ที่อายุการบ่มต่างๆ	162
47	ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM 80 : OPC 20	163
48	แสดงปริมาณสารประกอบหลักของซีเมนต์เพสต์ปูน OPC และ BCM	166
49	แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ $\text{Ca(OH)}_2$ ของซีเมนต์เพสต์ปูน OPC และ BCM	167
50	สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อน	170
51	สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน	173
52	สัญลักษณ์และรายละเอียดตัวอย่างดินซีเมนต์	173
53	ค่าการรับกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	174
54	ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ (Water content) เป็นเปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มต่างๆ	178
55	ความหนาแน่นเปียกของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	180
56	Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	182
57	แสดงปริมาณสารประกอบหลัก $\text{C}_3\text{S}$ และ $\text{C}_2\text{S}$ ของดินซีเมนต์	187
58	แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ CAH ของดินซีเมนต์	187
59	ผลการวัดแรงคูดในดินซีเมนต์	199
60	สัญลักษณ์ตัวอย่างคอนกรีตพูนที่อัตราส่วน โพรงเท่ากับ 30%	212
61	ผลการทดสอบสมบัติคอนกรีตพูน	212
62	การคำนวณราคาค่าขนส่งจากอุตสาหกรรมต่อ 1 เทียวรถบรรทุก (14 ตัน)	215
63	การคำนวณราคาค่าขนส่งจากอุตสาหกรรมต่อ 1 ตัน	216

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงประเภทและปริมาณของกากอุตสาหกรรมที่นำกลับมาใช้ใหม่	7
2	ปริมาณการเกิดเถ้าลอยและเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	10
3	การทำลายกากอุตสาหกรรมแบ่งตามประเภทการทำลาย	11
4	ภาพตัดขวางทั่วไปของอนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	16
5	ภาพแสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต	17
6	ภาพขยาย Ettringite จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	19
7	Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems	22
8	Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems ที่ปรับปรุงโดย AitCin	23
9	Bragg's law	25
10	ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 3 วัน	26
11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	27
12	ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 90 วัน	28
13	โครงสร้างดินที่ผสมด้วยซีเมนต์	31
14	ปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินกับซีเมนต์	32
15	โครงสร้างดินซีเมนต์	33
16	โครงสร้างดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยกากตะกอนเหล็ก	34
17	แรงดันน้ำในสถานะสถิตย์	37
18	ลักษณะอนุภาคดินที่ไม่อิมตัวด้วยน้ำ	39
19	แผนการวิจัยส่วนที่ 1	49
20	บ่อตากตะกอนประปา กรุงเทพมหานคร	50
21	ฝุนผงหินปูน จังหวัดสระบุรี	50
22	เปลือกหอยแครง จังหวัดเพชรบุรี	51
23	เถ้าลอยลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	51
24	ลักษณะผงแห้งของเปลือกหอยแครงหลังจากบด	52
25	เครื่องทดสอบด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD)	53

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	อุปกรณ์การวิเคราะห์ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)	54
27	รูปแบบการเผาที่ช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างๆ	56
28	เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงและอุปกรณ์ประกอบ	59
29	ขั้นตอนการเผาในเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง	60
30	การเก็บรักษาสารเชื่อมประสานหลังจากการเผา	61
31	แผนการวิจัยส่วนที่ 2	63
32	ครกอาร์เกต	64
33	ชุดเหล็กบดละเอียด	64
34	เครื่องบดความละเอียดความเร็วสูง	64
35	อุปกรณ์ทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า	66
36	การวัดแรงดูดเมตริกของดินเหนียวอ่อนด้วยเคอูเทนสิโอมิเตอร์	68
37	อุปกรณ์สำหรับการวัดแรงดูดเมตริก (Metrix suction)	68
38	การทดสอบการรับกำลังอัดของดินซีเมนต์	69
39	การหุ้มตัวอย่างด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์	70
40	การวัดแรงดูดรวมของดินซีเมนต์ด้วยอุปกรณ์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity sensor)	71
41	อุปกรณ์การวัดแรงดูดรวม (Total suction)	72
42	เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger)	72
43	การกระจายตัวของอนุภาคของกากอุตสาหกรรม	82
44	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเปลือกหอยแครง	85
45	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฝุ่นผงหินปูน	85
46	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของตะกอนประปา	86
47	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเถ้าลอย	86
48	เปลือกหอยแครง (กำลังขยาย x 500)	87
49	ฝุ่นผงหินปูน (กำลังขยาย x 1,000)	88

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	ตะกอนประปา (กำลังขยาย x 1,000)	88
51	ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (กำลังขยาย x 1,000)	88
52	ลักษณะตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผา	92
53	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการเผากับปริมาณก้อนแข็งผลึกคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์	95
54	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการเผากับปริมาณผงฝุ่นคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์	95
55	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับปริมาณก้อนผลึกแข็งคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์	98
56	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับปริมาณผงฝุ่นคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์	98
57	การทดสอบการแข็งตัวของเพสต์ก้อนผลึกแข็ง	99
58	การทดสอบการแข็งตัวของเพสต์ก้อนผลึกแข็งในลักษณะก้อนมวลใหญ่	100
59	การทดสอบการแข็งตัวของเพสต์ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน	100
60	การทดสอบความทนทานของก้อนเพสต์ผงฝุ่นในกรณีแช่น้ำเป็นเวลานาน	101
61	ลักษณะตัวอย่างหลังเผา เมื่อไม่มีส่วนผสมของถ้ำลอย	103
62	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างกับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษาที่ 2 คิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์	105
63	ลักษณะหินปูนเม็ด	107
64	สารผลิตภัณฑ์หลังการเผาในกรณีศึกษาที่ 3	107
65	สารผลิตภัณฑ์ M9R6 หลังการเผาในกรณีศึกษาที่ 4	109
66	การไม่จับตัวกันของเพสต์ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลเข้ม	109
67	การแข็งตัวของเพสต์จากก้อนผลึกแข็งที่บดละเอียดร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 จากสัดส่วน M8R6	111
68	การทดสอบความทนทานของก้อนเพสต์จากก้อนผลึกแข็งในกรณีแช่น้ำเป็นเวลานาน	111
69	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของปูนเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ	117

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
70	รูปแบบการเผา R6 แบ่งตามขั้นตอนการเผา 9 ระดับ	118
71	กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาอุณหภูมิสูงในช่วงระยะเวลา 5.85 ชั่วโมง	118
72	การเกิดสารประกอบของปูนเม็ดในแต่ละช่วงอุณหภูมิการเผา	119
73	สรุปขั้นตอนการออกแบบตัดส่วนผสมเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์	122
74	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารเชื่อมประสาน GCM (anhydrous)	125
75	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารเชื่อมประสาน GCM (anhydrous)	125
76	CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> System ของ OPC และสารเชื่อมประสาน GCM	126
77	อนุภาคปูนซีเมนต์ OPC (กำลังขยาย x 3,000)	127
78	อนุภาคสารปูนซีเมนต์ GCM (กำลังขยาย x 3,000)	127
79	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดกับความถ่วงจำเพาะของสารเชื่อมประสาน GCM	130
80	ลักษณะมอร์ต้าที่ผลิตจากตัวอย่าง S4 ก่อนทดสอบการรับกำลังอัด	130
81	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ต้า GCM กับอายุการบ่ม	134
82	แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า OPC ที่อายุการบ่มต่างๆ	136
83	แสดงลักษณะการขยายตัวและบวมตัวของมอร์ต้า S1 ที่อายุการบ่มต่างๆ	136
84	แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S2 ที่อายุการบ่มต่างๆ	137
85	แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S3 ที่อายุการบ่มต่างๆ	137
86	แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S4 ที่อายุการบ่มต่างๆ	138
87	แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S5 ที่อายุการบ่มต่างๆ	138
88	แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S6 ที่อายุการบ่มต่างๆ	139
89	แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S7 ที่อายุการบ่มต่างๆ	139
90	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความถ่วงจำเพาะ	140
91	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความละเอียด	141

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
92	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุการบ่มต่างๆ	142
93	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ S5 ที่อายุการบ่มต่างๆ	142
94	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ S6 ที่อายุการบ่มต่างๆ	143
95	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ S7 ที่อายุการบ่มต่างๆ	143
96	ปริมาณ $C_3S$ ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	146
97	ปริมาณ $C_2S$ ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	146
98	ปริมาณ CSH ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	147
99	ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	147
100	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ	149
101	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ S5 เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ	151
102	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ S6 เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ	153
103	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ S7 เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ	155
104	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารเชื่อมประสาน BCM (anhydrous)	158
105	$CaO-Al_2O_3-SiO_2$ System ของ OPC และสารเชื่อมประสาน BCM	159
106	อนุภาคสารเชื่อมประสาน BCM (กำลังขยาย x 3,000)	159
107	ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้า BCM และมอร์ต้า BCM 80 : OPC 20	164
108	การวิบัติของมอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่มต่างๆ	165
109	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ BCM ที่อายุการบ่มต่างๆ	166
110	ปริมาณ $C_2S$ ของ BCM เพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	167
111	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ BCM เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ	168

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
112	การกระจายตัวของขนาดเม็ดดินของดินเหนียวอ่อน	171
113	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของดินเหนียวอ่อน ก่อนการปรับปรุงคุณภาพ	171
114	ดินเหนียวอ่อน (กำลังขยาย x 3000)	172
115	ไคอะตอม (กำลังขยาย x 3000)	172
116	การพัฒนาปรับกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	175
117	การวัดดัชนีของดินซีเมนต์ SCM1 ที่อายุการบ่มต่างๆ	176
118	การวัดดัชนีของดินซีเมนต์ SCM2 ที่อายุการบ่มต่างๆ	176
119	การวัดดัชนีของดินซีเมนต์ SCM3 ที่อายุการบ่มต่างๆ	177
120	การวัดดัชนีของดินซีเมนต์ SCM4 ที่อายุการบ่มต่างๆ	177
121	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	179
122	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณน้ำในดิน	179
123	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	181
124	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความหนาแน่น	181
125	การเปลี่ยนแปลง Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์ ที่อายุการบ่มต่างๆ	183
126	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ )	183
127	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของดินซีเมนต์ SCM1 ที่อายุการบ่มต่างๆ	184
128	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของดินซีเมนต์ SCM2 ที่อายุการบ่มต่างๆ	185
129	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของดินซีเมนต์ SCM3 ที่อายุการบ่มต่างๆ	185
130	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของดินซีเมนต์ SCM4 ที่อายุการบ่มต่างๆ	186
131	ปริมาณ $C_3S$ ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	188

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
132	ปริมาณ $C_2S$ ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	188
133	ปริมาณ $CSH$ ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	189
134	ปริมาณ $CAH$ ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ	189
135	โครงสร้างดินซีเมนต์ SCM1 ที่อายุการบ่มต่างๆ	191
136	โครงสร้างดินซีเมนต์ SCM2 ที่อายุการบ่มต่างๆ	193
137	โครงสร้างดินซีเมนต์ SCM3 ที่อายุการบ่มต่างๆ	195
138	โครงสร้างดินซีเมนต์ SCM4 ที่อายุการบ่มต่างๆ	197
139	การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ SCM1	200
140	การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ SCM2	201
141	การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ SCM3	201
142	การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ SCM4	202
143	การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่ม	202
144	ความชื้นสัมพัทธ์กับปริมาณน้ำในดินของดินซีเมนต์	204
145	การเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ SCM1	205
146	การเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ SCM2	205
147	การเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ SCM3	206
148	การเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ SCM4	206
149	การเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่ม	207
150	แรงคูรวมกับความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์	208
151	แรงคูรวมกับกำลังอัดของดินซีเมนต์	208
152	แรงคูรวมกับปริมาณน้ำในดินของดินซีเมนต์	209
153	แรงคูรวมกับความหนาแน่นของดินซีเมนต์	209
154	แรงคูรวมกับ Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์	210
155	ตัวอย่างคอนกรีตพูนก่อนทดสอบ	212
156	ตัวอย่างคอนกรีตพูนหลังทดสอบ	213

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	การคำนวณไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M1	235
ก2	การคำนวณไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M2	236
ก3	การคำนวณไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M3	237
ก4	การคำนวณไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M4	238
ก5	การคำนวณไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M5	239
ก6	การคำนวณไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M6	240
ก7	การคำนวณไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M7	241
ก8	การคำนวณไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M8	242
ก9	การคำนวณไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M9	243
ข1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ SCM1	245
ข2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ SCM2	245
ข3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ SCM3	246
ข4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ SCM4	246

## การพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

### Development of Cementitious Materials using Industrial Wastes as Construction Materials

#### คำนำ

ในช่วงระยะเวลาไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ประเทศไทยมีการพัฒนาความเจริญในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้ประเทศไทยมุ่งเน้นการพัฒนาเป็นประเทศที่มีอุตสาหกรรมหนักขนาดใหญ่ และปัญหาที่คาดว่าจะเกิดตามมาจากการพัฒนาในกระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมคือ ปัญหาการเพิ่มขึ้นของกากอุตสาหกรรม และการขาดประสิทธิภาพในการกำจัดของเสีย ซึ่งปริมาณกากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) รัฐบาลต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมากในการกำจัดกากอุตสาหกรรมเหล่านี้ ทั้งยังต้องมีการกำจัดให้ถูกวิธีเพื่อป้องกันปัญหาสารพิษตกค้าง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปัญหามลภาวะและสิ่งแวดล้อม

วิธีการที่จะแก้ปัญหการเพิ่มขึ้นของกากอุตสาหกรรมประการหนึ่งก็คือ การลดปริมาณกากอุตสาหกรรม แต่ในปัจจุบันแนวคิดในการพัฒนาและการจัดการสิ่งแวดล้อมเพื่อก้าวสู่สังคมยุคใหม่แบบ 3Rs กำลังเป็นที่นิยม และได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยใช้หลักการลดการใช้วัสดุและผลิตภัณฑ์เพื่อลดปริมาณกากที่เกิดขึ้น (Reduce) มีการนำวัสดุและผลิตภัณฑ์ที่ยังสามารถใช้งานได้กลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) และนำเศษวัสดุและผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานแล้วมาแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Recycle) ซึ่งจะช่วยลดปริมาณกากจากแหล่งกำเนิด เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กากอุตสาหกรรม และยังเป็นการแสวงหาแหล่งทรัพยากรใหม่ๆ อีกทางหนึ่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2550)

นักวิจัยหลายท่านพบว่ามีการกากอุตสาหกรรมในประเทศไทยหลายชนิด มีศักยภาพเหมาะสมในการนำกลับมาใช้ใหม่โดยการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้ เช่น แก้วตะกอนสลัดจ์ ตะกอนประปา หรือ แก้วลอย เป็นต้น (สมเกียรติ, 2541; จิตรกร, 2543; Nontananandh *et al*, 2004; เกศรินทร์, 2550) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่สอดคล้องกับแนวคิดแบบ 3Rs โดยทำการคัดเลือกกากที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และมีสมบัติเหมาะสมตามเกณฑ์ NICE Criteria (Nontananandh *et al*, 1991)

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางการผลิตสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์สังเคราะห์) ที่มีลักษณะเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ โดยการนำกากอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท (Waste combination) ที่มีศักยภาพเหมาะสมกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นทดแทนในขั้นตอนของอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น การรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่อายุการบ่มต่างๆ เทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I การศึกษาผลของความละเอียด การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี การศึกษากลไกการพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ในระดับจุลภาค

สำหรับการนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์มาประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้าง ได้เสนอแนวทางการนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน (ดินซีเมนต์) และทดสอบสมบัติการรับกำลังอัดแบบแกนเดียว พร้อมทั้งศึกษากลไกการพัฒนากำลังในดินซีเมนต์ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของดินซีเมนต์ในระดับจุลภาค และศึกษาสมบัติด้านแรงดูดของดินซีเมนต์ นอกจากนี้ได้ศึกษาวิจัยร่วมกับเกียรติคุณ (2554) ในการนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ผลิตคอนกรีตพูนใช้สำหรับงานที่ไม่ต้องการการรับกำลังอัดสูง เช่น งานปูพื้นทางเดิน งานบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

ผลการวิจัยนี้คาดว่าจะจะเป็นประโยชน์หลายประการ เช่น เป็นนวัตกรรมปูนซีเมนต์สังเคราะห์ชนิดใหม่จากกากอุตสาหกรรม ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุใหม่ที่เกิดจากกากอุตสาหกรรมที่สังเคราะห์แล้ว และยังเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับระบบสาธารณูปโภคของรัฐและเอกชน ตลอดจนโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ในการจัดการกากอุตสาหกรรมปริมาณมากๆ ช่วยลดมลภาวะสิ่งแวดล้อมจากขั้นตอนในการกำจัดกากอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้ ซึ่งจะช่วยประหยัดงบประมาณค่าใช้จ่ายได้มากในแต่ละปี นอกจากนี้เป็นการลดมลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมแล้ว อาจมีการพัฒนาต่อยอดในเชิงพาณิชย์และส่งออกกากอุตสาหกรรมไปขายยังต่างประเทศ สามารถทำรายได้เข้าประเทศได้อีกทางหนึ่งในอนาคต

## วัตถุประสงค์

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้

1. ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการนำกลับไปใช้ใหม่ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ และทำการคัดเลือกชนิดของกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพนำมาใช้ในการผลิตสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์สังเคราะห์)
2. ศึกษาวิธีการและผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ ที่มีลักษณะเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ และนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้ จากกากอุตสาหกรรมต่างๆ
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ ซึ่งสามารถคาดคะเนสมบัติเชิงกายภาพได้
4. ตรวจสอบสมบัติของมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ และทดสอบสมบัติอื่นๆ เพื่อหาศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง
5. ศึกษาวิธีและสัดส่วนในการนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้าง

## ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยมีขอบเขตการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษาสมบัติของกากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นภายในประเทศได้แก่ ตะกอนประปา ฝุ่นผง หินปูน และ เปลือกหอยแครง ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ โดยคำนวณส่วนผสมและศึกษารูปแบบการเผาที่เหมาะสมเพื่อผลิตปูนเม็ด (Clinker) ด้วยเตาเผาไฟฟ้า อุณหภูมิสูงในห้องปฏิบัติการ

2. ทำการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ด้านต่างๆ เช่น ความละเอียด ระยะเวลา ก่อตัว กำลังอัดมอร์ต้าที่อายุการบ่มต่างๆ เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I ทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบ (X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือ XRF) ศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์และกลไกปฏิกิริยาการพัฒนากำลังอัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer หรือ XRD) และศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope หรือ SEM)

3. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ไปประยุกต์ใช้งานปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (ดินซีเมนต์) และทดสอบสมบัติของดินซีเมนต์เช่น ทดสอบสมบัติการรับกำลังอัดแบบแกนเดี่ยว ศึกษากลไกการพัฒนากำลังในดินซีเมนต์ด้วยวิธี XRD ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของดินซีเมนต์ในระดับจุลภาคด้วย SEM การศึกษาสมบัติด้านแรงดูดของดินซีเมนต์แบบวัดแรงดูดรวม (Total suction)

## การตรวจเอกสาร

### แนวคิดการจัดการสิ่งแวดล้อม

การพัฒนาด้านอุตสาหกรรม และการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรส่งผลให้มีการนำทรัพยากรธรรมชาติมาใช้มากมาย เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้น การนำทรัพยากรเหล่านี้มาใช้ประโยชน์จนเกินขีดความสามารถของธรรมชาติที่จะฟื้นฟูและทดแทนของเดิมที่ถูกใช้ไปนั้นจะส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อมนุษย์ เช่น การขาดแคลนวัตถุดิบจากธรรมชาติ การปนเปื้อนของสารพิษลงสู่ธรรมชาติ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งมีผลต่อคุณภาพชีวิตที่ดี เป็นต้น การจัดการด้านสิ่งแวดล้อมจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในทุกด้าน ทุกสาขาที่เกี่ยวข้อง โดยยึดหลักการอนุรักษ์ของเดิมที่มีอยู่ การใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และการแสวงหาแหล่งทรัพยากรทดแทนแหล่งใหม่ๆ เพื่อให้มีการคงอยู่ของทรัพยากรธรรมชาติอันเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญ

สำหรับในกลไกกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม จะต้องมีการแสวงหาแหล่งทรัพยากรทดแทนแหล่งใหม่ๆ โดยในกระบวนการผลิตจะต้องไม่ก่อให้เกิดการปลดปล่อยสารพิษลงสู่แหล่งธรรมชาติทั้งทางดิน น้ำ และอากาศ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพปราศจากอันตรายจากสารพิษตกค้าง ซึ่งแนวความคิดการปล่อยมลพิษเป็นศูนย์หรือ Zero Emission Concept เป็นแนวความคิดที่ถูกนำมาใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม โดยอยู่ในหลักการที่ว่า “ภาคอุตสาหกรรมจากโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งจะสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนหรือเชื้อเพลิงทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมอื่นได้” (พวงรัตน์ และเอกชัย, 2548)

### แนวคิดการจัดการกากอุตสาหกรรม

การจัดการกากอุตสาหกรรมด้วยการนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมหนึ่งมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นทดแทนวัสดุอีกชนิดหนึ่งเป็นแนวความคิดใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และได้เริ่มมีการศึกษาและทดลองใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายๆ ประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย และญี่ปุ่น ซึ่งเป็นประเทศที่มีอุตสาหกรรมหนักขนาดใหญ่เป็นปริมาณมากในอันดับแนวหน้าของโลก และมีปริมาณกากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตต่อปีสูงมาก ซึ่งการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่นี้สามารถดำเนินการได้หลายวิธีเช่น เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ส่งกลับผู้ขายเพื่อกำจัดหรือใช้ซ้ำ หรือเป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ เป็นต้น

เนื่องจากกากอุตสาหกรรมมีมากมายหลายชนิด มีแหล่งที่มาแตกต่างกัน ทำให้สมบัติและองค์ประกอบต่างๆ ไม่เหมือนกัน ดังนั้นการคัดเลือกกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพเหมาะสมกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่จะต้องวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุเบื้องต้นก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ และต้องสอดคล้องกับ “NICE Criteria” (Nontananandh *et al*, 1991) ซึ่งมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1. N หมายถึง Nonhazardous waste material ต้องทำการวิเคราะห์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่จะนำไปใช้อย่างละเอียด เพื่อมั่นใจว่าไม่มีสารพิษเฉียบหรือมีในปริมาณที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย

2. I หมายถึง Waste with high Improvability เป็นวัสดุซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ได้เช่น ความสามารถในการทำงาน (Workability) กำลังรับแรงอัด และมีความเป็นเนื้อเดียวกันผสมผสานเข้ากันได้ดีกับวัสดุอื่นๆ ตลอดอายุการใช้งาน

3. C หมายถึง Waste with high Compatibility ควรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปนที่ไม่มีประโยชน์น้อยที่สุด

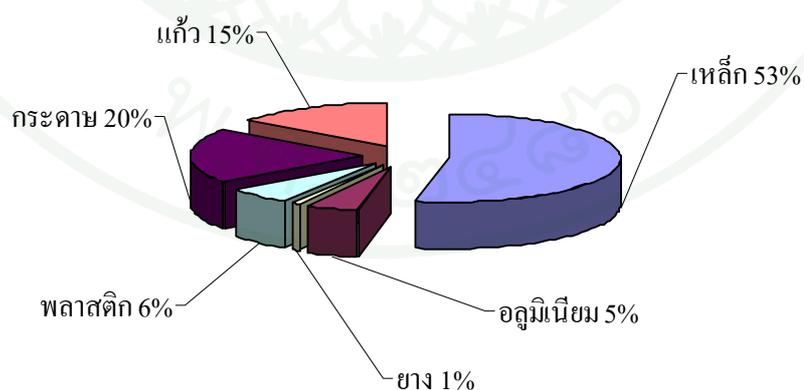
4. E หมายถึง Waste with high Economic Feasibility เป็นวัสดุซึ่งมีคุณภาพสูงแต่มีราคาต่อหน่วยต่ำ มีปริมาณมากพอสำหรับโครงการหนึ่งๆ ง่ายต่อการขนส่งและการเก็บรักษา

สำหรับในประเทศไทย ปริมาณกากอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ซึ่งประเทศไทยได้นำหลักการ 3R (Reduce-Reuse-Recycle) มาใช้บริหารจัดการกากอุตสาหกรรม ข้อมูลจากตารางที่ 1 พบว่าปริมาณการนำกากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปีเช่นกัน สำหรับการนำกากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่นี้ เมื่อทำการแบ่งตามประเภทพบว่ามี การนำเหล็กกลับมาใช้ใหม่ในสัดส่วนที่สูงสุด รองลงมาได้แก่ กระดาษ แก้ว พลาสติก อลูมิเนียม และ ยาง ตามลำดับ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกากอุตสาหกรรมที่จัดอยู่ในอุตสาหกรรมหนักเกือบทั้งหมด ดังแสดงตามภาพที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณกากอุตสาหกรรมในประเทศไทยที่นำกลับมาใช้ใหม่

ปี พ.ศ.	ปริมาณกากอุตสาหกรรม ที่เกิดขึ้น (ล้านตัน)	ปริมาณกากอุตสาหกรรม ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (ล้านตัน)	ร้อยละ
2542	11.70	5.20	44.44
2543	10.80	5.33	49.35
2544	11.30	5.10	45.13
2545	11.40	5.48	48.07
2546	12.40	5.30	42.74
2547	14.56	8.35	57.35
2548	11.08	7.08	63.90
2549	12.88	8.26	64.13
2550	13.04	8.45	64.80
2551	11.55	7.22	62.51
2552	11.91	8.09	67.93
2553	12.09	8.06	66.67

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2554)



ภาพที่ 1 แสดงประเภทและปริมาณของกากอุตสาหกรรมที่นำกลับมาใช้ใหม่

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2550)

ปริมาณกากอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ปีนี้ เป็นผลเนื่องมาจากมีผู้ศึกษาวิจัยในการนำกลับมาใช้ใหม่น้อย มีการผลิตเป็นปริมาณมาก และมีอยู่ทั่วไป เช่น ตะกอนประปา เป็นต้น ดังนั้นในการนำกากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณมากกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุก่อสร้าง นอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนกำจัดทิ้ง ลดมลภาวะสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นคัดเลือกกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพเหมาะสมผ่านเกณฑ์ NICE criteria และมีปริมาณมาก ทำการศึกษาวิจัยเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ซึ่งสามารถนำมาใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างได้ โดยการคัดเลือกชนิดกากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ จะพิจารณาวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบเทียบเคียงกับวัตถุดิบที่ใช้ผลิตปูนซีเมนต์ เช่น เปลือกหอยแครง ฟูนผงหินปูน มีองค์ประกอบหลักจำพวกแคลเซียม และตะกอนประปา เถ้าลอย มีองค์ประกอบหลักจำพวกซิลิกาและอลูมินา เป็นต้น

สำหรับปริมาณของกากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณมากมีหลายชนิด เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร หอยแครงเป็นหอยน้ำเค็มที่มีความต้องการบริโภคกันเป็นปริมาณมาก หลังจากแกะเนื้อหอยเพื่อจำหน่ายแล้ว เปลือกหอยแครงจะถูกนำมากองทิ้งไว้ตามบริเวณที่ใกล้กับแหล่งผลิตหรือบริเวณที่เพาะเลี้ยง ซึ่งจังหวัดที่มีการเพาะเลี้ยงหอยแครงกันมากได้แก่ เพชรบุรี สมุทรสงคราม สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช ภูเก็ต สตูล และปัตตานี (กรมประมง, 2554) ซึ่งสำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร (2552) รายงานปริมาณความต้องการหอยแครงภายในประเทศในแต่ละปีมีประมาณ 80,000 ตันต่อปี จากงานศึกษาวิจัยของสุขกมล (2545) พบว่าในอดีตที่ผ่านมาเปลือกหอยมีศักยภาพเหมาะสมและมีความเป็นไปได้ในการที่จะนำกลับมาใช้ในการเผาเพื่อผลิตปูนขาว หรือปูนจากเปลือกหอย

ฟูนผงหินปูนเป็นกากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ หลังจากกระเปิดหินปูนเพื่อนำหินปูนไปย่อยเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่โรงโม่หินแล้ว จะเกิดฟูนผงหินปูนอันเนื่องมาจากขั้นตอนการย่อยหินปูนประมาณ 30% โดยน้ำหนัก ในการผลิตปูนซีเมนต์ปริมาณ 1 ตัน ต้องใช้วัตถุดิบประมาณ 1.50 ตัน โดยหินปูนเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้เป็นปริมาณมากถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงคิดเป็นปริมาณหินปูน 0.9 ตัน ปัจจุบันช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา มีความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ภายในประเทศเฉลี่ย 30 ล้านตันต่อปี ซึ่งต้องใช้หินปูนเป็นวัตถุดิบจำนวน 27 ล้านตันต่อปี ดังนั้นจะก่อให้เกิดฟูนผงหินปูนประมาณ 8-10 ล้านตันต่อปี

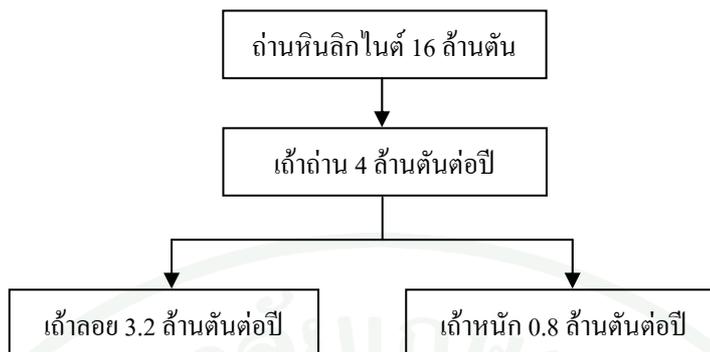
อุตสาหกรรมการผลิตน้ำประปาเพื่อใช้ในการอุปโภค-บริโภค จะก่อให้เกิดตะกอนประปาขึ้นจากขั้นตอนการตกตะกอนของน้ำดิบ ซึ่งจัดเป็นกากอุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่งที่มีแนวโน้มปริมาณการเกิดมากขึ้นในทุกๆ ปี จากตารางที่ 2 พบว่าในปี พ.ศ.2553 เมื่อคิดเทียบปริมาณน้ำจำหน่ายต่อปีเป็นปริมาณน้ำที่ผลิตต่อวันจะได้ประมาณ 3.51 ล้าน ลบ.ม. ต่อวัน จะมีตะกอนประปาเกิดขึ้นมากกว่า 60,000 ตันต่อปี หรือประมาณ 170 ตันต่อวัน การประปานครหลวงจะทำการประกวดราคาจัดจ้างให้บริษัทเอกชนมารับดำเนินการกำจัดตามขั้นตอนต่อไป นอกจากนี้หน่วยงานของรัฐแล้ว ยังมีหน่วยงานเอกชนอีกหลายแห่งที่รับสัมปทานการผลิตน้ำประปาซึ่งก่อให้เกิดปริมาณตะกอนประปาเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำจำหน่ายของการประปานครหลวง

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำจำหน่าย (ล้าน ลบ.ม.)
2548	1,131.0
2549	1,172.9
2550	1,224.0
2551	1,250.6
2552	1,250.3
2553	1,281.9

ที่มา: การประปานครหลวง (2554)

สำหรับในอุตสาหกรรมด้านพลังงานเช่น การผลิตกระแสไฟฟ้านั้น ถ้ำลอยเป็นกากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นมาจากการเผาถ่านหินเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางเป็นโรงไฟฟ้าที่มีปริมาณถ้ำลอยเกิดขึ้นมากที่สุดในประเทศ โดยในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจะต้องเผาถ่านหินลิกไนต์ 16 ล้านตันต่อปี ก่อให้เกิดถ้ำถ่านประมาณ 25 % โดยน้ำหนัก (4 ล้านตัน) ซึ่งถ้ำถ่านที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ถ้ำลอย 80% โดยน้ำหนัก (3.2 ล้านตัน) และ ถ้ำหนัก 20% โดยน้ำหนัก (0.8 ล้านตัน) ดังแสดงตามภาพที่ 2 โดยโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะยังคงปริมาณการเผาถ่านหินไว้ในระดับนี้เนื่องจากข้อจำกัดของโรงกำจัดถ้ำ พื้นที่กองเก็บ ปริมาณฝุ่นในอากาศ และสภาวะสิ่งแวดล้อมในบริเวณพื้นที่โดยรวม

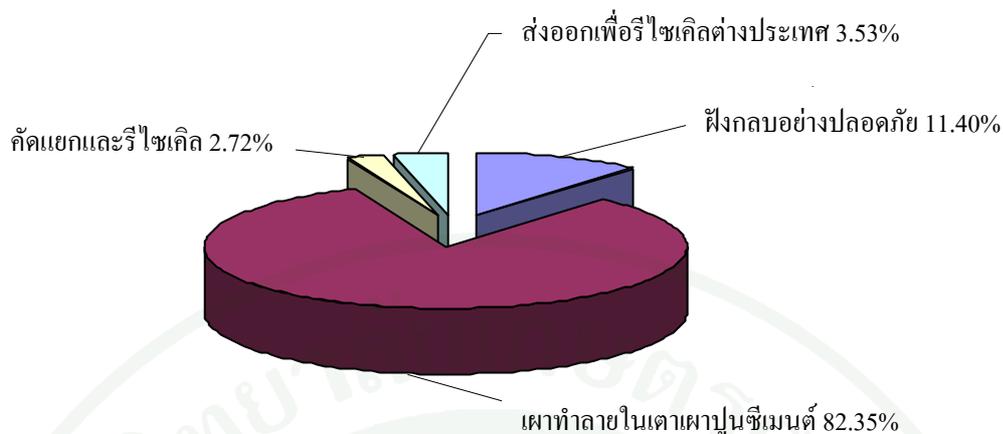


ภาพที่ 2 ปริมาณการเกิดถ่านลอยและถ่านหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2551)

ถ่านลอยจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ เป็นวัสดุที่กระทรวงอุตสาหกรรม ประกาศให้เป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) และจัดเป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในประเภทสารซึ่งถูกชะล้างได้ (Leachable Substances) จึงต้องทดสอบด้วยวิธีสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) และใช้วิธีวิเคราะห์น้ำที่ถูกสกัดตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดในประกาศฯ เพื่อตรวจว่ามีปริมาณ โลหะหนัก หรือวัตถุมีพิษอยู่ในน้ำสกัดเท่ากับ หรือมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ในประกาศฯ หรือไม่ ผลการวิเคราะห์พบว่า ถ่านลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีโลหะหนัก หรือวัตถุมีพิษอยู่ในน้ำสกัดในปริมาณที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในประกาศฯ ไว้ค่อนข้างมาก จึงไม่เข้าข่ายเป็นสารพิษที่ต้องกำจัดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับดังกล่าว และสามารถนำถ่านลอยลิกไนต์แม่เมาะมาใช้งานได้โดยปลอดภัยเช่นเดียวกับวัสดุก่อสร้างทั่วไปได้ (สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย, 2543)

การทำลายกากอุตสาหกรรม เมื่อแบ่งตามประเภทของการทำลายตามภาพที่ 3 พบว่า การเผาทำลายในเตาเผาปูนซีเมนต์ เป็นวิธีการทำลายที่มีเปอร์เซ็นต์สูงสุด พวงรัตน์และจานุมาศ (2552) ได้นำเสนอข้อดีของเตาเผาในกระบวนการผลิตซีเมนต์ ซึ่งมีความเหมาะสมในการเผาทำลายกากอุตสาหกรรมไว้หลายประการ ได้แก่



ภาพที่ 3 การทำลายกากอุตสาหกรรมแบ่งตามประเภทการทำลาย

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2550)

- อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในกระบวนการเผาปูนเม็ดสูงถึง  $1450^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเพียงพอที่จะหลอมละลาย หรือเผาไหม้วัตถุดิบ หรือกากอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท
- ระยะเวลาในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงนานมากกว่า 5 วินาที ที่  $1,200^{\circ}\text{C}$  ทำให้มีเวลาเพียงพอต่อการเผาไหม้วัตถุดิบ หรือกากอุตสาหกรรม
- เก้า่่านจากการเผาไหม้ คือส่วนหนึ่งของวัตถุดิบที่หลอมละลายในกระบวนการผลิต ออกเป็นปูนเม็ด ส่งผลให้ไม่มีเก้า่่านที่ต้องถูกกำจัดอีกครั้ง
- วัตถุดิบหลักได้แก่ หินปูนที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ คือสารปรับสภาพ (Neutralizing Agent) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานปูนซีเมนต์

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mokrzycki and Bochenczyk (2003) พบว่าในกระบวนการผลิตปูนเม็ด การเผาในเตาเผาแบบหมุนมีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการนำของเสียมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ซึ่งประกอบไปด้วยสถานะต่างๆ เช่น อุณหภูมิที่สูงจัด สภาพการเป็น oxidizing atmosphere การเผาของเสียทั้งวัสดุที่เป็นโลหะ และอโลหะนี้ จะได้รับการดูดซับอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ในเตาเผาแบบหมุนยังมีพื้นที่เพียงพอสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อน และการผสมคลุกเคล้าที่เข้ากันของแก๊สและวัตถุดิบที่ดี

ดังนั้นการนำกากอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภทมาเผาทำลายในเตาเผาในกระบวนการผลิตซีเมนต์ จึงเป็นวิธีการทำลายกากอุตสาหกรรมที่มีความเหมาะสม และช่วยลดการใช้พลังงานตลอดจนค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการกำจัด อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดใหม่ ซึ่งเป็นแนวคิดการจัดการกากอุตสาหกรรมแบบผสมผสานบูรณาการ โดยทำการศึกษาวิจัยและนำเสนอหลักการ “การเปลี่ยนจากการเผาเพื่อทำลายกาก เป็นการเผาเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม” ซึ่งสามารถนำมาใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างได้ นอกจากช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำลายแล้ว ยังนับเป็นนวัตกรรมในการผลิตปูนซีเมนต์ชนิดใหม่ และช่วยลดมลภาวะจากสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

### การนำกากอุตสาหกรรมมาร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

กากอุตสาหกรรมบางชนิดสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน (Alternative raw material) และเชื้อเพลิงทดแทน (Alternative fuels) ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ โดยใช้หลักการหาวัตถุดิบจากแหล่งอื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันมาทดแทนวัตถุดิบเดิม วัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้แต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว Nevill (2002) ให้นิยามของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ว่าเกิดจากผลรวมของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียม (Calcareous material) เช่น หินปูน ซอล์ก กับวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบจำพวกซิลิกาและอลูมินา (Argillaceous material) เช่น ดิน หินดินดาน เป็นต้น ดังนั้นในการคัดเลือกชนิดกากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ จึงต้องพิจารณาวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมซึ่งเทียบเคียงกับ Calcarous material เช่น เปลือกหอยแครง ฟันผงหินปูน เป็นต้น และวัตถุดิบ Argillaceous material ที่มีองค์ประกอบจำพวกซิลิกาและอลูมินา เช่น ตะกอนประปา เถ้าลอย เป็นต้น

การวิจัยเพิ่มเติมในอดีตที่ผ่านมาพบว่า มีกากอุตสาหกรรมหลายชนิดที่มีศักยภาพเหมาะสมในการนำมาใช้แทนที่บางส่วนของวัตถุดิบตั้งต้นในขั้นตอนกระบวนการผลิตซีเมนต์ เช่น ตะกอนสลัดจ์ เถ้าลอย กากตะกรันเหล็ก (Dyer and Dher, 2004; Lin and Lin, 2005; Puertas *et al.* 2008) นอกจากนี้พวงรัตน์ และอริสรา (2549) ได้ทำการสรุปรวบรวมชนิดของกากอุตสาหกรรมที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนได้ ดังแสดงตามตารางที่ 3

### ตารางที่ 3 ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน

ตัวอย่างกากที่ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน	ตัวอย่างกากที่ใช้เป็นพลังงานทดแทน
ตะกรันจากงานหลอมโลหะ	สารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างๆ
จี๊ถั่วลอย จี๊ถั่วหนัก	พลาสติกและผ้าปนเปื้อน
ทรายหล่อแบบ	กากสีและตะกอนสี
อิฐทนไฟเสื่อมสภาพ	สินค้าและวัตถุดิบหมดอายุหรือไม่ได้คุณภาพ
สารโพลีเมอร์	เมลานินหรือกระเบื้องเสื่อมสภาพ
ผลิตภัณฑ์เซรามิกชำรุด	เศษยางหรือผลิตภัณฑ์จากยางที่ไม่ใช้แล้ว
แม่พิมพ์เซรามิก	ยางรถยนต์เก่า
กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย	ผงคาร์บอน
ดินและโคลนปนเปื้อนสารเคมี	ตัวทำละลายต่างๆ
สารดูดความชื้นเสื่อมสภาพ	น้ำมันใช้แล้วหรือวัสดุปนเปื้อนน้ำมัน
	น้ำหล่อเย็น น้ำเสีย น้ำจากกระบวนการทำความสะอาด
	เศษไม้ จี๊เลื่อย แกลบ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ที่มา: พวงรัตน์ และอริสรา (2549)

การนำกากอุตสาหกรรมเข้าร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นี้ เป็นวิธีการที่ช่วยลดมลภาวะให้กับสิ่งแวดล้อมซึ่งสอดคล้องกับหลักการเทคโนโลยีสะอาด หรือ Clean technology (Shimoda *et al.*, 1999) ยกตัวอย่างเช่น ประเทศญี่ปุ่นซึ่งประสบปัญหาการเพิ่มขึ้นของกากอุตสาหกรรม ได้นำหลักการของเทคโนโลยีสะอาดมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา โดยนำกากอุตสาหกรรมบางชนิดมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และเรียกชื่อว่า Eco-Cement ซึ่งมีที่มาจากคำว่า Ecology แปลว่า นิเวศวิทยา และ Cement ซึ่งแปลว่า ปูนซีเมนต์ ดังนั้น Eco-Cement คือ ปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นมาโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพนิเวศวิทยา และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีต่อสิ่งมีชีวิต สมบัติทั่วไปของ Eco-Cement แสดงตามตารางที่ 4 ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากขั้นตอนการคัดเลือกชนิดของกากอุตสาหกรรมจะสอดคล้องกับ NICE Criteria แล้ว กรรมวิธีและขั้นตอนการผลิตยังจะต้องสอดคล้องกับแนวคิดเทคโนโลยีสะอาด เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4 สมบัติทั่วไปของ Eco-Cement

ชนิดปูนซีเมนต์	ความถ่วง จำเพาะ	พื้นที่ผิว จำเพาะ	ระยะเวลาก่อตัว		ความสามารถ การรับกำลังอัด (ksc)			
			(ชั่วโมง-นาที)		1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
	เริ่ม	สิ้นสุด						
Portland cement type	3.19	4,500	2-0	4-30	90	220	370	530
Rapid hardening type	3.13	4,600	0-9	0-13	230	300	380	460
NPC	3.17	3,220	2-22	3-20	110	270	430	590

หมายเหตุ: \* หมายถึง Normal Portland Cement

ที่มา: Shimoda *et al.* (1999)

#### องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยออกไซด์หลักเช่น CaO (60-67%), SiO<sub>2</sub> (17-25%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3-8%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.5-6%) และออกไซด์รองเช่น MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O เป็นต้น (Nevill, 2002) ซึ่งออกไซด์หลักจะรวมตัวกันในระหว่างขั้นตอนการเกิดปูนเม็ดหรือ Clinker เกิดสารประกอบหลัก ตามตารางที่ 5

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ สามารถคำนวณหาได้จากสมการของ Bogue (1955) ดังนี้

$$C_3S = 4.0710[CaO] - 7.6024[SiO_2] - 1.4297[Fe_2O_3] - 6.7187[Al_2O_3] - [2.852SO_3] \quad (1)$$

$$C_2S = 8.6024[SiO_2] + 1.0785[Fe_2O_3] + 5.0683[Al_2O_3] - 3.0710[CaO] \quad (2)$$

หรือ  $2.8675[SiO_2] - 0.7544[C_3S]$

$$C_3A = 2.6504[Al_2O_3] - 1.6920[Fe_2O_3] \quad (3)$$

$$C_4AF = 3.0432[Fe_2O_3] \quad (4)$$

ตารางที่ 5 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	องค์ประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ปริมาณ (%)
Tricalcium silicate	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ or $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$ (alite)	35-55
Dicalcium silicate	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ or $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$ (belite)	15-35
Tricalcium aluminate	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ or $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$ (aluminite)	7-15
Tetracalcium aluminoferrite	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ or $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$ (ferlite)	5-10

หมายเหตุ: สัญลักษณ์สากล C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H = H<sub>2</sub>O,  $\bar{\text{S}}$  = SiO<sub>3</sub> และ F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ที่มา: Nevill (2002)

สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีคุณสมบัติดังนี้

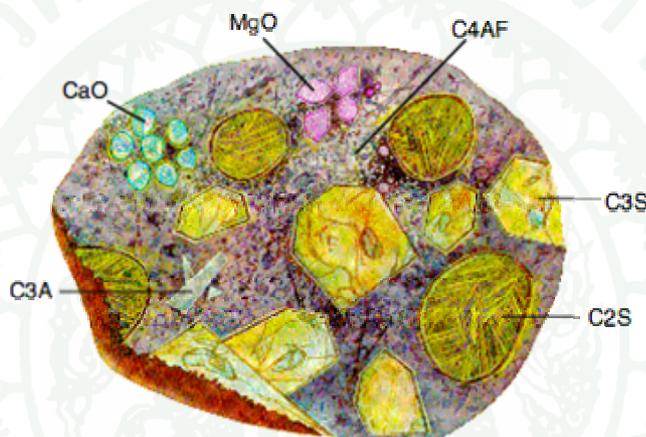
1. Tricalcium silicate ( $\text{C}_3\text{S}$ ) มีลักษณะเป็นผลึก 6 เหลี่ยมด้านเท่า สีเทาเข้ม เมื่อผสมน้ำสามารถแข็งตัวได้ภายใน 3 ชั่วโมง ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดปูนซีเมนต์ภายใน 2 สัปดาห์ (Nevill, 2002 และ AitCin, 2007)

2. Dicalcium silicate ( $\text{C}_2\text{S}$ ) มีลักษณะรูปทรงค่อนข้างทรงกลม สีดำ โดย  $\text{C}_2\text{S}$  จะมีอยู่หลายลักษณะประมาณ 3-4 รูปแบบ ซึ่ง  $\alpha\text{-C}_2\text{S}$  จะอยู่ตัวที่ อุณหภูมิสูง แต่มีเพียง  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป  $\beta\text{C}_2\text{S}$  เมื่อผสมน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดอย่างช้าๆ (Nevill, 2002 และ AitCin, 2007)

3. Tricalcium aluminate ( $\text{C}_3\text{A}$ ) มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน  $\text{C}_3\text{A}$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ Flash set คือ เกิดการแข็งตัวของปูนซีเมนต์แข็งอย่างรวดเร็ว การหน่วงเวลาการเกิด Flash set สามารถทำได้โดยการเติมยิปซั่มลงไปในช่วงขั้นตอนการบดละเอียดปูนเม็ดเพื่อผลิตปูนซีเมนต์  $\text{C}_3\text{A}$  จะพัฒนากำลังอัดขึ้นภายในในเวลา 1-2 วัน แต่จะมีค่าค่อนข้างต่ำ (Nevill, 2002 และ AitCin, 2007)

4. Tetracalcium aluminoferrite ( $C_4AF$ ) จะอยู่ในรูปสารละลายของแข็ง (Solid solution) ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน บางครั้งมีลักษณะเป็นเหลี่ยมแท่ง โดยมีขอบเขตองค์ประกอบอยู่ระหว่าง  $C_2F$  กับ  $C_6A_2F$  ทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีทันใดและรวดเร็วมาก ซึ่งจะก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความสามารถในการรับกำลังอัดของ  $C_4AF$  มีค่าค่อนข้างต่ำ (Swayze, 1962 และ Neville, 2002)

Taylor (1997) ได้เสนอภาพตัดขวางทั่วไปของอนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงตามภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ภาพตัดขวางทั่วไปของอนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ที่มา: Taylor (1997)

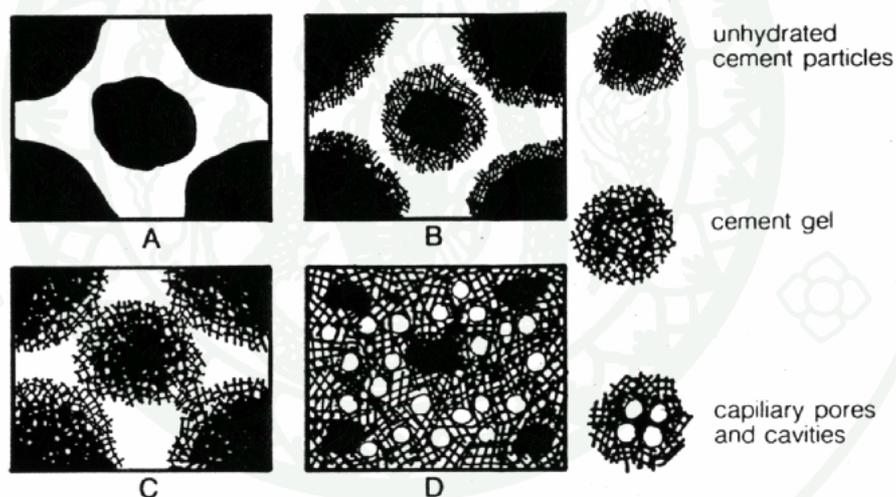
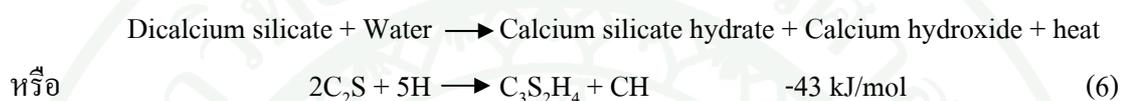
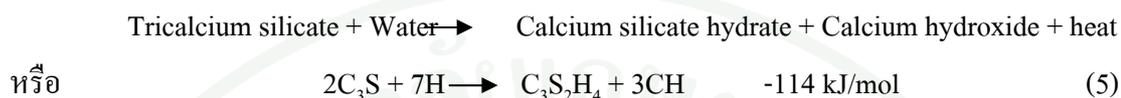
#### กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Mechanism)

เมื่อซีเมนต์ผสมน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท ดังนี้

##### 1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Calcium silicate ( $C_3S$ และ $C_2S$ )

เมื่อ Tricalcium silicate ( $C_3S$ ) สัมผัสกับน้ำ ( $H_2O$  หรือ  $H$ ) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  จะเปลี่ยนเป็นเจลของ  $C_3S_2H_3$  และน้ำปูน ( $Ca(OH)_2$  หรือ  $CH$ ) ส่วน Dicalcium silicate ( $C_2S$ ) จะ

เกิดปฏิกิริยาค้ำกันแต่มีน้ำปูนน้อยกว่า ซึ่งทั่วไปจะเขียน  $C_3S_2H_3$  ในรูปของ CSH หรือ (Calcium Silicate Hydrate) เมื่อ CSH ทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิด  $Ca(OH)_2$  และ CSH ซึ่งมีสมบัติเป็นตัวประสาน เพื่อความสะดวกในการศึกษา Jawed *et al.* (1983) ได้เสนอสมการการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งอยู่ในรูปสมการทั่วไปของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  ดังนี้



- A) Immediately after mixing  
 B) Reaction around particles - early stiffening  
 C) Formation of skeletal structure - first hardening  
 D) Gel infilling - later hardening

ภาพที่ 5 ภาพแสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต

ที่มา: Bennison (2001)

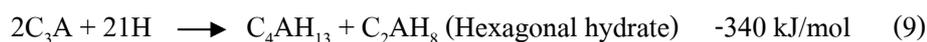
CSH จะมีปริมาณเกิดขึ้นประมาณ 60% ของเนื้อที่ทั้งหมด มีลักษณะเป็น Gel ที่ทำให้เกิดการก่อตัว Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะทำให้โครงสร้างมีลักษณะขรุขระและเป็นโพรง เมื่อ CSH มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความเป็นโพรงลดลง โครงสร้างเริ่มทึบและแน่นขึ้น เริ่มมีการพัฒนาขึ้นของกำลังรับแรงอัด ซึ่ง CSH จะอยู่ในรูปของอนุภาคหรือผลึกที่มีขนาดเล็กมากประมาณเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ส่วน  $\text{Ca(OH)}_2$  มีปริมาณเกิดขึ้นประมาณ 25% ของเนื้อที่ทั้งหมด โดยจะอยู่ล้อมรอบอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์  $\text{Ca(OH)}_2$  จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างเป็นอย่างมาก (pH ประมาณ 12.5) ซึ่งมีข้อดีในการช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (Mindess and Young, 1981; Bennison, 2001; Benstead, 2001; Jensen and Hansan, 2001)

## 2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Tricalcium aluminate ( $\text{C}_3\text{A}$ )

Tricalcium aluminate มีปริมาณเกิดขึ้นประมาณ 10% ของเนื้อที่ทั้งหมด การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{A}$  จะเกิดปฏิกิริยาทันทีทันใด ก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ และเกิดความร้อนค่อนข้างสูง ผลึกมีลักษณะสี่เหลี่ยมหรือเป็นเหลี่ยมมุมและถูกล้อมรอบด้วย CSH Gel ไว้ และเพื่อความสะดวกในการศึกษา Jawed *et al.* (1983) ได้เสนอสมการการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งอยู่ในรูปสมการทั่วไปของ  $\text{C}_3\text{A}$  ไว้ดังนี้

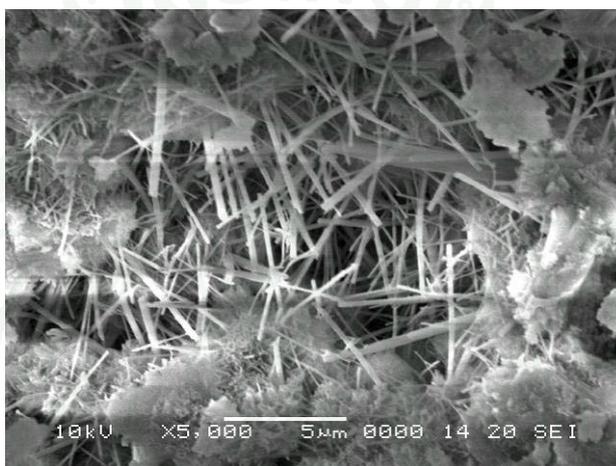


ในการหน่วงเกิดปฏิกิริยาเนื่องจาก Tricalcium aluminate ทำปฏิกิริยากับน้ำเร็วเกินไป ใช้การเติมยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ประมาณ 3-6% เข้าไปในระหว่างขั้นตอนกระบวนการบดเม็ดปูนซีเมนต์ ซึ่งยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{C}_3\text{A}$  และก่อให้เกิด Ettringite บนผิวของอนุภาค  $\text{C}_3\text{A}$  ซึ่งเสนอสมการโดย Jawed *et al.* (1983) ดังสมการ



ชั้นของ Ettringite ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) จะทำให้เกิดการหน่วงตัวของ  $\text{C}_3\text{A}$  และการก่อตัวในช่วงแรกนี้จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  เสียเป็นส่วนใหญ่ แต่ปฏิกิริยาของ Ettringite ยังคงเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง Ettringite ทำให้จะเกิดแรงดันที่มาจาก

การเพิ่มปริมาณของผลึกของแข็ง แรงดันนี้ส่งผลให้ Ettringite แตกตัวออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  แต่การแตกตัวนี้จะทำให้จะเกิดมี Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่ซึ่งเป็นการหน่วงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง การดำเนินไปของปฏิกิริยาจะเป็นไปในลักษณะนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาเพื่อจะก่อให้เกิด Ettringite จากนั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  จะเปลี่ยนแปลงรูปของ Ettringite ไปเป็น Monosulphate (Mindess and Young, 1981; Benstead, 2001; Jensen and Hansan, 2001)



ภาพที่ 6 ภาพขยาย Ettringite จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ที่มา: Yoobanpot (2004)

### 3. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Tetracalcium aluminoferrite ( $C_4AF$ )

Tetracalcium aluminoferrite มีปริมาณเกิดขึ้นประมาณ 5% ของเนื้อที่ทั้งหมด และจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้น โดย  $C_4AF$  จะทำปฏิกิริยากับ  $Ca(OH)_2$  และยิปซั่มที่เติมลงไปในช่วงตอนการบดปูนเม็ด ทำให้เกิด Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ซึ่งมีรูปร่างเหมือนเข็ม เนื่องจาก  $C_4AF$  มีปริมาณน้อย จึงมีผลน้อยต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์ ปฏิกิริยาของ  $C_4AF$  นี้ ดังสมการ (Gany, 1997; ชัชวาลย์, 2540)



### เกณฑ์การพิจารณาเลือกองค์ประกอบของวัตถุดิบตั้งต้น

การศึกษาออกแบบส่วนผสมของวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตซีเมนต์ ได้พิจารณาเลือกวัตถุดิบที่มีปริมาณออกไซด์ขององค์ประกอบหลัก และองค์ประกอบรองในปริมาณที่เหมาะสม ปริมาณออกไซด์รวมจะส่งผลต่อสมบัติของปูนเม็ดที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้นำค่าโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ มาใช้เป็นเกณฑ์กำหนดเริ่มต้นเพื่อควบคุมคุณภาพในขั้นตอนการผลิตปูนเม็ด เบื้องต้นดังนี้

#### 1. Hydration modulus หรือ HM

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (11)$$

ค่า Hydration modulus ค่าที่ทำให้ซีเมนต์มีคุณภาพดี ปกติมีค่าอยู่ในช่วง 1.7-2.4 ทั้งนี้ถ้ามีค่าน้อยกว่า 1.70 จะทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำ (Kamon and Nontananandh, 1991) ถ้ามีค่าสูงกว่า 2.40 ส่งผลให้ปริมาตรไม่คงตัว เมื่อการผลิตปูนที่มีค่า HM สูง ทำให้ใช้ความร้อนในการเผาปูนสูง กำลังรับแรงอัดเริ่มแรกสูง แต่ค่าความร้อนเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำก็สูงขึ้นเช่นกัน มีผลทำให้ความทนทานต่อสารเคมีลดลง (Kamon and Nontananandh, 1991; Lin and Lin, 2005)

#### 2. แฟกเตอร์การอิ่มตัวเนือปูน (Lime Saturation Factor หรือ LSF)

$$LSF = 100 * \left[ \frac{CaO}{(2.80SiO_2) + (1.18Al_2O_3) + (0.65Fe_2O_3)} \right] \quad (12)$$

จากงานวิจัยพบว่าค่า Lime Saturation Factor ปกติมีค่าอยู่ในช่วง 90-100% ถ้ามีค่าสูงกว่า 100% จะทำให้ให้กำลังอัดได้ดี แต่จะเกิดเนือปูนอิสระสูงซึ่งทำให้มีแนวโน้มเกิดการไม่คงตัว (Unsound) ของซีเมนต์ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มากทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงเพื่อทำให้เกิดองค์ประกอบหลักของปูนเม็ด  $C_3S$  และ  $C_4AF$  อย่างไรก็ตาม LSF ในปริมาณต่ำทำให้มี  $C_3S$  ไม่เพียงพอในปูนเม็ด โดยจะเกิด  $C_2S$  ขึ้นมาแทนซึ่งจะทำให้ผาง่าย แต่การรับกำลังค่อนข้างช้า (Pliskin, 1993; Hewlett, 1998; Hazairin, 2001; Lin and Lin, 2005; Jose, 2010)

### 3. Silica Ratio (Ms หรือ SR)

$$\text{Ms หรือ SR} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (13)$$

ในปูนซีเมนต์ปกติควรมีค่า Silica Ratio ปกติมีค่าอยู่ในช่วง 1.9-3.0 ซีเมนต์มีคุณภาพดีมีค่า Ms หรือ SR อยู่ในช่วง 2.2-2.6 ค่า Silica Ratio สูงทำให้การเผาปูนมีเฟสของเหลวลดลง เฟสของแข็งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูง และซีเมนต์ใช้เวลาการแข็งตัวค่อนข้างนาน เมื่อค่า Silica Ratio ต่ำเกินไป จะทำให้มีปริมาณซิลิกาไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็น  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  ส่งผลให้เกิด  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  ไม่สมบูรณ์ (Pliskin, 1993; Hewlett, 1998; Hazairin, 2001; Lin and Lin, 2005; Jose, 2010)

### 4. Alumina Ratio (Ma หรือ AR)

$$\text{Ma หรือ AR} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (14)$$

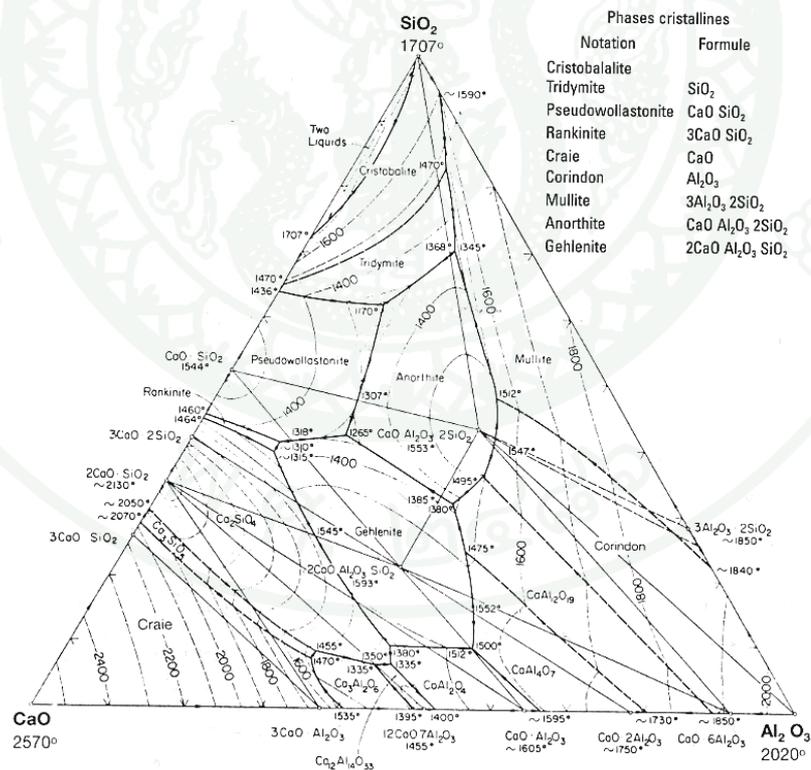
ค่า Alumina Ratio ของปูนซีเมนต์ปกติมีค่าอยู่ในช่วง 1.8-2.5 โดย Alumina Ratio ที่สูงเกินไปทำให้มี  $\text{C}_3\text{A}$  มากกว่า  $\text{C}_4\text{AF}$  ส่งผลให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็ว ต้องใส่ยิปซัมเพื่อหน่วงระยะเวลาค่อนข้างมาก และเมื่อค่า Alumina Ratio ต่ำจะทำให้  $\text{C}_3\text{A}$  น้อยกว่า  $\text{C}_4\text{AF}$  จะให้ความร้อนต่ำและแข็งตัวช้า (Pliskin, 1993; Hewlett, 1998; Lin and Lin, 2005; Jose, 2010)

เมื่อนำค่าโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ จากนักวิจัยหลายท่าน มาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาช่วงค่าที่เหมาะสม พบว่าค่า Hydration modulus มีค่าระหว่าง 1.7-2.4 ค่า LSF มีค่าระหว่าง 90-100% ค่า Ms หรือ SR มีค่าระหว่าง 1.9-3.0 และ ค่า Ma หรือ AR มีค่าระหว่าง 1.8-2.5 ตามลำดับ ดังแสดงตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ

นักวิจัยผู้เสนอ	HM	LSF (%)	Ms หรือ SR	Ma หรือ AR
Kamon and Nontananandh	1.7-2.4			
Lin and Lin	1.7-2.3	80-95	1.9-3.2	1.7-2.5
Pliskin		90-95	2.0-3.0	1.8-2.8
Hewlett		90-95	1.8-3.4	1.5-2.5
Hazairin		66-102	1.9-3.2	
Jose		66-102		1.5-1.7
สรุปช่วงค่าที่เหมาะสม	1.7-2.4	90-100	1.9-3.0	1.8-2.5

ที่มา: Kamon and Nontananandh, 1991; Pliskin, 1993; Hewlett, 1998; Hazairin, 2001; Lin and Lin, 2005; Jose, 2010

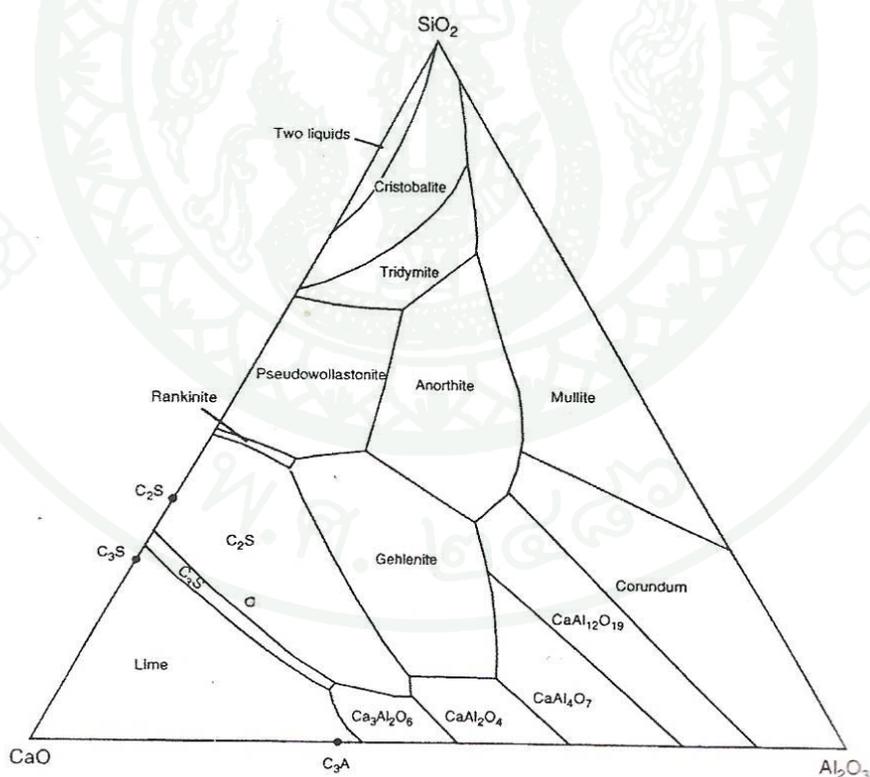


ภาพที่ 7 Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems

ที่มา: Osborn and Muan (1964)

หลังจากการเผาเพื่อผลิตปูนเม็ดแล้ว การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ดเป็นปัจจัยที่สำคัญ Osborn and Muan (1964) นำเสนอแผนภูมิเฟสของออกไซด์ของสารประกอบ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  System ตามภาพที่ 7 ซึ่งใช้หลักการการนำองค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของแคลเซียม อลูมิเนียม และ ซิลิกอน มากำหนดลงในแผนภูมิเพื่อดูช่วงเฟสของสารแต่ละชนิด

AitCin (2007) ทำการปรับปรุงและพัฒนาแผนภูมิให้มีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาเฟสของปูนเม็ดหลังจากผ่านกระบวนการเผา โดยได้ศึกษาและกำหนดขอบเขตเบื้องต้นของสารประกอบหลักได้แก่  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ , และ  $\text{C}_3\text{A}$  ในปูนเม็ด ซึ่งพบว่ามีตำแหน่งอยู่บริเวณใกล้มุมทางด้านซ้าย ดังแสดงตามภาพที่ 8 ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากภาคอุตสาหกรรมเพื่อเทียบเคียงปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type I เมื่อนำค่าองค์ประกอบของออกไซด์มากำหนดลงใน  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  System แล้ว ควรมีขอบเขตของสารประกอบที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type I



ภาพที่ 8 Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems ที่ปรับปรุงโดย AitCin

ที่มา: AitCin (2007)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปของออกไซด์เพื่อกำหนดคลงในแผนภูมิ CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> System นี้ มีการวิเคราะห์ได้หลายวิธีเช่น Titrimetry standard method, atomic absorption spectrometer และ gravity method เป็นต้น แต่ในปัจจุบันนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือ XRF) กำลังเป็นที่นิยมเป็นอย่างมาก ซึ่งใช้แพร่หลายในการวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ไม่ว่าจะเป็นงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การวิเคราะห์ธาตุที่มีความเป็นพิษที่อยู่ในอากาศ ด้านธรณีวิทยา เช่น การวิเคราะห์แร่ ดิน หิน ด้านชีววิทยาหรือด้าน การแพทย์ เช่น การวิเคราะห์ปริมาณของอินทรีย์สารต่างๆ ด้านอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการควบคุมกระบวนการและควบคุมคุณภาพ การตรวจวัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นพิษ หรือการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เป็นต้น (แม้น และอมร, 2535)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่างข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้ สำหรับข้อดีของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF มีหลายประการได้แก่ เป็นวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง มีการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อย สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายๆ ตัวพร้อมกัน ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว เชื่อถือได้ และมีประสิทธิภาพสูง (แม้น และอมร, 2535)

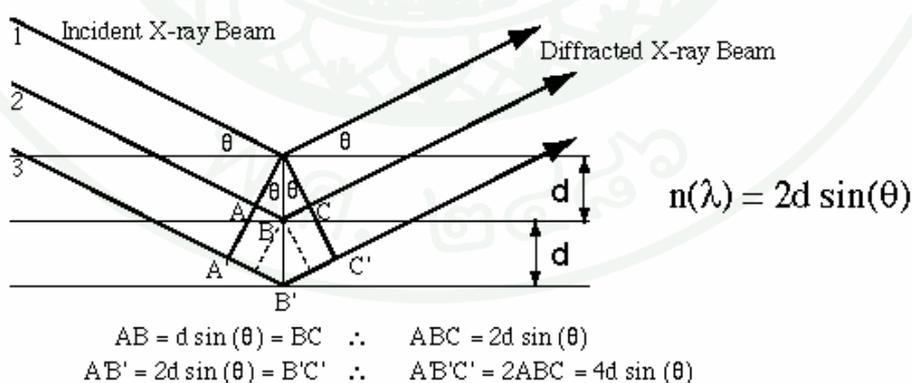
นอกจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ด้วยเทคนิค XRF แล้ว การอธิบายการพัฒนากำลังอัดอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์นั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้านอื่นๆ ที่เหมาะสมเข้ามาใช้ประกอบร่วมกัน เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction หรือ XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายตัวอย่างที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ ซึ่งมีเหมาะสมในการใช้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Kamon and Nontanandh, 1990)

เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่น ไปตกกระทบที่หน้าผลึกของสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมต่างๆ กัน โดยมีอุปกรณ์หัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่ององศาในการเลี้ยวเบนของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและ โครงสร้างของสาร

ที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานที่มีอยู่เช่น JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard-International Centre for Diffraction Data) เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง (แม้น และอมร, 2535)

หลักการและวิธีการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นผลึกคือ วัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d$  ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งค่าระยะห่าง  $d$  จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างระนาบนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg

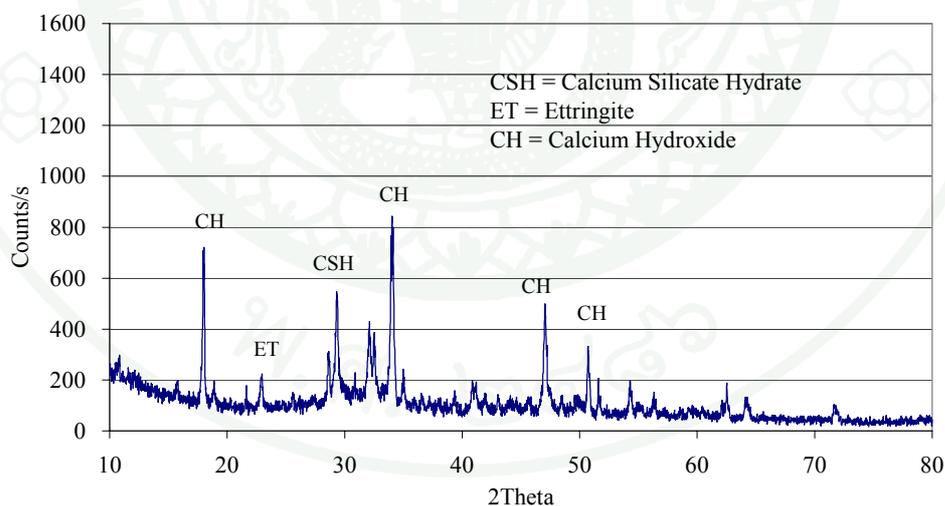
ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ  $\theta$  รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน  $\theta$  เท่ากับมุมตกกระทบซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปแบบสมการ ของ Bragg's law



ภาพที่ 9 Bragg's law

XRD เป็นเทคนิคที่ทำกรวิเคราะห์ห้ควบคู่กับการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเทคนิคอื่นๆ เช่น XRF โดยที่ XRF จะสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นทำให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง (แม้น และอมร, 2535)

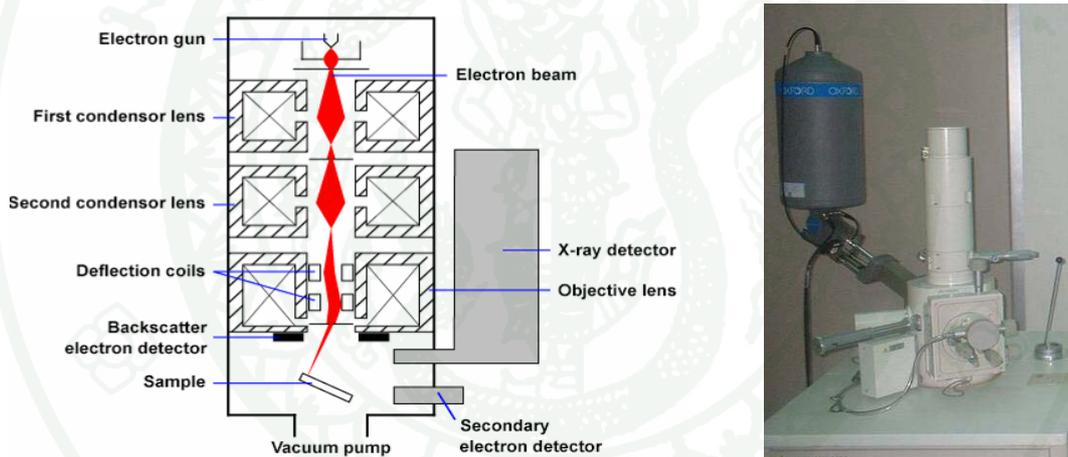
นักวิจัยหลายท่านนำเทคนิคการวิเคราะห์แบบ XRD นี้ไปใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆ เช่น เฟสค์ของปูนซีเมนต์ที่ผสมสารผสมสารปอซโซลานเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการเผา เฟสค์ของปูนซีเมนต์ที่เผาด้วยอุณหภูมิต่ำ เฟสค์ของปูนซีเมนต์ที่ใช้กากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ มาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น (Eco-cement) หรือกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในดินซีเมนต์ นอกจากนี้ยังใช้ในการอธิบายการเกิดเฟสของปูนเม็ดในแต่ละช่วงอุณหภูมิการเผาได้อีกด้วย (Ampadu and Torii, 2001; Wang *al.*, 2001; Shiha *al.*, 2003; Nontananandh *et al.*, 2004; Saikia *et al.*, 2007; Vangelatos *et al.*, 2009) ดังแสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของซีเมนต์เฟสค์ที่อายุการบ่ม 3 วัน

ที่มา: Nontananandh *et al.* (2004)

นอกจากเทคนิค XRD ที่ใช้อธิบายการพัฒนาโครงสร้างอันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบหรือสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแล้ว การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในระดับจุลภาคมีส่วนสำคัญที่ทำให้การอธิบายเรื่องดังกล่าวมีความเข้าใจมากยิ่งขึ้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ที่มีกำลังขยายสูง ทำการถ่ายภาพของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นตามอายุการบ่ม การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ เครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะ และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ หรือ ลักษณะของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เป็นต้น (แมน และอมร, 2535)



(ก) หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

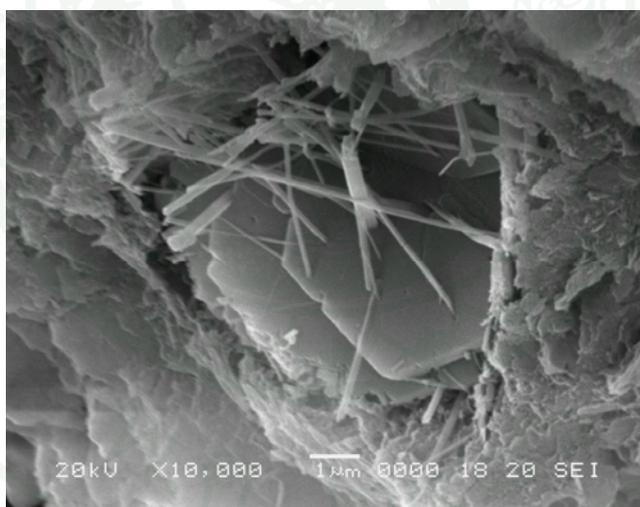
(ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

### ภาพที่ 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการ

ศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และถูกจับโดย detector และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แล้วจึงแปลเป็นภาพออกมาทางจอรับสัญญาณภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ซึ่งสามารถบันทึกภาพได้ (แม้น และอมร, 2535)

สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย SEM นี้ นักวิจัยหลายท่านได้นำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ควบคู่กับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ด้วยการถ่ายภาพลักษณะสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ เช่น ปูนซีเมนต์ที่ใช้จากอุตสาหกรรมมาแทนที่บางส่วนเป็นวัสดุดิบตั้งต้น ปูนซีเมนต์ที่เผาด้วยอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถถ่ายภาพของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาไฮเดรชันปอซโซลานิกในดินซีเมนต์ หรือสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ได้อีกประการหนึ่ง (Yan *et al.*, 2004; Nontananandh, 2005; Pereira *et al.* 2008; Pimraksa *et al.* 2009; Temuujin *et al.* 2009; Tosun *et al.* 2010.) แสดงดังตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ตามภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 90 วัน

ที่มา: Nontananandh (2005)

นอกจากนี้เทคนิคการวิเคราะห์ X-ray Microanalyser (EDX) ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วย SEM สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย ซึ่งเป็นงานวิเคราะห์วิจัยด้วยเทคนิคขั้นสูง Nontananandh (1990) พบว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย EDX ต่อธาตุ Ca บนระนาบหน้าตัดใดๆ ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในระนาบหน้าตัดนั้นๆ ต่อธาตุ Ca จะมีความสัมพันธ์อยู่ในช่วงอัตราส่วนหนึ่งๆ ซึ่งนิยามการวิเคราะห์เป็นอัตราส่วนของธาตุหลักในสารธาตุหลัก Peak Element Ratio (PER) และ Surface Area Ratio (SAR) ได้แก่

1. Peak Element Ratio (PER) คือ อัตราส่วนของความเข้มของพีก (Peak intensity) ที่เกิดขึ้นของ Silicon (Si), Aluminum (Al) และ Sulfur ต่อ Calcium (Ca) ในระนาบเดียวกัน

2. Surface Area Ratio (SAR) คือ อัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพีก (Surface intensity) ที่เกิดขึ้นของ Silicon (Si), Aluminum (Al) และ Sulfur ต่อ Calcium (Ca) ในระนาบเดียวกัน

Nontananandh (1990) ได้เสนอช่วงอัตราส่วนสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันตามตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 7 อัตราส่วนสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Reaction Product	Chemical Formula	Element Ratio	
		Theoretical	Predicted from EDX
C-S-H Groups	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Si/Ca = 0.66	Si/Ca = 0.50-0.70
Ettringite	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	Al/Ca = 0.33	Al/Ca = 0.20-0.30
		S/Ca = 0.50	
Monosulfate	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Al/Ca = 0.50	S/Ca = 0.10-0.50
		S/Ca = 0.25	
Calcium carbonate	$\text{CaCO}_3$		Si/Ca < 0.50
Calcium hydroxide	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	-	Al/Ca < 0.20
Calcium sulfate	$\text{CaSO}_4$		S/Ca < 0.10

### กลไกปฏิกิริยาเคมีในดินซีเมนต์

การพัฒนากำลังของดินผสมซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เป็นส่วนใหญ่ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ที่เกิดในดินผสมซีเมนต์ก็จะคล้ายๆ กับปฏิกิริยาปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ในคอนกรีต คือเมื่ออนุภาคซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ผลจากปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวทำให้เกิด Calcium Silicates Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Release Hydrate Lime สาร CSH และ CAH จะมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะ โดยสามารถยึดเกาะมวลเม็ดดินเข้าด้วยกัน ทำให้รวมตัวกันเป็นเม็ดดินขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง ส่วน Release Hydrate Lime ที่เกิดขึ้นจะแตกตัวออกเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร Calcium Silicates Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรงต่อไปอีก (Lambe *et al.*, 1959)

Moh (1965) ได้เสนอสมการปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ไว้ดังนี้



Primary cementitious products



Secondary cementitious product



Secondary cementitious product

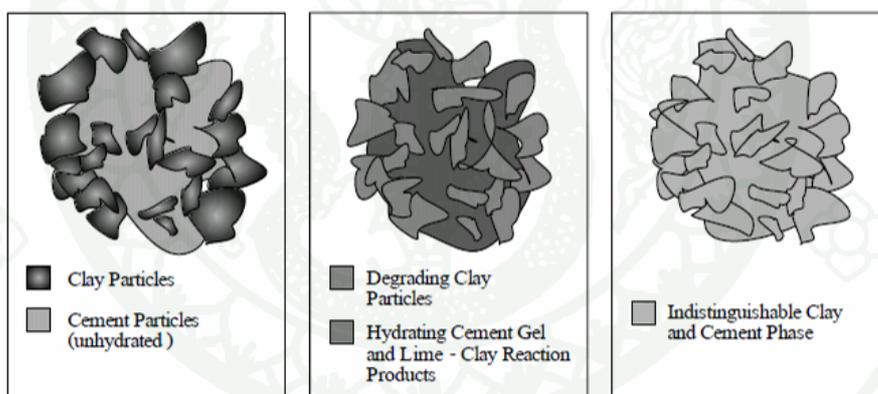
ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลของปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์จะก่อให้เกิดสาร CSH และ CAH ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึดดังแสดงในสมการที่ 15, 16 และ 18 โดยสมการที่ 15 CSH และ CAH เกิดจากปฏิกิริยาจากซีเมนต์โดยตรงเรียกว่า “Hydration Reaction หรือ Primary Reaction” แต่สมการที่ 16 และ 18 CSH และ CAH เกิดจากปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอลูมินาในดินจึงเรียกว่า “Pozzolanic Reaction หรือ Secondary Reaction”

Mitchell and Jack (1966) ได้เสนอโครงสร้างของดินที่ผสมซีเมนต์ซีเมนต์ดังแสดงตามภาพที่ 13 พบว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 เมื่อทำการบดอัดดินด้วยพลังงานการบดอัด ดินและและอนุภาคของปูนซีเมนต์ (Unhydrated cement particle) จะเข้าผสมคลุกเคล้าและแทรกเข้าด้วยกัน

ขั้นตอนที่ 2 อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่สัมผัสกับน้ำในขั้นตอนการบ่มจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้น ซึ่งจะให้สารผลิตภัณฑ์เป็นซีเมนต์เจลแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะก่อให้เกิด Lime ออกมาซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Soil silica และ Soil alumina ที่มีอยู่ในดิน

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ สารผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เจลจะแพร่กระจายแทรกซึมทั่วทั้งก้อนดิน ทำให้ดินมีลักษณะรวมตัวกันแน่นขึ้น ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินลดลง ส่งผลให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 13 โครงสร้างดินที่ผสมด้วยซีเมนต์

ที่มา: Mitchell and Jack (1966)

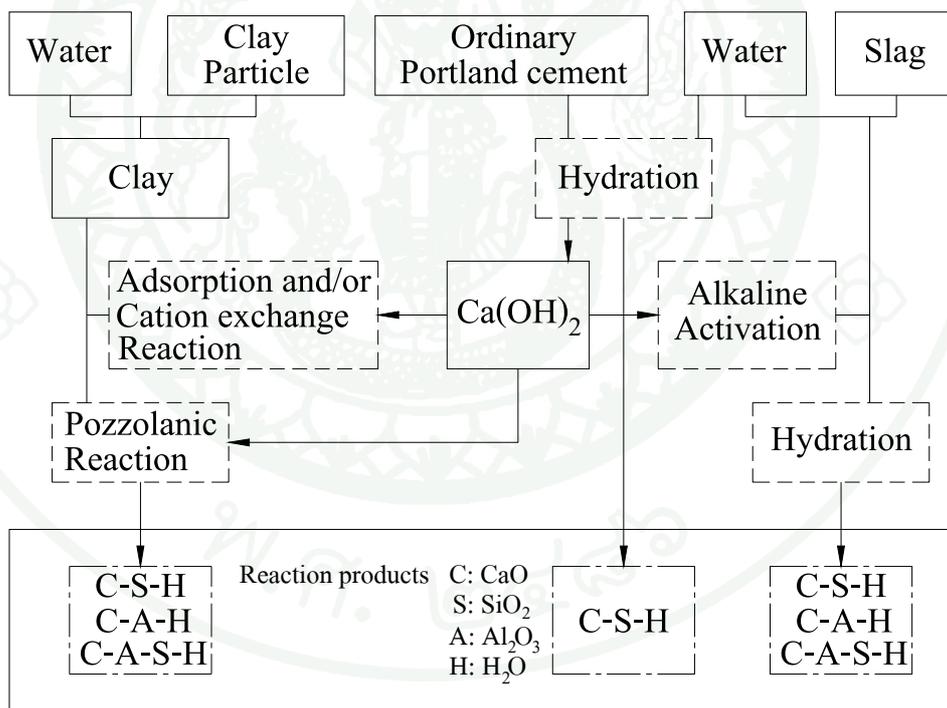
Saito *et al.* (1985) ได้เสนอ Diagram ที่แสดงปฏิกิริยาระหว่างดินกับซีเมนต์ดังแสดงในภาพที่ 14 โดยสรุปเป็น 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ทำให้เกิด  $\text{Ca(OH)}_2$  ขึ้นประมาณ 25% โดยน้ำหนักของซีเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 ดินจะถูกเคลือบผิว (Adsorbition) ด้วย  $\text{Ca(OH)}_2$  หรือเรียกว่า Cation Exchange Reaction

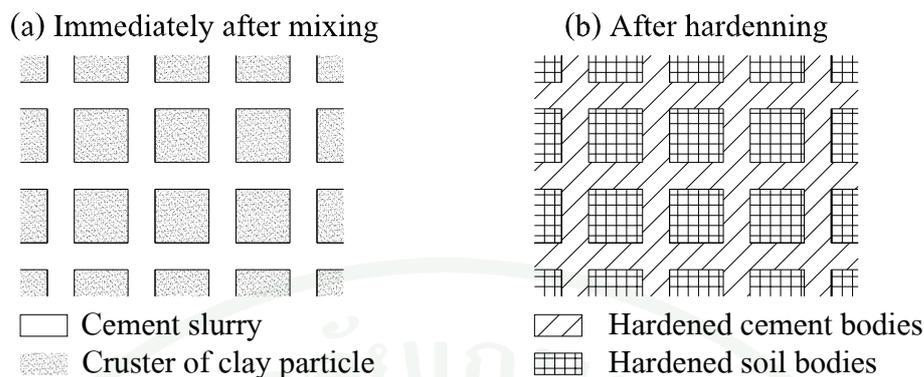
ขั้นตอนที่ 3 เมื่ออนุภาคดินอิ่มตัวด้วย  $\text{Ca(OH)}_2$  จะเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ขึ้น

จากปฏิกิริยาทั้ง 3 ขั้นตอน จะได้สารผลิตภัณฑ์ที่ทำให้อนุภาคดินเชื่อมประสานกันได้แก่ สาร CSH และ CAH โดยอนุภาคดินจะฝังตัวอยู่สารผลิตภัณฑ์ซึ่งมีลักษณะเป็น Cement paste และจะแข็งตัวตามเวลา และยังสามารถเปลี่ยนโครงสร้างดินให้แข็งตัวมากขึ้นได้อีกด้วย ดังแสดงตามภาพที่ 15



ภาพที่ 14 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างดินกับซีเมนต์

ที่มา: Saito *et al.* (1985)

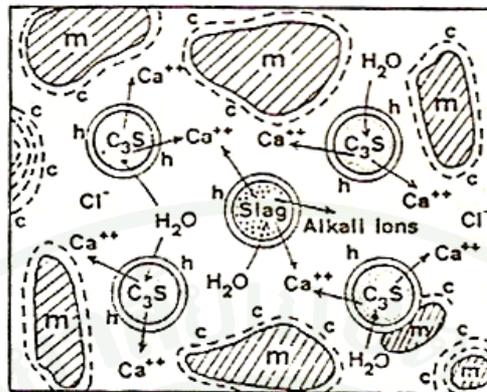


ภาพที่ 15 โครงสร้างดินซีเมนต์

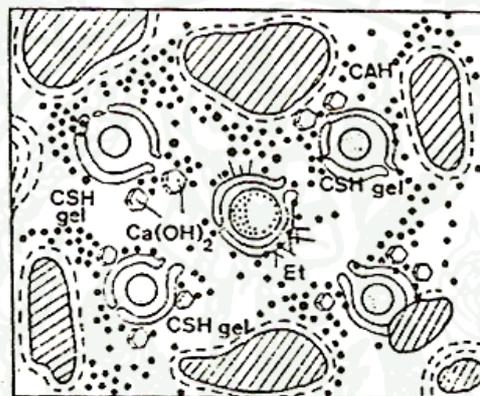
ที่มา: Saito *et al.* (1985)

งานวิจัยของ Kamon and Nontananandh (1990) ทำการศึกษากลไกปฏิกิริยาของดินซีเมนต์พบว่า  $C_3S$  มีผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์เป็นสำคัญ โดย  $C_3S$  จะลดลงเมื่อกำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจาก  $C_3S$  ถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็น CSH ซึ่งทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  พบว่าดินซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินน้อยที่ 6% อัตราการลดลงของ  $C_3S$  ค่อนข้างต่ำ และ กำลังอัดที่ได้ไม่สูงนัก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินเป็น 9% เริ่มสังเกตเห็นอัตราการลดลงของ  $C_3S$  ในขณะที่กำลังดินดินซีเมนต์เริ่มสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินเป็น 12% และ 15% พบว่าสามารถสังเกตเห็นอัตราการลดลงของ  $C_3S$  ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการเพิ่มของกำลังดินซีเมนต์สูงขึ้นอย่างชัดเจนเช่นกัน ซึ่งอัตราการลดลงของ  $C_3S$  นี้ เริ่มลงที่ที่อายุการบ่มประมาณภายใน 2 สัปดาห์

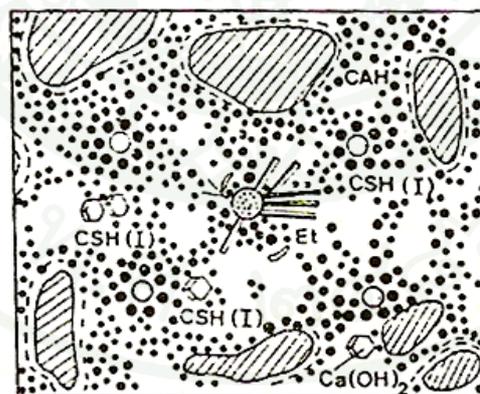
นอกจากนี้งานวิจัยของ Kamon and Nontananandh (1990) ได้เสนอกลไกปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ จากการวิเคราะห์อัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  โดยนำเสนอโครงสร้างของดินซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยซีเมนต์และกากตะกอนเหล็ก (Slag) ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ตามภาพที่ 16 อธิบายได้ดังนี้



(f) Gelatineous phase



(g) Hardening phase



(d) Hardened phase

ภาพที่ 16 โครงสร้างดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยกากตะกอนเหล็ก

ที่มา: Kamon and Nontananandh (1990)

Kamon and Nontananandh (1990) นำเสนอกลไกปฏิกิริยาของดินซีเมนต์ในทำนองเดียวกันกับ Saito *et al.* (1985) ซึ่งกลไกที่นำเสนอแสดงการแข็งตัวของดินซีเมนต์ตามช่วงเวลาภาพที่ 16 (ก) แสดงช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยา (Gelatinious phase) แสดงอนุภาคของกากตะกอนเหล็กฝังตัวและแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของ  $C_3S$  มีผลทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวและเพิ่มโอกาสในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความเข้มข้นของ  $Ca^{++}$  จะมีมากขึ้นในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มขึ้นจะทำให้เกิดแผ่นฟิล์มบางๆ ล้อมรอบอนุภาคของ  $C_3S$  และกากตะกอนเหล็ก ซึ่งค่า pH ที่สูงขึ้นจะเป็นตัวทำลายซิลิเกตและอลูมินेटที่มีอยู่ในอนุภาคของดินให้เข้าไปในช่องว่างของสารละลาย (Pore solution) ซึ่งมีผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้ดินเริ่มมีสมบัติเปลี่ยนไปเช่น มีความเหนียวลดลง

ภาพที่ 16 (ข) แสดงช่วงต้นของการแข็งตัว (Hardening phase) ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเริ่มเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากกากตะกอนเหล็กและปูนขาว ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของ  $Ca^{++}$  ลดลง ส่งผลให้แผ่นฟิล์มบางๆ ที่ล้อมรอบอนุภาคของ  $C_3S$  แตกตัวได้เร็วขึ้น เกิดสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น CSH CAH และ Ettringite อย่างต่อเนื่อง สารผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะเข้าไปแทนที่ช่องว่างที่เต็มไปด้วยน้ำและรวมตัวกับแร่ธาตุต่างๆ ในดิน Ettringite ที่เกิดขึ้นมีส่วนช่วยทำให้ปริมาณความชื้นลดลงอย่างชัดเจน ส่งผลให้ดินเริ่มมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาของ CSH ทั้งนี้จะมีตำแหน่งการเกิดเพิ่มขึ้นใกล้กับอนุภาคของ  $C_3S$  ในขณะที่ CAH จะมีตำแหน่งการเกิดเพิ่มขึ้นใกล้กับอนุภาคดินและแร่ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในดิน ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นตามอายุการบ่ม ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และดินซีเมนต์มีความแข็งแรงมากขึ้น

ภาพที่ 16 (ค) แสดงช่วงการแข็งตัว (Hardened phase) ซึ่งปริมาณสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุการบ่ม ส่งผลให้สมบัติโดยรวมของดินซีเมนต์มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ดินซีเมนต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความพรุนลดลง ปริมาณน้ำในมวลดินลดลง ซึ่งช่วงระยะการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ดังกล่าว จะใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์

### ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและแรงดูดในดิน

ส่วนประกอบของเนื้อดินโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 50-80 ของปริมาตรทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะเป็นช่องว่างซึ่งมีอากาศหรือน้ำบรรจุอยู่ เมื่อช่องว่างของดินถูกบรรจุด้วยน้ำเต็มทั้งหมด เรียกดินชนิดนั้นว่า ดินอิ่มตัวด้วยน้ำหรือ Saturated soil โดยปกติทั่วไปแล้ว ช่องว่างในเนื้อดินจะประกอบไปด้วยน้ำ และอากาศซึ่งมีไอน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย จึงเรียกดินชนิดนี้ว่า ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือ Unsaturated soil (ปฎิภาณ, 2551; อภินิติ, 2551; วสัน, 2552)

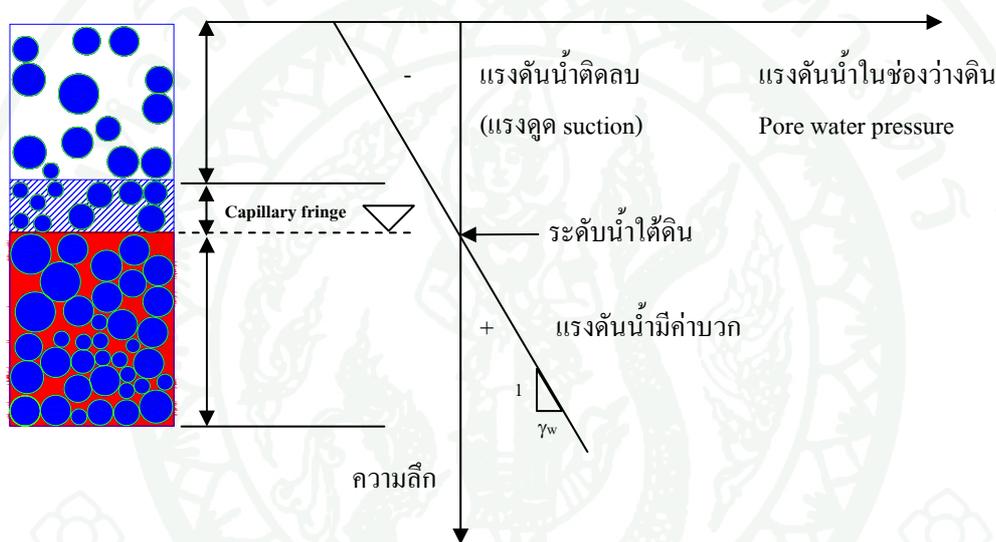
น้ำทั้งหมดที่ปรากฏอยู่ในดินนี้จะมีการติดต่อเชื่อมโยงถึงกันโดยตลอด โดยแรงที่ดูดยึดให้น้ำที่ปรากฏในดินต้องเคลือบเป็นเยื่อบาง ๆ รอบอนุภาคดินคือ แรงดูดยึดที่เกิดระหว่างโมเลกุลของสาร แรงดูดยึดนี้จะมีค่าแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเยื่อน้ำรอบ ๆ อนุภาคดินบางลง แต่จะมีค่าแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเยื่อน้ำมีปริมาณหนาแน่นขึ้น จนกระทั่งก็ไม่สามารถดูดยึดชั้นของโมเลกุลน้ำที่อยู่นอก ๆ ได้ และต้องปล่อยให้เคลื่อนที่ไปตามแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งภาวะที่น้ำตกอยู่ภายใต้แรงดูดยึดของสิ่งหนึ่งสิ่งใดทำให้มีอิสรภาพที่จะเคลื่อนที่ได้น้อยลงนี้เรียกว่า น้ำนั้นมีความเครียดในลักษณะของแรงดึง Tension หรือแรงดูด Suction (ปฎิภาณ, 2551; อภินิติ, 2551; วสัน, 2552)

น้ำที่ตกอยู่ภายใต้แรงดูดยึด เรียกว่าน้ำนั้นมีความเครียด โดยน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นน้ำที่มีความเครียดสูงกว่าน้ำปกติ ดังนั้นความเครียดก็คือ ความดันที่ติดลบ ความเครียดที่เกิดกับน้ำในดินโดยการดูดยึดของอนุภาคของแข็งในดินนี้ เรียกว่าความเครียดเมตริก (Matric suction) สำหรับความเครียดที่เกิดจากการที่มีสารละลายชนิดต่าง ๆ ละลายอยู่ในน้ำซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเกลือ และมีแรงดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำ เรียกว่าความเครียดออสโมติก หรือ Osmotic suction (ปฎิภาณ, 2551; อภินิติ, 2551; วสัน, 2552)

แรงดูดของดิน (Soil suction) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงสภาวะของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยจากภาพที่ 17 พบว่าน้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) จะอยู่ในสภาวะแรงดึง (Tension) จากน้ำหนักของน้ำด้านล่าง แรงดึงหรือแรงดูดนี้เรียกว่าแรงดูดเมตริก (Matric suction,  $s$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$s = u_a - u_w = -u_w \quad (19)$$

โดยค่า  $u_w$  เท่ากับค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดิน และ  $u_a$  จะมีค่าเท่ากับแรงดันอากาศในช่องว่างดิน เครื่องมือที่ใช้วัดแรงดูดเมทริกโดยตรงเรียกว่า Tensiometer ซึ่งจะใช้งานในสภาวะที่ค่า  $u_a$  ของดินมีค่าเท่ากับ 0 และค่า suction ที่วัดได้ก็คือ ค่าที่ติดลบของแรงดันน้ำ นั่นเอง. อย่างไรก็ตาม Tensiometer ทั่วไปจะไม่สามารถวัดค่าแรงดันน้ำที่ติดลบเกิน 100 kPa ได้ ซึ่งกรณีที่มีค่าเกิน 100 kPa จะต้องใช้หลักการ Axis-translation เพื่อวัดและควบคุมค่า Matric suction ของดินด้วยเครื่องมือ Pressure plate หรือ หม้อแรงดัน โดยเป็นการเพิ่มแรงดันอากาศในช่องว่างดิน  $u_a$  เพื่อเพิ่ม Suction ในขณะที่ค่า  $u_w = 0$  นั่นเอง (อกินิตี, 2551; อกินิตี และวิญญพงศ์, 2551)



ภาพที่ 17 แรงดันน้ำในสภาวะสถิตย์

ที่มา: อกินิตี (2551)

แรงดูดเมทริก (Matric suction,  $s$ ) และแรงดูดออสโมติก (Osmotic suction,  $\pi$ ) ทั้งสองชนิดนี้ โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาแรงดูดรวมกันซึ่งเรียกว่า แรงดูดรวม (Total suction,  $\psi$ ) ดังแสดงตามสมการที่ 20

$$\psi = \pi + s \tag{20}$$

โดยแรงดูดรวมหาได้จาก

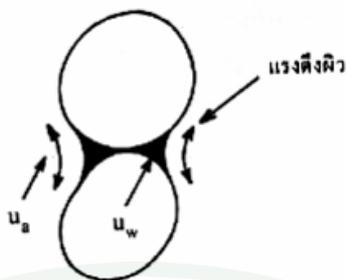
$$\Psi = - \left[ \frac{RT}{V_{mol}} \right] \ln(R_h) \quad (21)$$

เมื่อ  $R_h$  = ความชื้นสัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างแรงดันไอในสถานะปกติ ต่อแรงดันไอ ในสถานะอิ่มตัว ( $P / P_0$ )  
 $R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant) =  $8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$   
 $V_{mol}$  = molecular volume ของไอน้ำ ( $0.01802 \text{ m}^3$ ),  
 $T$  = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{K}$ ),  
 และ Total suction,  $\Psi$ , มีหน่วยเป็น kPa

เครื่องมืออุปกรณ์การวัดแรงดูดเมทริก จะต้องสามารถสัมผัสกับน้ำในดินได้เป็นอย่างดี (Intimate contact) เพื่อให้ น้ำในดินส่งผ่านกับน้ำในเครื่องมือวัดได้ เช่น Tensiometer หรือ Filter paper เป็นต้น สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์การวัดแรงดูดรวม (Total suction) จะต้องเป็นเครื่องมือวัดที่วัดโดยไม่ต้องสัมผัสกับน้ำในดินอย่างดี (Non contact) โดยไอน้ำในดินจะส่งผ่านความชื้นกับไอน้ำในเครื่องมือวัด เช่น Relative humidity sensor เป็นต้น (อกินิติ, 2549; อกินิติ และวิษณุพงศ์, 2551)

Fredlund and Rahardjo (1993) พบว่า คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญหลายอย่างของดินเช่น เปรอร์เซ็นต์ของน้ำในดิน, สัมประสิทธิ์ของการไหลซึมของน้ำผ่านดิน, กำลังรับแรงเฉือนของดิน และ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดินเป็นตัวแปรที่สัมพันธ์โดยตรงกับแรงดูดในดิน นอกจากนี้จากการศึกษายังพบอีกว่า แรงดูดออสโมติกเป็นผลมาจากปริมาณสารละลายที่เจือจางของน้ำในดิน ซึ่งส่วนมากเป็นเกลือ จึงทำให้เกิดแรงดูดชนิดนี้

มานะ (2541) กล่าวว่า สภาพทั่วไปของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีอากาศและไอน้ำแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน มีลักษณะของน้ำผิวเว้าขังเต็มอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน ซึ่งผลต่างของแรงดันน้ำและแรงดันอากาศในมวลดินนี้จะทำให้เกิดแรงดึงผิวของน้ำระหว่างเม็ดดินขึ้น ดังแสดงตามภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ลักษณะอนุภาคดินที่ไม่อึดตัวด้วยน้ำ

ที่มา: มานะ (2541)

ปัจจุบันการศึกษาด้านแรงคูดในดินไม่อึดตัวด้วยน้ำนี้ ยังมีน้อยมากในประเทศไทย โดยเป็นการศึกษาในแนวคิดรูปแบบใหม่ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงของดินเหนียวอ่อนเมื่อน้ำอยู่ในมวลดิน การศึกษาแรงคูดน้ำในดินนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ (ดินซีเมนต์) โดยดินซีเมนต์จัดอยู่ในจำพวกดินที่ไม่อึดตัวด้วยน้ำเช่นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบบคูดในดินซีเมนต์ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของดินซีเมนต์มากยิ่งขึ้น โดยทำการศึกษหาความสัมพันธ์ของแรงคูดของดินซีเมนต์กับสมบัติต่างๆ เช่น กำลังอัด ปริมาณความชื้นในมวลดิน ความหนาแน่น เป็นต้น ทั้งนี้ยังสามารถทำนายพฤติกรรมเบื้องต้นของดินซีเมนต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ เพิ่มเติมได้อีกทางหนึ่ง

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษา ทดลอง ความเป็นไปได้ในการนำกากอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ มาประยุกต์ใช้หรือนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง หรือการแทนที่วัสดุดิบในขั้นตอนการเผาปูนซีเมนต์ Bhatti (1986) พบว่าคอนกรีตที่ผสมซีเมนต์ด้วยกากของเสียทิ้งอุตสาหกรรมคือ ผงฝุ่นซีเมนต์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รวมกับเถ้าลอย 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ/หรือ กากชีโลหะ (Slag) 10-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านความแข็งแรง การหดตัว การทนทานต่อเกลือซัลเฟต และการทนต่อเกลือคลอไรด์ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว Kamon and Nontananandh (1991) ได้เสนอแนวทางการนำกาก

อุตสาหกรรมหลายประเภทกลับไปใช้ใหม่ โดยการผลิตสารเชื่อมประสานจากปูนขาวและตะกอน จากกากของเสียทิ้งจากแหล่งผลิตด้านอุตสาหกรรมต่างๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และนำมา ทดสอบเปรียบเทียบด้านการรับกำลังอัดกับตัวอย่างที่ใช้ดินผสมด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ด้วย อัตราส่วน 3, 6, 9 และ 12 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) พบว่าที่อัตราส่วน 12 เปอร์เซ็นต์ ดินปรับปรุง คุณภาพมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวในทุกช่วงอายุการบ่ม

นอกจากนี้ ตะกอนประปาหรือสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำประปานั้น จัดเป็น กากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้เป็นไปตามเกณฑ์ (NICE Criteria) Elliott and Singer (1988) ได้ทำการศึกษาปริมาณโลหะหนักในตะกอนประปาพบว่า การใส่สารเคมี ลงในน้ำประปา จะทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นจากการผลิตน้ำประปามีลักษณะคล้ายกับเป็นตะกอนของ เสีย โดยปริมาณโลหะหนักที่วัดได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับปริมาณที่มีอยู่ในน้ำดิบ ซึ่งจาก ผลการศึกษาปริมาณและส่วนประกอบของโลหะหนักในตะกอนน้ำประปาพบว่า โลหะหนักได้แก่ แคลเซียม ทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยไม่มีการตกค้างอยู่ในดิน เนื่องมาจากกระบวนการทางชีวเคมี อีกทั้งยังพบอีกว่าปริมาณ โลหะหนักในตะกอนที่เกิดจากการใช้ เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอน จะมีมากกว่าในตะกอนที่เกิดจากอลูมิเนียมซัลเฟต นอกจากนี้ ยังมีการนำเอาต่างๆ ไปใช้ในงานด้านอื่นอีก เช่น ใช้เป็นสารดูดซับสี ใช้ในการตรึงโลหะหนักต่างๆ

จากการศึกษาการนำตะกอนประปาหรือสลัดจ์มาเผาจนเป็นเถ้าตะกอนสลัดจ์พบว่าเถ้า ตะกอนสลัดจ์มีคุณสมบัติสามารถเป็นวัสดุปูซโชนเลนในงานด้านคอนกรีตได้ Khanbilvardi and Afshari (1995) พบว่าการใช้เถ้าสลัดจ์ที่ได้จากโรงบำบัดน้ำเสียโดยการผ่านกระบวนการเผาไหม้ให้ ตะกอนสลัดจ์ กลายเป็นเถ้าก่อน สามารถใช้ผสมแทนวัสดุผสมละเอียดในงานคอนกรีตได้ โดย สามารถพบว่าสามารถใช้เถ้าสลัดจ์แทนวัสดุผสมละเอียดในคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 30 ของน้ำหนัก แห่งของวัสดุผสมละเอียดในสัดส่วนผสมสำหรับการใช้งานปกติ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Monzo *et al.* (1996) พบว่าคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเถ้าตะกอนสลัดจ์เช่น รูปร่างของ อนุภาค มีอิทธิพลกับ Workability ของมอร์ต้า โดยที่รูปร่างของอนุภาคเถ้าตะกอนสลัดจ์มีความ ขรุขระมากกว่าเถ้าถ่านหิน ทำให้สามารถดูดซับน้ำได้มาก ส่งผลให้ไม่มีความไหลลื่นในการทำงาน ซึ่งเมื่อใช้เถ้าตะกอนสลัดจ์เป็นส่วนผสมร้อยละ 15 จะช่วยส่งเสริมกำลังอัดของมอร์ต้า

ความละเอียดของอนุภาคของเถ้าตะกอนสลัดจ์มีผลต่อความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ต้า Monzo *et al.* (1999) ได้ใช้เถ้าตะกอนสลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียในเมืองบาเลนเซีย ประเทศสเปน เป็นส่วนผสมในมอร์ต้าซีเมนต์ แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมทางกล พบว่าซัลเฟอร์ ( $\text{SO}_3$ ) ที่มีอยู่ในเถ้าตะกอนสลัดจ์มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ไม่ได้มีผลกระทบต่อการพัฒนากำลังของมอร์ต้า ในขณะที่ความละเอียดของเถ้าตะกอนสลัดจ์ยิ่งมากขึ้นจะเป็นตัวแปรที่สำคัญมากสำหรับการพัฒนา กำลังให้มากขึ้น และเถ้าตะกอนสลัดจ์จะช่วยการพัฒนากำลังมอร์ต้าได้เท่าและดีกว่า เถ้าลอยในช่วงต้น แต่ในระยะยาวไม่เห็นความแตกต่างมากนัก ตรงกับการศึกษาของ Pan *et al.* (2003) ได้ศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมของมอร์ต้าที่ถูกแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าตะกอนสลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสีย ในด้านที่เกี่ยวกับความละเอียดของเถ้าตะกอนสลัดจ์ หลังจากทำการทดสอบโดยใช้ความละเอียดของเถ้าตะกอนสลัดจ์ตั้งแต่ 500-1000  $\text{m}^2/\text{kg}$  และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่ายิ่งเพิ่มความละเอียด จะทำให้ Workability มีค่าเพิ่มขึ้น และความสามารถรับกำลังอัดยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย สำหรับดัชนีกำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 ทุกครั้งที่เพิ่มความละเอียด 100  $\text{m}^2/\text{kg}$

สำหรับการนำกากอุตสาหกรรมมาแทนที่วัสดุดิบในขั้นตอนการเผาปูนซีเมนต์นั้น ปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้มีการพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้มาเป็นลำดับซึ่งได้มีการนำวัสดุชนิดใหม่ๆ มาทดสอบด้วยอุปกรณ์และเครื่องมือที่มีความทันสมัยมากยิ่งขึ้นเพื่อศึกษาหาวิธีการใหม่ๆ เช่น ใช้วิธีการเผาพร้อมกัน จนทำให้เกิดสารเชื่อมประสานใหม่ที่มอดูล์ประกอบและคุณสมบัติเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ทั่วไป August and Abba Mahmood (2002) พบว่าเถ้าถ่านไม้สามารถนำมาแทนที่บางส่วนใช้เป็นวัสดุดิบตั้งต้นปูนซีเมนต์ได้ Pereira *et al.* (2008) ได้ทดลองนำตะกอนสลัดจ์จำนวน 3 ชนิดมาเผาพร้อมกับปูนขาวด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกันจนถึง 1500 องศาเซลเซียส แล้วนำปูนเม็ดนั้นมาทดสอบกำลังอัดด้วยแท่งลูกบาศก์มอร์ต้า พบว่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้ามีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น Frias *et al.* (2008) ได้ทดลองนำสลัดจ์จากกระบวนการผลิตกระดาษมาแทนที่ใช้เป็นวัสดุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยได้ทดลองเผาในเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที หลังจากทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ทั้งทางกายภาพและทางเคมี ตลอดจนทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ต้าพบว่ามอร์ต้าที่ทำจากปูนเม็ดที่เผาด้วยอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง จะให้ค่าทางด้านกายภาพและทางเคมี ที่เหมาะสมกว่า และให้ค่าการรับกำลังอัดที่สูงกว่าการเผาที่อุณหภูมิอื่นๆ

สำหรับกากที่ได้จากกากของเสียทิ้งของระบบชุมชนเมือง มีนักวิจัยได้ทำการทดสอบเพื่อหาวิธีนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อย่างถูกต้องปลอดภัยซึ่งสอดคล้องกับ NICE Criteria Garcés *et al.* (2008) ได้ทดลองนำขี้เถ้าจากกากของเสียจากท่อน้ำทิ้ง (sewage sludge ash) เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนเม็ด และนำปูนเม็ดนี้ไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของมอร์ต้าเช่น กำลังอัด ความพรุน การหดตัวและการบวมตัว สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของซีเมนต์ได้สูงขึ้น และ Jill *et al.* (2008) ได้ทำการทดลองลดปริมาณคลอไรด์ในขี้เถ้าจากกากเทศบาลด้วยการแช่ในน้ำและน้ำกรด หลังจากนั้นจึงไปใช้แทนดินเหนียวซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตซีเมนต์ พบว่าขี้เถ้าจากกากเทศบาลสามารถที่จะนำไปใช้เป็นทางเลือกในการแทนที่วัตถุดิบได้ ผลการทดสอบยังบ่งชี้ว่ามีปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ให้กำลังอัดของมอร์ต้าอยู่ในระดับที่น่าพอใจ แต่จะใช้เวลาในการก่อตัวนานกว่ามอร์ต้ามาตรฐาน

นอกจากขี้เถ้าและตะกอนสลัดจ์แล้ว ตะกรันโลหะเช่น ตะกรันเหล็กหรือทองแดง ยังจัดเป็นกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพและคุณสมบัติเหมาะสมในการนำมาปรับปรุง หรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้อีกด้วย Alp *et al.* (2008) พบว่าเมื่อนำกากตะกรันทองแดง (Copper slag) มาแทนที่วัตถุดิบเพื่อใช้ในการกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกำลังอัดกับค่ามอร์ต้าที่ใช้การแทนที่ด้วยกากตะกรันเหล็ก (Steel slag) ที่ใช้ในการกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน โดยตะกรันทองแดงมี  $Fe_2O_3$  มากกว่า 59% เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อทดสอบการชะล้างของโลหะหนักพบว่ายังอยู่ในค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Tsakiridis *et al.* (2008) ซึ่งได้นำตะกรันเหล็กทดลองแทนที่วัตถุดิบในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10.50% แล้วเผาที่อุณหภูมิ  $1,450^{\circ}C$  จากผลการตรวจสอบปูนเม็ดด้านสมบัติของธาตุสารหลัก (Mineralogical characteristics) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเทียบกับ clinker ปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ผลการทดสอบด้าน เวลาก่อตัว กำลังอัด ความอยู่ตัว ยังแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างจากปูนซีเมนต์ปกติเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในประเทศไทยนั้น มีผลการวิจัยเกี่ยวกับการนำกากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เช่น การนำเถ้าตะกอนสลัดจ์มาใช้เป็นวัสดุปอซโซแลนในงานด้านคอนกรีต เป็นต้น จิตรกร (2543) ได้ศึกษาการนำตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน และ โรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์ มาใช้เป็นวัสดุปอซโซแลนในงานด้านคอนกรีต โดยทำการเผาตะกอนสลัดจ์ที่อุณหภูมิ 500 , 700 และ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 15, 30 และ 60 นาที

ตามลำดับ แล้วทำการทดสอบหาค่าดัชนีการรับกำลังอัด จากผลการวิจัยพบว่าค่าดัชนีกำลังแรงอัดของมอร์ต้าผสมตะกอนสลัดจ์จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนทุกตัวอย่างมีค่ามากกว่าร้อยละ 75 ผ่านมาตรฐาน ASTM C618 ค่าดัชนีกำลังแรงอัดของมอร์ต้าผสมตะกอนสลัดจ์จากโรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์ มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน โดยเฉพาะที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการเผา 15 นาที โดยมีค่าดัชนีกำลังแรงอัดร้อยละ 74

ธนศ (2546) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเถ้าตะกอนสลัดจ์จากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนในแต่ละช่วงฤดูของปีเพื่อหาความเหมาะสมในการนำมาใช้งานเป็นวัสดุปอซโซเลน พบว่าในแต่ละช่วงฤดูของปีจะสามารถนำเถ้าตะกอนสลัดจ์มาใช้งานได้เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน เถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เผาด้วยอุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส จะให้คุณสมบัติที่ดีกว่าเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเล็กน้อย เมื่อเผาด้วยเวลา 15 นาที เท่ากัน สอดคล้องกับผลการศึกษาของปีติฤกษ์ (2547) ได้ศึกษาคุณสมบัติของมอร์ต้าผสมตะกอนสลัดจ์จากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนเปรียบเทียบกับตัวควบคุมคือ มอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน โดยทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าตะกอนสลัดจ์ซึ่งถูกเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่าเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่ผ่านการเผา มีลักษณะพื้นผิวอนุภาคขรุขระ เป็นเกล็ดรวมกันเป็นกลุ่มก้อน สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซเลนในประเภท N และการเพิ่มปริมาณของเถ้าตะกอนสลัดจ์ในปูนซีเมนต์ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง โดยกำลังอัดที่อายุ 90 วันของมอร์ต้าที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.60 แทนที่ด้วยเถ้าตะกอนสลัดจ์ร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าปกติมากที่สุด นอกจากนี้ สายัณห์ (2545) ยังพบว่าฝุ่นหินจากโรงโม่หินสามารถนำมาใช้ทดแทนในงานคอนกรีตได้

นอกจากนี้เกศรินทร์ และสกลวรรณ (2550) ได้ทดลองทำการผลิตวัสดุซีเมนต์ที่มีเบไลท์เป็นองค์ประกอบสูงจากวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อประหยัดพลังงานโดยใช้วัสดุดิบจำพวก Fly ash FGD-gypsum และ Slag โดยได้ทดลองทำการสังเคราะห์แบบเผา (Clinkerization) และการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอล พบว่าการสังเคราะห์แบบเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส จะพบเฟสในปูนเม็ดคือ Iarnite (Beta-C<sub>2</sub>S) และ gehlenite (C<sub>2</sub>AS) ซึ่งจะให้ค่าความแข็งแรงของมอร์ต้าที่อายุ 28 วันและ 45 วัน เท่ากับ 16.15 และ 18.90 ksc ตามลำดับ และเมื่อทำการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอลจะให้ค่าความแข็งแรงของมอร์ต้าที่อายุ 28 เท่ากับ 49-93 ksc และเมื่อทดสอบการชะล้างของโลหะหนักพบว่ามีค่าการชะล้างสูงกว่าซีเมนต์ปกติเพียงเล็กน้อยแต่ยังอยู่ในค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

นอกจากตะกอนประปาแล้ว Kamon and Nontananandh (1991) ยังได้นำเสนอแนวคิดในการผลิตสารเชื่อมประสานจากกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับแนวความคิดในปัจจุบันซึ่งเน้นการจัดการกากอุตสาหกรรมแบบผสมผสาน (เกียรติคุณ และคณะ, 2552)

งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำกากอุตสาหกรรมนำกลับไปใช้ใหม่หรือนำมาแทนที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของวัตถุดิบตั้งต้นซึ่งจะใช้กากอุตสาหกรรมเพียงชนิดเดียว (Single waste) แต่แนวคิดใหม่ในการนำกากอุตสาหกรรมหลายชนิดมารวมกันเพื่อผลิตสารเชื่อมประสานที่มีคุณสมบัติเทียบเคียงปูนซีเมนต์เช่น ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมโดยใช้หลักการผสมผสานกากประเภทต่างๆ (Wastes combination) ยังมีอยู่เป็นจำนวนน้อย และยังไม่มีผู้นำเสนออย่างชัดเจนสำหรับงานวิจัยในลักษณะเดียวกันนี้ในประเทศไทย

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### วัสดุทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม ได้แก่

1. ตะกอนประปาจากบ่อตากตะกอน โรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพมหานคร
2. ฟูนผงหินปูน ซึ่งเป็นกากอุตสาหกรรมจากโรงโม่หินปูน จังหวัดสระบุรี
3. เปลือกหอยแครง บ้านบางตะบูน อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี
4. ถ้ำลอยลิกไนต์ จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะจังหวัดลำปาง
5. ปูนขาว ชนิด Hydrate Lime

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาสำหรับเตรียมตัวอย่างมอร์ต้าและซีเมนต์เพสต์ ได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement หรือ OPC) ประเภทที่ 1 ตราช้าง
2. ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมชนิดผงสีน้ำตาลอ่อน (Brown Cementing Material หรือ BCM)
3. ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมชนิดผงสีเทาดำ (Gray Cementing Material หรือ GCM)
4. ยิปซั่ม (Gypsum) เกรดการค้า
5. ทราย
6. น้ำประปา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาสำหรับเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์ ได้แก่

1. ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จากบริเวณพื้นที่คลองระบายน้ำ ณ สนามบินสุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement หรือ OPC) ประเภทที่ 1 ตราช้าง

3. ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมชนิดผงสีเทาดำ (Gray Cementing Material หรือ GCM)
4. ยิปซั่ม (Gypsum) เกรดการค้า
5. น้ำประปา

### อุปกรณ์ทดสอบ

1. เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (Electric high temperature furnace: Nabertherm) สามารถให้อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 1,500 องศาเซลเซียส และตั้งเวลาในการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ พร้อมอุปกรณ์ต่างๆ ประกอบด้วย

- ถ้วยครุชชีเบิ้ล (Crucible cup) ทนอุณหภูมิได้ไม่ต่ำกว่า 1,500 องศาเซลเซียส
- ฝาปิดถ้วยครุชชีเบิ้ล (Lid) ทนอุณหภูมิได้ไม่ต่ำกว่า 1,500 องศาเซลเซียส
- ทราเยอะลูมินา
- อิฐทนไฟ

2. ชุดเครื่องมือสำหรับบดละเอียด

- ครกและสากบดอาร์เกต (Agate mortar and pestle sets)
- ชุดเหล็กบดละเอียด (Mechanical grinding sparatus)
- เครื่องบดความละเอียดสูง (Mechanical grinding machine)

3. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบปริมาณโลหะหนัก Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

4. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ตามมาตรฐาน Standard of American Society for Testing and Material (ASTM) ประกอบด้วย

- การทดสอบปริมาณเนื้อปูนอิสระ (Free lime) ใน clinker (ASTM C25 – 06)

- การทดสอบการรับกำลังของมอร์ต้าซีเมนต์ไฮดรอลิกรูปลูกบาศก์ ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ซม.<sup>3</sup> (ASTM C109-91)

- การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (ASTM C188 – 09)

- การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโดยใช้เข็มไวแคต (ASTM C191 – 08)

- การทดสอบหาความละเอียดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโดยใช้เครื่องแอร์เพอร์มี-อะบิลิตี้แบบเบลน (ASTM C204 – 07)

5. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบสมบัติของดินตามมาตรฐาน Standard of American Society for Testing and Material (ASTM) ประกอบด้วย

- การทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน (ASTM D 422-63)

- การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (ASTM D 854-92)

- การทดสอบการรับกำลังอัดของดิน (ASTM D 2199-97)

- การทดสอบหาปริมาณความชื้นในดิน (ASTM D 2216-92)

- การจำแนกประเภทของดิน (ASTM D 2487-93)

- การทดสอบ Atterberg's Limits (ASTM D 4318-93)

6. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence หรือ XRF) ยี่ห้อ Philips รุ่น PW2400

7. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction หรือ XRD) ยี่ห้อ Philips รุ่น X'Pert

8. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510

9. ชุดเครื่องมือทดสอบสมบัติด้านแรงดูดของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil) ด้วยวิธี Suction measurement test ประกอบด้วย

- KU Tensiometer สำหรับวัดแรงดูดเมทริก (Matrix suction)
- ปิ๊มลมสูญญากาศพร้อมอุปกรณ์ 1 ชุด
- Relative humidity sensor สำหรับวัดแรงดูดรวม (Total suction)
- เครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (Automatic Data Logger)
- ผู้ควบคุมอุณหภูมิ พร้อมอุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิ
- คอมพิวเตอร์พร้อมอุปกรณ์ 1 ชุด
- เครื่องสำรองไฟฉุกเฉิน 1 ชุด ใช้สำหรับในกรณีไฟฟ้าดับ

### วิธีการ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ภาพที่ 19 แสดงแผนการวิจัยส่วนที่ 1 อธิบายรายละเอียดลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

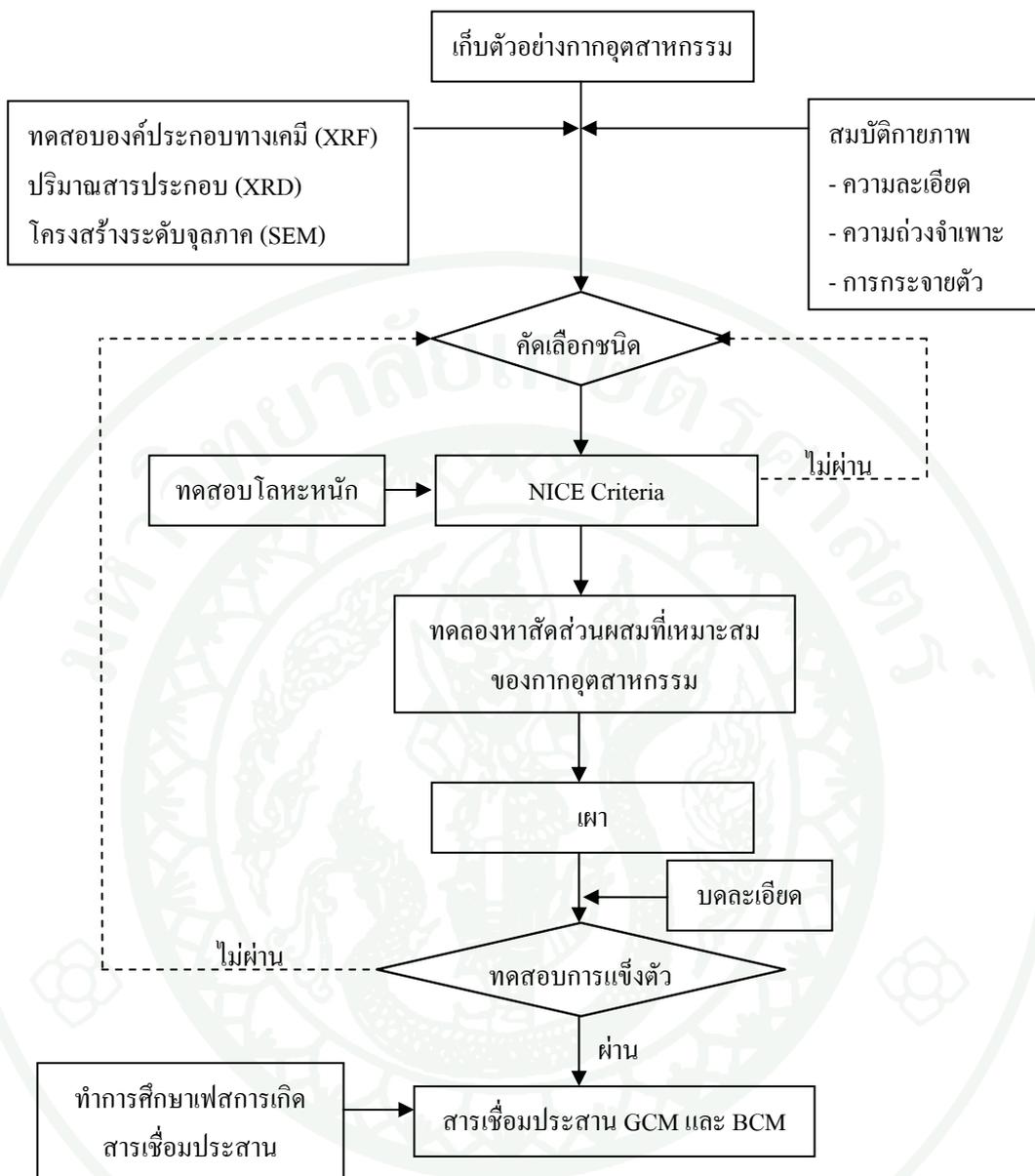
#### แผนการวิจัยส่วนที่ 1

ทำการเก็บตัวอย่างจากอุตสาหกรรมจากแหล่งต่างๆ ภายในประเทศ และทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่

- ตะกอนประปา เก็บตัวอย่างจากบ่อตากตะกอน โรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพมหานคร มีลักษณะเป็นก้อนแข็งสีน้ำตาลเข้มคล้ายดินเหนียวแห้ง เมื่อตากแห้งแล้วมีขนาดคละที่แตกต่างกัน ดังแสดงตามภาพที่ 20

- ฟุ่นผงหินปูน เก็บตัวอย่างมาจากโรงโม่หินปูน จังหวัดสระบุรี มีลักษณะเป็นฟุ่นผงแข็งสีขาวขุ่น ฟุ่นผงหินปูนเกิดจากอุตสาหกรรมโม่หินปูนเพื่อนำหินปูนเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์ ดังแสดงตามภาพที่ 21

- เปลือกหอยแครง เก็บตัวอย่างจากบ้านบางตะบูน อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นแหล่งเพาะเลี้ยง และส่งจำหน่ายหอยแครงมากที่สุดในประเทศ หลังจากเก็บตัวอย่างแล้ว ล้างทำความสะอาด ขจัดเศษสิ่งสกปรกที่ติดอยู่กับเปลือกหอยออก ผึ่งแดดให้แห้งก่อนที่จะนำไปใช้ในงานวิจัย ดังแสดงตามภาพที่ 22



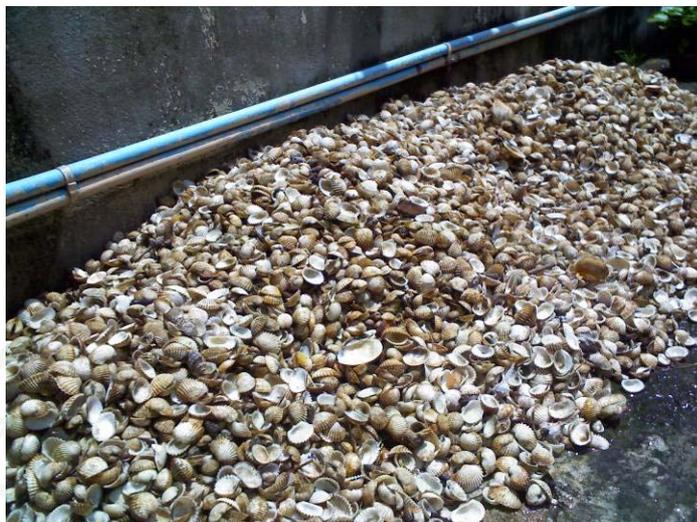
ภาพที่ 19 แผนการวิจัยส่วนที่ 1



ภาพที่ 20 บ่อตากตะกอนประปา กรุงเทพมหานคร



ภาพที่ 21 ฝู้นผงหินปูน จังหวัดสระบุรี



ภาพที่ 22 เปลือกหอยแครง จังหวัดเพชรบุรี



ภาพที่ 23 ถ้ำล่อยลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

- ถ้ำล่อย นำตัวอย่างมาจาก โรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลแดงดำ ถ้ำล่อยที่ใช้ในงานวิจัยเป็นถ้ำล่อยลิกไนต์ซึ่งเกิดจากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 °C เพื่อนำพลังงานความร้อนมาใช้ขับเคลื่อนเครื่องจักรในขั้นตอนผลิตกระแสไฟฟ้า ดังแสดงตามภาพที่ 23

กากอุตสาหกรรมทั้งหมดถูกนำมาบดละเอียดในลักษณะเป็นผงแห้ง ดังแสดงตัวอย่าง ลักษณะเปลือกหอยแครงหลังจากบด ตามภาพที่ 24 เพื่อเตรียมตัวอย่างก่อนที่จะนำไปใช้ในขั้นตอน การเผาด้วยเตาเผาไฟฟ้า และทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบความละเอียด ความถ่วงจำเพาะ และการทดสอบการกระจายตัวของอนุภาค

สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าประกอบทางเคมี จะส่งตัวอย่างกากอุตสาหกรรมไปทดสอบ ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการด้วยวิธี Titrimetry standard method, Atomic Absorption Spectrometer และ Gravity method



ภาพที่ 24 ลักษณะผงแห้งของเปลือกหอยแครงหลังจากบด

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบ ทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffraction (XRD) ด้วยเครื่อง Philips X'Pert Diffractometer ณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยกำหนดใช้ค่าตัวแปร ดังนี้

- Input energy : 40 kV and 30 mA
- Scanning speed : 2 degrees/min.
- Start angle ( $2\theta$ ) = 10 degrees
- Stop angle ( $2\theta$ ) = 80 degrees



(ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง



(ข) อุปกรณ์ที่ใช้บรรจุผงตัวอย่าง



(ค) Philips X'Pert Diffractometer

### ภาพที่ 25 เครื่องทดสอบด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD)

การศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาค จะทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM) ด้วยเครื่อง JEOL JSM-6510 ณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยกำหนดใช้ค่าตัวแปร ดังนี้

- Probe current : 20 mA
- Accelerating voltage : 10 kA
- Working distance : 10-30 mm



(ก) อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่าง



(ข) เครื่องเคลือบ (Coater) JEOL รุ่น JFC-1600



(ค) Scanning Electron Microscope



(ง) ขณะบรรจุตัวอย่าง

### ภาพที่ 26 อุปกรณ์การวิเคราะห์ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM)

การทดสอบปริมาณโลหะหนักในกากอุตสาหกรรม จะทดสอบด้วยวิธี Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) ณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อยืนยันสมบัติความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมตามเกณฑ์ NICE criteria

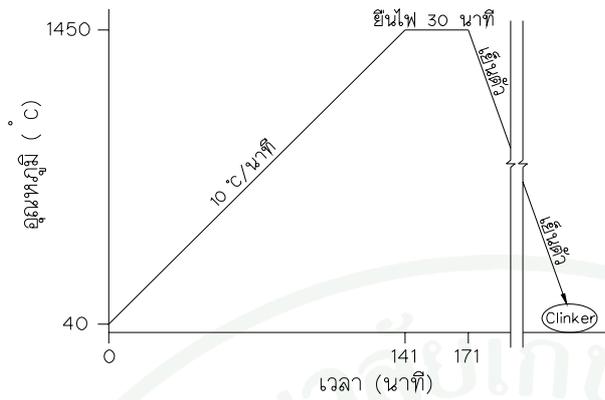
นำกากอุตสาหกรรมที่ผ่านเกณฑ์ NICE Criteria มาทดลองสกัดส่วนผสมของสารตั้งต้นจากกากอุตสาหกรรมที่ค่าต่างๆ กัน (Trial and Error) โดยปรับปริมาณของกากตะกอนประปาอยู่ในช่วง 20% – 40% ฟูนผงหินปูน 5% – 70% เปลือกหอยแครง 5% - 70% และเถ้าลอย 0% - 5% จากนั้นนำมาคำนวณหาสัดส่วนผสมของวัตถุดิบตั้งต้น โดยทำการคำนวณผลรวมของออกไซด์หลักคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>), อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเหล็กออกไซด์

(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ตามสัดส่วนของกากอุตสาหกรรมแต่ละชนิดโดยน้ำหนัก นำมาหาค่า Hydration Modulus (HM หรือ HR) และอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ได้แก่ Lime Saturation Factor (LSF), Silica Ratio (Ms หรือ SR) และ Alumina Ratio (Ma หรือ AR) ตามตารางที่ 8 เป็นเกณฑ์กำหนดเบื้องต้น โดยคำนวณจากปริมาณออกไซด์หลัก อย่างไรก็ตามสัดส่วนผสมของวัตถุดิบตั้งต้นจากกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนดเบื้องต้นแล้ว จะให้ค่าไฮเดรชัน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ อยู่ในช่วงที่กำหนดตามตารางที่ 8 ยกเว้นค่า LSF ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะออกแบบให้สูงกว่าเกณฑ์กำหนดเล็กน้อย เพื่อให้สารผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์มี Free lime สูงเล็กน้อย

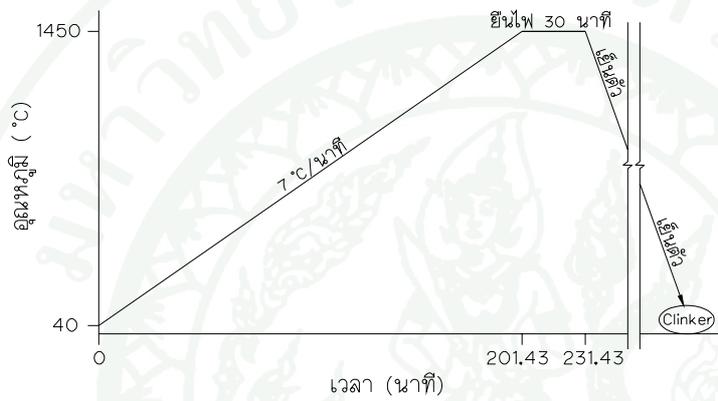
นำกากอุตสาหกรรมมาผสมตามสัดส่วนที่คำนวณได้ บรรจุลงในถ้วยครุชีเบิ้ล แล้วเผาในเตาเผาไฟฟ้าด้วยรูปแบบการเผาที่แตกต่างกันของช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาจำนวน 7 รูปแบบ โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 40 °C และเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,450 °C ดังแสดงรูปแบบการเผาตามภาพที่ 27 และรายละเอียดการเผาตามตารางที่ 9 สำหรับเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงแสดงตามภาพที่ 28

**ตารางที่ 8** เกณฑ์กำหนดเบื้องต้นในการคำนวณสัดส่วนผสม

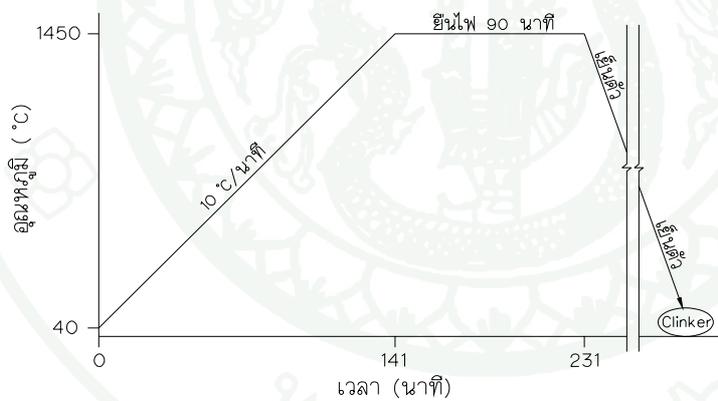
ลำดับ	โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ	เกณฑ์กำหนดเบื้องต้น
1	Hydration Modulus (HM หรือ HR)	1.7-2.4
2	Lime Saturation Factor (LSF)	90-100%
3	Silica Ratio (Ms หรือ SR)	1.9 – 3.0
4	Alumina Ratio (Ma หรือ AR)	1.8 – 2.5



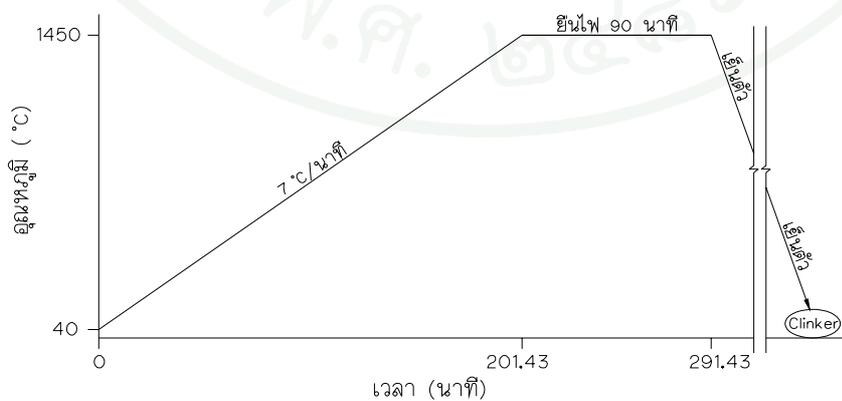
รูปแบบ R1



รูปแบบ R2

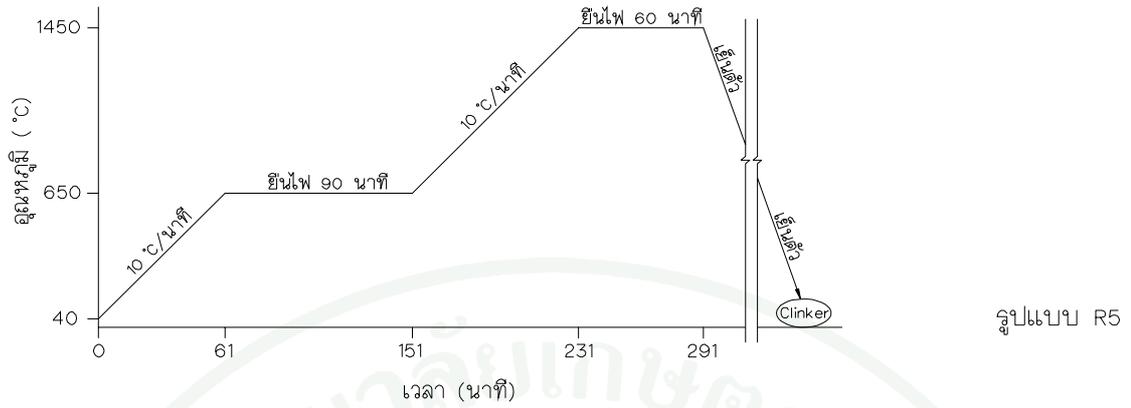


รูปแบบ R3

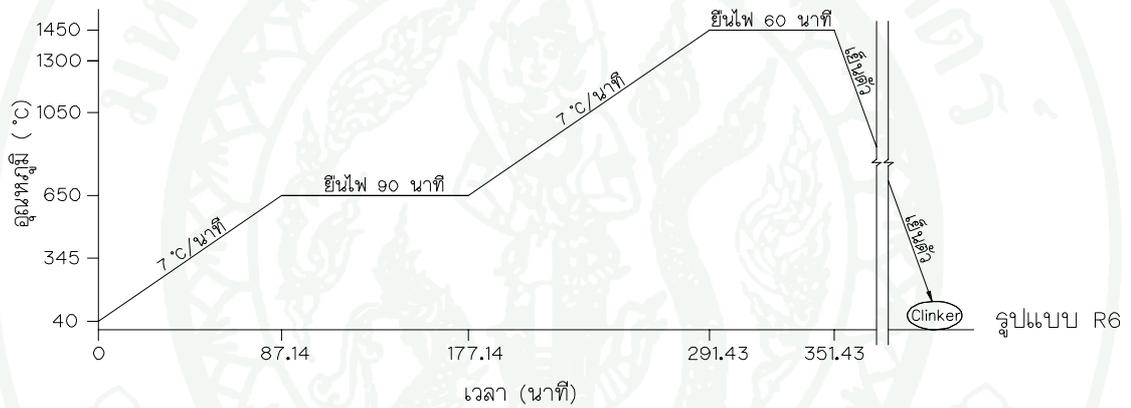


รูปแบบ R4

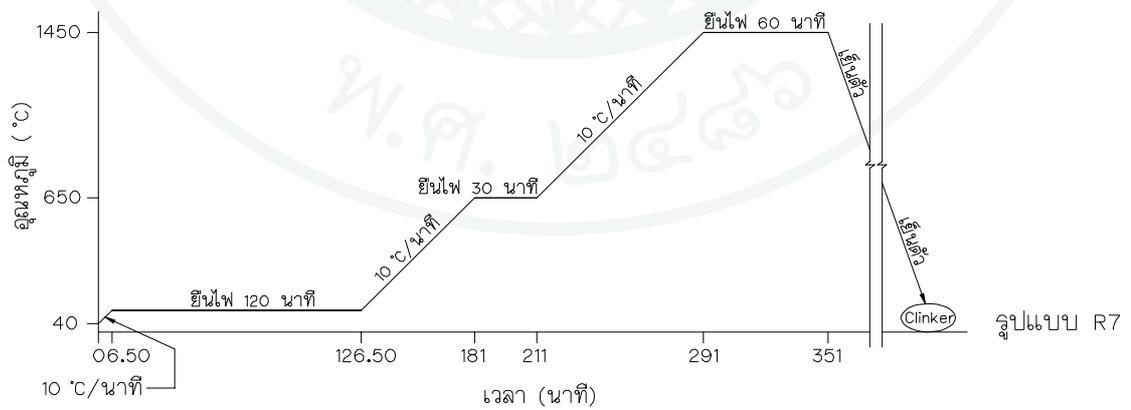
ภาพที่ 27 รูปแบบการเผาที่ช่วงอุณหภูมิและเวลาต่างๆ



รูปแบบ R5



รูปแบบ R6



รูปแบบ R7

ภาพที่ 27 (ต่อ)

ตารางที่ 9 รายละเอียดรูปแบบการเผา

ช่วงอุณหภูมิและเวลา	รูปแบบการเผา						
	R1 (10 °C /นาทีก)	R2 (7 °C /นาทีก)	R3 (10 °C /นาทีก)	R4 (7 °C /นาทีก)	R5 (10 °C /นาทีก)	R6 (7 °C /นาทีก)	R7 (10 °C /นาทีก)
<b>ช่วงที่ 1</b>							
อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	40	40	40	40	40	40	40
อุณหภูมิสิ้นสุด (°C)	1450	1450	1450	1450	650	650	105
ระยะเวลา (นาทีก)	141	201.43	141	201.43	61.00	87.14	6.50
<b>ช่วงที่ 2</b>							
อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	1450	1450	1450	1450	650	650	105
อุณหภูมิสิ้นสุด (°C)	1450	1450	1450	1450	650	650	105
ระยะเวลา (นาทีก)	30	30	90	90	90	90	120
<b>ช่วงที่ 3</b>							
อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)					650	650	105
อุณหภูมิสิ้นสุด (°C)					1450	1450	650
ระยะเวลา (นาทีก)					80.00	114.29	54.50
<b>ช่วงที่ 4</b>							
อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)					1450	1450	650
อุณหภูมิสิ้นสุด (°C)					1450	1450	650
ระยะเวลา (นาทีก)					60	60	30
<b>ช่วงที่ 5</b>							
อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)							650
อุณหภูมิสิ้นสุด (°C)							1450
ระยะเวลา (นาทีก)							80.00

## ตารางที่ 9 (ต่อ)

ช่วงอุณหภูมิและเวลา	รูปแบบการเผา						
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
	10 °C /นาทึ่	7 °C /นาทึ่	10 °C /นาทึ่	7 °C /นาทึ่	10 °C /นาทึ่	7 °C /นาทึ่	10 °C /นาทึ่
ช่วงที่ 6							
อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)							1450
อุณหภูมิสิ้นสุด (°C)							1450
ระยะเวลา (นาทึ่)							60
เวลารวมทั้งหมด (นาทึ่)	171.00	231.43	231.00	291.43	291.00	351.43	351.00
เวลารวมทั้งหมด (ชั่วโมง)	2.85	3.85	3.85	4.85	4.85	5.85	5.85



(ก) อิฐทนไฟ ปูทับหน้าด้วยอลูมินา



(ข) ถ้วยครุฑซีเบิ้ล พร้อมฝาปิด



(ค) เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง

ภาพที่ 28 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงและอุปกรณ์ประกอบ

ขั้นตอนการเตรียมสัปดาห์ผสมของวัตถุดิบตั้งต้นจากกากอุตสาหกรรมก่อนที่จะนำเข้าเตาเผา จะดำเนินการคลุกเคล้าส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงแบ่งบรรจุใส่ในถ้วยครุชีเบิ้ล ในปริมาณ 100 กรัม ต่อ 1 ถ้วยครุชีเบิ้ล พร้อมปิดฝาให้มิดชิดเพื่อป้องกันก๊าซที่อาจจะเกิดขึ้น ในขณะที่เผาไปเกาะรวมตัวกับขดลวดนำความร้อน ซึ่งจะช่วยให้ขดลวดนำความร้อนเสื่อมสภาพ และทำให้เตาเผามีอายุการใช้งานสั้นลงกว่าปกติ เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดของขนาดช่องบรรจุตัวอย่าง (Chamber) ซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็ก ทำให้การเผาตัวอย่างในแต่ละครั้งไม่สามารถเผาในปริมาณมากได้ สำหรับการเผา 1 ครั้งจะสามารถบรรจุถ้วยครุชีเบิ้ลได้ไม่เกิน 4 ใบ ขั้นตอนการเผาแสดงตามภาพที่ 29



(ก) ทำความสะอาดช่องบรรจุตัวอย่าง



(ข) ช่องบรรจุตัวอย่าง (ก่อนบรรจุตัวอย่าง)



(ค) หลังจากบรรจุตัวอย่าง



(ง) ตั้งเวลาตามรูปแบบการเผา

ภาพที่ 29 ขั้นตอนการเผาในเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง

เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนกระบวนการเผาตามรูปแบบการเผาที่ได้กำหนดไว้ และอุณหภูมิภายในช่องบรรจุตัวอย่างของเตาเผาเย็นลงต่ำกว่า 200 °C จึงสามารถทำการเปิดช่องบรรจุตัวอย่างและทำการเก็บตัวอย่างได้ นำสารเชื่อมประสานที่ได้จากการเผาไปบดละเอียด แล้วทดสอบสมบัติการแข็งตัวได้ (Self Hardening Properties) ของเพสต์สารเชื่อมประสาน ถ้าผลการทดสอบไม่เป็นผลสำเร็จ ให้กลับไปทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนการคัดเลือกชนิดของกากอุตสาหกรรมอีกครั้ง

หลังจากได้สารเชื่อมประสานที่มีสมบัติการแข็งตัวได้ของเพสต์ ทำการศึกษาเฟสการเกิดสารประกอบในปูนเม็ดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffraction (XRD) ซึ่งจะศึกษาการเกิดเฟสของสารประกอบในแต่ละช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาการเผา

วิธีการเก็บรักษาตัวอย่างสารเชื่อมประสานหลังการเผา ต้องเก็บในสถานที่ที่ไม่มีอากาศไหลผ่านสัมผัสกับตัวอย่าง ต้องอยู่ในสถานที่หรือบรรจุในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิดพร้อมทั้งใส่สารดูดความชื้น (Silica gel) เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นในอากาศเข้าไปสัมผัสกับสารเชื่อมประสาน ดังแสดงตามภาพที่ 30 เมื่อความชื้นในอากาศสัมผัสกับสารเชื่อมประสาน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรเดชันกับสารเชื่อมประสานก่อนที่จะนำไปทดสอบตามขั้นตอนต่างๆ ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ตามมาเปลี่ยนแปลง และคลาดเคลื่อน ไม่ตรงกับความเป็นจริง



(ก) การเก็บตัวอย่างพร้อมใส่สารดูดความชื้น



(ข) บรรจุในภาชนะพร้อมฝาปิดมิดชิด

ภาพที่ 30 การเก็บรักษาสารเชื่อมประสานหลังจากการเผา

## แผนการวิจัยส่วนที่ 2

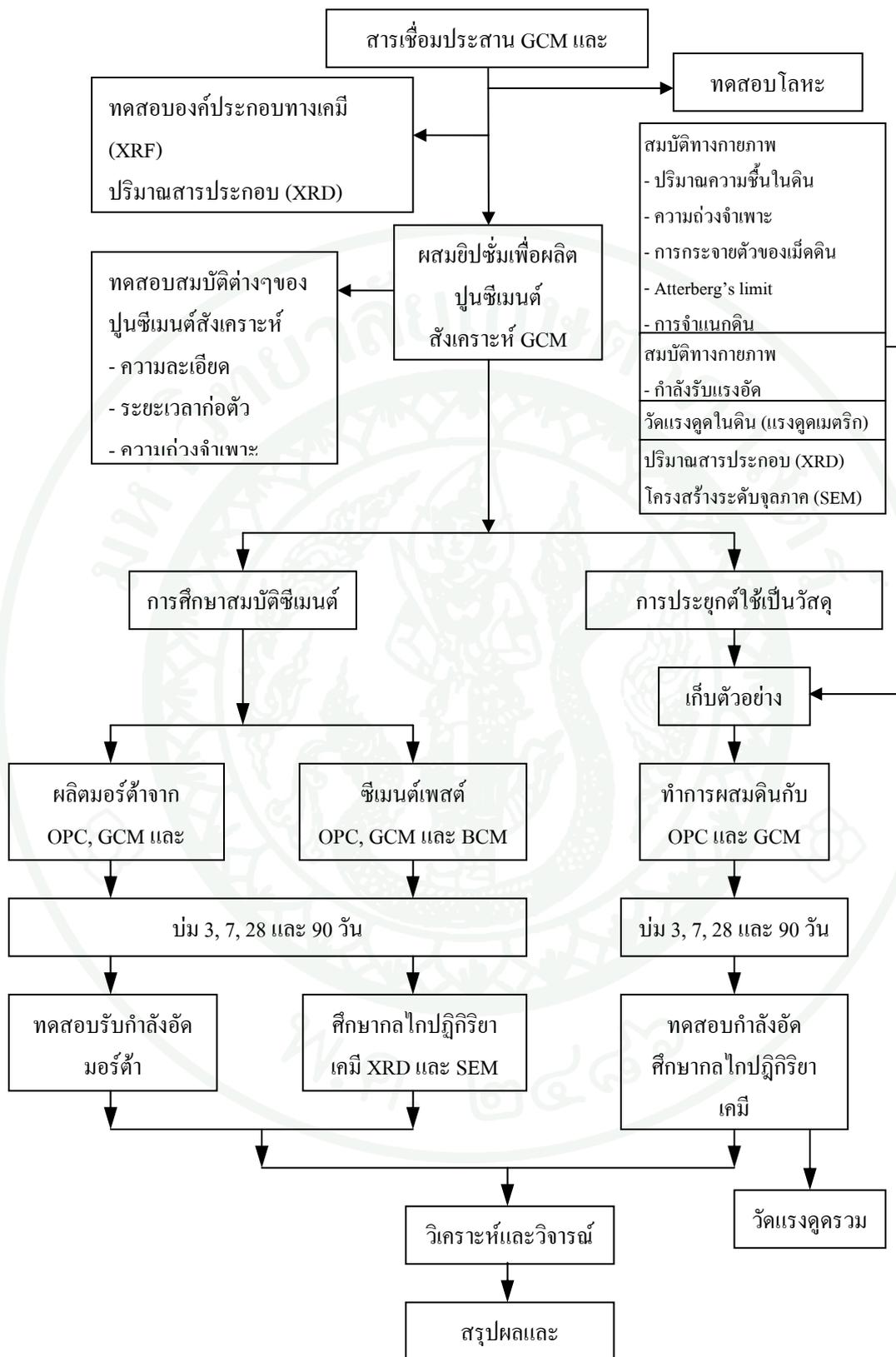
แผนการวิจัยส่วนที่ 2 แสดงตามภาพที่ 31 แสดงอธิบายรายละเอียดลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

นำสารเชื่อมประสานทั้ง 2 ชนิดคือ GCM และ BCM มาทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) หาปริมาณสารประกอบด้วยวิธี XRD ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SEM เปรียบเทียบกับ OPC ตามลำดับ จากนั้นทดสอบปริมาณโลหะหนักในปูนเม็ดด้วยวิธี Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) เพื่อยืนยันสมบัติความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมตามเกณฑ์ NICE criteria หลังการเผา

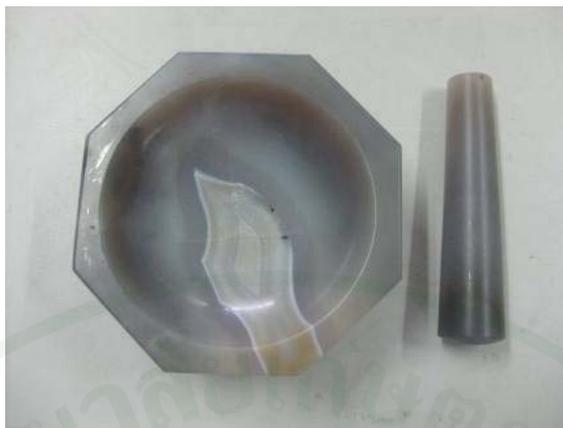
นำสารเชื่อมประสาน GCM มาบดละเอียดด้วยอุปกรณ์ และเครื่องมือที่แตกต่างกันได้แก่ ครกอาร์เกต (Agate mortar and pestle sets) ตามภาพที่ 32 ชุดเหล็กบดละเอียด (Mechanical grinding aparatus) ตามภาพที่ 33 และเครื่องบดความละเอียดความเร็วสูง (High speed ball mill) ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์จากโรงผลิตปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง) จังหวัดสระบุรี ตามภาพที่ 34 ตามลำดับ แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ (Sieve no.) แบ่งความละเอียดออกเป็น 7 ความละเอียด ดังแสดงสัญลักษณ์และรายละเอียดตามตารางที่ 10

**ตารางที่ 10** รายละเอียดการบดปูนเม็ดที่ความละเอียดต่างๆ

ตัวอย่าง	ผ่านตะแกรงเบอร์ (Sieve no.)	เวลาที่ใช้ในการบด (นาที)	อุปกรณ์ที่ใช้บด
S1	100	15-30	ครกอาร์เกต
S2	170	20-25	ชุดเหล็กบดละเอียด
S3	200	25-30	ชุดเหล็กบดละเอียด
S4	230	30-40	ชุดเหล็กบดละเอียด
S5	325	10-15	เครื่องบดความละเอียดความเร็วสูง
S6	325	15-20	เครื่องบดความละเอียดความเร็วสูง
S7	325	20-30	เครื่องบดความละเอียดความเร็วสูง



ภาพที่ 31 แผนการวิจัยส่วนที่ 2



ภาพที่ 32 ครกอาร์เกต



ภาพที่ 33 ชุดเหล็กบดละเอียด



ภาพที่ 34 เครื่องบดความละเอียดความเร็วสูง

นำสารเชื่อมประสาน GCM ที่บดละเอียดมาผสมยิปซั่ม 5% และสารเชื่อมประสาน BCM มาผสมยิปซั่ม 4% เพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM และ BCM ตามลำดับ จากนั้นทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความละเอียด ความถ่วงจำเพาะ และระยะเวลาการก่อตัว สำหรับการหาปริมาณส่วนผสมของยิปซั่มที่เหมาะสม จะทำการทดสอบเปรียบเทียบการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่มียิปซั่มผสมอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน

การทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดของมอร์ต้าจะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109-91 โดยเกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้ามาตรฐานแสดงตามตารางที่ 11 จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างมอร์ต้ารูปลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม<sup>3</sup> ใช้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายมาตรฐาน คือ 1 : 2.75 และ w/c ratio = 0.485 สำหรับทรายมาตรฐานจะใช้ทรายร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แต่ค้างตะแกรงเบอร์ 30 นำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM และ BCM มาผลิตมอร์ต้าทดสอบการรับกำลังอัด เปรียบเทียบกับมอร์ต้าที่ผลิตจาก OPC ดังนี้

- มอร์ต้าที่ผลิตขึ้นจาก OPC ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน
- มอร์ต้าที่ผลิตขึ้นจาก GCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน
- มอร์ต้าที่ผลิตขึ้นจาก BCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน

ตารางที่ 11 เกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้ามาตรฐานตาม ASTM C109-91

อายุและการบ่ม	กำลังอัด (ksc)				
	ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
1 วันในอากาศชื้น	-	-	120	-	-
1 วันในอากาศชื้น					
2 วันในน้ำ	85	70	210	-	-
1 วันในอากาศชื้น					
6 วันในน้ำ	150	130	-	55	105
1 วันในอากาศชื้น					
27 วันในน้ำ	245	245	-	140	210

กำลังอัดของมอร์ต้า สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{กำลังอัดมอร์ต้า} &= P/A \\ \text{เมื่อ } P &= \text{น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)} \\ A &= \text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างมอร์ต้าที่รับน้ำหนักกด (ซม<sup>2</sup>)} \end{aligned}$$



(ก) แบบหล่อมอร์ต้า



(ข) ขณะทดสอบ



(ค) เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression Testing Machine)

ภาพที่ 35 อุปกรณ์การทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า

การศึกษากลไกปฏิกิริยาเคมีจะทดสอบด้วยวิธี XRD และ SEM โดยจะศึกษาเพศของ OPC เปรียบเทียบกับ GCM และ BCM ดังนี้

- OPC เพสต์ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน
- GCM เพสต์ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน
- BCM เพสต์ ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน

การนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง จะนำไปใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน (ดินซีเมนต์) โดยทำการเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนซึ่งเก็บในระดับความลึกประมาณ 3-8 เมตรจากผิวดินแบบคงสภาพ (Undisturbed sample) และทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของดินเหนียวอ่อนได้แก่

- คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ปริมาณความชื้นในดิน, ความถ่วงจำเพาะ, การกระจายตัวของดิน, Atterberg's limits และการจำแนกดิน เป็นต้น
- คุณสมบัติด้านวิศวกรรม เช่น กำลังอัดดินเหนียวอ่อน และ Remold strength
- การวัดแรงดูดในดิน แบบแรงดูดเมตริก
- การหาปริมาณสารประกอบในดิน ด้วยวิธี XRD
- ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค ด้วยวิธี SEM

การวัดค่าแรงดูดของดินเหนียวอ่อนก่อนการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่ม เป็นการวัดค่าแรงดูดแบบเมตริก (Matrix suction) ทำการวัดค่าแรงดูด KU Tensiometer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าแรงดูดที่มีค่าค่อนข้างต่ำของดินเหนียวได้ในช่วงตั้งแต่ 0- 80 kPa ดังแสดงตามภาพที่ 36 และ 37 สำหรับแรงดูดเมตริก (Matrix suction,  $s$ ) สามารถหาได้จาก

$$s = u_a - u_w = -u_w \quad (22)$$

เมื่อ  $u_w$  = ค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดิน  
 และ  $u_a$  = แรงดันอากาศในช่องว่าง

นำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มาทำการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน และทดสอบการรับกำลังอัดของดินซีเมนต์ (Unconfined Compressive Strength หรือ UCS) ตามมาตรฐาน ASTM D 2199-97 เปรียบเทียบกับดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย OPC ดังนี้

- ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย OPC ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน
- ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย GCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน



ภาพที่ 36 การวัดแรงคูมตริกของดินเหนียวอ่อนด้วยเคยูเทนสิโอมิเตอร์



ภาพที่ 37 อุปกรณ์สำหรับการวัดแรงคูมตริก (Metrix suction)

กำลังอัดดินซีเมนต์ หรือ  $q_u$  หาได้จาก

$$q_u = P/A \quad (23)$$

เมื่อ  $P$  = น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินซีเมนต์ที่รับน้ำหนักกด (ซม<sup>2</sup>)

หลังจากทดสอบ UCS ของดินซีเมนต์แล้ว สามารถหา Modulus of elasticity ( $E_{50}$ ) ได้ดังนี้

$$E_{50} = (\sigma_{\max} / 2) \times (1 / \epsilon) \quad (24)$$

เมื่อ  $E_{50}$  = Modulus of elasticity at 50% Max.stress  
 $\sigma_{\max}$  = น้ำหนักกดสูงสุด  
 $\epsilon$  = ความเครียด ณ ตำแหน่งที่ 50% ของน้ำหนักกดสูงสุด



(ก) ขณะหล่อตัวอย่างดินซีเมนต์



(ข) Stepless Compression Testing Machine



(ค) ก่อนทดสอบ



(ง) หลังทดสอบ

ภาพที่ 38 การทดสอบการรับกำลังอัดของดินซีเมนต์

การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัด ดำเนินการตามมาตรฐาน JSF T821-1990 หลังจากถอดตัวอย่างออกจากแบบเหล็ก จะทำการหุ้มตัวอย่างดินด้วยพลาสติกใสแผ่นบาง (Wrap) เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นในตัวอย่างดินซีเมนต์ แล้วจึงหุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) อีกชั้น เพื่อช่วยลดแรงจากการกระทบกระเทือนกันของตัวอย่าง และเป็นการช่วยเพิ่มการป้องกันการสูญเสียความชื้นอีกทางหนึ่งตามภาพที่ 39 เมื่อครบอายุการบ่มจึงนำออกมาทดสอบกำลังอัดตามกำหนดต่อไป



ภาพที่ 39 การหุ้มตัวอย่างด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์

เมื่อครบกำหนดอายุการบ่ม นำตัวอย่างดินซีเมนต์มาทดสอบการรับกำลังอัด พร้อมทั้งนำตัวอย่างดินที่ผ่านการทดสอบการรับกำลังอัดแล้วไปหาปริมาณสารประกอบในดิน ด้วยวิธี XRD และศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค ด้วยวิธี SEM เพื่อศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของดินซีเมนต์

การวัดแรงดูดรวมของดินซีเมนต์ เมื่อครบกำหนดอายุการบ่มแล้วนำตัวอย่างดินซีเมนต์มาวัดแรงดูดของดินซีเมนต์ โดยจะเป็นการวัดแบบแรงดูดรวม (Total suction) ซึ่งจะทำให้การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity หรือ Rh) ในระบบปิด วัดด้วยอุปกรณ์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity sensor) โดยจะควบคุมอุณหภูมิไว้คงที่ 20 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นสภาวะที่ปริมาณของน้ำในอากาศในระบบปิด มีอัตราการเปลี่ยนแปลงไม่ช้าหรือเร็วจนเกินไป ทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านได้ค่อนข้างต่อเนื่อง

สำหรับการวัดปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ จะทำการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger) ดังแสดงตามภาพที่ 42 ซึ่งทำการบันทึกค่าทุกๆ 1 นาที ค่าที่วัด

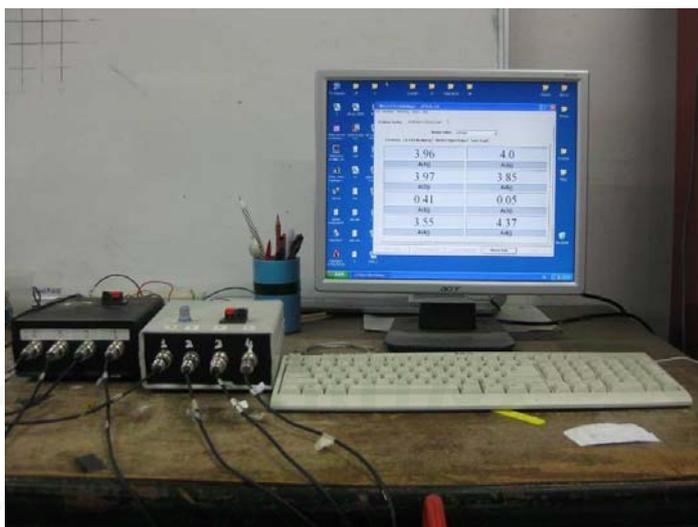
ได้ในช่วงต้นจะมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นและลดลงแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากค่าความชื้นสัมพัทธ์ในระบบปิดจะมีการปรับระบบให้อยู่ในสภาวะสมดุลย์ เมื่อค่าที่อ่านได้เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้อย แสดงว่าระบบเริ่มเข้าใกล้สู่สภาวะสมดุลย์ จึงนำช่วงข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณเป็นค่าแรงดูดรวมของดินซีเมนต์ เนื่องจากช่วงข้อมูลที่อ่านได้จากเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติมีปริมาณค่อนข้างมาก จึงเลือกชุดข้อมูลเป็นช่วงแล้วหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำมาใช้คำนวณเป็นค่าแรงดูดรวมของดินซีเมนต์ แรงดูดรวมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ในช่องว่างดิน ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\Psi = - \left[ \frac{RT}{V_{mol}} \right] \ln(R_h) \quad (25)$$

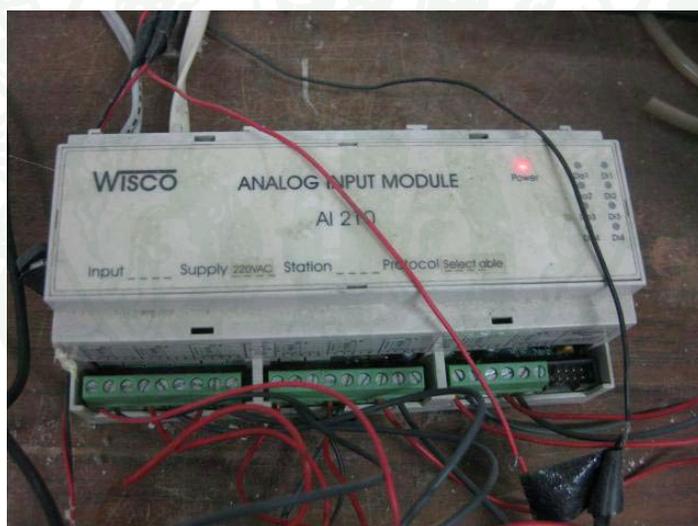
เมื่อ  $R_h$  = ความชื้นสัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างแรงดันไอในสภาวะปกติ ต่อแรงดันไอ ในสภาวะอิ่มตัว ( $P/P_0$ )  
 $R$  = ค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant) =  $8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$   
 $V_{mol}$  = molecular volume ของไอน้ำ ( $0.01802 \text{ m}^3$ ),  
 $T$  = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{K}$ ),  
 และ Total suction,  $\Psi$ , มีหน่วยเป็น kPa



ภาพที่ 40 การวัดแรงดูดรวมของดินซีเมนต์ด้วยอุปกรณ์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity sensor)



ภาพที่ 41 อุปกรณ์การวัดแรงดูดรวม (Total suction)



ภาพที่ 42 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger)

เมื่อได้ข้อมูลผลการทดสอบทั้งหมดแล้ว จึงทำการประมวลผลข้อมูล วิเคราะห์และวิจารณ์ จากนั้นทำการสรุปผลและนำเสนอข้อเสนอแนะในงานวิจัย

## ตัวแปรและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

### การทดสอบด้านการรับกำลังอัดของมอร์ต้า (ASTM C109)

สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I
W/B ratio	0.485
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ค่าความ ละเอียดต่างๆ จำนวน 7 ความละเอียด
W/B ratio	0.485
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	84 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้านการรับกำลังอัดของมอร์ต้าทั้งหมด 96 ตัวอย่าง

### การทดสอบด้านการรับกำลังอัดของดินเหนียว (ASTM D2166-97)

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพ (Undisturbed sample)
สารผสมเพิ่ม	-
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	- กก./ลบ.ม.
W/B ratio	-
ระยะเวลาในการบ่ม	-
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	3 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	200 กก./ลบ.ม.
W/B ratio	0.80
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ค่าความละเอียดต่างๆ จำนวน 3 ความละเอียด
W/B ratio	0.80
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	200 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	36 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้านการรับกำลังอัดของดินเหนียวทั้งหมด 51 ตัวอย่าง

การทดสอบ Suction measurement

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพ (Undisturbed sample)
สารผสมเพิ่ม	-
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	- กก./ลบ.ม.
W/B ratio	-
ระยะเวลาในการบ่ม	-
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	1 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	200 กก./ลบ.ม.
W/B ratio	0.80
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	2 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	8 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อน
สารผสมเพิ่ม	ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ค่าความละเอียดต่างๆ จำนวน 3 ความละเอียด
W/B ratio	0.80
ปริมาณสารผสมเพิ่ม	200 กก./ลบ.ม.
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	2 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	24 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบ Suction measurement ทั้งหมด 33 ตัวอย่าง

การทดสอบด้วย SEM เทคนิค

สารตั้งต้น	ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมจำนวน 4 ชนิด, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I, ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ความละเอียดต่างกัน 4 ความละเอียด, ดินเหนียวอ่อน
ระยะเวลาในการบ่ม	- วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	10 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I ผสมน้ำ
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	4 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ผสมน้ำที่ ความละเอียดต่างกัน 4 ความละเอียด
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	16 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	4 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ ด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ความ ละเอียดต่างกัน 3 ความละเอียด
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้วย SEM เทคนิคทั้งหมด 42 ตัวอย่าง

การทดสอบด้วย XRD เทคนิค

สารตั้งต้น	ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมจำนวน 4 ชนิด, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I,
------------	--------------------------------------------------------------------

	ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ความละเอียดต่างกัน 2 ความละเอียด, ดินเหนียวอ่อน
ระยะเวลาในการบ่ม	- วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	8 ตัวอย่าง
สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type I ผสมน้ำ
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	4 ตัวอย่าง
สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ผสมน้ำที่ความละเอียดต่างกัน 4 ความละเอียด
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	16 ตัวอย่าง
สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type I
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	4 ตัวอย่าง
สารตั้งต้น	ดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ความละเอียดต่างกัน 3 ความละเอียด
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้วย XRD เทคนิคทั้งหมด 40 ตัวอย่าง

การทดสอบด้วย XRF เทคนิค

สารตั้งต้น

ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมจำนวน  
4 ชนิด, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I,  
ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ความละเอียด  
ต่างกัน 2 ความละเอียด, วัสดุดิบที่ผสม  
กันตามสัดส่วนจำนวน 9 สัดส่วน

จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด

1 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่าง

16 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้วย XRF เทคนิคทั้งหมด 16 ตัวอย่าง

#### มาตรฐานการทดสอบ

- ASTM C25 - 06 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime.
- ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- ASTM C188 - 09 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.
- ASTM C618 Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete.
- ASTM C191 - 08 Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.

- ASTM C204 - 07 Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus.
- ASTM C618 Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as mineral admixture in Portland cement concrete.
- ASTM D422-63 (1990) Standard test method for Particle-size analysis of soils.
- ASTM D854-92 Standard Test Method for Specific gravity of soil solids by water Pycnometer.
- ASTM D2166-97 Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil.
- ASTM D2216-92 Standard Test Method for laboratory determination of Water (Moisture) content of Soil and Rock by mass.
- ASTM D2487-93 Standard Classification of Soil for Engineering Purposes (Unified Soil classification System).
- ASTM D4318-93 Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soil.
- JSF T821-1990 Practice of making and curing non-compacted stabilized soil specimens.



## ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาวิจัยการพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง สามารถนำเสนอผลการศึกษาและวิจารณ์ออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

### ส่วนที่ 1 การผลิตสารเชื่อมประสานจากกากอุตสาหกรรม

(แผนการวิจัยขั้นตอนที่ 1)

- การคัดเลือกชนิดและสมบัติของกากอุตสาหกรรม
- การพิจารณาสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมที่เหมาะสม
- สรุปผลการผลิตสารเชื่อมประสาน

### ส่วนที่ 2 การเกิดเฟสในกระบวนการสารเชื่อมประสาน

(แผนการวิจัยขั้นตอนที่ 1)

### ส่วนที่ 3 การผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์และการศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์สังเคราะห์

(แผนการวิจัยขั้นตอนที่ 2)

- สมบัติของสารเชื่อมประสาน GCM
- สมบัติของสารเชื่อมประสาน BCM

### ส่วนที่ 4 การนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ประยุกต์ใช้ปรับปรุงดินเหนียวอ่อน

(แผนการวิจัยขั้นตอนที่ 2)

- สมบัติของดินเหนียวอ่อนก่อนการปรับปรุงคุณภาพ
- สมบัติของดินเหนียวอ่อนหลังถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์
- การวัดแรงคูดของดินซีเมนต์
- การพิจารณานำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ไปใช้งาน

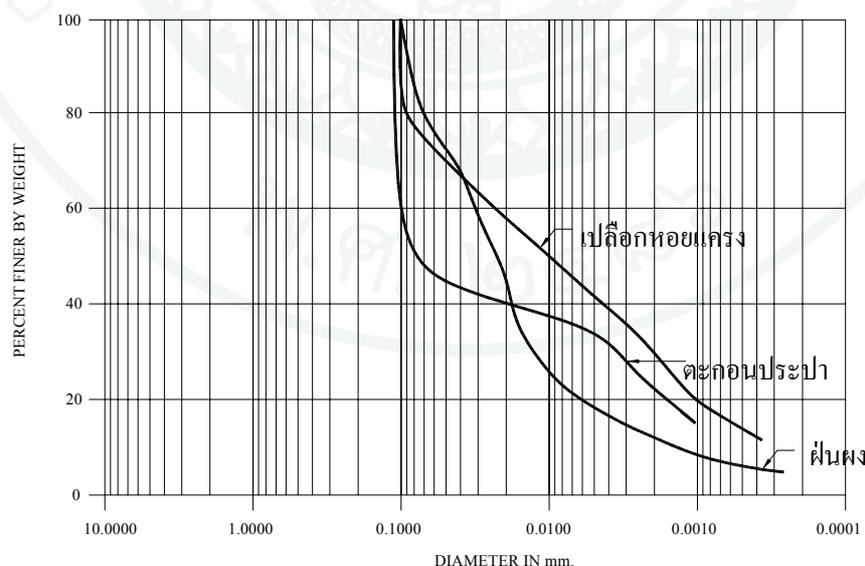
## ส่วนที่ 1 การผลิตสารเชื่อมประสานจากกากอุตสาหกรรม

### การคัดเลือกชนิดและสมบัติของกากอุตสาหกรรม

จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า การเผาวัสดุคืบหยาบส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์ปูนเม็ดที่มีความแข็งตัวได้ และมีความทนทานค่อนข้างต่ำ โดยเมื่อเพิ่มความละเอียดวัสดุคืบขึ้น 60-80% จะได้ผลิตภัณฑ์ปูนเม็ดเพิ่มขึ้นประมาณ 20-30% ในขั้นตอนแรกของการพัฒนากระบวนการผลิต จึงนำกากอุตสาหกรรมที่ตากแห้งมาบดละเอียดเป็นผง เพื่อเตรียมตัวอย่างก่อนที่จะนำไปเผา การทดสอบความละเอียดจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C204-07 ส่วนความถ่วงจำเพาะจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854-92 ดังแสดงผลการทดสอบตามตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของกากอุตสาหกรรม

ชนิดกากอุตสาหกรรม	ค่าความละเอียด (ซม <sup>2</sup> /กรัม)	ความถ่วงจำเพาะ
เปลือกหอยแครง	5,720	2.70
ฝุ่นผงหินปูน	4,480	2.71
ตะกอนประปา	2,740	2.65
เถ้าลอย	3,320	2.30



ภาพที่ 43 การกระจายตัวของอนุภาคของกากอุตสาหกรรมที่บดละเอียดแล้ว

ผลการทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคตามภาพที่ 43 เปลือกหอยแครง ฟุ้งผงหินปูน และตะกอนประปา พบว่าอนุภาคก่อนเผาอยู่ในช่วงประมาณ 0.001-0.0001 มม. สำหรับเถ้าลอยจะทำการวัดขนาดคละของอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Laser Particle Size Analyzer แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลทดสอบการวัดขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอย

ช่วงขนาดการวัด (ไมโครเมตร)	Particle Size Distribution ในเถ้าลอย
0.0-0.50	1.68
0.5-1.0	4.22
1.0-5.0	7.28
5.0-10.0	13.41
10.0-50.0	30.37
50.0-100.0	17.92
100.0-250.0	24.12
250.0-500.0	1.00
ใหญ่กว่า 500.0	-

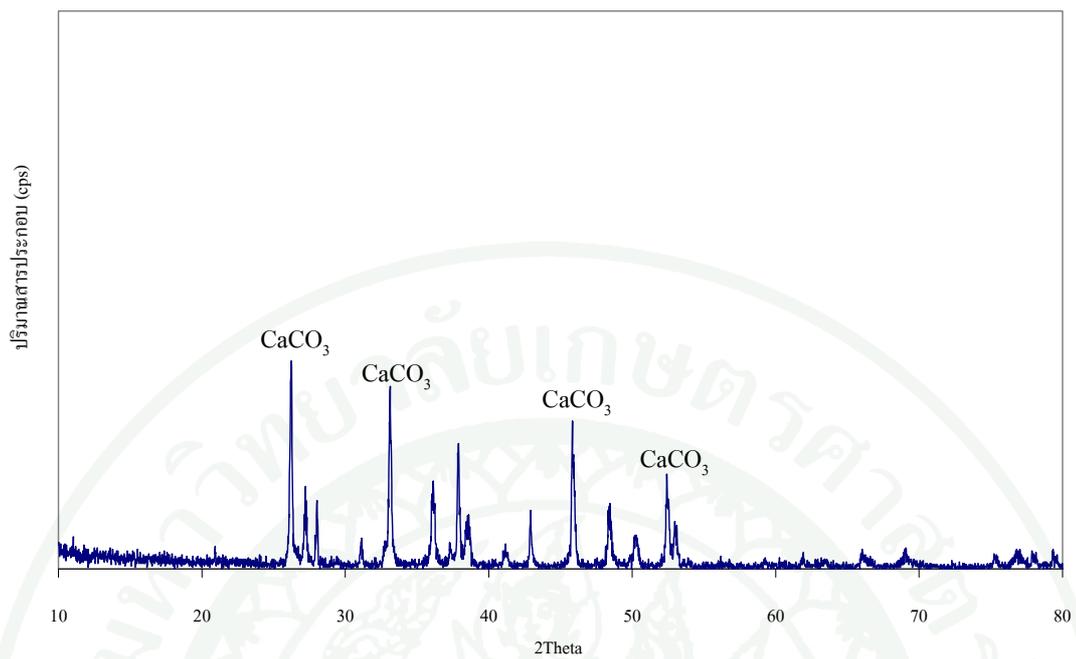
จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรม เพื่อหาปริมาณออกไซด์หลัก พบว่าตะกอนประปามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ค่อนข้างสูงถึง 52.19% แต่มี  $\text{CaO}$  ค่อนข้างต่ำ มีปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 17.39% และ 9.56% โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สำหรับฟุ้งผงหินปูนและเปลือกหอยแครงเป็นมีปริมาณ  $\text{CaO}$  ค่อนข้างสูง จากผลการทดสอบพบว่ามีปริมาณสูงถึง 51.70% และ 53.91 % โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ โดยมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ค่อนข้างต่ำ และไม่พบองค์ประกอบของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  สำหรับเถ้าลอยพบปริมาณ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักที่สูงที่สุด เมื่อจำแนกประเภทของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 จะจัดอยู่ในประเภท Class C (High Lime)

ตารางที่ 15 องค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

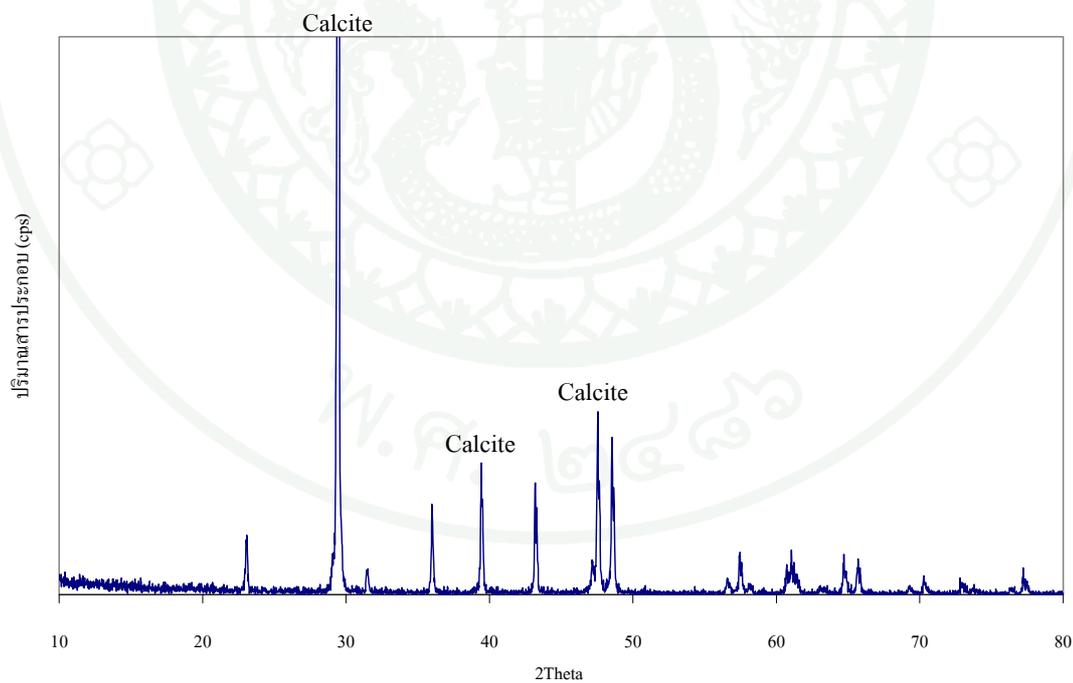
องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)	ชนิดกากอุตสาหกรรม			
	เปลือกหอยแครง	ฝุ่นผงหินปูน	ตะกอนประปา	เถ้าลอย
CaO	53.90*	51.70	0.40	16.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.06	17.39	19.90
SiO <sub>2</sub>	0.07	0.11	52.17	36.79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.04	9.56	10.09
Na <sub>2</sub> O	0.50	0.01	0.63	10.28
MgO	0.03	0.36	1.04	1.98
K <sub>2</sub> O	0.002	0.005	0.017	2.92
TiO	-	-	0.54	0.78
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0.009	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0.009	0.009
MnO	0.005	0.010	0.113	0.009
CuO	0.002	0.001	0.009	0.009
NiO	-	-	0.009	-
ZnO	0.003	0.003	0.017	0.019
BaO	-	-	0.017	0.123
Ignition loss (LOI)	44.70	42.40	17.90	0.24
รวม	99.232	94.699	99.848	99.778

หมายเหตุ : \* หมายถึง เป็นปริมาณเทียบเท่า

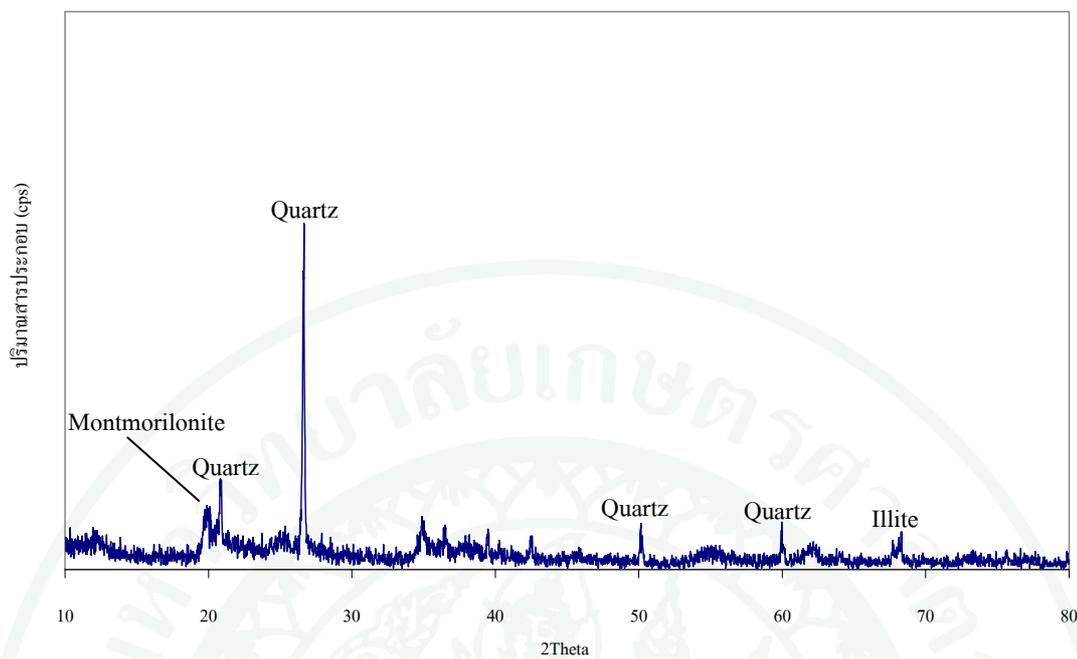
: Ignition loss หมายถึง การสูญเสียมวลเนื่องจากการเผา



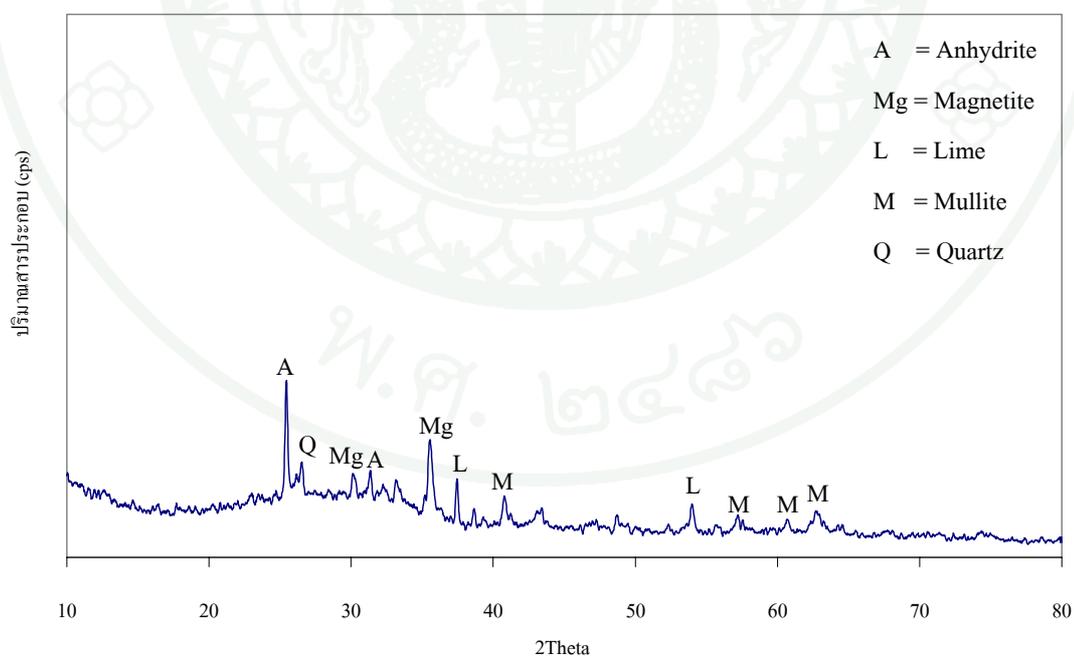
ภาพที่ 44 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเปลือกหอยแครง



ภาพที่ 45 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฝุ่นผงหินปูน



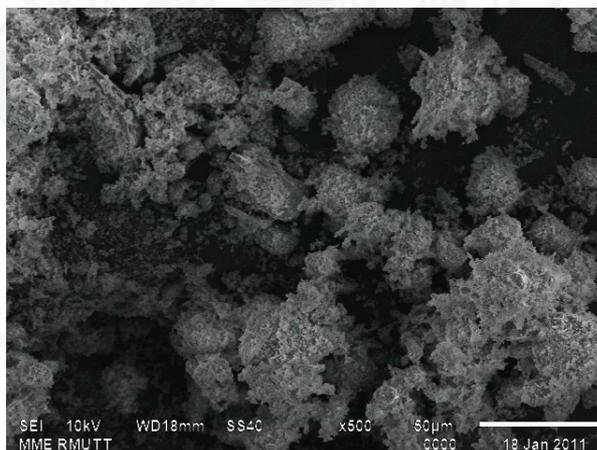
ภาพที่ 46 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของตะกอนประปา



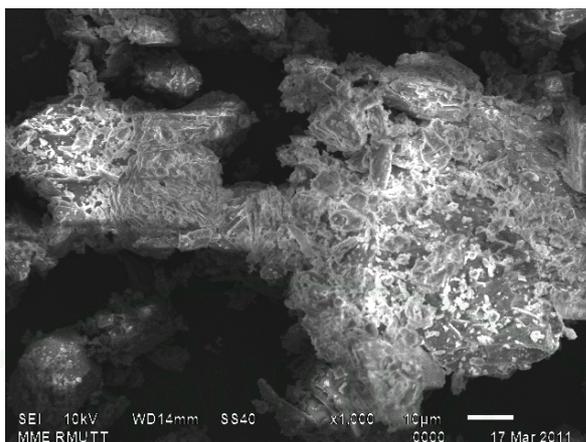
ภาพที่ 47 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของถ้ำลอย

ผลการทดสอบเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffraction (XRD) ของกากอุตสาหกรรมพบว่าเปลือกหอยแครงมีสารประกอบส่วนใหญ่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ตามภาพที่ 44 ส่วนฝุ่นผงหินปูนมี Calcite เป็นสารประกอบ ตามภาพที่ 45 สำหรับตะกอนประปาจะพบแร่ควอทซ์ (Quartz) เป็นสารประกอบหลัก และยังพบแร่ดินเหนียวมอนท์โมลิลโลไนท์ (Montmorillonite) และอิลไลท์ (Illite) เป็นส่วนประกอบร่วมตามภาพที่ 46 สำหรับถ้ำลอยลึกในค้จะประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลายชนิด เช่น Anhydrite, Magnetite, Lime, Mullite และ Quartz ดังแสดงตามภาพที่ 47

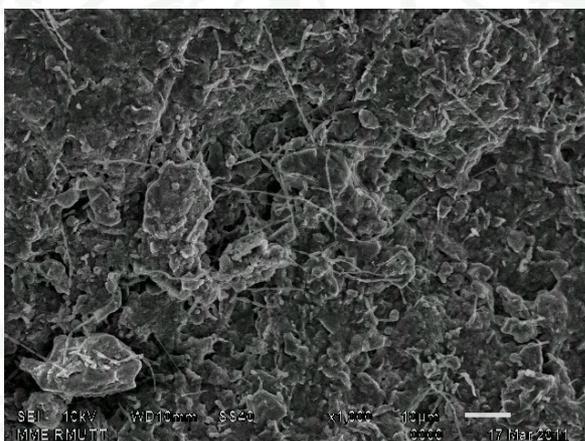
สำหรับการศึกษาในระดับจุลภาค จะทำวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) พบว่าเปลือกหอยแครงบดละเอียด ซึ่งมีลักษณะอนุภาคขรุขระ รูปร่างไม่แน่นอน มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ตามภาพที่ 48 ฝุ่นผงหินปูนมีลักษณะผิวขรุขระ เช่นเดียวกับเปลือกหอยแครงบดละเอียด แสดงตามภาพที่ 49 ส่วนภาพที่ 50 แสดงลักษณะพื้นผิวของตะกอนประปา พบว่ามีลักษณะเรียงตัวอัดกันแน่น มีช่องว่างอยู่ค่อนข้างน้อย อาจเกิดจากตะกอนประปาผ่านการเติมสารเคมีในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันแบบอัดแน่นเป็นมวลขนาดใหญ่ สำหรับลักษณะของถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแสดงดังภาพที่ 51 พบว่ามีอนุภาคค่อนข้างกลม และสม่ำเสมอ



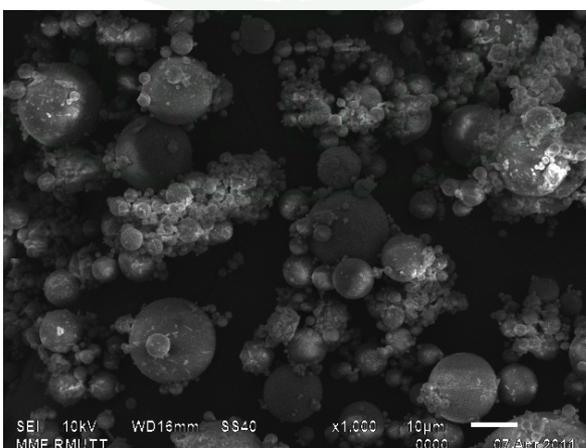
ภาพที่ 48 เปลือกหอยแครง (กำลังขยาย x 500)



ภาพที่ 49 ฟุ้งผงหินปูน (กำลังขยาย x 1,000)



ภาพที่ 50 ตะกอนประปา (กำลังขยาย x 1,000)



ภาพที่ 51 ฝ้าลอกจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (กำลังขยาย x 1,000)

การตรวจสอบปริมาณโลหะหนักจะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) พบว่าปริมาณโลหะหนักของวัตถุดิบหลักตั้งต้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ USEPA (United State Environmental Protection Agency) ดังแสดงในตารางที่ 16 และเป็นการยืนยันว่ากากอุตสาหกรรมที่คัดเลือกมานี้เป็นมิตรและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม มีศักยภาพเหมาะสมสอดคล้องกับเกณฑ์ NICE Criteria ที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ สำหรับถ้ำลอยลิกไนต์ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีปริมาณโลหะหนักต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2554)

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของวัตถุดิบหลักตั้งต้น โดยวิธี Atomic Absorption

ชนิดกากอุตสาหกรรม	ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิด(mg/kg)					
	Cu	Cd	Cr	Pb	Ni	Zn
เปลือกหอยแครง	3.10	ND	0.80	ND	ND	5.03
ฝุ่นผงหินปูน	3.34	0.05	1.85	ND	ND	5.34
ตะกอนประปา	34.68	ND	32.76	24.72	38.88	102.01
เกณฑ์กำหนด USEPA	1,500	39	3,000	420	18	2,800

หมายเหตุ: ND (Not Detected) หมายถึง ตรวจไม่พบ

#### การพิจารณาสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมที่เหมาะสม

นำกากอุตสาหกรรมที่ผ่านการตรวจสอบปริมาณโลหะหนักแล้ว มาหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมของวัตถุดิบตั้งต้น โดยทำการคำนวณผลรวมของ Oxide ตามสัดส่วนของแต่ละชนิด เพื่อนำมาหาค่าไฮเดรชันโมดูลัส (Hydration Modulus) และค่าอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ตามตารางที่ 8 เป็นเกณฑ์กำหนดเบื้องต้น จากนั้นทำการเผาด้วยรูปแบบของอุณหภูมิและระยะเวลาที่แตกต่างกัน จนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,450 °C เพื่อผลิตสารเชื่อมประสาน โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งกรณีศึกษาการเผาเพื่อหาความสัมพันธ์ของช่วงเวลาและอุณหภูมิออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

## กรณีศึกษาที่ 1

คำนวณสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมแต่ละชนิด โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 4 สัดส่วน ดังแสดงตามตารางที่ 17 ตัวอย่างรายละเอียดการคำนวณหาค่าไฮดรเจนโมดูลัส (HM หรือ HR) และอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M1 แสดงตามตารางที่ 18 สำหรับการคำนวณหาค่าไฮดรเจนโมดูลัส และอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของสัดส่วนอื่น แสดงไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 17 สัดส่วนผสมกรณีศึกษาที่ 1

ชนิดกากอุตสาหกรรม	M1	M2	M3	M4
	สัดส่วนร้อยละ	สัดส่วนร้อยละ	สัดส่วนร้อยละ	สัดส่วนร้อยละ
เปลือกหอยแครง	60	15	55	15
ฝุ่นผงหินปูน	15	60	15	55
ตะกอนประปา	20	20	20	20
เถ้าลอย	5	5	5	5
ปูนขาว	0	0	5	5
รวม	100	100	100	100
HM หรือ HR	2.13	2.07	2.25	2.20
LSF	99.03	96.44	104.63	102.31
Ms หรือ SR	1.78	1.78	1.78	1.78
Ma หรือ AR	1.84	1.84	1.84	1.84

เมื่อกำหนดสัดส่วนผสมของขยะทั้ง 4 สัดส่วนคือ M1, M2, M3 และ M4 แล้ว นำวัตถุดิบตั้งต้นมาเผาเพื่อผลิตสารเชื่อมประสานด้วยรูปแบบการเผาซึ่งแตกต่างกันทั้งช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาจำนวน 7 รูปแบบ ได้แก่ R1, R2, R3, R4, R5, R6 และ R7 ทั้งนี้เพื่อศึกษารูปแบบการเผา มีผลต่อสารผลิตภัณฑ์อย่างไร เช่น อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ระยะเวลาเผา เป็นต้น ตารางที่ 19 แสดงสัญลักษณ์และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 18 การคำนวณค่าไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M1

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	32.34 (53.9/100 x 60)	0.00 (0.00/100 x 60)	0.04 (0.07/100 x 60)	0.01 (0.02/100 x 60)
ฝุ่นผงหินปูน	7.76 (51.7/100 x 15)	0.01 (0.06/100 x 15)	0.02 (0.11/100 x 15)	0.01 (0.04/100 x 15)
ตะกอนประปา	0.08 (0.04/100 x 20)	3.48 (17.39/100 x 20)	10.43 (52.17/100 x 20)	1.91 (9.56/100 x 20)
เถ้าลอย	0.83 (16.60/100 x 5)	1.00 (19.90/100 x 5)	1.84 (36.79/100 x 5)	0.50 (10.09/100 x 5)
ปูนขาว	0.00 (100/100 x 0)	0.00 (100/100 x 0)	0.00 (100/100 x 0)	0.00 (100/100 x 0)
รวม (%)	41.01	4.48	12.33	2.44

หมายเหตุ: HM หรือ HR =  $41.01 / (4.48 + 12.33 + 2.44) = 2.13$

LSF =  $(100 \times 41.01) / [(2.8 \times 12.33) + (1.18 \times 4.48) + (0.65 \times 2.44)] = 99.03$

Ms หรือ SR =  $12.33 / (4.48 + 2.44) = 1.78$

Ma หรือ AR =  $4.48 / 2.44 = 1.84$

ตารางที่ 19 สัญลักษณ์และจำนวนตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 1

สัดส่วน / รูปแบบการเผา	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
M1	M1R1	M1R2	M1R3	M1R4	M1R5	M1R6	M1R7
M2	M2R1	M2R2	M2R3	M2R4	M2R5	M2R6	M2R7
M3	M3R1	M3R2	M3R3	M3R4	M3R5	M3R6	M3R7
M4	M4R1	M4R2	M4R3	M4R4	M4R5	M4R6	M4R7

ผลหลังจากการเผาพบว่าเกิดผลิตภัณฑ์ในลักษณะที่คล้ายกันในทุกกรณีของการเผาทั้ง 28 ตัวอย่างคือ เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นก้อนผลึกแข็งสีเทาอ่อนปนดำ รวมอยู่กับผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนดังแสดงตามภาพที่ 52 มีน้ำหนักรวมเฉลี่ยหลังจากการเผาทั้ง 28 ตัวอย่าง ประมาณ 62.27 กรัม (ก้อนผลึกแข็ง 53.26 กรัม และผงฝุ่นละเอียด 9.01 กรัม) คิดเป็นสัดส่วน ปริมาณการเกิดก้อนผลึกแข็งเฉลี่ยประมาณ 85.52% และผงฝุ่นละเอียดอยู่ที่ประมาณ 14.48% โดย น้ำหนัก ตามลำดับ



(ก) ก่อนเผา (100 กรัม)



(ข) สารผลิตภัณฑ์หลังเผา

**ภาพที่ 52** ลักษณะตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผา

พิจารณาปริมาณของสารผลิตภัณฑ์รวม (ก้อนผลึกแข็งและผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน) ที่เกิดขึ้นหลังการเผา พบว่าสารผลิตภัณฑ์รวมที่เกิดขึ้นมีปริมาณแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 20 เมื่อแบ่งพิจารณาตามรูปแบบการเผา R1, R2, R3 และ R4 มีปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมเฉลี่ย 62.25, 62.71, 64.00 และ 64.50 กรัม ตามลำดับ พิจารณารูปแบบการเผาระหว่าง R1 กับ R2 ซึ่งมีรูปแบบคล้ายกันแต่ต่างกันที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิการเผา พบว่า R2 (7°C/นาทิจ) มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่ำกว่า R1 (10°C/นาทิจ) มีปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมสูงกว่า สอดคล้องกับรูปแบบการเผาระหว่าง R3 กับ R4 พบว่า R4 (7°C/นาทิจ) มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่ำกว่า R3 (10°C/นาทิจ) มีปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมสูงกว่าเช่นกัน

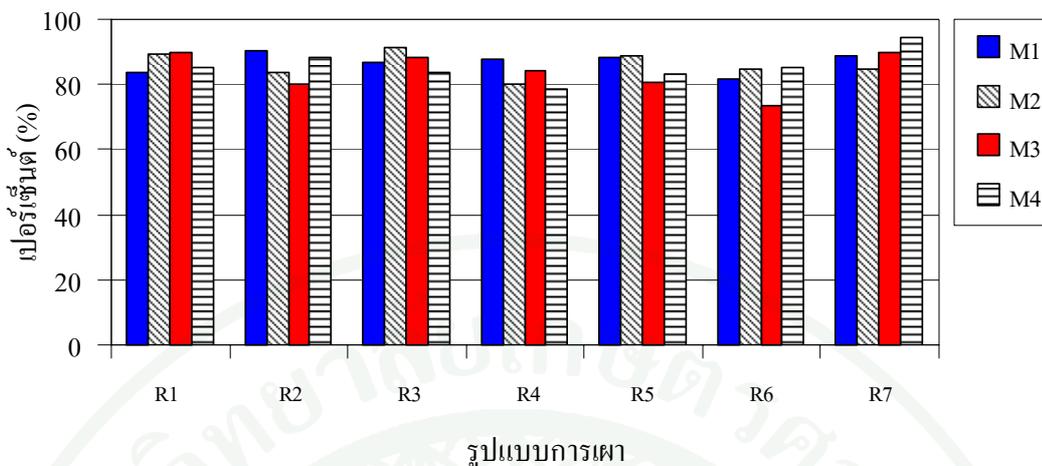
ตารางที่ 20 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลังจากการเผา (แบ่งตามรูปแบบการเผา)

รูปแบบการเผา	ตัวอย่าง	ก่อนผลิต (กรัม)	ผงฝุ่น (กรัม)	รวม (กรัม)	ก่อนผลิต (%)	ผงฝุ่น (%)	รวม (%)
R1	M1R1	52.18	10.32	62.50	83.49	16.51	100.00
	M2R1	57.19	6.81	64.00	89.36	10.64	100.00
	M3R1	54.68	6.32	61.00	89.64	10.36	100.00
	M4R1	52.51	8.99	61.50	85.38	14.62	100.00
	เฉลี่ย		54.14	8.11	62.25	86.97	13.03
R2	M1R2	56.29	6.21	62.50	90.06	9.94	100.00
	M2R2	53.41	10.53	63.94	83.53	16.47	100.00
	M3R2	48.85	12.19	61.04	80.03	19.97	100.00
	M4R2	56.01	7.33	63.34	88.43	11.57	100.00
	เฉลี่ย		53.64	9.07	62.71	85.51	14.49
R3	M1R3	56.10	8.40	64.50	86.98	13.02	100.00
	M2R3	57.15	5.35	62.50	91.44	8.56	100.00
	M3R3	55.02	7.48	62.50	88.03	11.97	100.00
	M4R3	55.72	10.78	66.50	83.79	16.21	100.00
	เฉลี่ย		56.00	8.00	64.00	87.56	12.44
R4	M1R4	51.55	7.10	58.65	87.89	12.11	100.00
	M2R4	51.36	12.64	64.00	80.25	19.75	100.00
	M3R4	53.45	10.05	63.50	84.17	15.83	100.00
	M4R4	50.80	13.70	64.50	78.76	21.24	100.00
	เฉลี่ย		51.79	10.87	62.66	82.77	17.23

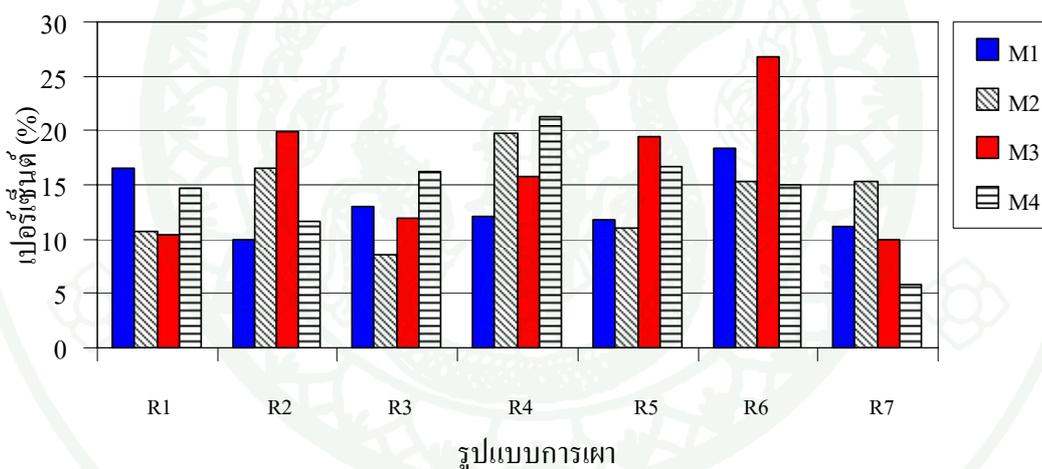
ตารางที่ 20 (ต่อ)

รูปแบบการเผา	ตัวอย่าง	ก้อนผลึก (กรัม)	ผงฝุ่น (กรัม)	รวม (กรัม)	ก้อนผลึก (%)	ผงฝุ่น (%)	รวม (%)
R5	M1R5	53.82	7.22	61.04	88.17	11.83	100.00
	M2R5	55.76	6.89	62.65	89.00	11.00	100.00
	M3R5	50.10	12.10	62.20	80.55	19.45	100.00
	M4R5	52.03	10.47	62.50	83.25	16.75	100.00
	เฉลี่ย	52.93	9.17	62.10	85.24	14.76	100.00
R6	M1R6	40.41	9.09	49.50	81.64	18.36	100.00
	M2R6	54.58	9.92	64.50	84.62	15.38	100.00
	M3R6	46.14	16.86	63.00	73.24	26.76	100.00
	M4R6	53.99	9.51	63.50	85.02	14.98	100.00
	เฉลี่ย	48.78	11.35	60.13	81.13	18.87	100.00
R7	M1R7	54.16	6.86	61.02	88.76	11.24	100.00
	M2R7	52.78	9.48	62.26	84.77	15.23	100.00
	M3R7	54.84	6.10	60.94	89.99	10.01	100.00
	M4R7	60.50	3.71	64.21	94.22	5.78	100.00
	เฉลี่ย	55.57	6.54	62.11	89.44	10.56	100.00
เฉลี่ยรวม		53.26	9.01	62.27	85.52	14.48	100.00

รูปแบบการเผาระหว่าง R2 กับ R3 มีระยะเวลาตลอดการเผาที่ 3.85 ชั่วโมงเท่ากัน พบว่ารูปแบบการเผา R2 (7°C/นาทีก) มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่ำกว่า R3 (10°C/นาทีก) มีปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมสูงกว่า เมื่อพิจารณารูปแบบการเผา R5, R6 และ R7 ซึ่งมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 1 ครั้ง พบว่ามีปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมเท่ากับ 62.10, 60.13 และ 64.21 กรัม ตามลำดับ รูปแบบการเผา R7 มีระยะเวลาการเผานานกว่า R6 และ R5 ยังคงมีปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมสูงกว่าทั้ง R6 และ R5 เช่นกัน ผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นบ่งชี้ว่า อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณการเกิดสารผลิตภัณฑ์รวม ซึ่งการเผาวัสดุที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่ำจะทำให้การเกิดสารผลิตภัณฑ์รวมมีปริมาณสูงกว่า



ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการเผากับปริมาณก้อนแข็งผลึกคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการเผากับปริมาณผงฝุ่นคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาเวลารวมในแต่ละรูปแบบการเผา รูปแบบ R1 ถึง R4 ซึ่งมีอัตราเพิ่มอุณหภูมิเพียงครั้งเดียว พบว่า R1 มีเวลารวมน้อยสุดเท่ากับ 2.85 ชม. และเวลารวมมากขึ้นตามรูปแบบการเผาที่ R2, R3, และ R4 เท่ากับ 4.85 ชม. มีปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ เช่นเดียวกับรูปแบบการเผา R5 ถึง R7 ซึ่งมีอัตราเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 1 ครั้ง พบว่า R7 ซึ่งมีเวลาการเผารวมมากที่สุดเท่ากับ 5.85 ชม. มีปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมมากกว่า R5 และ R6 ดังนั้นระยะเวลาการเผาที่มีผลต่อปริมาณการเกิดสารผลิตภัณฑ์รวม โดยสารผลิตภัณฑ์รวมมีปริมาณมากขึ้นตามระยะเวลาการเผาที่ยาวนานขึ้น

ตารางที่ 21 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลังจากการเผา (แบ่งตามสัดส่วนผสม)

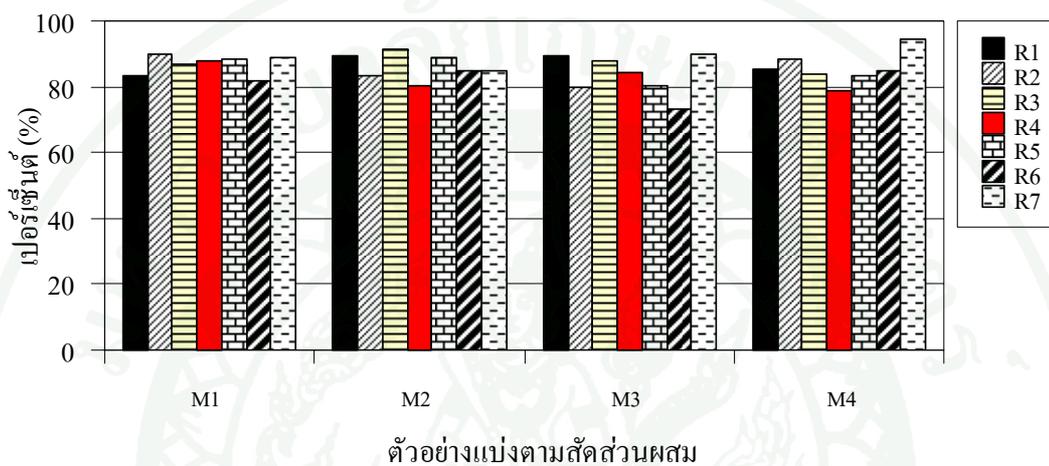
สัดส่วนผสม	ตัวอย่าง	ก้อนผลึก (กรัม)	ผงฝุ่น (กรัม)	รวม (กรัม)	ก้อนผลึก (%)	ผงฝุ่น (%)	รวม (%)
M1	M1R1	52.18	10.32	62.50	83.49	16.51	100.00
	M1R2	56.29	6.21	62.50	90.06	9.94	100.00
	M1R3	56.10	8.40	64.50	86.98	13.02	100.00
	M1R4	51.55	7.10	58.65	87.89	12.11	100.00
	M1R5	53.82	7.22	61.04	88.17	11.83	100.00
	M1R6	40.41	9.09	49.50	81.64	18.36	100.00
	M1R7	54.16	6.86	61.02	88.76	11.24	100.00
เฉลี่ย		52.07	7.89	59.96	86.71	13.29	100.00
M2	M2R1	57.19	6.81	64.00	89.36	10.64	100.00
	M2R2	53.41	10.53	63.94	83.53	16.47	100.00
	M2R3	57.15	5.35	62.50	91.44	8.56	100.00
	M2R4	51.36	12.64	64.00	80.25	19.75	100.00
	M2R5	55.76	6.89	62.65	89.00	11.00	100.00
	M2R6	54.58	9.92	64.50	84.62	15.38	100.00
	M2R7	52.78	9.48	62.26	84.77	15.23	100.00
เฉลี่ย		54.60	8.80	63.41	86.14	13.86	100.00

ตารางที่ 21 (ต่อ)

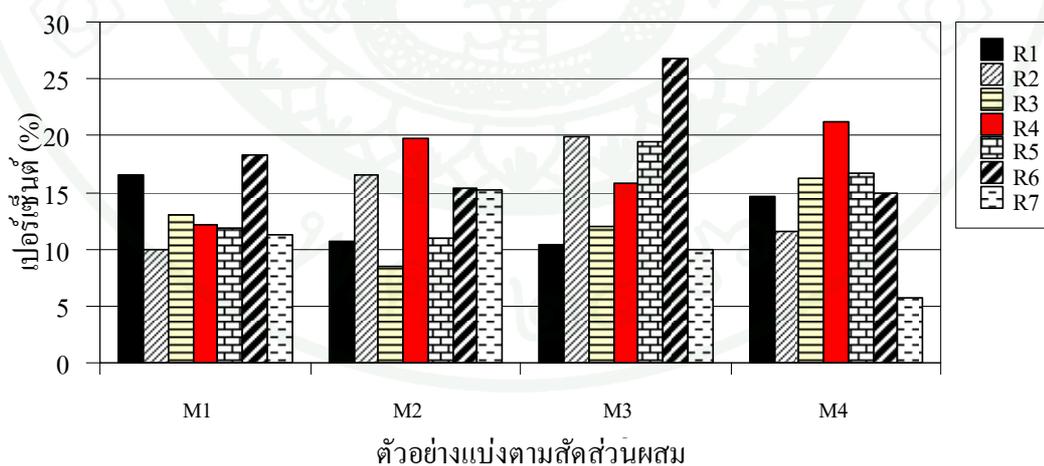
สัดส่วนผสม	ตัวอย่าง	ก้อนผลึก (กรัม)	ผงฝุ่น (กรัม)	รวม (กรัม)	ก้อนผลึก (%)	ผงฝุ่น (%)	รวม (%)
M3	M3R1	54.68	6.32	61.00	89.64	10.36	100.00
	M3R2	48.85	12.19	61.04	80.03	19.97	100.00
	M3R3	55.02	7.48	62.50	88.03	11.97	100.00
	M3R4	53.45	10.05	63.50	84.17	15.83	100.00
	M3R5	50.10	12.10	62.20	80.55	19.45	100.00
	M3R6	46.14	16.86	63.00	73.24	26.76	100.00
	M3R7	54.84	6.10	60.94	89.99	10.01	100.00
เฉลี่ย		51.87	10.16	62.03	83.66	16.34	100.00
M4	M4R1	52.51	8.99	61.50	85.38	14.62	100.00
	M4R2	56.01	7.33	63.34	88.43	11.57	100.00
	M4R3	55.72	10.78	66.50	83.79	16.21	100.00
	M4R4	50.80	13.70	64.50	78.76	21.24	100.00
	M4R5	52.03	10.47	62.50	83.25	16.75	100.00
	M4R6	53.99	9.51	63.50	85.02	14.98	100.00
	M4R7	60.50	3.71	64.21	94.22	5.78	100.00
เฉลี่ย		54.51	9.21	63.72	85.55	14.45	100.00
เฉลี่ยรวม		53.26	9.01	62.27	85.52	14.48	100.00

พิจารณาปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมหลังจากการเผาเมื่อแบ่งตามสัดส่วนผสม M1, M2, M3 และ M4 มีค่าเฉลี่ย 59.96, 63.41, 60.94 และ 64.21 กรัม ตามลำดับ สัดส่วนผสม M1 และ M2 แตกต่างกันที่สัดส่วนของเปลือกหอยแครงและฝุ่นผงหินปูน พบว่า M2 มีฝุ่นผงหินปูนในสัดส่วนที่สูงกว่า ให้สารผลิตภัณฑ์รวมในปริมาณที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง M3 และ M4 ให้ผลเช่นเดียวกัน M4 ซึ่งมีฝุ่นผงหินปูนเป็นส่วนผสมในสัดส่วนที่สูงกว่า จะให้สารผลิตภัณฑ์รวมในปริมาณที่มากกว่า M3 แสดงว่าเปลือกหอยแครงเป็นเป็นสารเคลือบผิวจากอินทรีย์สาร ซึ่งอาจจะเปลี่ยนรูปหรือสลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่น้อยกว่า

สัดส่วน M1 และ M2 เป็นสัดส่วนที่ไม่มีปูนขาวเป็นส่วนผสม ให้ปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมน้อยกว่า M3 และ M4 ซึ่งมีปูนขาวผสม แสดงว่าปูนขาวซึ่งเป็นสารที่มีแคลเซียมสูง มีผลต่อปริมาณการเกิดสารผลิตภัณฑ์รวม โดยจะให้ปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมสูงกว่าในสัดส่วนที่ไม่มีปูนขาวเป็นส่วนผสม



ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับปริมาณก้อนผลึกแข็งคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมกับปริมาณผงฝุ่นคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

นำสารผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดคือ ก้อนผลึกแข็งและผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน นำมาแยกทดสอบสมบัติการแข็งตัวของเพสต์ สำหรับก้อนผลึกแข็งนำไปบดละเอียดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60 ประมาณ 20 กรัม นำไปผสมน้ำด้วย w/c Ratio เท่ากับ 0.30, 0.35 และ 4.00 ตามลำดับ หลังจากบ่มไว้ 3 วัน พบว่าไม่เกิดการจับตัวกัน และไม่มีความแข็งตัวเกิดขึ้นในทุกๆ ตัวอย่าง เมื่อสัมผัสโดนผิวของตัวอย่างเกิดการหลุดร่อนออกในลักษณะคล้ายดินร่วนซุยดังภาพที่ 57(ง) เมื่อทดสอบในปริมาณที่มากขึ้นเป็น 200 กรัม เพื่อหาความเป็นไปได้ของการแข็งตัวของเพสต์ในลักษณะก้อนมวลใหญ่ หลังจากบ่มไว้ 3 วัน พบว่าไม่เกิดการจับตัวกันและไม่มีความแข็งตัวของก้อนมวลใหญ่เกิดขึ้น ผิวของตัวอย่างเกิดการหลุดร่อนออกในลักษณะคล้ายดินร่วนซุยเช่นกัน โดยเมื่อสัมผัส ดังภาพที่ 58



(ก) w/c Ratio เท่ากับ 0.30



(ข) w/c Ratio เท่ากับ 0.35



(ค) w/c Ratio เท่ากับ 0.40



(ง) หลังจากบ่ม 3 วัน

ภาพที่ 57 การทดสอบการแข็งตัวของเพสต์ก้อนผลึกแข็ง



ภาพที่ 58 การทดสอบการแข็งตัวของเพสต์ก้อนผลึกแข็งในลักษณะก้อนมวลใหญ่



(ก) ก่อนผสมน้ำ



(ข) w/c Ratio เท่ากับ 0.30 หลังจากบ่ม 2 วัน



(ค) w/c Ratio เท่ากับ 0.40 หลังจากบ่ม 2 วัน



(ง) หลังจากบ่ม 3 วัน

ภาพที่ 59 การทดสอบการแข็งตัวของเพสต์ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน

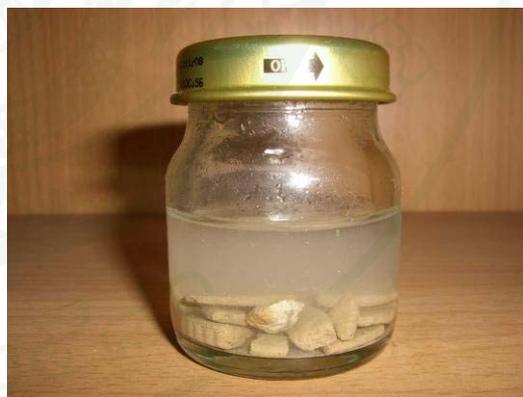
ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนถูกนำมาทดสอบความเป็นไปได้ของเพสต์ในการแข็งตัว เช่นเดียวกันกับก้อนผลึกแข็ง ใช้วิธีการทดสอบเหมือนกับการทดสอบเพสต์ของก้อนผลึกแข็ง ทุกประการ พบว่าเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนและมีความแข็งตัวเกิดขึ้นในทุกๆ ตัวอย่าง เมื่อสัมผัส โคนผิวของตัวอย่างจะเกิดการหลุดร่อนออกคล้ายฝุ่นเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 59

เมื่อผ่านการทดสอบสมบัติการแข็งตัวได้ของเพสต์แล้ว นำผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนไปทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบื้องต้น ใช้ก้อนเพสต์ผงฝุ่นที่แข็งตัวแล้วอบที่ อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดแล้วนำออกจากเตาอบและบ่มในน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าก้อนเพสต์ผงฝุ่นยังคงสภาพความแข็งตัว ไม่เกิดการทลายตัว (Slaking) ผิวของ ตัวอย่างเกิดการหลุดร่อนออกเพียงเล็กน้อย

นำก้อนเพสต์ผงฝุ่นไปทดสอบความทนทานในกรณีแช่น้ำเป็นเวลานาน (Soaked Condition) โดยนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 3 วัน และ 7 วัน ตามลำดับ พบว่าก้อนเพสต์ผงฝุ่นยังสามารถ คงสภาพความแข็งตัว ไม่เกิดการทลายตัว จากการสังเกตลักษณะน้ำพบว่ามีความขุ่นเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งยังคงสามารถมองเห็นตัวอย่างที่แช่ไว้ในน้ำได้ ดังแสดงตามภาพที่ 60



(ก) อายุการบ่ม 3 วัน



(ข) อายุการบ่ม 7 วัน

ภาพที่ 60 การทดสอบความทนทานของก้อนเพสต์ผงฝุ่นในกรณีแช่น้ำเป็นเวลานาน

## กรณีศึกษาที่ 2

เนื่องจากเพศของผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนมีสมบัติการแข็งตัวได้ จึงมุ่งเน้นเฉพาะการทดสอบผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน แต่ปริมาณของผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนที่เกิดขึ้นในการเผาแต่ละครั้งมีปริมาณค่อนข้างน้อย ดังนั้นการเผากรณีศึกษาที่ 2 จึงมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน การคำนวณสัดส่วนผสมจึงได้มีแนวความคิดไม่ใช่ถ้ำลอยเป็นวัตถุดิบในสัดส่วนผสม เนื่องจากเป็นขยะอุตสาหกรรมที่เคยผ่านกระบวนการเผามาก่อนหน้านี้แล้วครั้งหนึ่ง ซึ่งอาจจะไม่มีผลต่อปริมาณการเกิดของสารผลิตภัณฑ์

จากกรณีศึกษาที่ 1 พบว่ารูปแบบการเผา R6 เกิดผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนสูงสุด คิดเป็น 18.87% ของสารผลิตภัณฑ์รวมที่เกิดขึ้น จึงเลือกใช้รูปแบบการเผา R6 เป็นรูปแบบกำหนดตั้งต้นผลการคำนวณสัดส่วนผสมของขยะแสดงตามตารางที่ 22 ใช้จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่างต่อ 1 สัดส่วน คิดเป็นตัวอย่างทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ดังแสดงสัญลักษณ์ตามตารางที่ 23

ตารางที่ 22 สัดส่วนผสมกรณีศึกษาที่ 2

ชนิดกากอุตสาหกรรม	M5	M6	M7	M8
	สัดส่วนร้อยละ	สัดส่วนร้อยละ	สัดส่วนร้อยละ	สัดส่วนร้อยละ
เปลือกหอยแครง	70	5	50	5
ฝุ่นผงหินปูน	5	70	5	50
ตะกอนประปา	25	25	25	25
ถ้ำลอย	0	0	0	0
ปูนขาว	0	0	20	20
รวม	100	100	100	100
HM หรือ HR	2.04	1.96	2.50	2.45
LSF	93.18	89.62	114.55	112.04
Ms หรือ SR	1.94	1.93	1.94	1.93
Ma หรือ AR	1.81	1.81	1.81	1.81

### ตารางที่ 23 สัญลักษณ์และจำนวนตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ 2

ตัวอย่างที่	M5R6	M6R6	M7R6	M8R6
1	M5R6-1	M6R6-1	M7R6-1	M8R6-1
2	M5R6-2	M6R6-2	M7R6-2	M8R6-2
3	M5R6-3	M6R6-3	M7R6-3	M8R6-3

ผลการเผาพบว่าเกิดสารผลิตภัณฑ์ในลักษณะที่คล้ายกันกับกรณีศึกษาที่ 1 ในทุกกรณีคือ สารผลิตภัณฑ์ก้อนผลึกแข็งสีดำปนเทา รวมอยู่กับผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน แต่ก้อนผลึกแข็งมีขนาดค่อนข้างเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.50 ซม. มีน้ำหนักรวมเฉลี่ยจากทั้ง 12 ตัวอย่าง เท่ากับ 62.93 กรัม (ก้อนผลึกแข็ง 43.79 กรัม และผงฝุ่น 19.13 กรัม) คิดเป็นสัดส่วนปริมาณการเกิด ก้อนผลึกแข็งประมาณ 69.75% และผงฝุ่นประมาณ 30.25% โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาน้ำหนักของ สารผลิตภัณฑ์รวมที่เกิดขึ้นตามสัดส่วนผสม พบว่าสัดส่วนผสม M8R6 เกิดผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนในปริมาณเฉลี่ยสูงสุดคือ 26.97 กรัม คิดเป็น 41.45% โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังแสดงในตาราง ที่ 24

เปรียบเทียบปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมที่เกิดขึ้นจากกรณีศึกษาที่ 1 กับกรณีศึกษาที่ 2 พบว่า ปริมาณสารผลิตภัณฑ์รวมที่เกิดขึ้นทั้งหมดโดยรวมมีค่าสูงขึ้น 1.06% ก้อนผลึกแข็งมีปริมาณค่า ลดลง 17.78% และผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนมีปริมาณเพิ่มขึ้น 112.21%



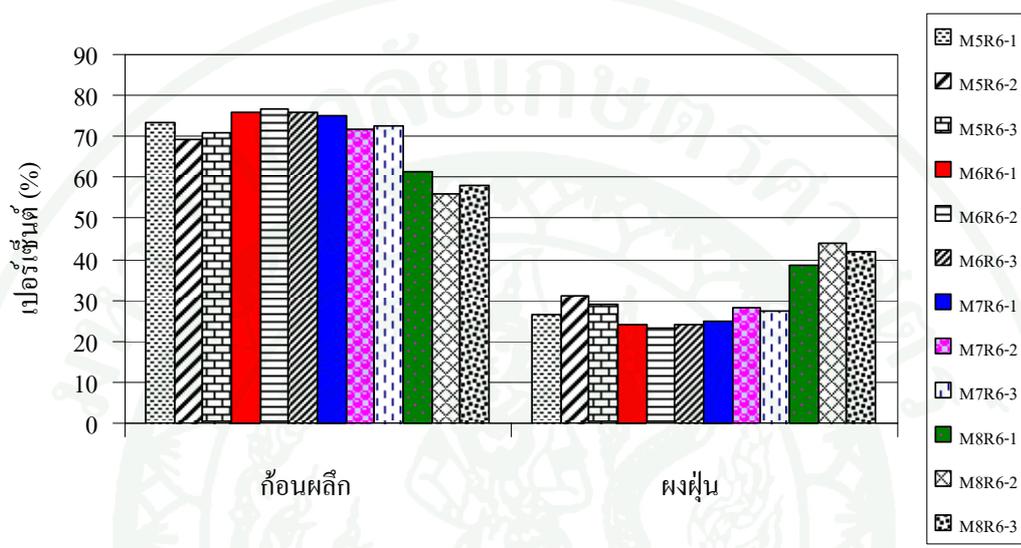
ภาพที่ 61 ลักษณะตัวอย่างหลังเผา เมื่อไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย

นำสารผลิตภัณฑ์ไปทดสอบสมบัติการแข็งตัวได้ ขั้นตอนการทดสอบเหมือนกับกรณีศึกษาที่ 1 ทุกประการ ผลทดสอบพบว่าเพสต์ของก้อนผลึกแข็งบดละเอียดไม่เกิดการจับตัวกันและไม่มี ความแข็งตัวเกิดขึ้นในทุกๆ ตัวอย่าง และเมื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการแข็งตัวของเพสต์ใน ลักษณะก้อนมวลใหญ่ พบว่าไม่เกิดการจับตัวกันและไม่มี ความแข็งตัวของเพสต์ก้อนมวลใหญ่ เช่นเดียวกับผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 24 ปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลังจากการเผาในกรณีศึกษาที่ 2

รูปแบบการเผา	ตัวอย่าง	ก้อนผลึก (กรัม)	ผงฝุ่น (กรัม)	รวม (กรัม)	ก้อนผลึก (%)	ผงฝุ่น (%)	รวม (%)
M5R6	M5R6-1	45.83	16.43	62.26	73.61	26.39	100.00
	M5R6-2	42.70	19.13	61.83	69.06	30.94	100.00
	M5R6-3	45.63	18.76	64.39	70.87	29.13	100.00
	เฉลี่ย	44.72	18.11	62.83	71.18	28.82	100.00
M6R6	M6R6-1	48.24	15.21	63.45	76.03	23.97	100.00
	M6R6-2	45.64	13.80	59.44	76.78	23.22	100.00
	M6R6-3	47.14	15.03	62.17	75.82	24.18	100.00
	เฉลี่ย	47.01	14.68	61.69	76.21	23.79	100.00
M7R6	M7R6-1	45.74	15.23	60.97	75.02	24.98	100.00
	M7R6-2	45.81	18.12	63.93	71.66	28.34	100.00
	M7R6-3	44.56	16.94	61.50	72.46	27.54	100.00
	เฉลี่ย	45.37	16.76	62.13	73.04	26.96	100.00
M8R6	M8R6-1	39.70	24.81	64.51	61.54	38.46	100.00
	M8R6-2	36.96	28.85	65.81	56.16	43.84	100.00
	M8R6-3	37.58	27.26	64.84	57.96	42.04	100.00
	เฉลี่ย	38.08	26.97	65.05	58.55	41.45	100.00
เฉลี่ยรวม		43.79	19.13	62.93	69.75	30.25	100.00

เมื่อทดสอบสมบัติการแข็งตัวได้ของเพสต์ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน พบว่าเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนและมีความแข็งตัวเกิดขึ้นในทุกๆ ตัวอย่าง เมื่อสัมผัสโคนผิวของตัวอย่างเกิดการหลุดร่อนคล้ายฝุ่นเพียงเล็กน้อย การทดสอบสมบัติการแข็งตัวได้ของเพสต์ก้อนผลึกแข็งและเพสต์ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนนี้มีผลทดสอบเหมือนกับการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1



ภาพที่ 62 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างกับปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษาที่ 2 คิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

นำก้อนเพสต์ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนกับการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1 พบว่าก้อนเพสต์ที่แข็งตัวแล้วยังสามารถคงสภาพความแข็งตัวไว้ได้

เมื่อก้อนเพสต์ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบความทนทานในกรณีแช่น้ำเป็นเวลานาน (Soaked Condition) ที่ 3 วัน และ 7 วัน พบว่าก้อนเพสต์ที่แข็งตัวแล้วยังสามารถคงสภาพความแข็งตัว ไม่เกิดการทลายตัว จากการสังเกตลักษณะน้ำพบว่ามีความขุ่นเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งยังคงสามารถมองเห็นตัวอย่างที่แช่ไว้ในน้ำได้ การทดสอบความทนทานในกรณีแช่น้ำเป็นเวลานานให้ผลการทดสอบเหมือนกับการศึกษาที่ 1

### กรณีศึกษาที่ 3

ผลการทดลองเผาในกรณีศึกษาที่ 2 พบว่าสัดส่วนผสม M8R6 เกิดผงฝุ่นสีน้ำตาลอ่อนในปริมาณเฉลี่ยสูงสุด การเผาในกรณีศึกษาที่ 3 จึงนำสัดส่วนผสม M8R6 มาเปลี่ยนขนาดของฝุ่นผงหินปูน เป็นหินปูนเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.50 และ 1.00 ซม. ตามลำดับ ใช้แทนที่ผงหินปูนด้วยสัดส่วนเท่าเดิม ดังแสดงสัญลักษณ์ตามตารางที่ 25

หลังจากการเผาพบว่าสารผลิตภัณฑ์เกิดการหลอมละลายรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันติดอยู่กับถ้วยครุชีเบิ้ลทั้ง 2 ตัวอย่างและไม่สามารถแยกออกจากถ้วยครุชีเบิ้ลได้ ดังแสดงตามภาพที่ 64 ดังนั้นการแทนที่ฝุ่นผงหินปูนด้วยหินปูนเม็ดนี้ จึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเผาด้วยเตาเผาแบบไฟฟ้า

ตารางที่ 25 สัญลักษณ์และสัดส่วนผสมกรณีศึกษาที่ 3

ชนิดกากอุตสาหกรรม	M8R6 (0.5) สัดส่วนร้อยละ	M8R6 (1.0) สัดส่วนร้อยละ
เปลือกหอยแครง	5	5
ฝุ่นผงหินปูน	50	50
ตะกอนประปา	25	25
ถ้ำลอย	0	0
ปูนขาว	20	20
รวม	100	100
HM หรือ HR	2.45	2.45
LSF	112.04	112.04
Ms หรือ SR	1.93	1.93
Ma หรือ AR	1.81	1.81
หมายเหตุ	หินปูนเม็ดขนาด 0.5 ซม.	หินปูนเม็ดขนาด 1.0 ซม.



ภาพที่ 63 ลักษณะหินปูนเม็ด



(ก) M8R6 (0.5)



(ข) M8R6 (1.0)

ภาพที่ 64 สารผลิตภัณฑ์หลังการเผาในกรณีศึกษาที่ 3

#### กรณีศึกษาที่ 4

เนื่องจากตะกอนประปาเป็นกากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณจำนวนมาก จึงพยายามทดลองเพิ่มสัดส่วนในส่วนผสมที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยเพิ่มสัดส่วนของตะกอนประปาให้สูงถึงร้อยละ 40 และใช้รูปแบบการเผาแบบ R6 เพื่อทดสอบหาขอบเขตของการใช้ปริมาณตะกอนประปาในวัตถุดิบตั้งต้น ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 26

ตารางที่ 26 สัญลักษณ์และสัดส่วนผสม กรณีศึกษาที่ 4

ชนิดกากอุตสาหกรรม	M9R6 สัดส่วนร้อยละ
เปลือกหอยแครง	5
ฝุ่นผงหินปูน	35
ตะกอนประปา	40
เถ้าลอย	0
ปูนขาว	20
รวม	100
HM หรือ HR	1.29
LSF	59.11
Ms หรือ SR	1.93
Ma หรือ AR	1.82

สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการเผามีลักษณะเป็นก้อนผลึกแข็งสีเทาอ่อนปนดำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.50 ซม. ซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็กกว่าทุกกรณีศึกษาที่ผ่านมาทั้ง 3 กรณี รวมอยู่กับผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลเข้ม มีน้ำหนักรวมเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างเท่ากับ 62.93 กรัม (ก้อนผลึกแข็ง 46.19 กรัม และผงฝุ่น 16.74 กรัม) คิดเป็นสัดส่วนปริมาณการเกิดก้อนผลึกแข็งเฉลี่ย 73.37% และผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลเข้มเฉลี่ย 26.63% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 27

ตารางที่ 27 น้ำหนักของสารผลิตภัณฑ์รวมหลังการเผาในกรณีศึกษาที่ 4

รูปแบบ	ตัวอย่าง	ก้อนผลึก (กรัม)	ผงฝุ่น (กรัม)	รวม (กรัม)	ก้อนผลึก (%)	ผงฝุ่น (%)	รวม (%)
การเผา	M9R6-1	46.05	16.72	62.77	73.36	26.64	100.00
	M9R6-2	43.87	17.66	61.53	71.30	28.70	100.00
	M9R6-3	48.65	15.83	64.48	75.45	24.55	100.00
เฉลี่ย		46.19	16.74	62.93	73.37	26.63	100.00



ภาพที่ 65 สารผลิตภัณฑ์ M9R6 หลังการเผาในกรณีศึกษาที่ 4



ภาพที่ 66 การไม่จับตัวกันของเพสต์ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลเข้ม

นำสารผลิตภัณฑ์ไปทดสอบสมบัติการแข็งตัวได้ ขั้นตอนการทดสอบเหมือนกับกรณีศึกษาที่ 1 ทุกประการ ผลทดสอบพบว่าเพสต์ของก้อนผลึกแข็งบดละเอียดไม่เกิดการจับตัวกันและไม่มีความแข็งตัวเกิดขึ้นในทุกๆ ตัวอย่าง และเมื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการแข็งตัวของเพสต์ในลักษณะเป็นก้อนมวลใหญ่ พบว่าไม่เกิดการจับตัวกันและไม่มีความแข็งตัวของเพสต์ก้อนมวลใหญ่ เช่นเดียวกันกับผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1

ผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลเข้มถูกนำมาทดสอบสมบัติการแข็งตัวได้เช่นเดียวกันกับก้อนผลึกแข็งพบว่าเพสต์ของผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลเข้ม สามารถคงตัวอยู่ในลักษณะเป็นก้อนได้ในสภาวะที่อยู่ในภาชนะทรงรูป (Confined) เท่านั้น หลังนำตัวอย่างเพสต์ออกจากภาชนะ (Unconfined) เพสต์ตัวอย่างไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ เมื่อออกแรงบีบเพียงเล็กน้อย ก้อนตัวอย่างจะหลุดออกจากกันเป็นผงมีลักษณะคล้ายดินดังแสดงในภาพที่ 66 ผลการทดสอบนี้บ่งชี้การใส่ตะกอนประปาในสัดส่วนที่มากเกินไปร้อยละ 40 ส่งผลด้านลบต่อคุณสมบัติด้านการแข็งตัวของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ และเมื่อพิจารณาค่า Hydration Modulus และอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ได้แก่ Lime Saturation Factor , Silica Ratio และ Alumina Ratio ของสารตั้งต้น ตามตารางที่ 8 พบว่าไม่อยู่ในช่วงค่าที่แนะนำ

จากผลการศึกษาทั้ง 4 กรณีศึกษาการเผา พบว่าสัดส่วน M8R6 เป็นสัดส่วนที่มีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ โดยสารผลิตภัณฑ์รวมหลังจากการเผามี 2 ชนิดคือ ก้อนผลึกแข็งสีเทาอ่อนปนดำ และผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน การทดสอบการแข็งตัวได้เบื้องต้นพบว่าเพสต์ของผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนสามารถแข็งตัวได้ แต่เพสต์ของก้อนผลึกแข็งสีเทาอ่อนปนดำซึ่งบดละเอียดคร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60 ไม่สามารถแข็งตัวได้

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำก้อนผลึกแข็งจากสัดส่วน M8R6 มาทำการบดให้มีความละเอียดมากขึ้นกว่าเดิมแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ผลจากการทดสอบเพสต์ที่อายุการบ่ม 3 วัน กลับพบว่าสามารถแข็งตัวและขึ้นรูปได้คล้ายกับปูนซีเมนต์ ดังแสดงตามภาพที่ 67 และเมื่อนำก้อนเพสต์ที่แข็งตัวแล้วมาทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเหมือนในกรณีศึกษาที่ 1 พบว่าก้อนเพสต์ก้อนผลึกแข็งยังคงสภาพความแข็งตัว ไม่เกิดการทลายตัว (Slaking) ผิวของตัวอย่างเกิดการหลุดร่อนออกเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 67 การแข็งตัวของเพสต์จากก้อนผลึกแข็งที่บดละเอียดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 จาก สัปดาห์ M8R6



(ก) อายุการบ่ม 3 วัน



(ข) อายุการบ่ม 7 วัน

ภาพที่ 68 การทดสอบความทนทานของก้อนเพสต์จากก้อนผลึกแข็งในกรณีแช่น้ำเป็นเวลานาน

เมื่อนำก้อนเพสต์จากก้อนผลึกแข็งที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบความทนทานในกรณีแช่น้ำเป็นเวลานาน (Soaked Condition) โดยนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 3 วัน และ 7 วัน ตามลำดับ พบว่าก้อนเพสต์ตัวอย่างยังสามารถคงสภาพความแข็งตัว ไม่เกิดการทลายตัว จากการสังเกตลักษณะน้ำพบว่ามีความขุ่นเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งยังคงสามารถมองเห็นตัวอย่างที่แช่ไว้ในน้ำได้ ดังแสดงตามภาพที่ 68

### สรุปผลการผลิตสารเชื่อมประสาน

จากผลการศึกษาทั้ง 4 กรณีศึกษาการเผา พบว่าสัปดาห์ M8R6 เป็นสัปดาห์ที่มีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม ประกอบด้วย เปลือกหอยแครง : ฝุ่นผงหินปูน : ตะกอนประปา : ปูนขาว เท่ากับ 5 : 50 : 25 : 20 ตามลำดับ โดยสารผลิตภัณฑ์รวมหลังจากการเผา 2 ชนิดคือ ก้อนผลึกแข็งสีเทาอ่อนปนดำ และผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อน

เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดมีสมบัติการแข็งตัวได้ของเพสต์ และมีลักษณะการเชื่อมประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ จึงเรียกก้อนผลึกแข็งสีเทาอ่อนปนดำว่า “สารเชื่อมประสาน GCM หรือ Gray Cementing Material” และผงฝุ่นละเอียดสีน้ำตาลอ่อนว่า “สารเชื่อมประสาน BCM หรือ Brown Cementing Material” โดยจะนำไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบของสารเชื่อมประสานทั้ง 2 ชนิดจะนำเสนอในส่วนที่ 3 และส่วนที่ 4 ต่อไป

## ส่วนที่ 2 การเกิดเฟสในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายการเกิดสารประกอบหลักในเม็ดปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM จากรูปแบบการเผาต่างๆ เพื่อยืนยันสัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม

### การวิเคราะห์การเกิดสารประกอบในเม็ดปูนซีเมนต์สังเคราะห์

ตามที่ได้ตั้งสมมุติฐานในเบื้องต้นในการเลือกสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรม โดยเริ่มต้นพิจารณาจากออกไซด์หลักซึ่งได้แก่  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  โดยสัดส่วนผสมที่เป็นไปตามเกณฑ์ดังสรุปในตารางที่ 6 มีศักยภาพในการเกิดสารประกอบหลัก จากตารางที่ 28 ซึ่งสรุปรวมค่าไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของวัตถุดิบตั้งต้น พบว่าสัดส่วนผสม M5, M7 และ M8 สอดคล้องกับเกณฑ์ดังกล่าวมากที่สุด จากผลการศึกษาการทดลองเผาเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ทั้ง 4 กรณีศึกษา พบว่าสัดส่วน M8 และรูปแบบการเผา R6 มีความเหมาะสมในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์มากที่สุด เมื่อพิจารณาจากปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผา (สารเชื่อมประสาน GCM และ BCM)

ตารางที่ 28 ค่าไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของวัตถุดิบตั้งต้น

สัดส่วนผสม	ค่าไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ			
	HM หรือ HR	LSF	Ms หรือ SR	Ma หรือ AR
M1	2.13	99.03	1.78	1.84
M2	2.07	96.44	1.78	1.84
M3	2.25	104.63	1.78	1.84
M4	2.20	102.31	1.78	1.84
M5	2.04	93.18	1.94	1.81
M6	1.96	89.62	1.93	1.81
M7	2.50	114.55	1.94	1.81
M8	2.45	112.04	1.93	1.81
M9	1.29	59.11	1.93	1.82

ตารางที่ 29 องค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ดที่สกัดส่วนต่างๆ

ชนิดของ ปูนซีเมนต์	องค์ประกอบทางเคมี (%)							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI	Free lime
M1R6	64.403	17.884	9.098	3.534	0.684	0.309	1.62	3.59
M2R6	65.706	16.819	8.905	3.108	0.809	0.445	1.45	4.06
M3R6	64.674	17.731	9.316	3.239	0.720	0.163	1.92	2.79
M4R6	66.112	17.087	9.056	3.134	0.845	0.134	1.49	4.27
M5R6	63.789	18.467	10.109	2.876	0.584	0.065	1.88	3.25
M6R6	65.837	17.650	9.780	2.621	0.733	0.041	1.50	2.68
M7R6	64.042	18.948	9.438	2.730	0.637	0.038	1.70	3.10
M8R6	64.310	18.420	9.250	2.630	1.230	0.090	1.06	4.98
M9R6	49.697	26.435	14.324	3.576	0.776	0.055	1.41	1.27

ตารางที่ 30 สารประกอบหลัก C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF ของปูนเม็ดที่สกัดส่วนต่างๆ

ชนิดของปูนซีเมนต์	สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ (%)				ความเหมาะสม * (ความเป็นไปได้)
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	
M1R6	59.12	6.99	18.14	10.74	มากที่สุด
M2R6	74.04	-7.26	18.35	9.45	น้อยที่สุด
M3R6	60.77	5.31	19.21	9.85	ปานกลาง
M4R6	73.49	-6.08	18.70	9.53	น้อยที่สุด
M5R6	47.04	17.72	21.93	8.74	มากที่สุด
M6R6	64.23	2.48	21.49	7.97	ปานกลาง
M7R6	49.21	17.47	20.40	8.30	มากที่สุด
M8R6	55.57	11.19	20.07	8.00	มากที่สุด
M9R6	-100.17	150.99	31.92	10.87	น้อยที่สุด

หมายเหตุ \*ความเป็นไปได้ในการผลิตปูนซีเมนต์พิจารณาจากปริมาณสารประกอบหลักที่คำนวณและเปรียบเทียบกับสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ทั่วไป

จากผลการศึกษาร่องรอยประกอบทางเคมีของปูนเม็ดตามสัดส่วนผสม M1-M9 ด้วยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) ตามตารางที่ 29 พบว่า ปูนเม็ดทั้งหมดมีปริมาณออกไซด์หลักซึ่งได้แก่ CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อยู่ในช่วงปริมาณของออกไซด์ที่ประกอบอยู่ในปูนเม็ดทั่วไป ตามที่ Neville (2002) ได้ทำการศึกษากล่าวคือ CaO มีค่าระหว่าง 60-67%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีค่าระหว่าง 3-8%, SiO<sub>2</sub> มีค่าระหว่าง 17-25% และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีค่าระหว่าง 0.5-6 % ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณออกไซด์หลักที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงที่แนะนำ และมีปริมาณใกล้เคียงกันในทุกๆ ตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม สัดส่วน M9R6 มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากสัดส่วนอื่นค่อนข้างมาก โดยเฉพาะปริมาณ CaO และเมื่อพิจารณาค่าไฮดรเจนโมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของวัตถุดิบตั้งต้นใน สัดส่วน M9R6 พบว่าแตกต่างจากเกณฑ์ที่แนะนำค่อนข้างมากเช่นเดียวกัน

ผลการคำนวณหาปริมาณสารประกอบหลักของ C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF ใช้สมการที่เสนอโดย Bouge (1955) ตามมาตรฐาน ASTM C150 แสดงตามตารางที่ 30 เมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิดที่ทดสอบได้จากปูนเม็ดทั้ง 9 สัดส่วนเปรียบเทียบกับปริมาณสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ทั่วไป พบว่ามีค่าแตกต่างกันในแต่ละสัดส่วน โดยค่า C<sub>3</sub>S และ C<sub>2</sub>S เป็นสารประกอบหลักสำคัญที่ใช้ในการพิจารณา แนวคิดการพิจารณาความเหมาะสม (ความเป็นไปได้) ของปูนเม็ดสรุปดังแสดงในตารางที่ 30

เมื่อพิจารณาค่า C<sub>3</sub>S ของ M2R6, M4R6 และ M9R6 พบว่ามีค่าติดลบ จึงมีสมบัติไม่เหมาะสม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า C<sub>2</sub>S ของสัดส่วน M1R6, M3R6 และ M6R6 พบว่ามีค่าต่ำกว่า 10% ซึ่งต่ำกว่าค่าที่แนะนำโดย Czernin (1962) ค่อนข้างมาก สำหรับสัดส่วน M5R6, M7R6 และ M8R6 ซึ่งพบว่ามีองค์ประกอบหลักทั้ง C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน จึงมีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้สูงในการเกิดเป็นปูนเม็ด แต่เมื่อพิจารณาค่า C<sub>3</sub>S ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีผลต่อกำลังของปูนซีเมนต์ จึงสามารถเรียงลำดับความเหมาะสมจากมากไปน้อยได้ดังนี้

$$M8R6 > M7R6 > M5R6 > M1R6 > M3R6 > M6R6 >> M4R6 >> M2R6 >> M9R6$$

อย่างไรก็ตามเพื่อยืนยันการเกิดสารประกอบหลัก และความเป็นไปได้ (ความเหมาะสม) ที่ปูนเม็ดจะมีสมบัติแข็งตัวได้ (Hardening Property) จึงได้นำปูนเม็ดทั้ง 9 สัดส่วนผสมไปวิเคราะห์ XRD ผลการวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffraction (XRD) ของสัดส่วนปูนเม็ด

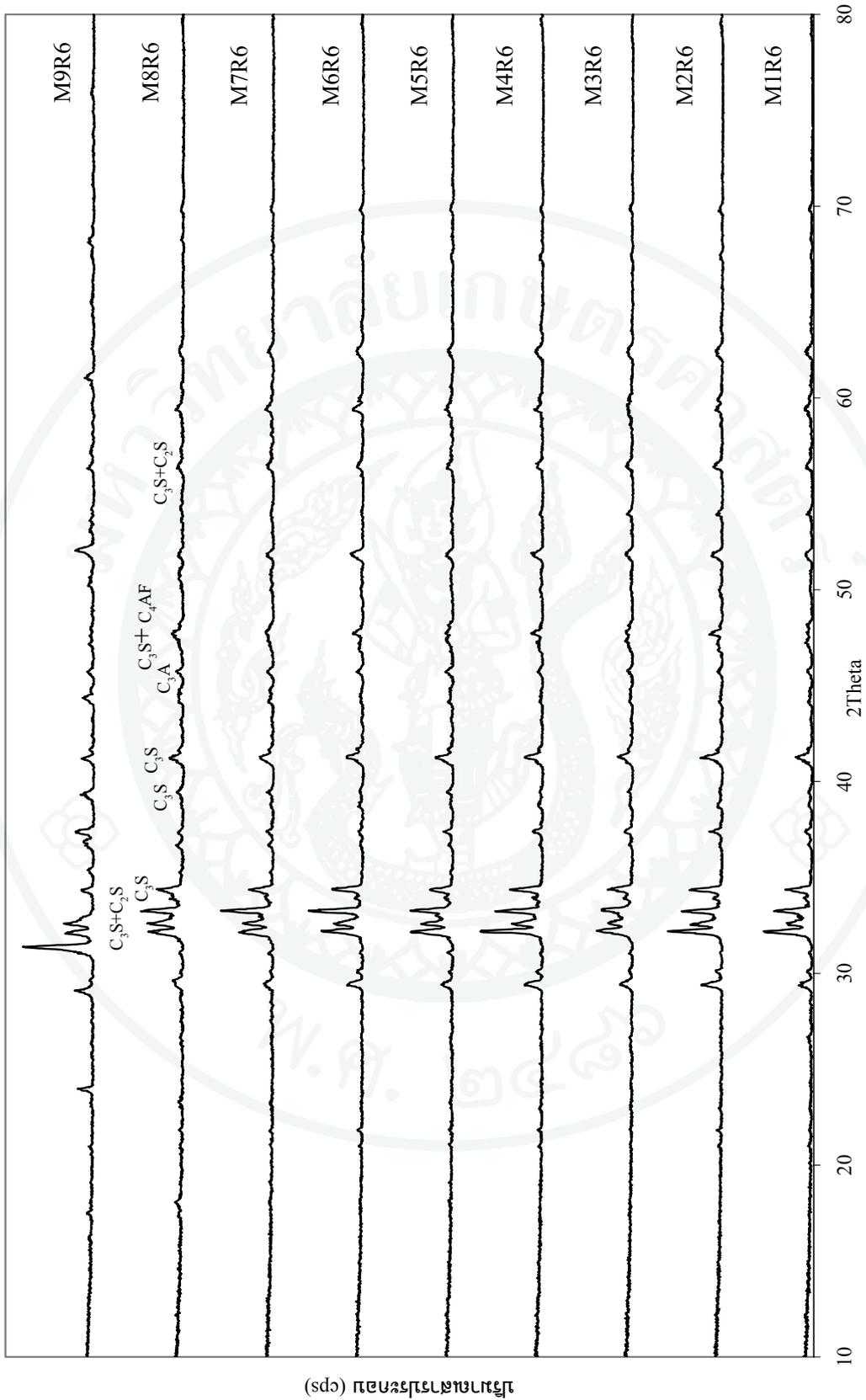
ทั้ง 9 สัดส่วนแสดงตามภาพที่ 69 จากการวิเคราะห์พบว่าสารประกอบหลักของปูนเม็ดทุกสัดส่วน มีสารประกอบหลัก  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  และ  $C_4AF$  เช่นเดียวกับที่พบในปูนซีเมนต์ OPC ตารางที่ 31 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อหาสารประกอบหลัก  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  และ  $C_4AF$  พบว่า สัดส่วน M8R6 มีปริมาณของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  สูงที่สุด และมีปริมาณ  $C_3A$  ก่อนข้างสูง โดยปริมาณ  $C_3A$  ที่สูงนี้จะส่งผลดีในการนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน เมื่อพิจารณาตามปริมาณ  $C_3S$  และ  $C_2S$  ที่เกิดขึ้น สามารถจัดเรียงลำดับความเหมาะสมของสัดส่วนผสมจากมากไปน้อยได้ดังนี้

$$M8R6 > M5R6 > M7R6 > M4R6 > M6R6 > M2R6 > M9R6 \gg M1R6 \gg M3R6$$

ตารางที่ 31 ปริมาณสารประกอบหลักของปูนเม็ดจากการวิเคราะห์ XRD

ชนิดของปูนซีเมนต์	สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ (%)			
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
M1R6	281	304	88	104
M2R6	340	265	122	81
M3R6	272	291	117	69
M4R6	361	288	121	71
M5R6	372	321	102	84
M6R6	336	280	89	83
M7R6	343	323	105	101
M8R6	386	421	176	94
M9R6	340	264	22	72

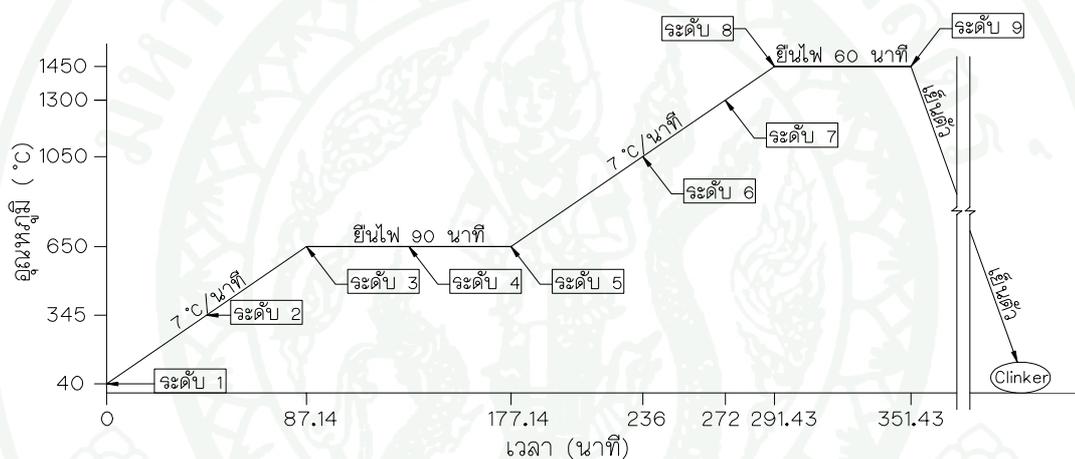
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมที่เหมาะสมและมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักตั้งต้นประกอบด้วย ตะกอนประปา ในช่วง 20-25% ฟูนผงหินปูนและเปลือกหอยแครงอยู่ในช่วง 55-75%



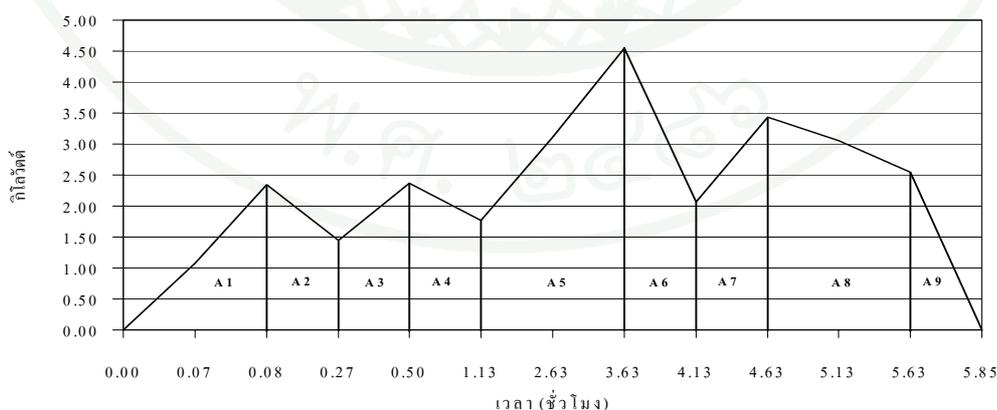
ภาพที่ 69 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของปูนเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ

## การศึกษาปฏิกิริยาเคมีที่เกิดสารประกอบจากรูปแบบการเผาที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ

จากการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการเลือกสัดส่วนผสมสรุปได้ว่าสัดส่วนผสม M8R6 มีศักยภาพสูงสุดเมื่อพิจารณาทั้งในด้านองค์ประกอบสารเคมีของออกไซด์หลักและสารประกอบหลัก (Bouge's compounds) ที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ลำดับขั้นตอนการเกิดสารประกอบในเม็ดปูนซีเมนต์สังเคราะห์ของสัดส่วน M8R6 ด้วยเทคนิค XRD แบ่งขั้นตอนการเผาตามรูปแบบการเผา R6 ออกเป็น 9 ระดับ ตามระดับการเพิ่มของอุณหภูมิและช่วงระยะเวลาที่ใช้เผาตามรูปที่ 70 โดยเริ่มจากอุณหภูมิห้อง  $40^{\circ}\text{C}$  ถึงอุณหภูมิสูงสุด  $1,450^{\circ}\text{C}$  คิดเป็นระยะเวลาเผารวมทั้งหมด 351.43 นาทีหรือ 5.85 ชั่วโมง สำหรับพลังงานที่ใช้ในการเผาแสดงในภาพที่ 71

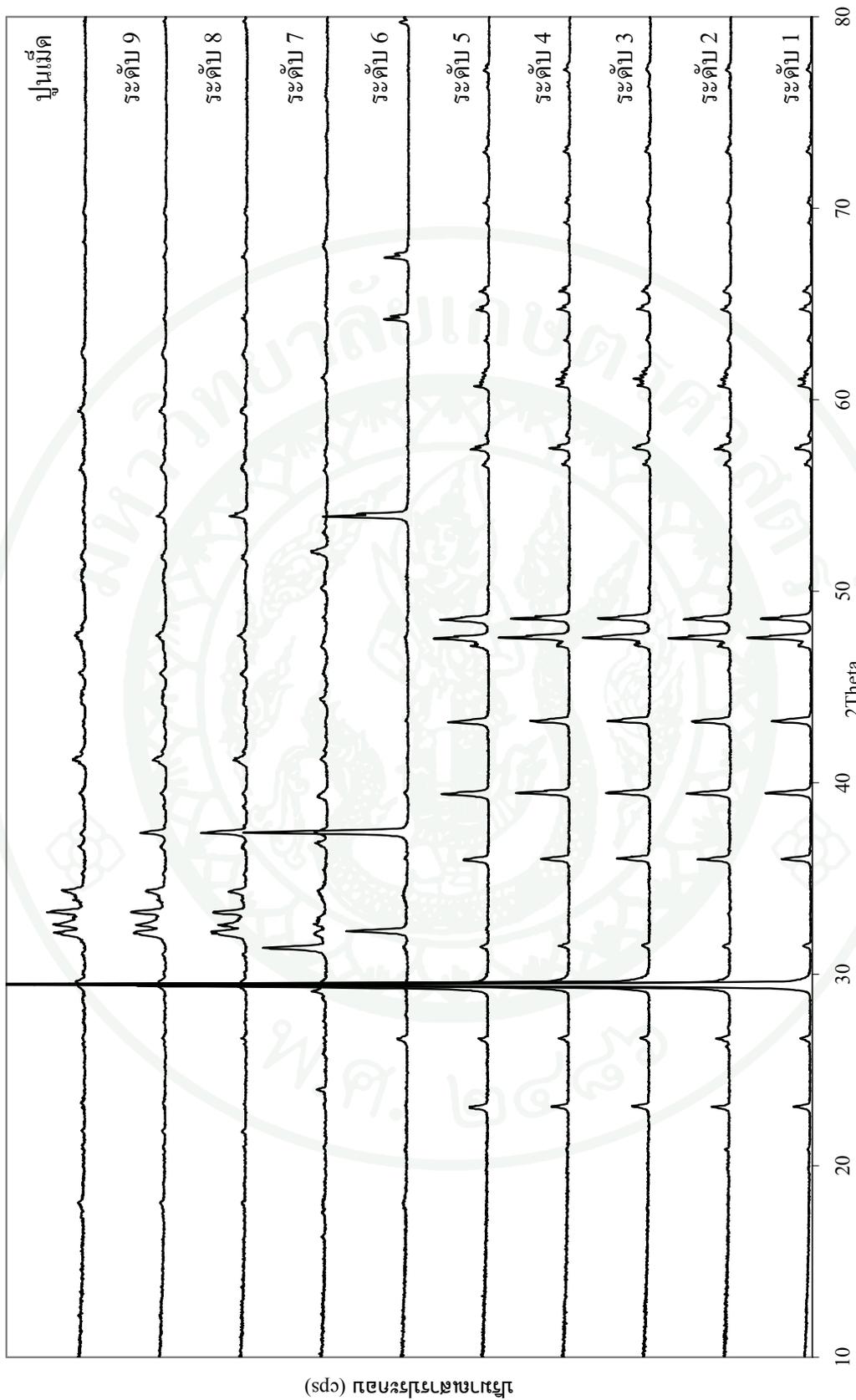


ภาพที่ 70 รูปแบบการเผา R6 แบ่งตามขั้นตอนการเผา 9 ระดับ



ภาพที่ 71 กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาอุณหภูมิสูงในช่วงระยะเวลา 5.85 ชั่วโมง

ที่มา: เกียรติคุณ (2554)



ภาพที่ 72 การเกิดสารประกอบของ ปุ๋ยเม็ดจากกากอุตสาหกรรมในแต่ละช่วงอุณหภูมิการเผา

จากผลการวิเคราะห์เฟสปูนซีเมนต์สังเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) จากระดับ 1, 2, 3, 4 จนถึงระดับ 5 ในภาพรวมพบว่าเกิดสารประกอบพวก Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) ที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  (30 ตำแหน่ง) เหมือนกันทุกๆ ระดับ ดังนี้ 23.205, 26.668, 29.445, 31.362, 36.041, 39.312, 43.038, 47.046, 47.306, 48.376, 56.403, 57.168, 57.955, 60.459, 61.345, 62.728, 64.678, 65.186, 68.999, 70.178, 72.675, 75.374, 76.084, 76.809 (ดูจาก code reference 00-003-0596; JCPDS) และตรวจพบ peak ของ Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) ที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ 26.639 องศา (ดูจาก code 01-085-0798; JCPDS) ภาพที่ 70 แสดงลำดับขั้นตอนการเกิดสารประกอบของปูนเม็ดในแต่ละช่วงเวลาและอุณหภูมิการเผา การเปลี่ยนแปลงในแต่ละระดับอธิบายได้ดังนี้

ระดับ 1-2 เกิดการระเหย (Evaporation)

เป็นช่วงการขจัดน้ำอิสระโดยการระเหย (Evaporation) ที่ อุณหภูมิประมาณ  $100^\circ\text{C}$  และที่ อุณหภูมิประมาณ  $250-450^\circ\text{C}$  น้ำที่ดูดซับในวัตถุดิบ (Adsorbed water) จะถูกระเหยออกไป

ระดับ 3 - 4 – 5 เกิดปฏิกิริยา Calcination

โมเลกุลน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$  crystal water) และคาร์บอนเนตจะค่อยๆ ถูกขจัดออกไป เริ่มสลายเป็น  $\text{CaO}$  และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่อุณหภูมิในการเผาในช่วงประมาณ  $650^\circ\text{C}$

ระดับ 6 Formation of  $\text{CaO}$

ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD ในช่วงนี้ ตรวจพบสารประกอบของ  $\text{CaO}$  (lime) อย่างชัดเจน ที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  (6 ตำแหน่ง) คือ 32.222, 37.377, 53.892, 64.195, 67.420, 79.710 (ดูจาก code reference 01-077-2776; JCPDS) และตรวจพบ peak ของ Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 26.639 องศา ในช่วงนี้ยังตรวจพบ peak ของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 29.455 องศา เช่นเดียวที่ปรากฏในระดับ 1-5 แต่มีปริมาณน้อยมาก ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับสมการการเผา  $\text{CaCO}_3$  โดยเมื่อเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 1,000 องศาจะได้  $\text{CaO}$  (lime) และ  $\text{CO}_2$  ในช่วงนี้ จะจึงเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) กลายเป็น  $\text{CaO}$  (Free lime) อย่างสมบูรณ์ซึ่งสามารถตรวจสอบเปรียบเทียบจาก Code 01-077-2376; JCPDS)

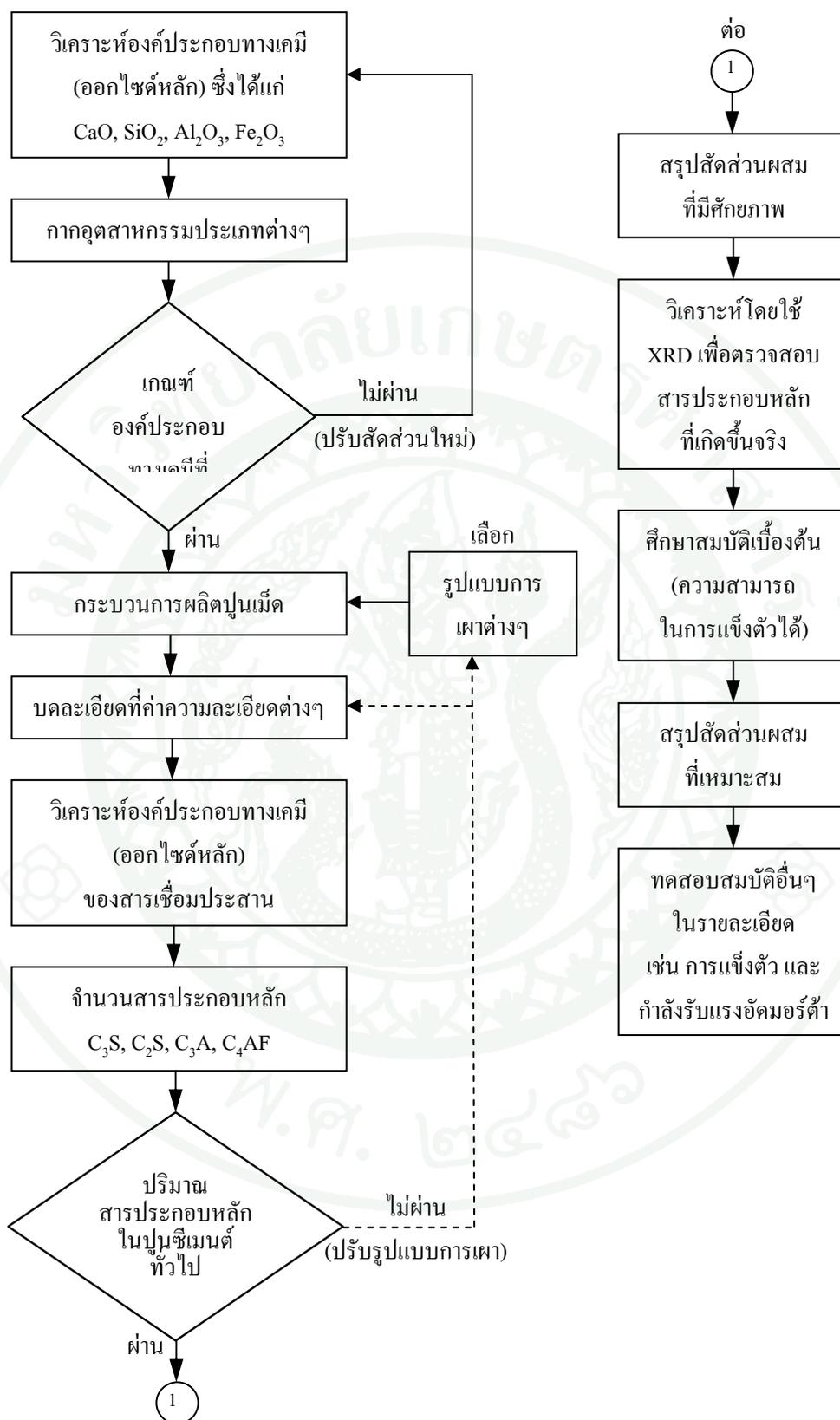
### ระดับ 7 Formation of $C_3A$ and $Fe_2O_3$ จากการวิเคราะห์ด้วย XRD

ปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมินี้ จะเกิดสารประกอบของ  $C_3A$  และ  $C_4AF$  ซึ่งจะทำหน้าที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  เกิดการหลอมละลายทำปฏิกิริยาเกิดเป็นปูนเม็ด (Clinker) อย่างไรก็ตาม การเผาในระดับอุณหภูมินี้พบว่าเกิดสารประกอบของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  โดยที่  $CaO$  (Free lime) จะหลอมรวมตัวกับ  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  และ  $Fe_2O_3$  แต่ยังคงเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์จึงตรวจพบเฟสของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  ในปริมาณน้อย

### ระดับ 8 – 9 Formation of $C_3S$ and $C_2S$ (complete)

จากการวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ที่เผาจนถึงระดับนี้ด้วย XRD พบว่าเกิดสารประกอบของ  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  และ  $C_4AF$  เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ในช่วงสุดท้ายของการเผาที่อุณหภูมิประมาณ  $1,300 - 1,450\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดย  $CaO$  สามารถทำปฏิกิริยาได้เกือบทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะเกิด  $CaO$  ในลักษณะของปูนซีเมนต์อิสระ (Free lime)

จากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ โดยใช้หลักการ Combination of wastes สามารถสรุปได้ตามภาพที่ 73 ดังนี้



ภาพที่ 73 สรุปขั้นตอนการออกแบบสัดส่วนผสมเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์

### ส่วนที่ 3 การผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์และการศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์สังเคราะห์

#### สมบัติของสารเชื่อมประสาน GCM

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) เปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ Ordinary Portland Cement type I (OPC) โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 32 พบว่าสารเชื่อมประสาน GCM มีออกไซด์หลัก (Major Oxides) ใกล้เคียงกับ OPC โดยที่สารเชื่อมประสาน GCM มีค่าออกไซด์หลัก เท่ากับ 64.31 %, 18.42 %, 9.25 % และ 2.63% ตามลำดับ ส่วน OPC มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>), อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เท่ากับ 65.63 %, 20.26 %, 6.05 % และ 3.11% ตามลำดับ

ตารางที่ 32 องค์ประกอบทางเคมีของ GCM และ OPC

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (%)							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI	Free lime
GCM	64.31	18.42	9.25	2.63	1.23	0.09	1.06	4.98
OPC	65.63	1.06	6.05	3.11	1.07	2.67	3.27	1.19

ตารางที่ 33 สารประกอบหลัก C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF ของ GCM และ OPC

ตัวอย่าง	สารประกอบหลัก (%)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
GCM	55.57	11.19	20.07	8.00
OPC	60.43	12.83	10.78	9.45

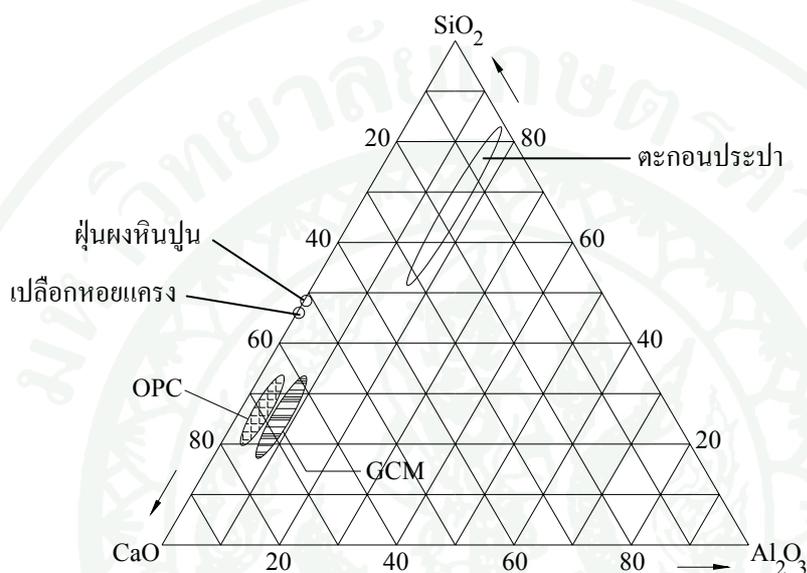
การคำนวณหาปริมาณสารประกอบหลักของ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate; C<sub>3</sub>S), ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate; C<sub>2</sub>S), ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate; C<sub>3</sub>A) และ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite; C<sub>4</sub>AF) ใช้สมการที่เสนอโดย Bouge (1955) ตามมาตรฐาน ASTM C150 พบว่า ปูนซีเมนต์ GCM มีปริมาณของ C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF เท่ากับ 55.57 %, 11.19 %, 20.07 % และ 8.00 % ตามลำดับ

ส่วน OPC มีปริมาณของ  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  และ  $C_4AF$  เท่ากับ 60.43 %, 12.83 %, 10.78 % และ 9.45% ตามลำดับ ดังแสดงตามตารางที่ 33 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ OPC แล้วพบว่าปูนซีเมนต์ GCM มีปริมาณสารประกอบที่ใกล้เคียงกับ OPC แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า ยกเว้น  $C_3A$  ซึ่งปูนซีเมนต์ GCM มีปริมาณสูงกว่าประมาณ 2 เท่า ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shimoda *et al.* (1999)

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบสารประกอบหลักในสภาพแห้ง (Anhydrous) โดยขึ้นต้นจากผลการทดสอบเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ X-ray Diffraction (XRD) ในภาพที่ 74 พบว่าปูนซีเมนต์ GCM มีสารประกอบหลัก (Bouge's Compounds) เช่นเดียวกับที่พบใน OPC อย่างไรก็ตาม สารประกอบหลักของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  เกิดขึ้นโดย OPC มีปริมาณของ  $C_3S$  เท่ากับ 1,010 หน่วยต่อวินาที (cps) ซึ่งมากกว่าที่ตรวจพบในปูนซีเมนต์ GCM มีปริมาณของ  $C_3S$  เท่ากับ 386 cps.

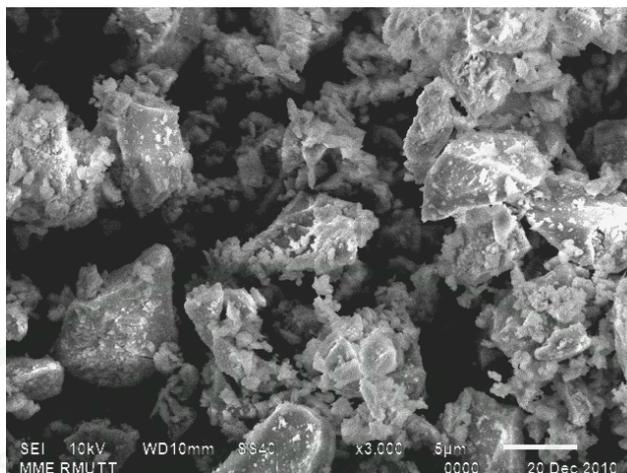


ภาพที่ 76 แสดง  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  System เมื่อนำองค์ประกอบทางเคมีของ OPC และสารเชื่อมประสาน GCM การทำการเขียนลงใน  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  System พบว่า มีตำแหน่งใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมีของสารเชื่อมประสาน GCM ว่ามีความเทียบเคียงกับ OPC

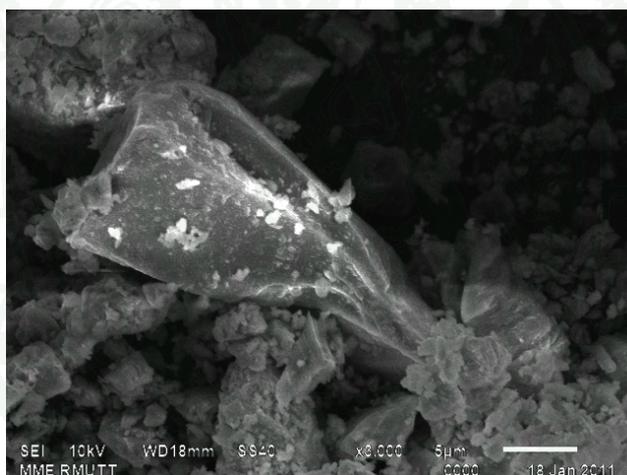


ภาพที่ 76  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  System ของ OPC และสารเชื่อมประสาน GCM

เมื่อตรวจสอบระดับอนุภาคของปูนซีเมนต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM) ของ OPC และ GCM พบว่า อนุภาคของ OPC มีลักษณะเป็นเส้นแหลม มีเหลี่ยมคม ขนาดและรูปร่างของอนุภาคคล้ายกัน ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ GCM โดย OPC มีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3-7  $\mu\text{m}$ . และ GCM มีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5-20  $\mu\text{m}$ . ดังแสดงตามภาพที่ 77 และ 78 ตามลำดับ



ภาพที่ 77 อนุภาคปูนซีเมนต์ OPC (กำลังขยาย x 3,000)



ภาพที่ 78 อนุภาคสารปูนซีเมนต์ GCM (กำลังขยาย x 3,000)

การทดสอบปริมาณโลหะหนักของสารเชื่อมประสาน GCM ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) พบว่าปริมาณโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ USEPA (United State Environmental Protection Agency) ทั้งนี้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 34 ยังสอดคล้องกับ NICE criteria ซึ่งสามารถยืนยันยืนยันความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 34 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของสารเชื่อมประสาน GCM

ตัวอย่าง	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Zn (mg/kg)
GCM	28.53	ND	27.71	4.30	16.90	153.26
USEPA	1,500	39	3,000	420	18	2,800

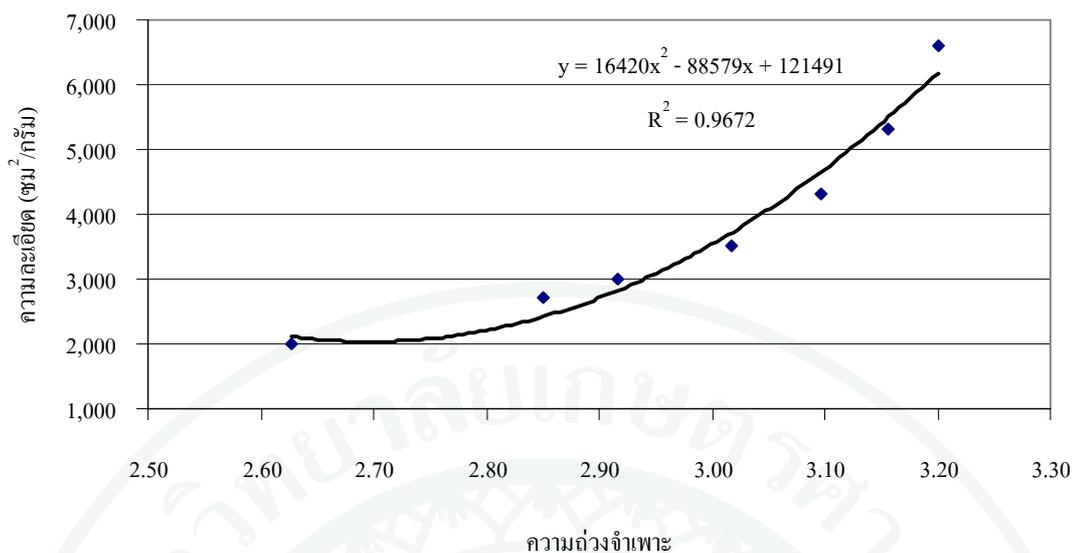
หมายเหตุ ND (Not Detected) หมายถึง ตรวจไม่พบ

จากการศึกษาอิทธิพลของความละเอียดที่มีต่อสมบัติของสารเชื่อมประสาน GCM โดยนำสารเชื่อมประสาน GCM มาบดละเอียดโดยแบ่งออกเป็น 7 ระดับ โดยให้กลบคลุมขอบเขตล่างและขอบเขตบนเมื่อเปรียบเทียบกับความละเอียดของปูนซีเมนต์ทั่วไป ผลการทดสอบความละเอียดโดยใช้เครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้แบบเบลน (ASTM C204-07) พบว่าตัวอย่าง S1, S2, S3, S4, S5, S6 และ S7 มีค่าความละเอียดเฉลี่ย 2,000, 2,700, 3,000, 3,500, 4,300, 5,300 และ 6,600 ซม<sup>2</sup>/กรัม ตามลำดับ ส่วนความถ่วงจำเพาะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 – 09 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.63, 2.85, 2.92, 3.02, 3.10, 3.16 และ 3.20 ตามลำดับ รายละเอียดผลการทดสอบดังแสดงตามตารางที่ 35

เมื่อพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดกับความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงตามภาพที่ 79 พบว่าเมื่อความละเอียดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

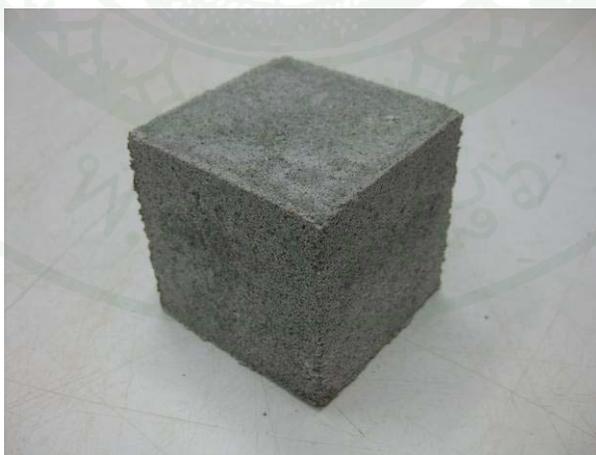
ตารางที่ 35 ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของสารเชื่อมประสาน GCM

ตัวอย่าง	ความละเอียด (ซม <sup>2</sup> /กรัม)	ความละเอียด เฉลี่ย (ซม <sup>2</sup> /กรัม)	ความถ่วงจำเพาะ	ความถ่วงจำเพาะ เฉลี่ย
OPC	3,127	3,200	3.05	3.07
	3,263		3.07	
	3,317		3.08	
S1	2,314	2,000	2.72	2.63
	1,944		2.59	
	1,693		2.57	
S2	2,741	2,700	2.89	2.85
	2,696		2.85	
	2,573		2.81	
S3	3,006	3,000	2.94	2.92
	2,951		2.91	
	2,811		2.90	
S4	3,593	3,500	3.03	3.02
	3,442		3.02	
	3,387		3.00	
S5	4,278	4,300	3.08	3.10
	4,305		3.10	
	4,393		3.11	
S6	5,216	5,300	3.14	3.16
	5,282		3.16	
	5,314		3.17	
S7	6,575	6,600	3.18	3.20
	6,623		3.20	
	6,692		3.22	



ภาพที่ 79 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับความถ่วงจำเพาะของสารเชื่อมประสาน GCM

สำหรับการหาปริมาณยิปซั่มที่เหมาะสมเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่เทียบเคียงกับ OPC จึงนำ GCM ที่บดละเอียดมาผสมกับยิปซั่ม ได้ทดลองนำตัวอย่าง S4 ซึ่งมีความละเอียดเริ่มต้นใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ OPC (3,380 ชม<sup>2</sup>/กรัม) ผสมกับยิปซั่มในอัตราส่วน 0%, 3%, 4% และ 5% โดยน้ำหนัก แล้วจึงทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่อายุการบ่ม 3 วัน ต่อไป



ภาพที่ 80 ลักษณะมอร์ต้าที่ผลิตจากตัวอย่าง S4 ก่อนทดสอบการรับกำลังอัด

ตารางที่ 36 ค่ากำลังรับแรงอัดอัดมอร์ต้าที่ผลิตจากตัวอย่าง S4 เมื่อผสมยิปซั่มที่อัตราส่วนต่างๆ

ปริมาณยิปซั่มที่ผสม โดยน้ำหนัก	กำลังอัด ที่อายุการบ่ม 3 วัน (ksc)	กำลังอัดเฉลี่ย
0%	50.16	51.21
	51.53	
	51.94	
3%	55.29	56.06
	56.07	
	56.83	
4%	57.44	58.34
	58.47	
	59.11	
5%	58.87	61.14
	61.67	
	62.89	

ตารางที่ 36 แสดงค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผลิตจากตัวอย่าง S4 เมื่อผสมยิปซั่มที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งค่ารับกำลังอัดเฉลี่ยมีค่า 51.21, 56.06, 58.34 และ 61.14 ksc ที่ยิปซั่มอัตราส่วน 0%, 3%, 4% และ 5% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อผสมยิปซั่มที่อัตราส่วน 5% ให้ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าสูงสุด ดังนั้นจึงใช้น้ำยิปซั่มที่อัตราส่วน 5% โดยน้ำหนัก มาทำการผสมกับสารเชื่อมประสาน GCM ในทุกๆ ตัวอย่างเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191 – 08 เนื่องจากข้อจำกัดของปริมาณตัวอย่าง จึงทำการทดสอบแบบการกำหนดปริมาณอัตราส่วนน้ำ และทดสอบเฉพาะตัวอย่าง S5, S6 และ S7 ผลการทดสอบแสดงตามตารางที่ 37 พบว่าเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ทั้ง 3 ตัวอย่างค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับ OPC ซึ่งเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดการก่อตัวของ OPC เท่ากับ 48 และ 65 นาที ตามลำดับ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นชัดเจนว่าระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลงตามค่าความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการก่อตัว

เริ่มต้นของ Eco-cement โดย Shimoda *et al.* (1999) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับปูนประเภทแข็งตัวเร็ว (Rapid hardening type)

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ใช้ทดสอบพบว่า w/c Ratio มีค่ามากขึ้นตามค่าความละเอียดที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่าง อธิบายได้ว่าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคมาก ส่งผลให้มีโอกาสสัมผัสกับน้ำมากขึ้นและเร็วขึ้น จึงต้องการปริมาณน้ำมาใช้ทำปฏิกิริยาก่อนข้างมาก ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็ว ทำให้ใช้ระยะเวลาในการก่อตัวน้อยลงเมื่อค่าความละเอียดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 37 ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ที่ความละเอียดต่างๆ

ตัวอย่าง	ความ ถ่วงจำเพาะ	พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $\text{cm}^2/\text{กรัม}$ )	W/C Ratio	ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
				เริ่ม	สิ้นสุด
OPC	3.07	3,200	0.45	48	65
S5	3.10	4,300	0.23	8	15
S6	3.16	5,300	0.48	4	10
S7	3.20	6,600	0.54	3	15
Eco-cement*					
Portland cement type	3.19	4,500	-	120	510
Rapid hardening type	3.13	4,600	-	9	13

หมายเหตุ: \* Shimoda *et al.* (1999)

ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผลิตได้โดยใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ดังตารางที่ 38 พบว่ากำลังอัดของ S2, S3, S4, S5, S6 และ S7 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มในทุกๆ ตัวอย่างตามภาพที่ 81 โดยเมื่อตัวอย่างมีค่าความละเอียดสูงขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงมากขึ้น สำหรับกรณีมอร์ต้า S1 (มีความละเอียดเริ่มต้นเท่ากับ 2,000  $\text{cm}^2/\text{กรัม}$ ) พบรอยแตกร้าวเมื่อบ่มไว้ในน้ำเป็นเวลา 3 วัน และมีการขยายขนาดของรอยร้าว และบวมตัวมากขึ้นตลอดอายุการบ่มที่ 90 วัน ซึ่งมอร์ต้าอยู่ในสถานะไม่คงตัว (Unsoundness) จึงไม่สามารถทำการทดสอบเพื่อหาค่าการรับกำลังอัดได้

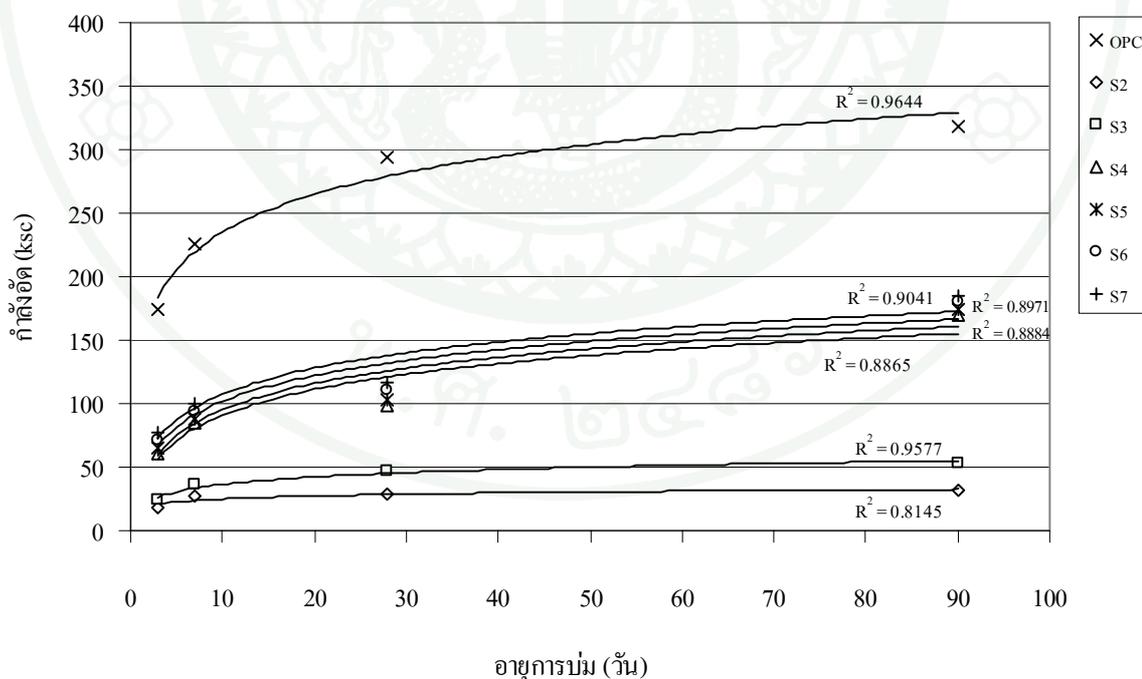
ตารางที่ 38 ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนสังเคราะห์ GCM ที่อายุการบ่มต่างๆ

ตัวอย่าง	กำลังอัดตามอายุการบ่ม (ksc)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
OPC	171.93	222.34	292.83	316.82
	174.31	225.88	294.21	318.32
	176.12	227.62	295.14	319.41
เฉลี่ย	174.12	225.28	294.06	318.18
	S2	17.14	26.11	28.94
เฉลี่ย	17.78	25.40	30.52	30.86
	19.20	28.38	29.13	31.03
	18.04	26.63	29.53	31.16
S3	22.55	37.26	45.75	51.71
	23.47	36.35	48.17	53.76
เฉลี่ย	25.20	34.53	47.56	53.64
	23.74	36.05	47.16	53.04
	S4	58.76	83.91	99.54
เฉลี่ย	62.98	85.21	97.34	168.11
	60.12	84.03	98.62	169.87
	60.62	84.38	98.50	169.17
S5	63.42	85.60	102.32	173.68
	64.91	87.31	103.04	174.85
	67.07	90.23	104.68	175.97
เฉลี่ย	65.13	87.71	103.35	174.83

ตารางที่ 38 (ต่อ)

ตัวอย่าง	กำลังอัดตามอายุการบ่ม (ksc)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
S6	69.33	92.75	107.73	176.32
	72.12	94.96	111.84	180.29
	72.87	95.63	112.41	182.65
เฉลี่ย	71.44	94.45	110.66	179.75
S7	75.30	99.57	116.22	184.32
	76.52	100.62	117.58	185.35
	77.86	101.07	117.89	186.17
	เฉลี่ย	76.56	100.42	117.23

หมายเหตุ S1 ไม่สามารถทดสอบกำลังอัดได้

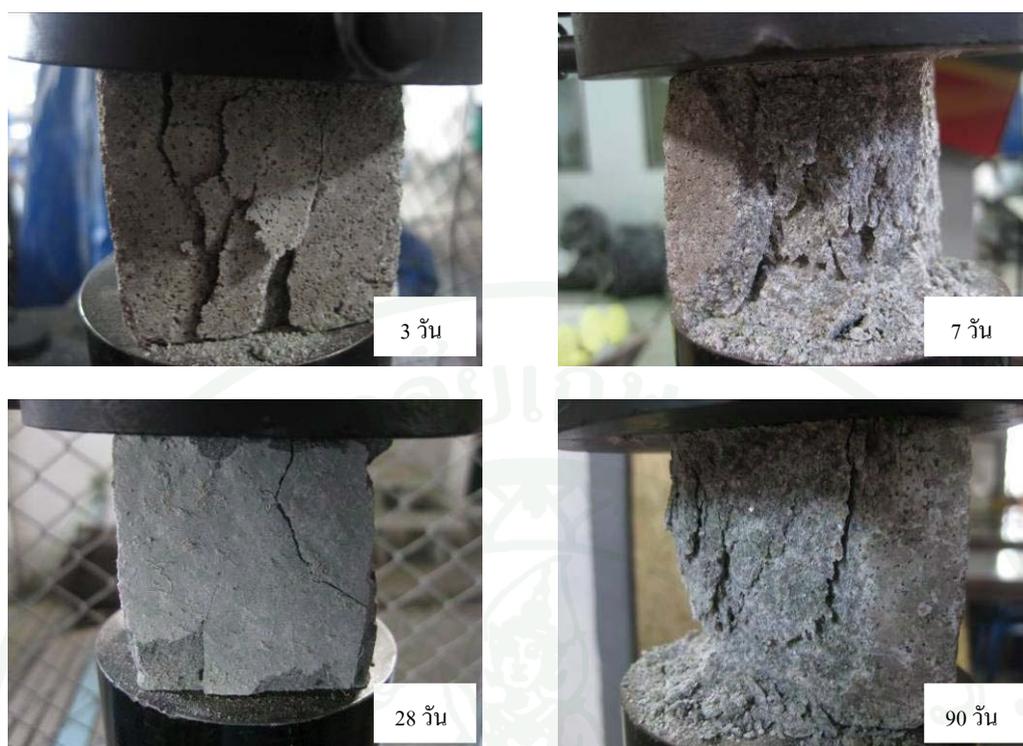


ภาพที่ 81 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ต้า GCM กับอายุการบ่ม

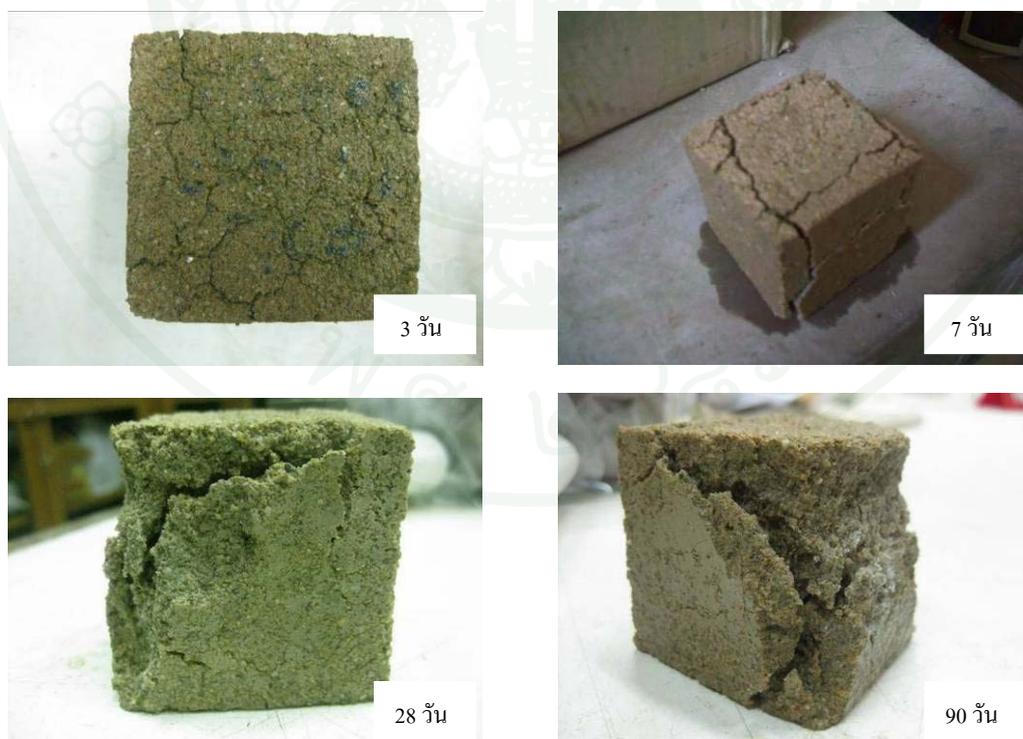
ภาพที่ 81 แสดงค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าทุกตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า S4, S5, S6 และ S7 มีค่าใกล้เคียงกันที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน เนื่องจากการทดสอบมอร์ต้ามาตรฐานใช้  $w/c \text{ ratio} = 0.485$  ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ทดสอบกับปูนซีเมนต์ OPC ที่มีค่าความละเอียดไม่เกิน  $3,500 \text{ ซม}^2/\text{กรัม}$  แต่เนื่องจากตัวอย่าง S4, S5, S6 และ S7 นั้น มีค่าความละเอียดที่ใกล้เคียงและสูงกว่า  $3,500 \text{ ซม}^2/\text{กรัม}$  ทำให้ต้องการปริมาณน้ำสำหรับที่จะใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น เมื่อปริมาณน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ ส่งผลให้การรับกำลังอัดมีค่าต่ำและใกล้เคียงกันที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน

เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้ามาตรฐานตาม ASTM C109-91 ตามตารางที่ 11 พบว่า กำลังอัดของมอร์ต้า OPC มีค่าสูงกว่าเกณฑ์กำหนดขั้นต่ำของปูนซีเมนต์ประเภท 1 ในทุกอายุการบ่ม และมีค่ากำลังแรงอัดสูงกว่ามอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ทุกตัวอย่างในทุกอายุการบ่ม ดังนั้นปูนซีเมนต์ GCM จึงอาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานโครงสร้างที่ต้องการกำลังอัดที่สูง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ต้าที่ค่อนข้างสูง ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่ต้องการกำลังที่ต่ำกว่าได้ เช่น นำไปทำอิฐบล็อก อิฐสำหรับทางเดิน หรือประยุกต์ใช้งานปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน คอนกรีตพูนประเภทที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดสูง เป็นต้น

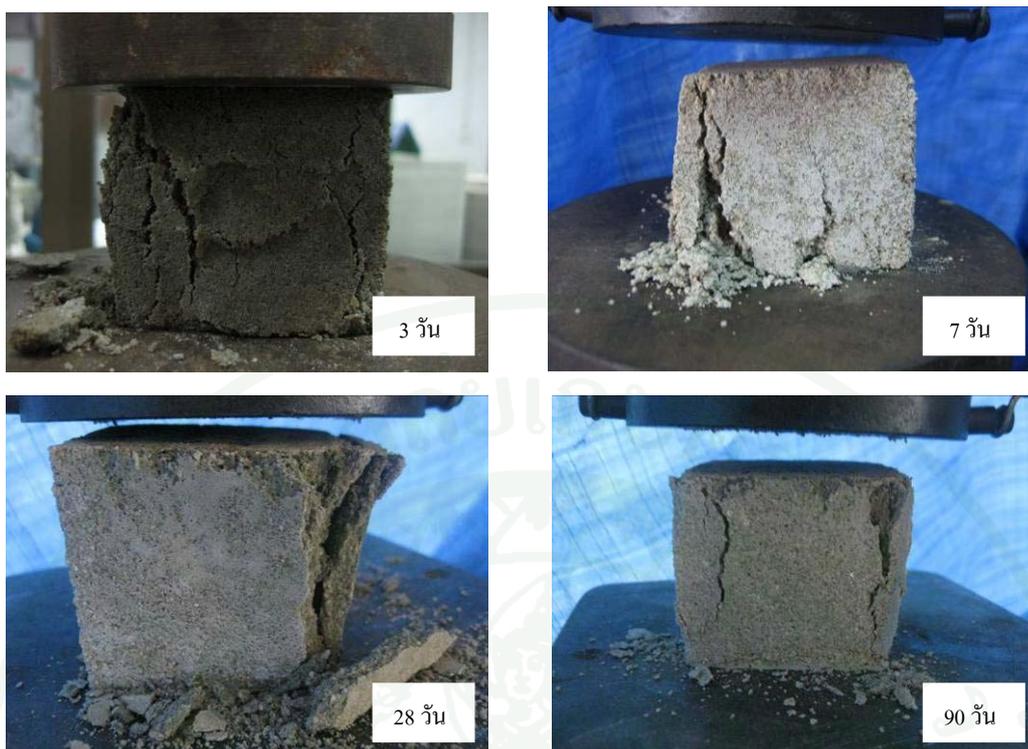
ภาพที่ 83 แสดงการบวมตัวที่มากขึ้นตามอายุการบ่มของมอร์ต้า S1 จนพังทลายทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณปูนขาวอิสระ (Free lime) ในปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM กับปูนซีเมนต์ OPC พบว่าปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มีปริมาณปูนขาวอิสระสูงกว่าประมาณ 4 เท่า ส่งผลให้มีปริมาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่สูง ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกแข็งและมีปริมาณมากขึ้นตามอายุการบ่ม เนื่องจากตัวอย่าง S1 มีความละเอียดต่ำส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างช้ากว่าปกติ ทำให้ผลึกของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้นในช่วงหลัง เกิดเป็นผลึกแข็งแทรกตัวขึ้นมาระหว่างสารผลิตภัณฑ์ของเดิมซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็ง ทำให้เริ่มขยายตัว และเมื่อเกิดการบวมตัวเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มจนกระทั่งเกิดการแตกร้าวในที่สุด ปรากฏการณ์การขยายตัวในลักษณะเช่นนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yamazaki *et al.* (1980) และ Min *et al.* (1995)



ภาพที่ 82 แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า OPC ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 83 แสดงลักษณะการขยายตัวและบวมตัวของมอร์ต้า S1 ที่อายุการบ่มต่างๆ



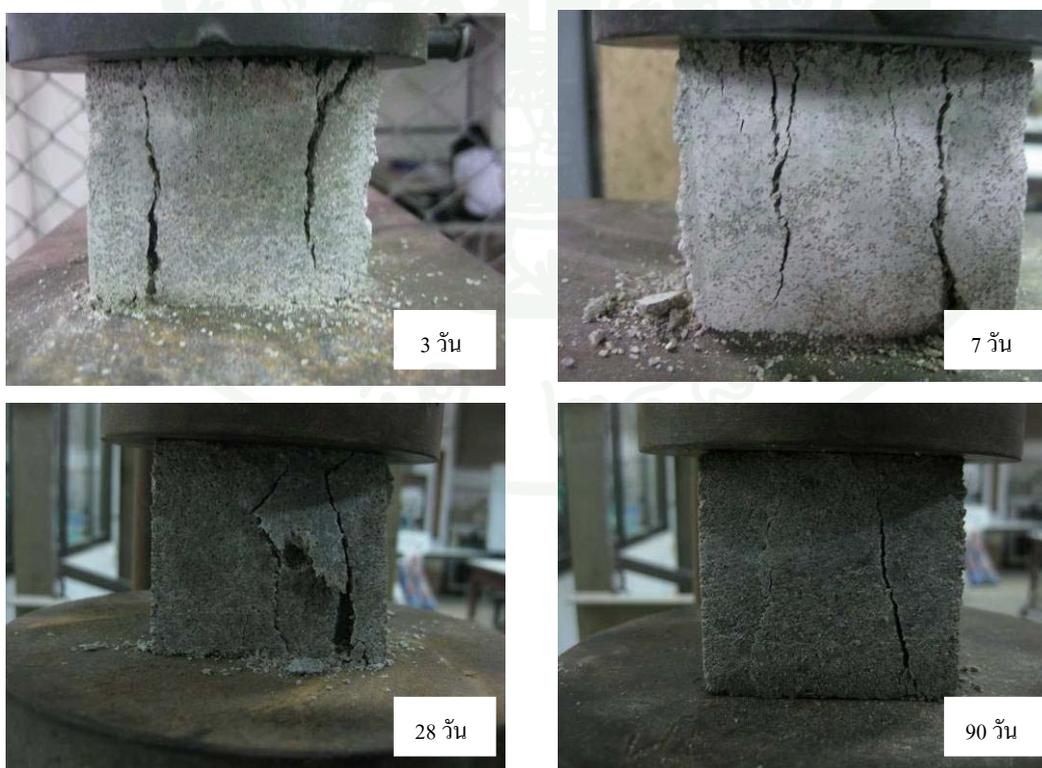
ภาพที่ 84 แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S2 ที่อายุการบ่มต่างๆ



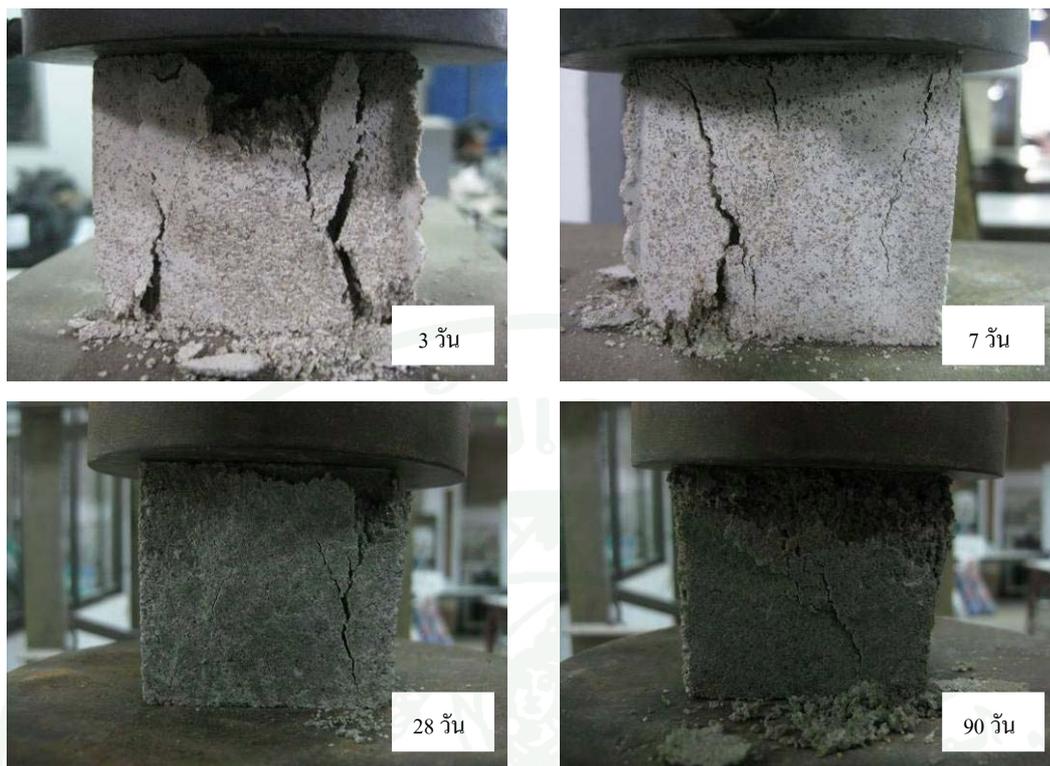
ภาพที่ 85 แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S3 ที่อายุการบ่มต่างๆ



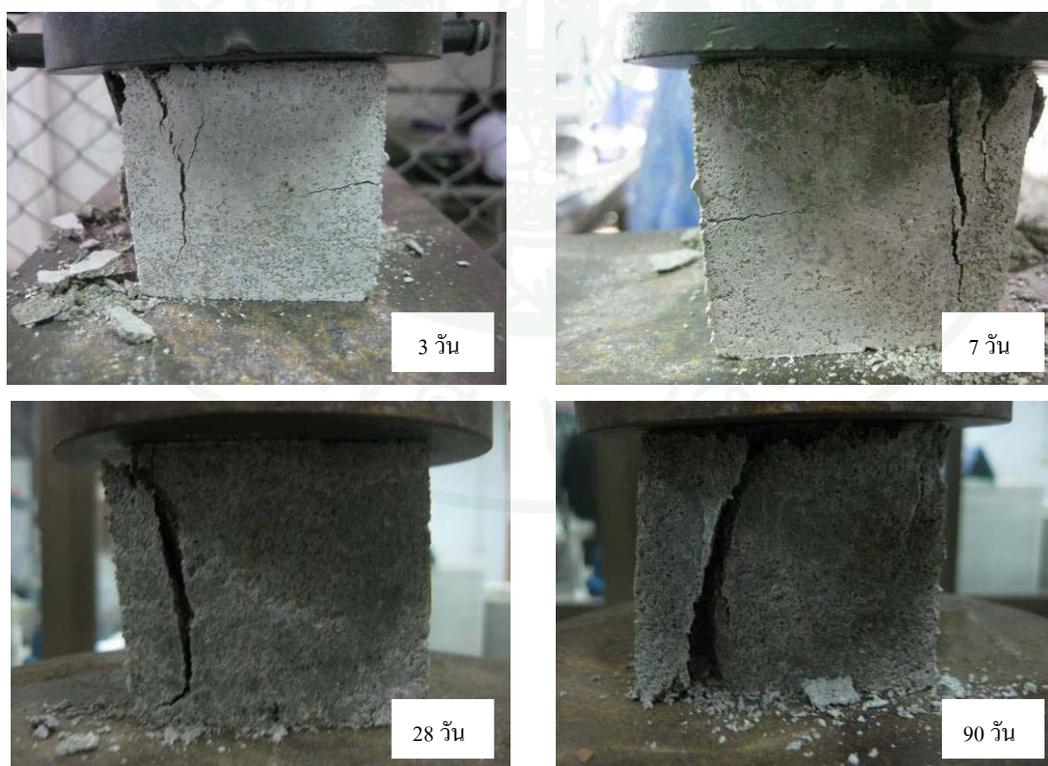
ภาพที่ 86 แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S4 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 87 แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S5 ที่อายุการบ่มต่างๆ

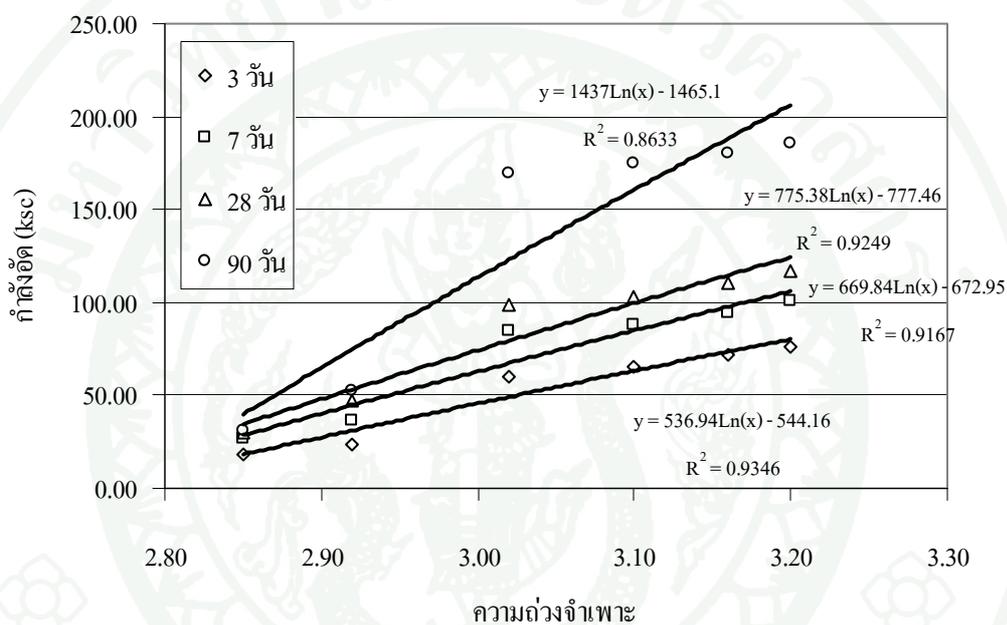


ภาพที่ 88 แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S6 ที่อายุการบ่มต่างๆ

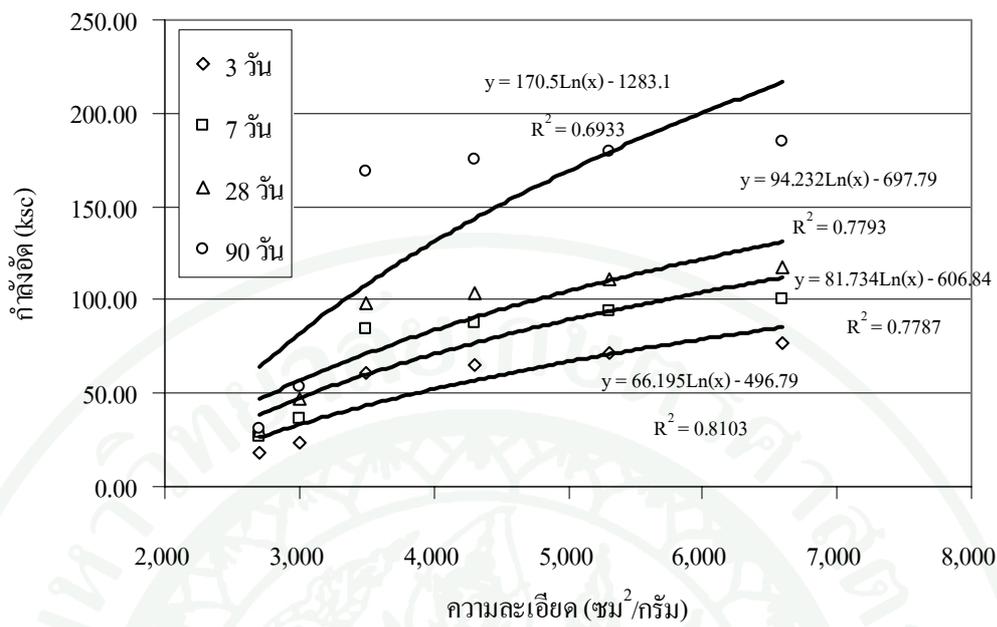


ภาพที่ 89 แสดงลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า S7 ที่อายุการบ่มต่างๆ

จากลักษณะการวิบัติของก้อนมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มตามภาพที่ 83 - ภาพที่ 89 พบว่าจะเกิดระนาบวิบัติในลักษณะเกือบจะแนวดิ่งในทิศทางเดียวกันกับแรงที่มากระทำ รอยแตกร้าวดังกล่าวมีลักษณะคล้ายระนาบการวิบัติของมอร์ต้ามาตรฐานที่ผลิตจาก OPC อย่างไรก็ตามการยึดเหนี่ยวกันของมวลละเอียดในมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มีความเชื่อมประสานที่ค่อนข้างต่ำกว่าการเชื่อมประสานของมวลละเอียดที่ใช้ปูนซีเมนต์ OPC



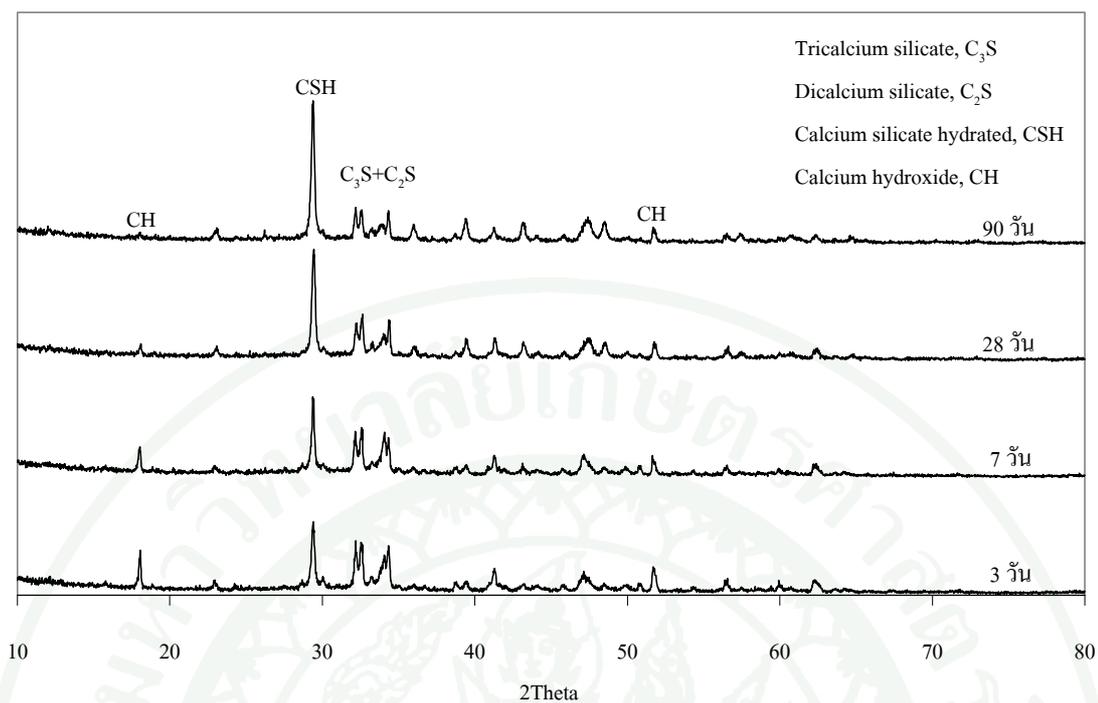
ภาพที่ 90 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความถ่วงจำเพาะ



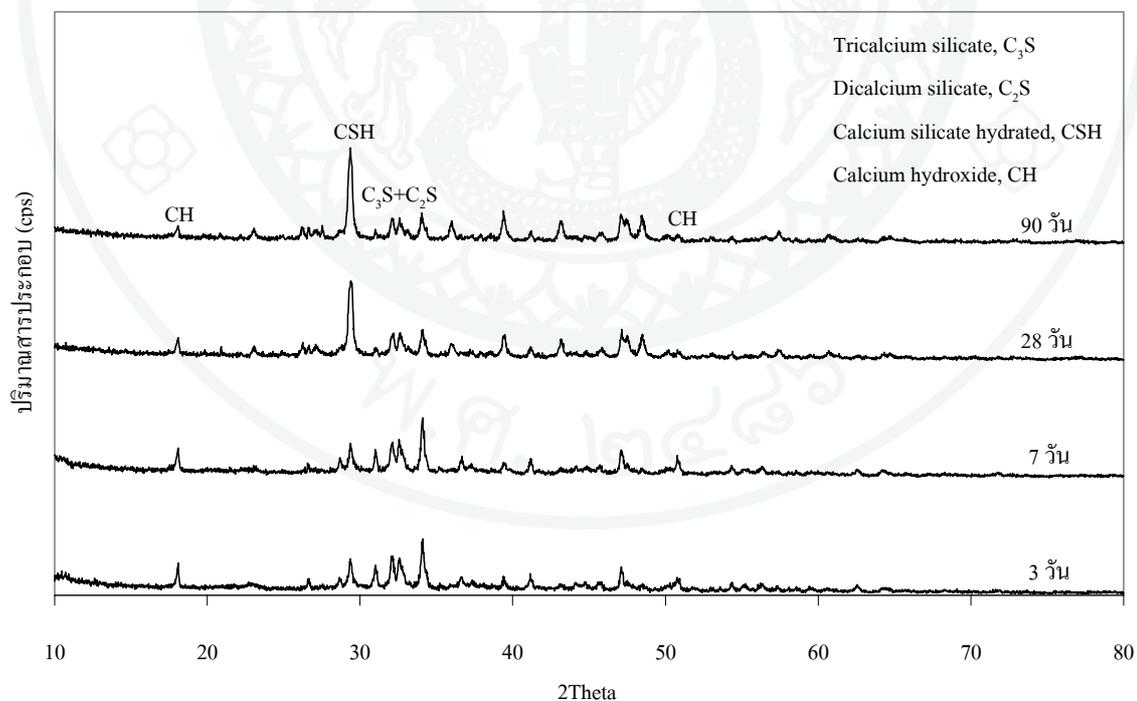
ภาพที่ 91 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความละเอียด

ภาพที่ 90 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความถ่วงจำเพาะมวลร้ด้า S2 ถึง S7 ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน ผลการวิเคราะห์พบว่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงขึ้น

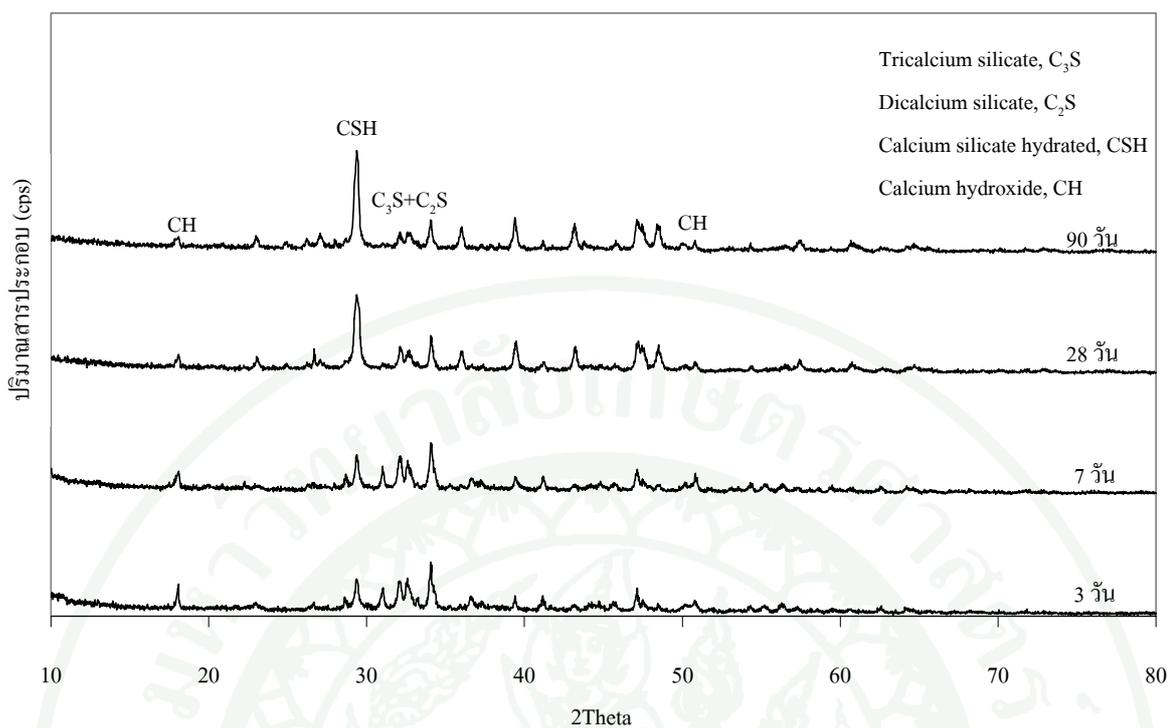
ในทำนองเดียวกันเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดของปูนซีเมนต์ GCM กับกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่างๆ สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ว่า เมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้นความถ่วงจำเพาะจะมีค่าสูงขึ้น และกำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามความละเอียด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เสนอโดย Owner *et al.* (2003), Binifi *et al.* (2007) และ Aydin *et al.* (2009)



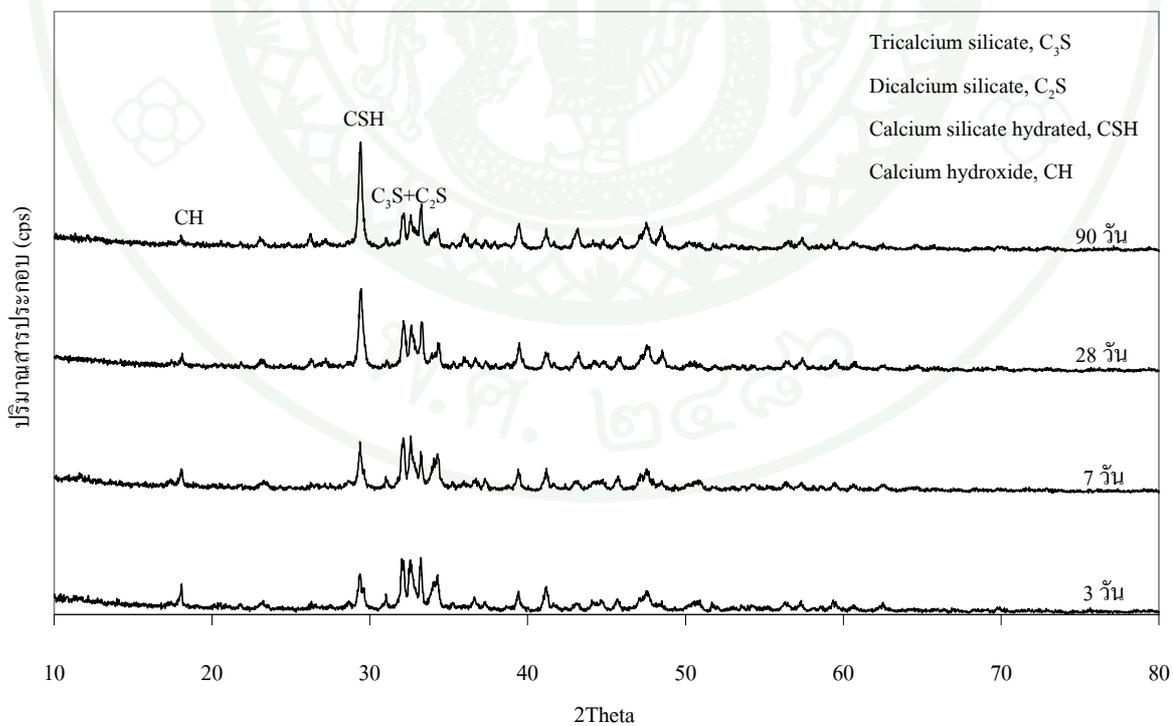
ภาพที่ 92 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 93 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ S5 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 94 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ S6 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 95 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ S7 ที่อายุการบ่มต่างๆ

การพัฒนากำลังของมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM สามารถอธิบายโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณสารตั้งต้น  $C_3S$  และ  $C_2S$  ที่ลดลง และการเกิดสารผลิตภัณฑ์ในซีเมนต์เพสต์ (Paste) โดยวิธีวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) เปรียบเทียบกับกำลังอัดที่อายุการบ่มต่างๆ ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ โดยการทดสอบเพสต์ของ GCM ที่ตัวอย่าง S5, S6 และ S7 เทียบกับเพสต์ของ OPC

กราฟการวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ของ OPC ที่อายุการบ่มต่างๆ แสดงดังภาพที่ 92 จากการวิเคราะห์ XRD (Semi-quantitative Analysis) ของซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน พบว่า มีสารประกอบหลักตั้งต้นของ  $C_3S$  ลดลงตามอายุการบ่มเท่ากับ 269, 249, 214 และ 199 cps ตามลำดับ สำหรับ  $C_2S$  ก็มีปริมาณลดลงเช่นกัน คือ เท่ากับ 254, 231, 204 และ 183 cps ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 39 ในทำนองเดียวกัน สารผลิตภัณฑ์หลัก (CSH) มีปริมาณเพิ่มขึ้นที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 441, 479, 617 และ 836 cps ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 40

ผลการวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ GCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน แสดงในภาพที่ 93- ภาพที่ 95 พบว่าสารประกอบหลักตั้งต้นของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  ลดลงตามอายุการบ่มในทุกๆ ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 39 นอกจากนี้สารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มในทุกๆ ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 40

ตารางที่ 39 แสดงปริมาณสารประกอบหลัก  $C_3S$  และ  $C_2S$  ของซีเมนต์เพสต์ปูน OPC และ GCM

ตัวอย่าง	$C_3S$ (cps)				$C_2S$ (cps)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
OPC	269	249	214	199	254	231	204	183
S5	223	217	170	165	212	201	176	131
S6	221	178	124	122	183	172	137	118
S7	318	294	249	176	292	284	279	165

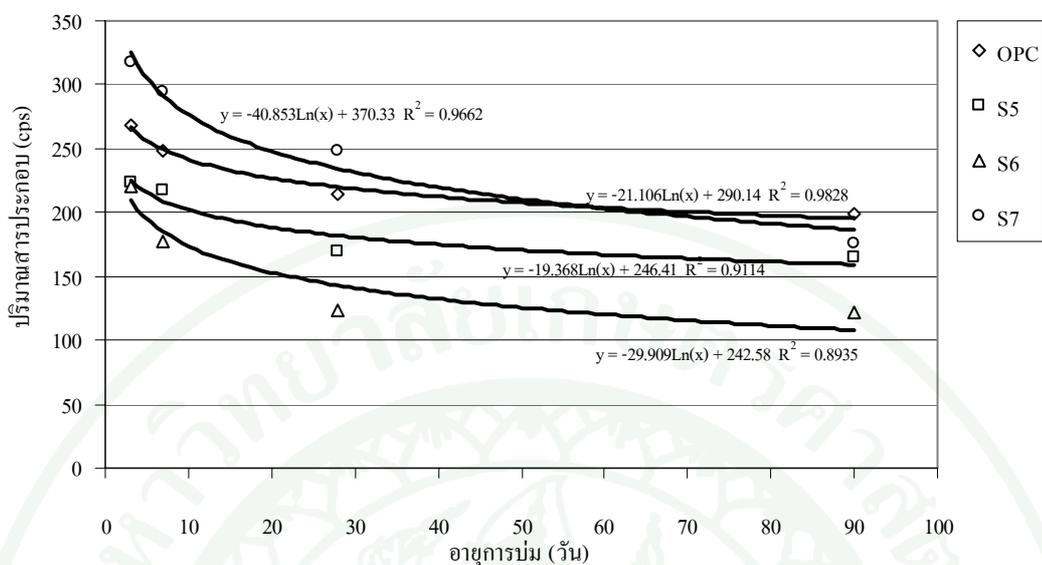
หมายเหตุ Anhydrous OPC มีปริมาณ  $C_3S$  และ  $C_2S$  เริ่มต้นจากภาพที่ 73 เท่ากับ 1,010 และ 980 cps  
Anhydrous GCM มีปริมาณ  $C_3S$  และ  $C_2S$  เริ่มต้นจากภาพที่ 74 เท่ากับ 386 และ 421 cps

ตารางที่ 40 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ  $\text{Ca(OH)}_2$  ของซีเมนต์เพสต์ปูน OPC และ GCM

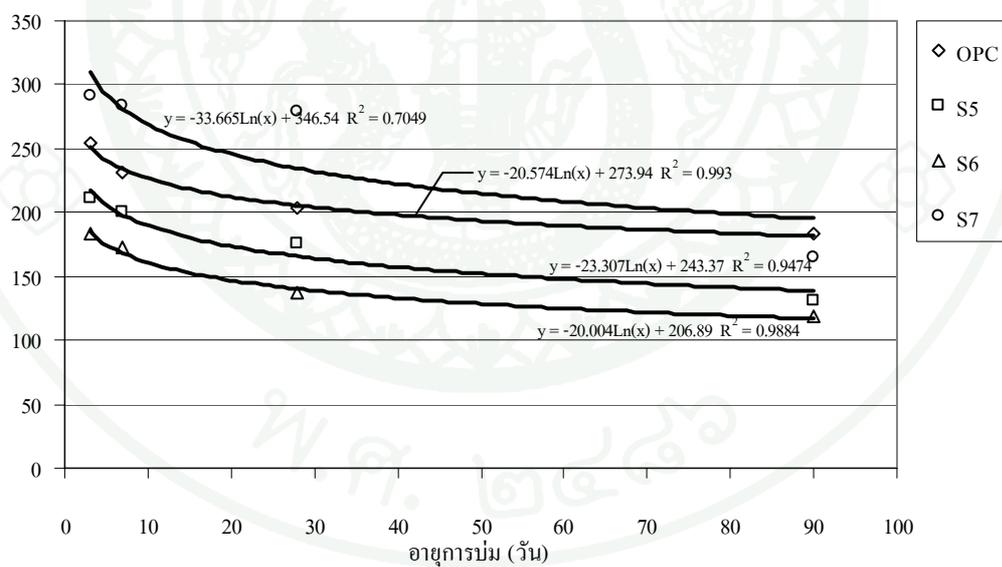
ตัวอย่าง	CSH (cps)				$\text{Ca(OH)}_2$ (cps)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
OPC	441	479	617	836	173	128	110	58
S5	207	211	443	584	194	183	146	116
S6	214	236	459	602	186	141	119	103
S7	216	301	468	605	176	134	96	90

ภาพที่ 96 และภาพที่ 97 แสดงอัตราการลดลงของ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น สารประกอบหลัก  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  ตั้งต้น มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนในช่วงต้น และเข้าสู่ค่าคงที่เมื่ออายุการบ่มระยะยาว (90 วัน) เกิดเป็น CSH ที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 98 เนื่องจาก OPC เพสต์ มีปริมาณสารประกอบหลัก  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  ตั้งต้นที่สูงกว่า GCM จึงทำให้เกิด CSH ในปริมาณที่สูงกว่า GCM

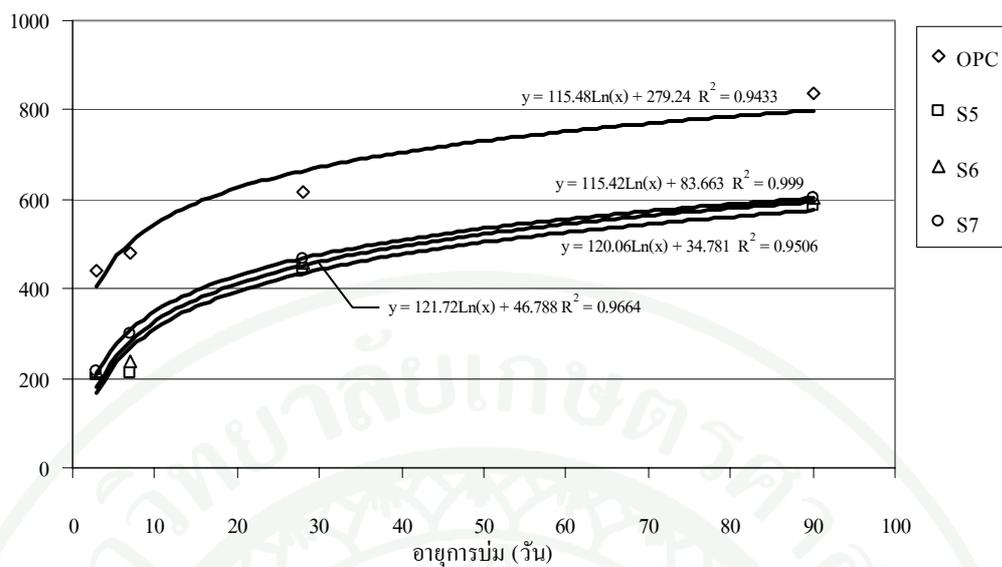
จากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณ CSH ของตัวอย่าง GCM มีปริมาณต่ำกว่า OPC อย่างไรก็ตาม ปริมาณ CSH ที่เกิดจาก GCM มีปริมาณมากขึ้นตามค่าความละเอียดที่เพิ่มขึ้น ภาพที่ 99 แสดงปริมาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  มีค่าลดลงตามอายุการบ่มในทุกๆ ตัวอย่าง เนื่องจาก  $\text{Ca(OH)}_2$  จะถูกใช้ไปขึ้นตอนปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH มีผลทำให้ค่ารับกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ต้าโดยมอร์ต้า S7 มีการรับกำลังอัดได้สูงกว่ามอร์ต้า S6 และ S5 ตามลำดับ



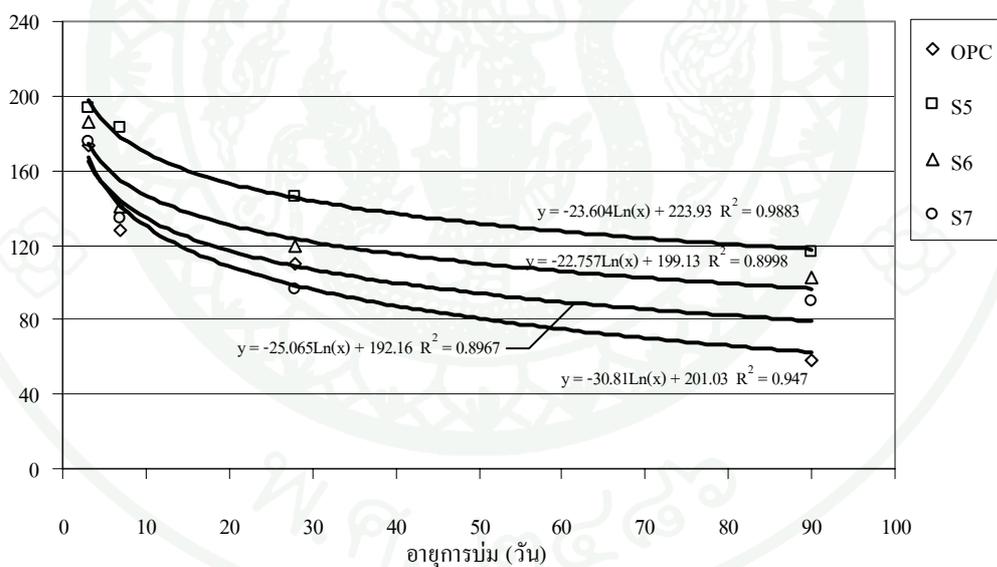
ภาพที่ 96 ปริมาณ  $C_3S$  ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 97 ปริมาณ  $C_2S$  ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆ



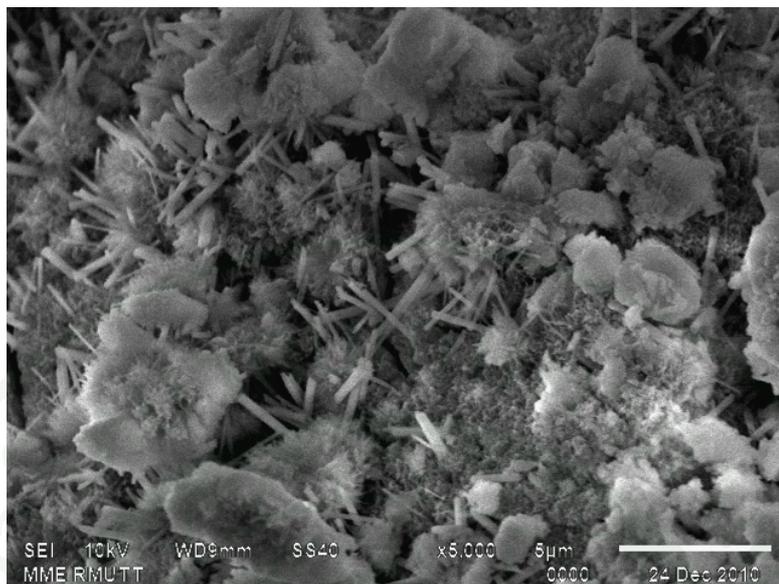
ภาพที่ 98 ปริมาณ CSH ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆ



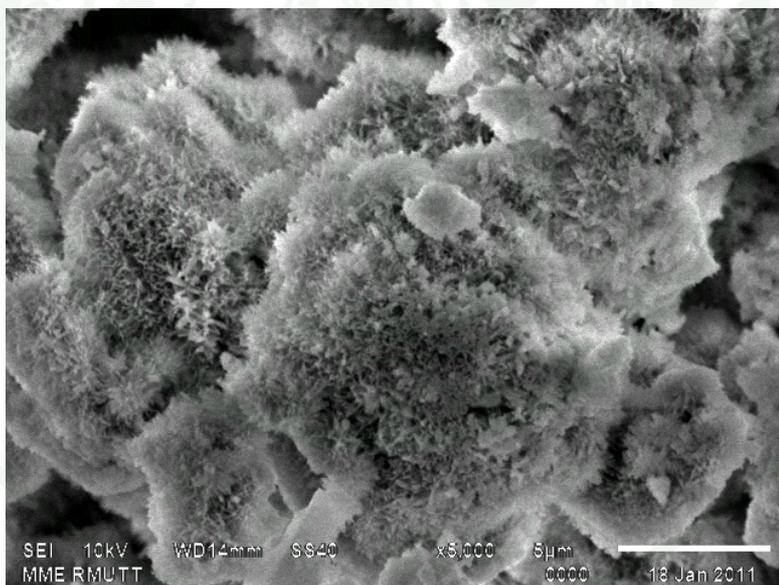
ภาพที่ 99 ปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้า สามารถสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับจุลภาคโดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้เกิดขึ้นอันจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC และปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ภาพที่ 100 แสดงสารผลิตภัณฑ์ Ettringite ของ OPC ในช่วงอายุการบ่มช่วงต้น (ภาพที่ 100 ก) ผลึกรูปคล้ายเข็มฉีดยาและเชื่อมประสานปกคลุมผิวโครงสร้าง ซึ่งทำให้โครงสร้างมีช่องว่างลดลง ในขณะที่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเกิดการรวมตัวกันของสารผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น CSH ส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัดเกิดขึ้น สารผลิตภัณฑ์ Ettringite นี้ จะมีปริมาณลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นและเปลี่ยนเป็น Monosulphate hydrate ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นรูปหกเหลี่ยมในระยะยาว ดังแสดงในภาพที่ 100(ง) ทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น

ภาพที่ 101-ภาพที่ 103 แสดงสารผลิตภัณฑ์ Ettringite และ Monosulphate hydrate ของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ซึ่งโครงสร้างแตกต่างจาก OPC จากภาพ SEM สังเกตพบว่า CSH ปกคลุมพื้นผิวในปริมาณที่น้อยกว่ากรณี OPC ซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตาม CSH สามารถสังเกตการเชื่อมประสานโครงสร้างพื้นผิวของ CSH ที่อายุการบ่มในระยะยาว ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการพัฒนากำลังและความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น CSH เกิดขึ้นเร็วกว่า สังเกตได้จากภาพที่ 103(ข) สำหรับภาพที่ 103(ค) แสดงการเปลี่ยนจาก Ettringite เป็น Monosulphate hydrate

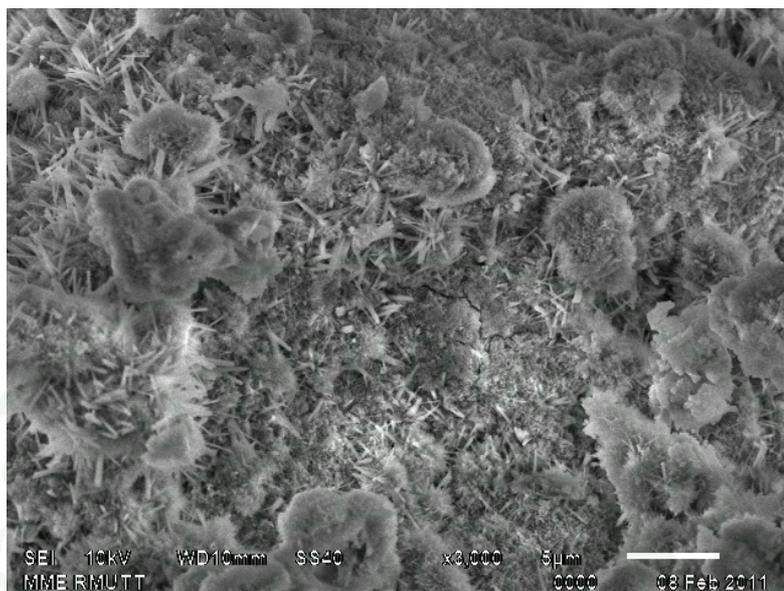


(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 5000)

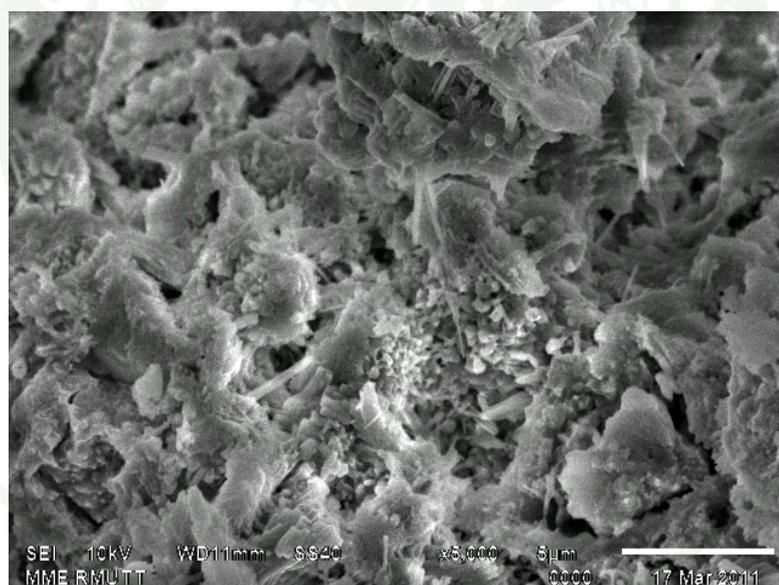


(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5000)

ภาพที่ 100 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ

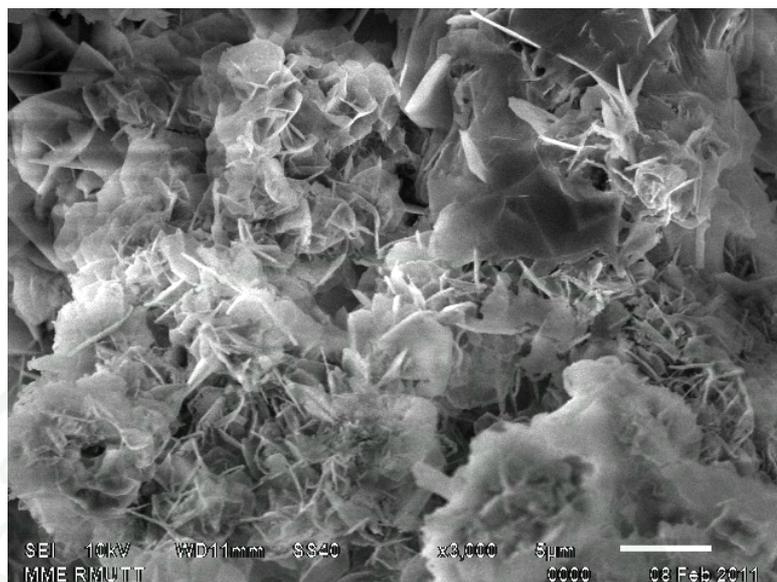


(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)

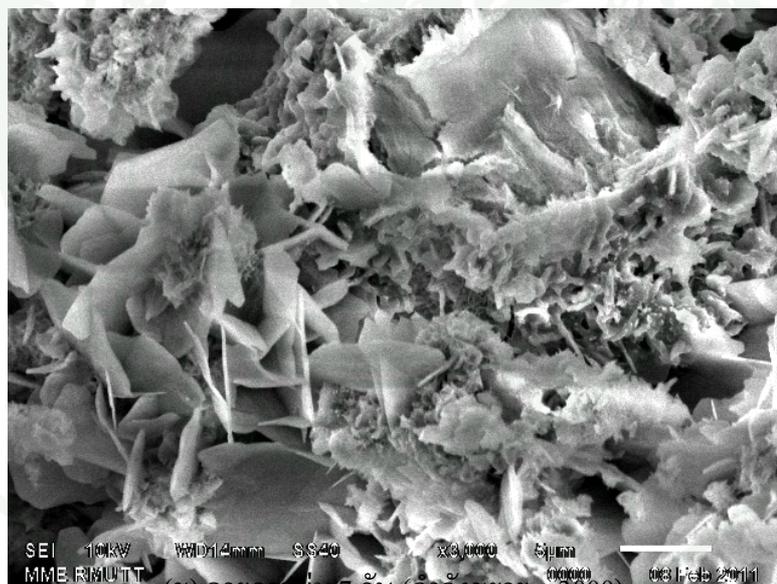


(ง) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 5000)

ภาพที่ 100 (ต่อ)

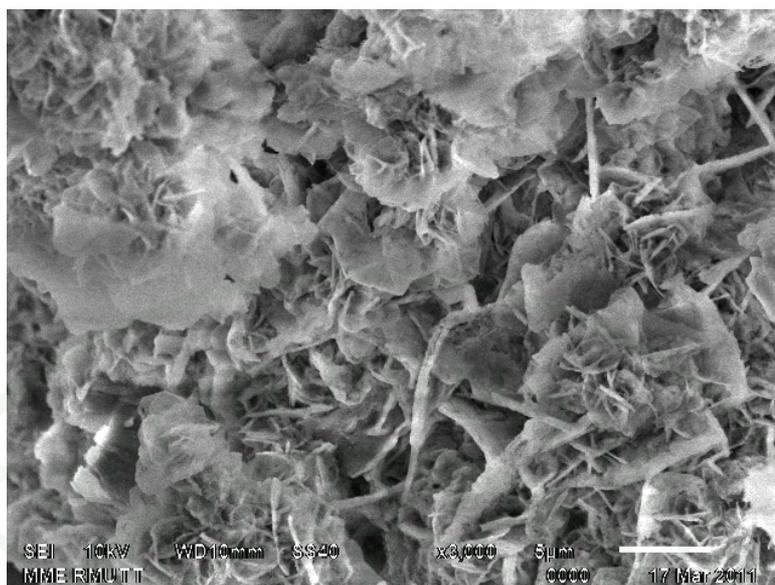


(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 3000)

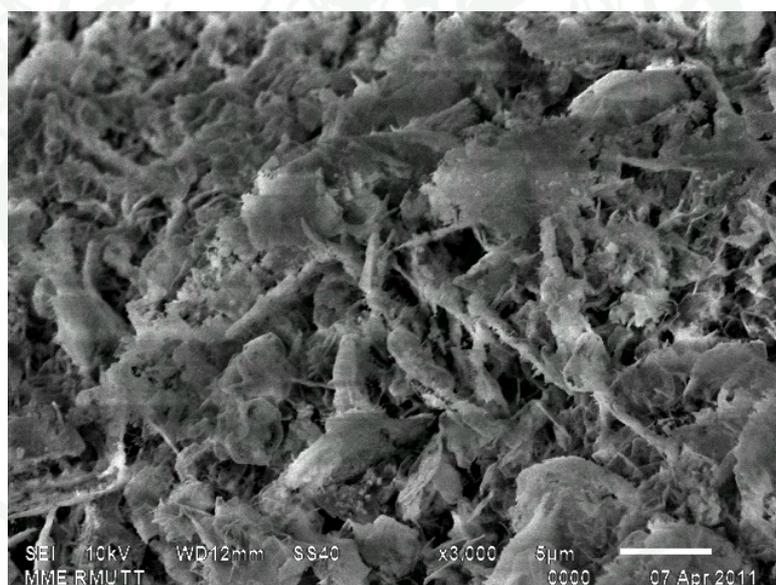


(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 101 ปฏิกริยาไฮดรเจนของ SS เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ

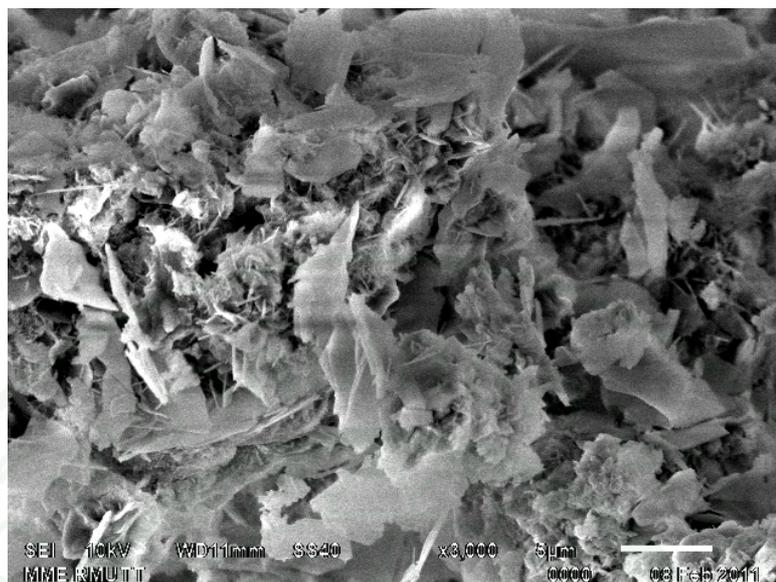


(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)

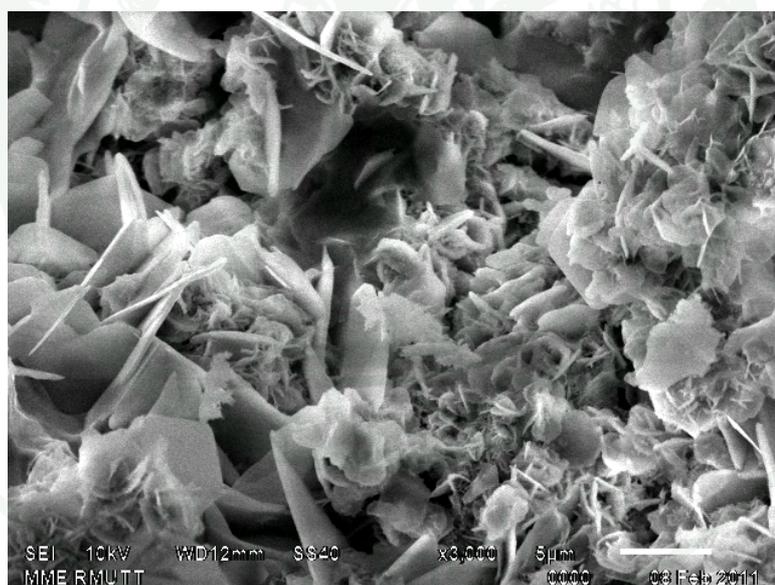


(ง) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 101 (ต่อ)

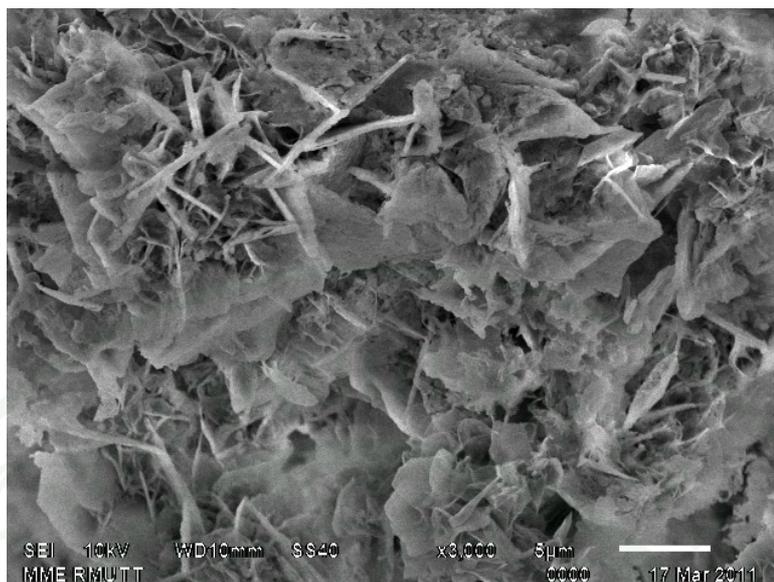


(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 3000)

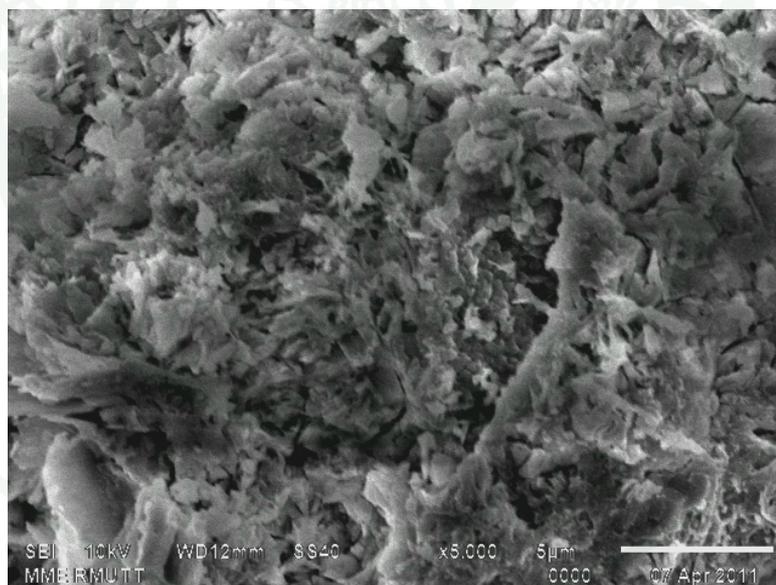


(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 102 ปฏิกริยาไฮเดรชันของ S6 เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ

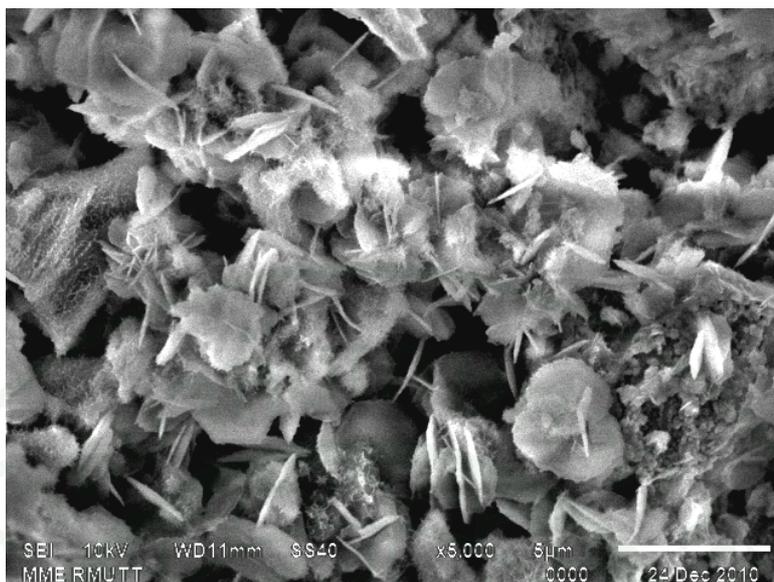


(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)

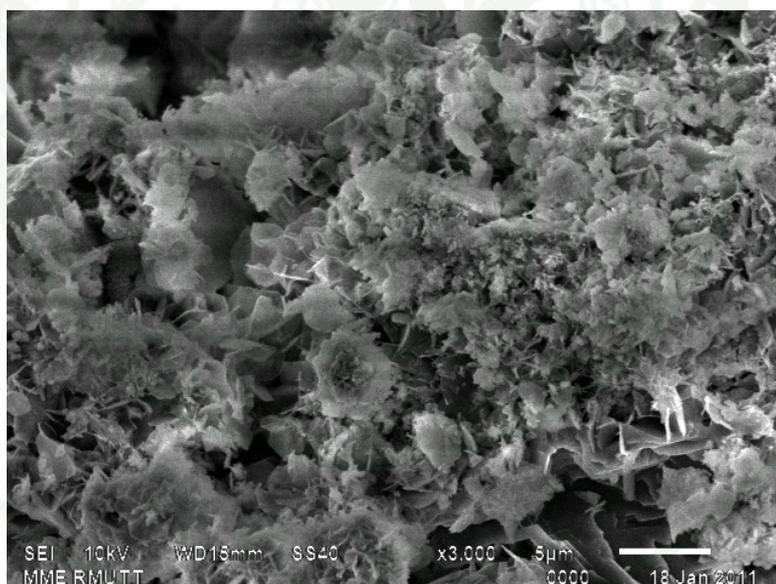


(ง) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 102 ปฏิกิริยาไฮดรเจนของ S6 เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ (ต่อ)

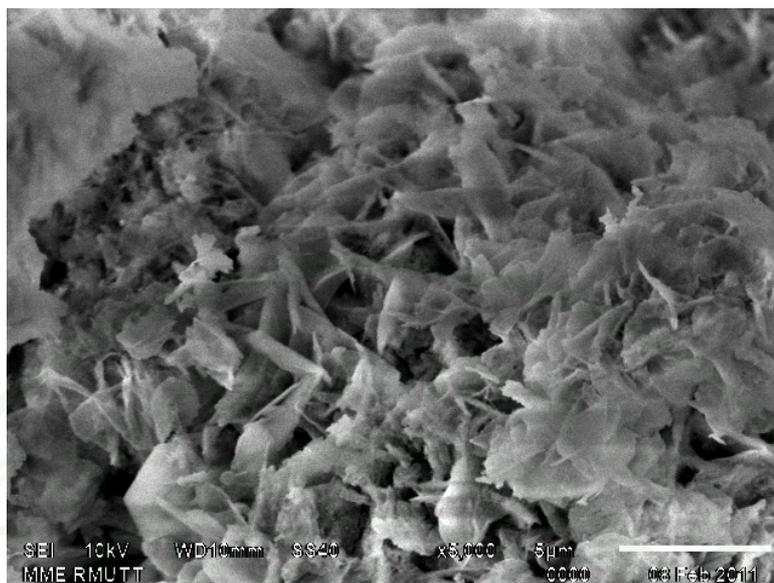


(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 5000)

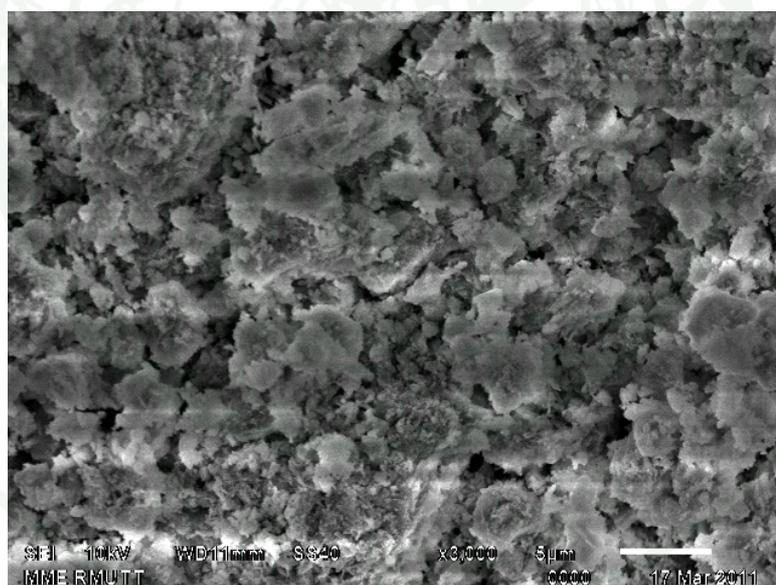


(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 103 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ S7 เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ



(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)



(ง) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 103 (ต่อ)

### สมบัติของสารเชื่อมประสาน BCM

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารเชื่อมประสาน BCM โดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) เช่นเดียวกันกับ OPC และสารเชื่อมประสาน GCM ดังแสดงในตารางที่ 41 พบว่า BCM มีออกไซด์หลัก (Major Oxides) เกิดขึ้นโดยมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>), อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เท่ากับ 64.31 %, 18.42 %, 9.25 % และ 2.63% ตามลำดับ

ตารางที่ 41 องค์ประกอบทางเคมีของ BCM และ OPC

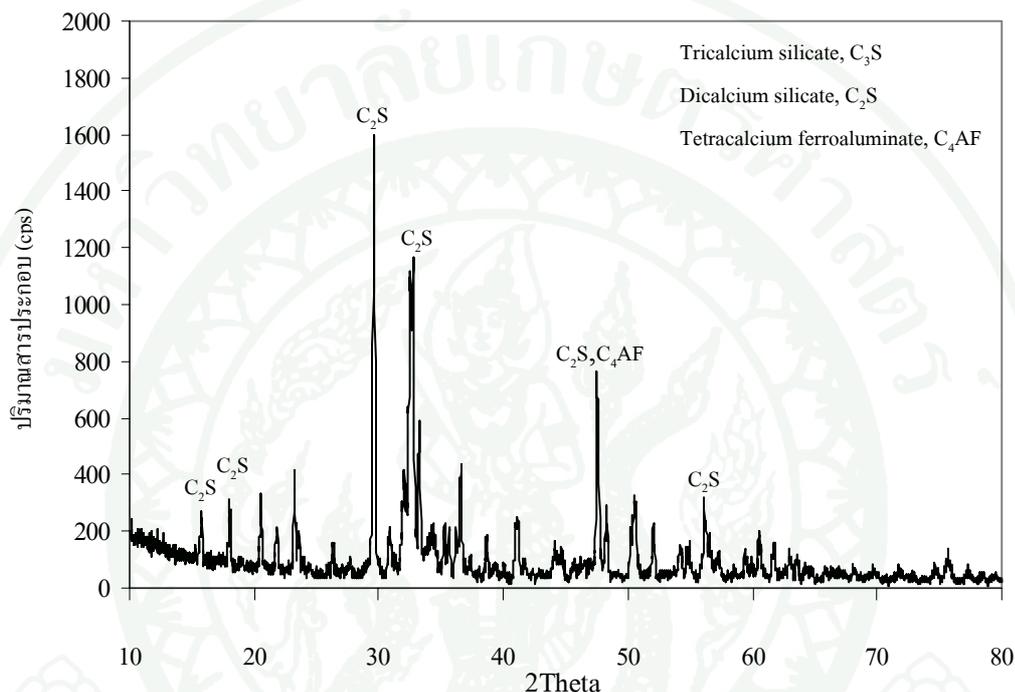
ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (%)							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI	Free lime
BCM	56.85	20.82	13.37	1.86	0.83	0.06	3.03	0.43
OPC	65.63	1.06	6.05	3.11	1.07	2.67	3.27	1.19

ตารางที่ 42 สารประกอบหลัก C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF ของ BCM และ OPC

ตัวอย่าง	สารประกอบหลัก (%)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
BCM	-19.56	74.42	32.25	5.72
OPC	60.43	12.83	10.78	9.45

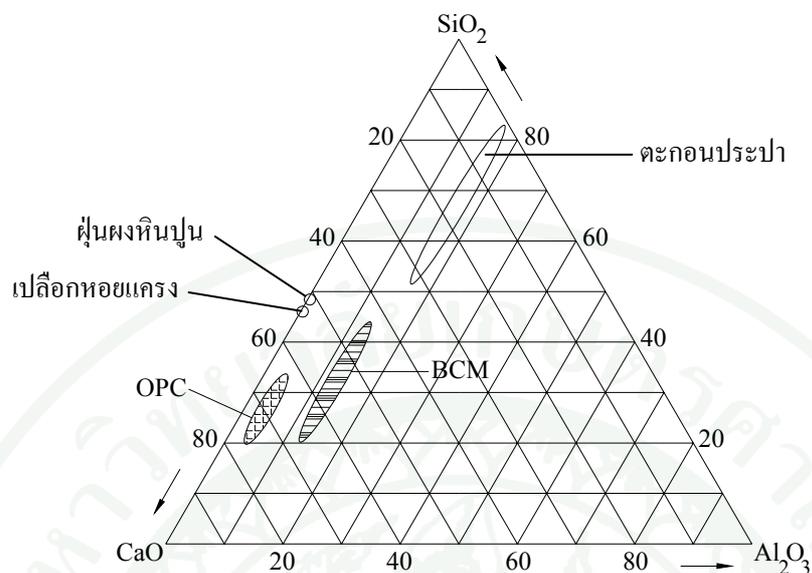
อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการวิเคราะห์หาคำนวนหาปริมาณสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ตามสมการที่เสนอ โดย Bouge (1955) พบว่าสารเชื่อมประสาน BCM มีปริมาณของ C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF เท่ากับ -19.56 %, 74.42 %, 32.25 % และ 5.73% ตามลำดับ (ตารางที่ 42) เมื่อเปรียบเทียบกับ OPC สารเชื่อมประสาน BCM มีปริมาณสารประกอบที่แตกต่างกับ OPC อย่างชัดเจน โดยเฉพาะค่าของ C<sub>3</sub>S ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจนติดลบ และ C<sub>2</sub>S ซึ่งมีค่าสูงกว่า OPC ประมาณ 6 เท่า

จากการวิเคราะห์ XRD ในภาพที่ 104 พบว่าสารเชื่อมประสาน BCM มีสารประกอบหลัก  $C_2S$  ในปริมาณที่มากอย่างชัดเจนซึ่งแตกต่างจากปูนซีเมนต์ OPC (ภาพที่ 74) โดยสารประกอบหลักที่เกิดขึ้นในสารเชื่อมประสาน BCM ในสภาพแห้ง (anhydrous) มีปริมาณของ  $C_2S$  สูงสุดเท่ากับ 640 cps.



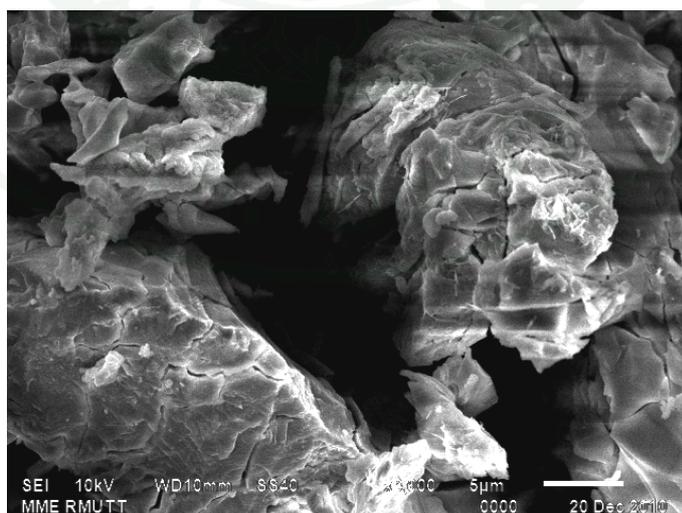
ภาพที่ 104 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของสารเชื่อมประสาน BCM (anhydrous)

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารเชื่อมประสาน BCM เปรียบเทียบกับ OPC โดยแสดงช่วงในกราฟ  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  System พบว่าสารเชื่อมประสาน BCM อยู่ในตำแหน่งที่มีระยะห่างจาก OPC และมีช่วงขององค์ประกอบที่กว้างกว่ามาก ดังแสดงตามภาพที่ 105 เมื่อเทียบกับตำแหน่งของสารเชื่อมประสาน GCM (ภาพที่ 76) พบว่าสารเชื่อมประสาน GCM อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กว่า และมีช่วงขององค์ประกอบที่แคบกว่าและใกล้เคียงกับ OPC มากกว่า



ภาพที่ 105 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> System ของ OPC และสารเชื่อมประสาน BCM

การตรวจสอบระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ตามภาพที่ 106 พบว่าอนุภาคของสารเชื่อมประสาน BCM มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน เป็นก้อนฐาน จับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคของ OPC และอนุภาคสารเชื่อมประสาน GCM ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นแหลม และมีเหลี่ยมคม



ภาพที่ 106 อนุภาคสารเชื่อมประสาน BCM (กำลังขยาย x 3,000)

อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) แสดงในตารางที่ 43 พบว่าปริมาณโลหะหนักของสารเชื่อมประสาน BCM อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ USEPA (United State Environmental Protection Agency)

ตารางที่ 43 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของสารเชื่อมประสาน BCM

ตัวอย่าง	Cu	Cd	Cr	Pb	Ni	Zn
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
BCM	14.78	0.68	21.39	3.16	9.93	29.80
USEPA	1,500	39	3,000	420	18	2,800

ผลการทดสอบความละเอียดโดยใช้เครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้แบบเบลน (ASTM C204 – 07) พบว่ามีความละเอียดเฉลี่ย 2,400 ซม<sup>2</sup>/กรัม และเมื่อทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ตามมาตรฐาน ASTM C188 จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.61 ดังแสดงตามตารางที่ 44

ตารางที่ 44 ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของ BCM

ตัวอย่าง	ความละเอียด	ความละเอียด	ความถ่วงจำเพาะ	ความถ่วงจำเพาะ
	(ซม <sup>2</sup> /กรัม)	เฉลี่ย (ซม <sup>2</sup> /กรัม)		เฉลี่ย
BCM	2,295	2,400	2.58	2.61
	2,378		2.61	
	2,445		2.63	

เมื่อนำสารเชื่อมประสาน BCM มาผสมยิปซัมเพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM โดยจะทำการหาปริมาณของยิปซัมที่เหมาะสม ซึ่งใช้วิธีเดียวกันกับการหาปริมาณยิปซัมของสารเชื่อมประสาน GCM

ตารางที่ 45 ค่ากำลังอัดของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM เมื่อผสมยิปซั่มที่อัตราส่วนต่างๆ

ปริมาณยิปซั่มที่ผสม โดยน้ำหนัก	กำลังอัด ที่อายุการบ่ม 3 วัน (ksc.)	กำลังอัดเฉลี่ย ที่อายุการบ่ม 3 วัน (ksc.)
0%	29.80	27.72
	26.15	
	27.22	
3%	29.78	27.86
	27.36	
	26.45	
4%	30.66	29.62
	29.25	
	28.95	
5%	30.92	29.56
	28.67	
	29.10	

จากตารางที่ 46 พบว่าค่าการรับกำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ต้าที่ผลิตจากสารเชื่อมประสาน BCM เมื่อผสมยิปซั่ม ณ อุณหภูมิห้องที่อัตราส่วน 0%, 3%, 4% และ 5% โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 27.27, 27.86, 29.62 และ 29.56 ksc ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้พบว่าเมื่อผสมยิปซั่มที่อัตราส่วน 3% ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าเมื่อเทียบกับการไม่ผสมยิปซั่ม แต่เมื่อผสมยิปซั่มที่อัตราส่วน 4% และ 5% ค่าการรับกำลังอัดที่ค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยในค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการผสมยิปซั่มที่ 4% ให้ค่าการรับกำลังอัดสูงสุด จึงนำสารเชื่อมประสาน BCM มาผสมยิปซั่มที่อัตราส่วน 4% โดยน้ำหนัก เพื่อผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM

เนื่องด้วยข้อจำกัดของเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง การผลิตตัวอย่างสารเชื่อมประสาน BCM ในแต่ละครั้งไม่สามารถที่จะผลิตในปริมาณครั้งละมากๆ ได้ ทำให้ปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวไม่เพียงพอ ส่งผลให้ไม่สามารถดำเนินการทดสอบได้ จึงทำให้ไม่มีผลทดสอบในส่วนนี้

กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM ผลการทดสอบตามตารางที่ 46 พบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM มีค่าเฉลี่ยที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วันเท่ากับ 29.62, 33.04, 33.35, 34.21 และ 49.84 ksc ตามลำดับ ซึ่งค่าการรับกำลังอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม

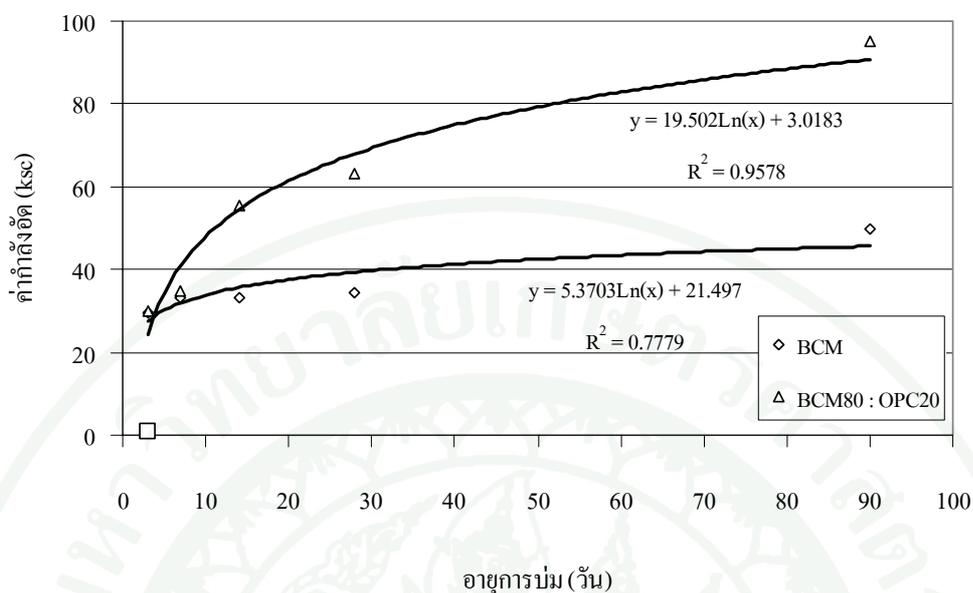
ตารางที่ 46 ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM ที่อายุการบ่มต่างๆ

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังอัดของมอร์ต้า BCM (ksc.)	กำลังอัดเฉลี่ยของ BCM (ksc.)
3	30.66	29.62
	29.25	
	28.95	
7	32.92	33.04
	32.76	
	33.45	
14	34.37	33.35
	31.56	
	34.12	
28	33.96	34.21
	33.75	
	34.93	
90	48.93	49.84
	49.68	
	50.91	

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ามอร์ต้า BCM จะมีค่าการรับกำลังอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้า OPC และมอร์ต้า GCM นั้นยังมีค่าต่ำกว่าอยู่มาก และเมื่อนำมาเทียบกับเกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้ามาตรฐานตาม ASTM C109-91 (ตารางที่ 11) พบว่ามอร์ต้า BCM มีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐานทุกช่วงอายุการบ่ม จึงได้ทดลองปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นด้วยการนำ OPC มาด้วยการแทนที่ BCM ในอัตราส่วน BCM 80 : OPC 20 ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 30.08, 34.91, 55.65, 62.97 และ 95.06 ksc. ตามลำดับ ดังแสดงตามตารางที่ 47

ตารางที่ 47 ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM 80 : OPC 20

อายุการบ่ม (วัน)	กำลังอัดของมอร์ต้า BCM 80 : OPC 20 (ksc.)	กำลังอัดเฉลี่ย (ksc.)
3	29.54	30.08
	30.23	
	30.48	
7	33.87	34.91
	34.47	
	36.38	
14	55.17	55.65
	55.64	
	56.13	
28	62.73	62.97
	63.11	
	63.08	
90	94.08	95.06
	95.28	
	95.81	



ภาพที่ 107 ค่าการรับกำลังอัดของมอร์ต้า BCM และมอร์ต้า BCM 80 : OPC 20

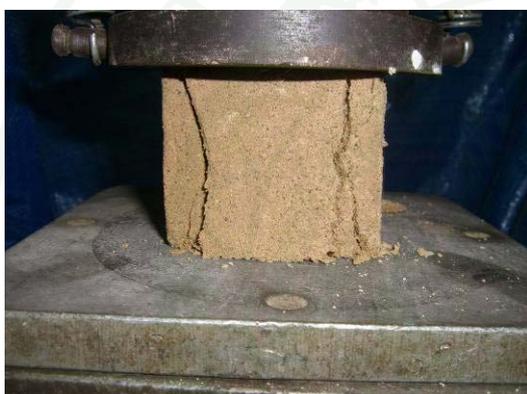
จากการสังเกตลักษณะการวิบัติของมอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่มต่างๆ ดังแสดงตามภาพที่ 108 พบว่าจะเกิดระนาบการวิบัติในลักษณะที่คล้ายกันคือ เกิดการวิบัติในลักษณะเกือบจะแนวตั้งในทิศทางเดียวกันกับแรงที่มากระทำ และมีอนุภาคแตกร่วน แสดงว่ามอร์ต้า BCM นี้ยังมีแรงยึดเหนี่ยวรั้งกันระหว่างอนุภาคค่อนข้างต่ำ ทำให้มอร์ต้ารับกำลังอัดได้ไม่สูง อย่างไรก็ตามปูนสังเคราะห์ BCM ยังมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์



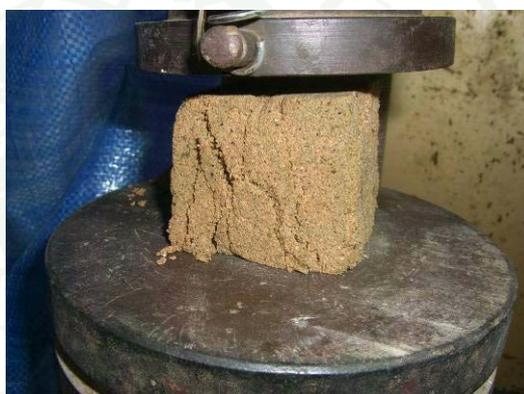
(ก) ก่อนทดสอบ



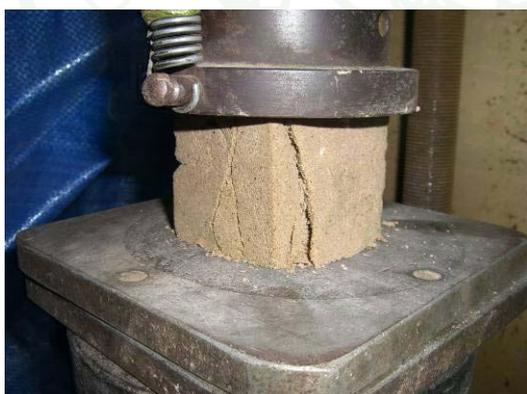
(ข) 3 วัน



(ค) 7 วัน



(ง) 14 วัน

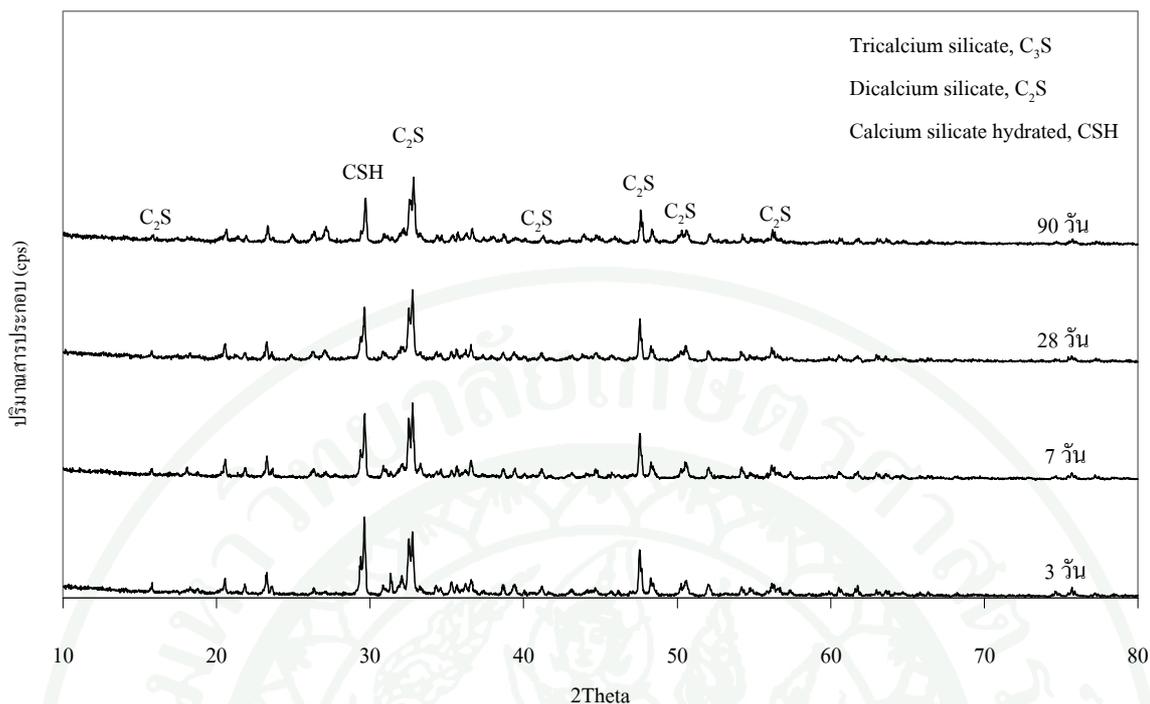


(จ) 28 วัน



(ฉ) 90 วัน

ภาพที่ 108 การวิบัติของมอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 109 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ BCM ที่อายุการบ่มต่างๆ

เมื่อนำซีเมนต์เพสต์ของ BCM มาทำการวิเคราะห์ XRD ที่อายุการบ่มต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 109 พบว่าซีเมนต์เพสต์ BCM มี  $C_2S$  เกิดขึ้นเช่นเดียวกับ OPC จากตารางที่ 48 และภาพที่ 110 พบว่า ปริมาณการเกิดของ  $C_2S$  มีแนวโน้มการเกิดที่ไม่ชัดเจน

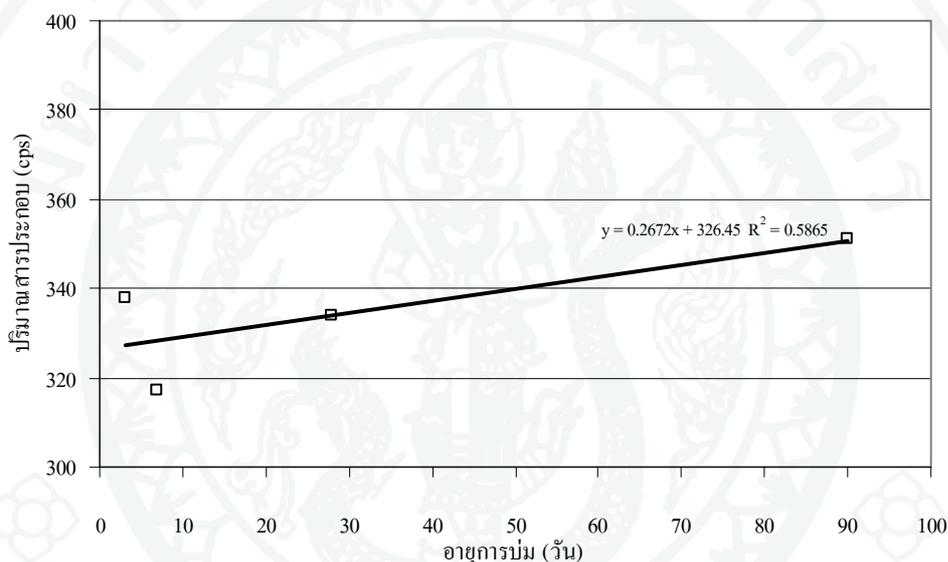
ตารางที่ 49 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ  $Ca(OH)_2$  ของ BCM เทียบกับ OPC พบว่า CSH ของ OPC มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม แต่ CSH ของ BCM มีปริมาณที่ไม่แน่นอน ทำให้เกิดการพัฒนากำลังได้ไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาปริมาณของ  $Ca(OH)_2$  พบว่ามีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ บ่งชี้ว่าการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ มีอัตราการเกิดสารผลิตภัณฑ์ค่อนข้างน้อย สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าที่มีการพัฒนากำลังได้ค่อนข้างต่ำ

ตารางที่ 48 แสดงปริมาณสารประกอบหลักของซีเมนต์เพสต์ปูน OPC และ BCM

สัญลักษณ์	$C_3S$ (cps)				$C_2S$ (cps)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
OPC	269	249	214	199	254	231	204	183
BCM	-	-	-	-	322	317	336	355

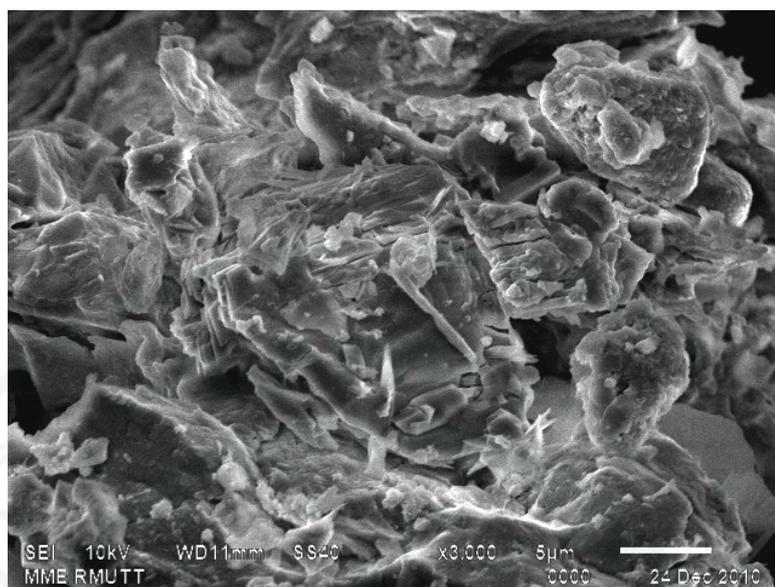
ตารางที่ 49 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ  $\text{Ca(OH)}_2$  ของซีเมนต์เฟสท์ปูน OPC และ BCM

สัญลักษณ์	CSH (cps)				$\text{Ca(OH)}_2$ (cps)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
OPC	441	479	617	836	173	128	110	58
BCM	341	262	223	129	77	105	61	78

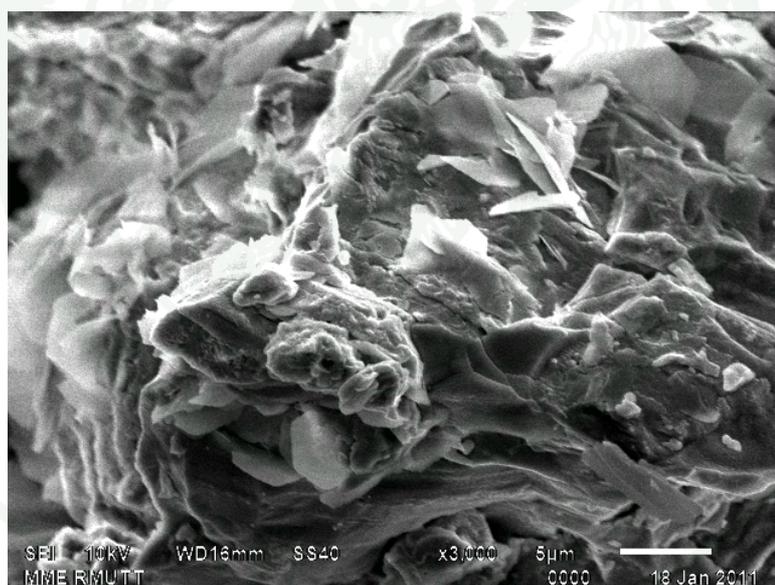


ภาพที่ 110 ปริมาณ  $\text{C}_2\text{S}$  ของ BCM เฟสท์ที่อายุการบ่มต่างๆ

จากการสังเกตโครงสร้างระดับจุลภาคของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของซีเมนต์เฟสท์ BCM ตามภาพที่ 111 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและไม่ชัดเจน และไม่ปรากฏสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ที่อายุการบ่มต่างๆ เช่นเดียวกับที่พบในโครงสร้างของซีเมนต์เฟสท์ OPC และ GCM ส่งผลให้การพัฒนากำลังก่อนข้างต่ำ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า

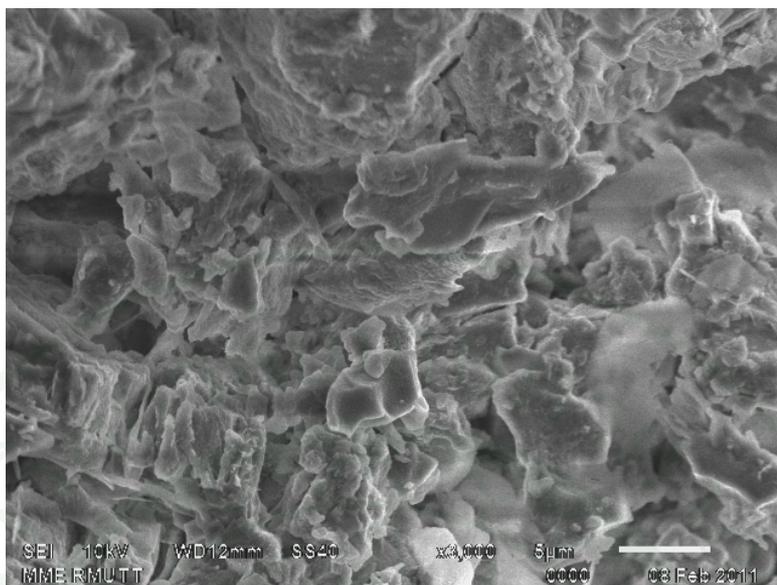


(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 5000)

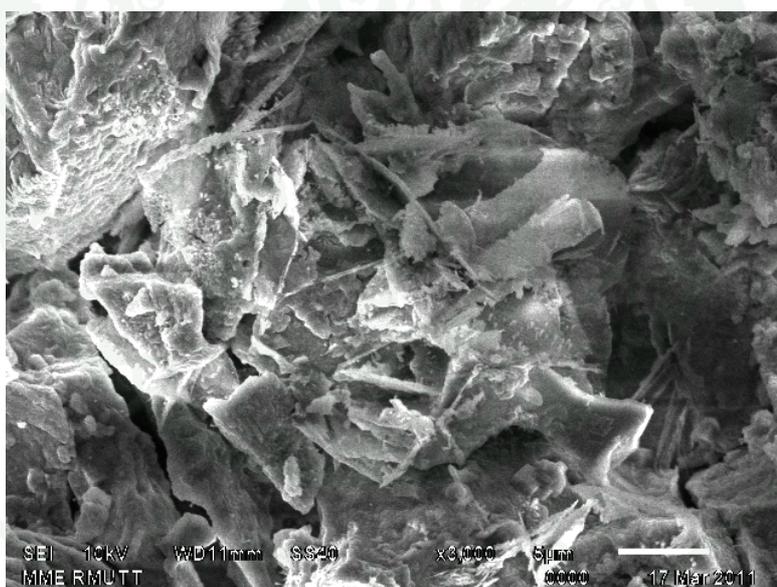


(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 111 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ BCM เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ



(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)



(ง) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 111 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ BCM เมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ (ต่อ)

## ส่วนที่ 4 การนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ประยุกต์ใช้ปรับปรุงดินเหนียวอ่อน

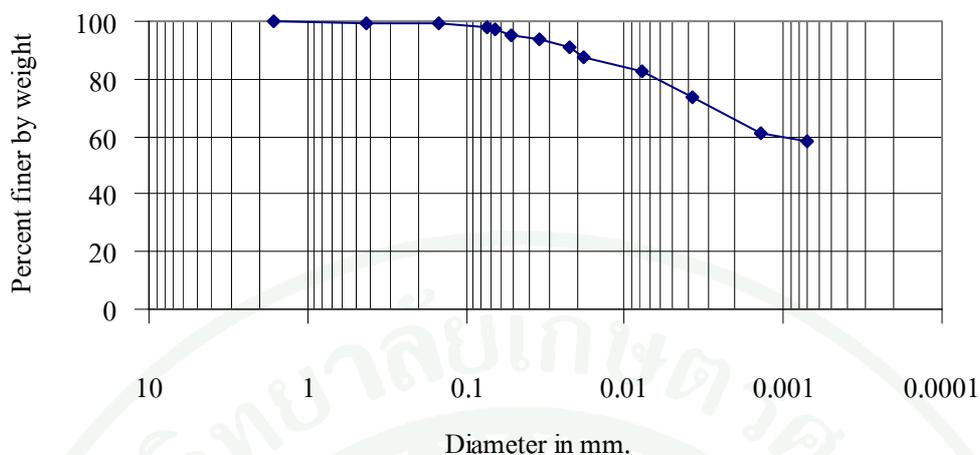
### สมบัติของดินเหนียวอ่อนก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

การทดสอบหาสมบัติพื้นฐานได้เลือกศึกษาดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay) จากบริเวณพื้นที่คลองระบายน้ำ ณ สนามบินสุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ ที่ความลึกประมาณ 3-8 ม. จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าลักษณะดินเป็นดินเหนียวอ่อนเนื้อละเอียด มีสีเทาเข้มค่อนข้างดำ

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนก่อนการปรับปรุงคุณภาพพบว่ามีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับ 101.43% จากการทดสอบ Atterberg's limits พบว่า Liquid limit เท่ากับ 99.86% Plastic limit เท่ากับ 39.71% และค่า Plasticity index เท่ากับ 60.15 % ความหนาแน่นเปียกเท่ากับ 1.51 ตัน/ม<sup>3</sup> ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.69 เมื่อจำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification และระบบ AASHTO พบว่าจัดเป็นดินประเภท CH และ A-7-5 ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีเม็ดละเอียด ดังแสดงผลการทดสอบตามตารางที่ 50 สำหรับการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินแสดงตามภาพที่ 112

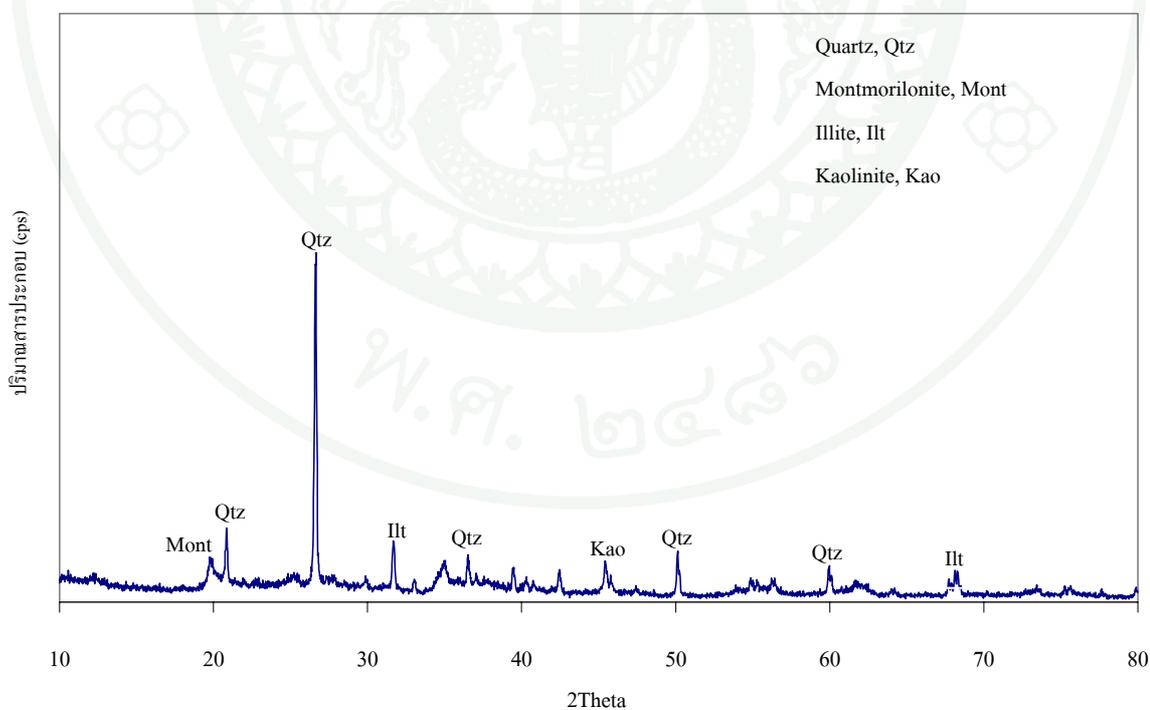
### ตารางที่ 50 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อน

สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อน	ผลการทดสอบ
ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (%)	101.43
Liquid limit (%)	99.86
Plastic limit (%)	39.71
Plasticity index (%)	60.15
ความหนาแน่นเปียก (ตัน/ม <sup>3</sup> )	1.51
ความถ่วงจำเพาะ	2.69



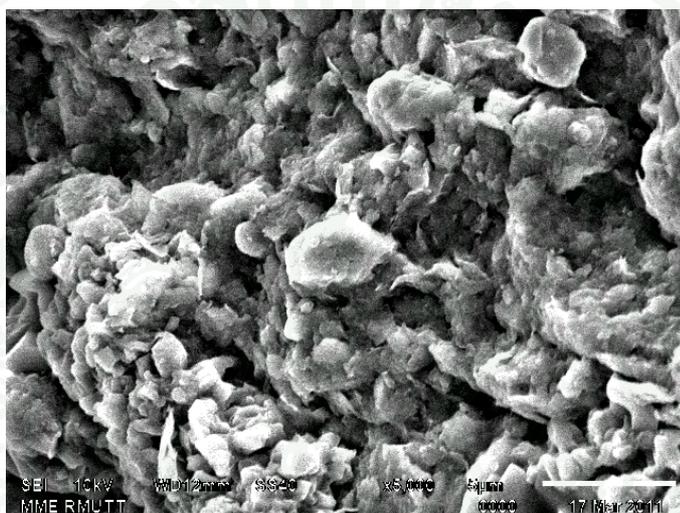
ภาพที่ 112 การกระจายตัวของขนาดเม็ดดินของดินเหนียวอ่อน

กราฟการวิเคราะห์ XRD ของดินเหนียวอ่อน แสดงตามภาพที่ 113 จากการวิเคราะห์พบว่า ดินเหนียวอ่อนประกอบด้วยแร่ดินเหนียวประเภท Montmorillonite Illite และ Kaolinite ซึ่งเป็นแร่ที่พบมากในดินจำพวกดินเหนียว นอกจากนี้ยังพบ Quartz เป็นแร่หลักซึ่งมีอยู่ในดินทุกประเภท

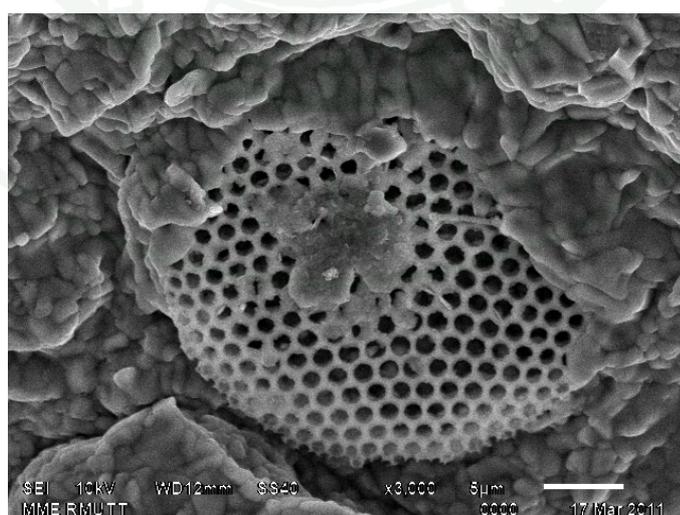


ภาพที่ 113 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของดินเหนียวอ่อนก่อนการปรับปรุงคุณภาพ

การจากศึกษาโครงสร้างดินเหนียวอ่อนในระดับจุลภาคด้วยเทคนิค SEM ตามภาพที่ 114 ซึ่งแสดงลักษณะทั่วไปของดินเหนียวอ่อน พบว่ามีลักษณะเป็นแผ่นแบนและบางคล้ายใบไม้ซ้อนทับกันอยู่อย่างหลวมๆ สำหรับภาพที่ 115 เป็นภาพของไคอะตอมซึ่งฝังตัวอยู่ในอนุภาคดินเหนียว ไคอะตอมเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวซึ่งส่วนใหญ่อาศัยอยู่ในน้ำทะเล จึงเป็นการยืนยันได้ว่าบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างดินเหนียว เคยเป็นพื้นที่ที่มีระดับน้ำทะเลหนุนสูงหรือท่วมขังมาก่อน



ภาพที่ 114 ดินเหนียวอ่อน (กำลังขยาย x 3000)



ภาพที่ 115 ไคอะตอม (กำลังขยาย x 3000)

สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน ทดสอบได้จากการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test หรือ UCS หรือ  $q_u$ ) ตามมาตรฐาน ASTM D2166-97 ผลการทดสอบพบว่าค่าการรับกำลังอัดอยู่ระหว่าง 0.08-0.11 ksc ค่า Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 5.84-7.06 และค่าความไวตัวของดินเท่ากับ 6.83 ซึ่งจัดว่าเป็นดินเหนียวที่มีการเปลี่ยนรูปได้ง่าย มีการรับกำลังต่ำ และมีการยุบตัวสูง

#### ตารางที่ 51 สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน

สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน	ผลการทดสอบ
กำลังอัดแบบไม่จำกัด (ksc)	0.08-0.11
Modulus of Elasticity	5.84-7.06
ความไวตัวของดิน	6.83
แรงคูเมตริกของดิน (kPa)	2.03

#### สมบัติของดินเหนียวอ่อนหลังถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

การนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์มาประยุกต์ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน จะนำเฉพาะปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเท่านั้น เนื่องจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มีอัตราการพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าปูนซีเมนต์สังเคราะห์ BCM ซึ่งจะใช้ตัวอย่าง S5, S6 และ S7 เป็นสารผสมเพิ่มกับดินเหนียวอ่อนเพื่อผลิตตัวอย่างดินซีเมนต์ เปรียบเทียบกับดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย OPC โดยใช้ปริมาณสารผสมเพิ่ม 200 กก./ดิน 1 ม<sup>3</sup> ตามข้อเสนอแนะของ DOH and JICA (1998) ดังแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 52

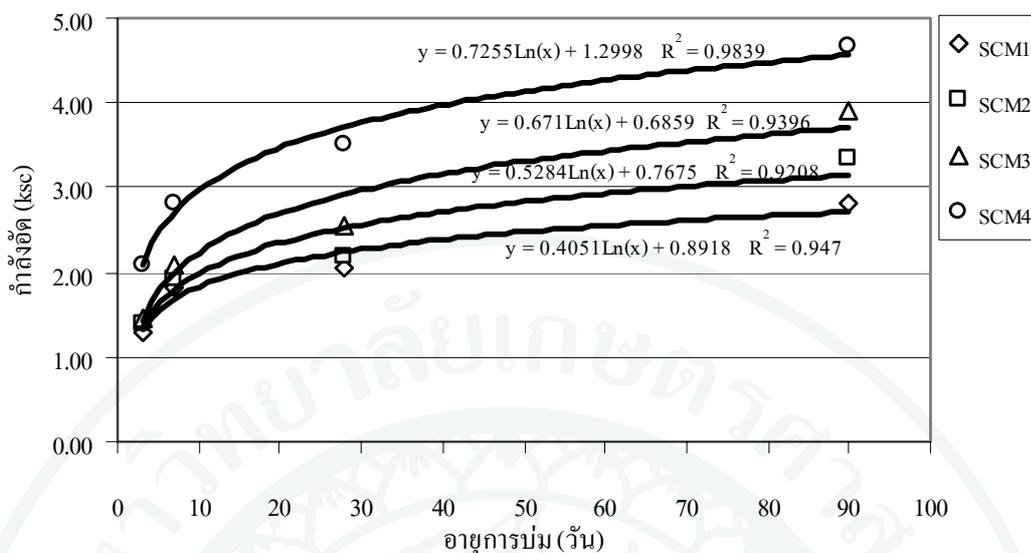
#### ตารางที่ 52 สัญลักษณ์และรายละเอียดตัวอย่างดินซีเมนต์

ตัวอย่าง	สารผสมเพิ่ม
SCM1	OPC (ความละเอียด 3,200 ซม <sup>2</sup> /กรัม)
SCM2	S5 (ความละเอียด 4,300 ซม <sup>2</sup> /กรัม)
SCM3	S6 (ความละเอียด 5,300 ซม <sup>2</sup> /กรัม)
SCM4	S7 (ความละเอียด 6,600 ซม <sup>2</sup> /กรัม)

ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของดินซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 53 พบว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มีค่าการรับกำลังอัดสูงกว่าดินซีเมนต์ที่ผสมด้วย OPC ที่อายุการบ่มเดียวกันในทุกๆ ตัวอย่าง ค่าการรับกำลังอัดของดินซีเมนต์ SCM 4 มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 2.083, 2.818, 3.525 และ 4.664 ksc ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ มีค่ารับกำลังอัดสูงสุดของทุกตัวอย่าง ค่ารับกำลังอัดเฉลี่ยของดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ เรียงจากมากไปน้อยได้แก่ SCM4 > SCM3 > SCM2 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบการรับกำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามค่าความละเอียดที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 53 ค่าการรับกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

ตัวอย่าง	กำลังอัด (ksc)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
SCM1	1.29	1.75	1.98	2.70
	1.30	1.80	2.07	2.77
	1.33	1.87	2.10	2.95
เฉลี่ย	1.31	1.81	2.05	2.81
SCM2	1.33	1.85	2.16	3.19
	1.37	1.90	2.18	3.40
	1.44	1.97	2.24	3.42
เฉลี่ย	1.38	1.91	2.19	3.34
SCM3	1.45	2.01	2.48	3.86
	1.47	2.11	2.58	3.92
	1.48	2.18	2.60	3.98
เฉลี่ย	1.47	2.10	2.55	3.92
SCM4	1.95	2.64	3.43	4.51
	2.12	2.79	3.53	4.67
	2.18	3.02	3.62	4.81
เฉลี่ย	2.08	2.82	3.53	4.66



ภาพที่ 116 การพัฒนารับกำลังอัดของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

ภาพที่ 116 แสดงการพัฒนารับกำลังอัดของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่ม ที่อายุการบ่มในระยะสั้น (Short term) 3 และ 7 วัน กำลังของดินซีเมนต์ SCM1, SCM2 และ SCM3 มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.3-2.1 ksc โดยประมาณ ซึ่งไม่แตกต่างกัน ส่วน SCM4 มีค่ารับกำลังอัดค่อนข้างแตกต่างจากดินซีเมนต์ทั้ง 3 ตัวอย่างก่อนหน้านี้ โดยมีค่าเฉลี่ยที่อายุการบ่ม 7 วันเท่ากับ 2.8 ksc ดินซีเมนต์ SCM3 และ SCM4 เริ่มมีค่ารับกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นแตกต่างจาก SCM1 และ SCM2 ที่อายุการบ่ม 28 วัน สำหรับค่าการรับกำลังอัดที่อายุการบ่มในระยะยาว (Long term) 90 วัน พบว่าดินซีเมนต์ SCM4 มีค่ารับกำลังอัดสูงสุด และมีอัตราการพัฒนาของกำลังอัดสูงขึ้นในทุกช่วงอายุการบ่มอย่างชัดเจน ดินซีเมนต์ซึ่งถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าดินซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย OPC ในทุกตัวอย่าง และทุกช่วงอายุการบ่ม

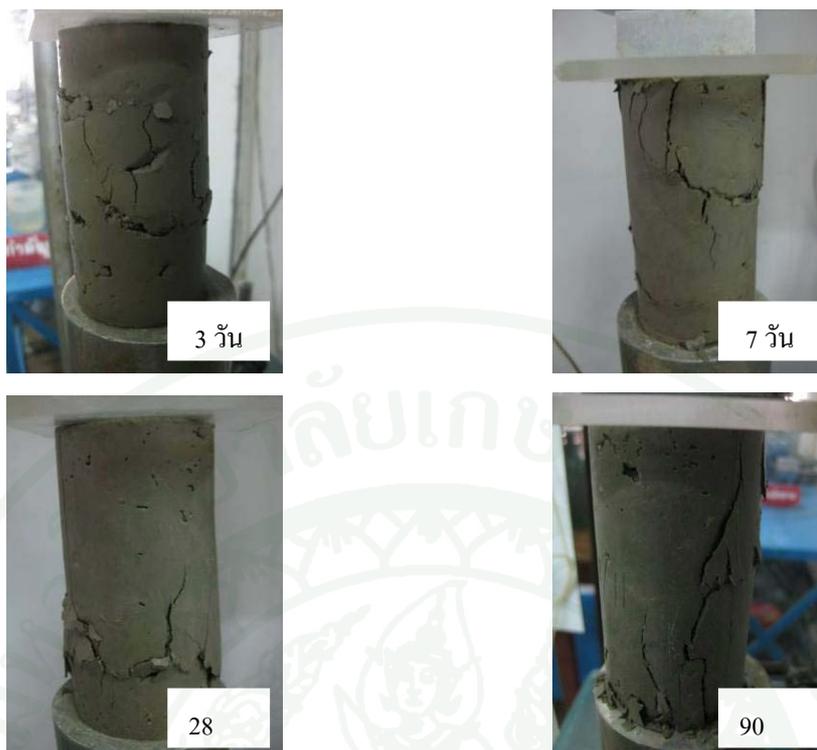
ภาพที่ 117 - ภาพที่ 120 แสดงการวิบัติของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ พบว่าดินซีเมนต์ OPC และ GCM มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน เนื่องจากการพัฒนากำลัง ทำให้กลายเป็นวัสดุที่และเปราะมากขึ้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินซีเมนต์ตามภาคผนวก ข พบว่าดินซีเมนต์ OPC มีเปอร์เซ็นต์ความเครียดต่ำกว่าดินซีเมนต์ GCM เล็กน้อย บ่งชี้ว่าเป็นวัสดุที่มีความเปราะมากกว่าดินซีเมนต์ GCM



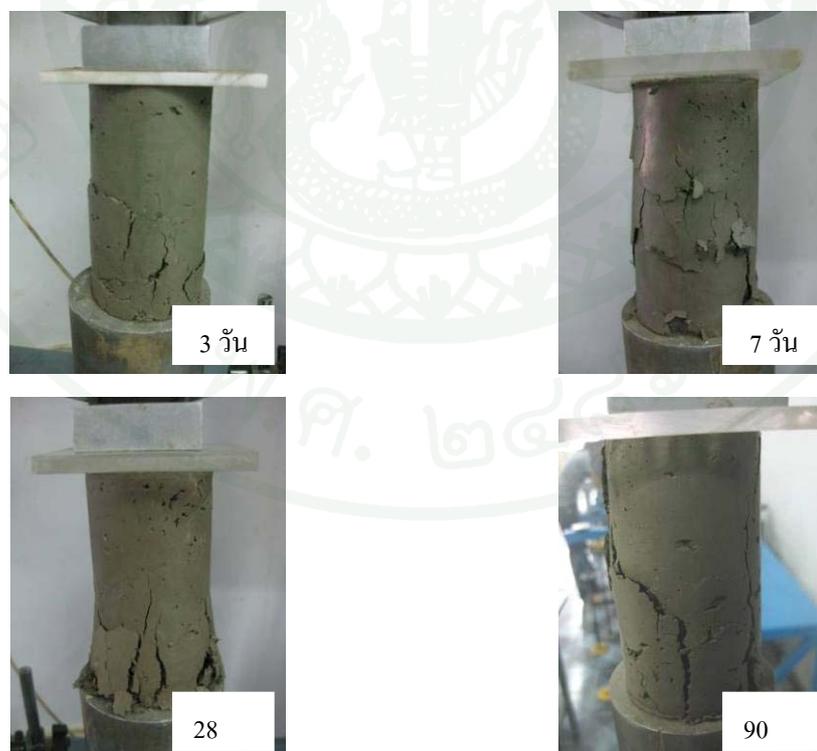
ภาพที่ 117 การวิบัติของดินซีเมนต์ SCM1 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 118 การวิบัติของดินซีเมนต์ SCM2 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 119 การวิบัติของดินซีเมนต์ SCM3 ที่อายุการป่มต่างๆ



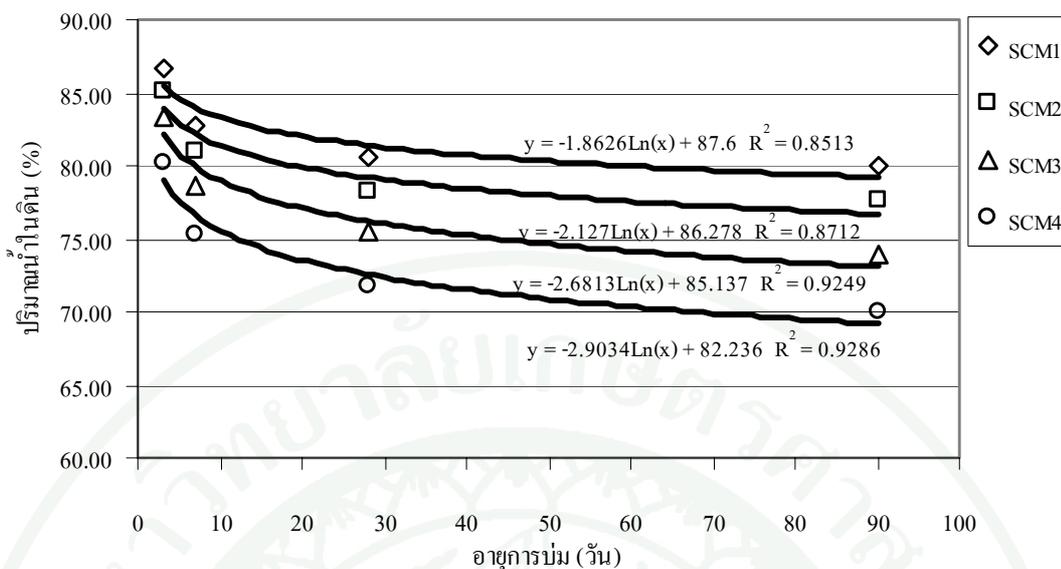
ภาพที่ 120 การวิบัติของดินซีเมนต์ SCM4 ที่อายุการป่มต่างๆ

ตารางที่ 54 ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ (Water content) เป็นเปอร์เซ็นต์ ที่อายุการบ่มต่างๆ

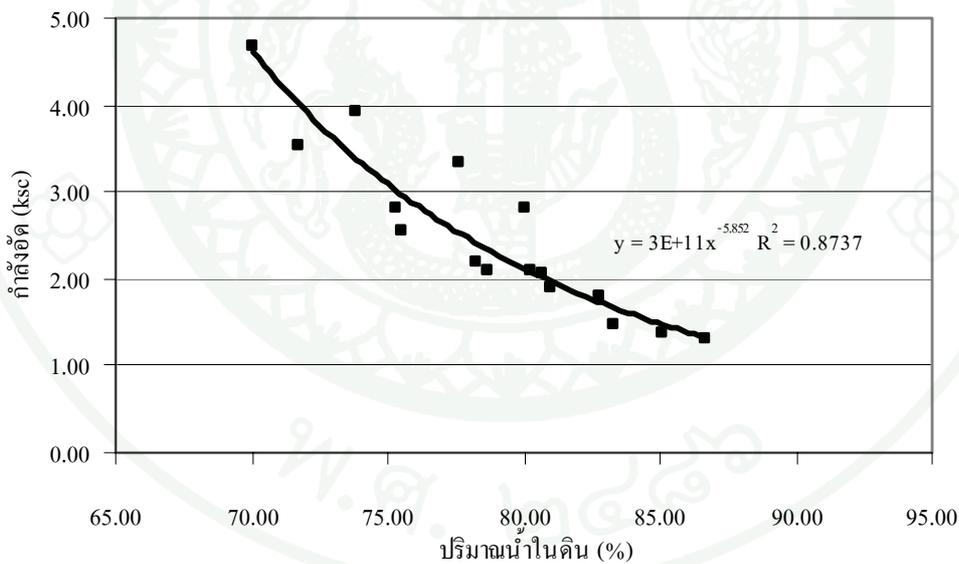
ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ (%)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
SCM1	86.811	81.953	80.781	79.932
	86.162	82.878	80.193	80.147
	87.224	83.422	80.938	79.981
เฉลี่ย	86.732	82.751	80.637	80.020
SCM2	84.602	80.553	78.132	77.912
	85.072	81.281	78.171	77.978
	85.759	81.058	78.457	76.952
เฉลี่ย	85.144	80.964	78.253	77.614
SCM3	83.124	78.313	74.934	73.672
	83.502	78.618	75.577	73.751
	83.448	79.112	76.021	74.079
เฉลี่ย	83.358	78.681	73.834	75.511
SCM4	80.072	74.992	71.312	69.731
	79.531	75.423	71.642	69.851
	81.168	75.637	72.260	70.478
เฉลี่ย	80.257	75.351	71.738	70.020

การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินซีเมนต์แสดงตามตารางที่ 54 และภาพที่ 121 พบว่า ปริมาณน้ำในดินมีแนวโน้มลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ดินซีเมนต์ SCM4 มีปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ต่ำสุดเมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ตัวอย่างต่างๆ ดินซีเมนต์ที่มีปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM เป็นสารผสมเพิ่มจะมีปริมาณน้ำในดินต่ำกว่าดินซีเมนต์ที่มี OPC เป็นสารผสมเพิ่มในทุกๆ ตัวอย่าง

ภาพที่ 122 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณน้ำในดิน พบว่าเมื่อกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณน้ำในดินจะมีแนวโน้มลดต่ำลง ซึ่งเกิดจากน้ำในมวลดินถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดสารผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำในมวลดินจึงมีปริมาณลดลงตามอายุการบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการรับกำลังอัด



ภาพที่ 121 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ



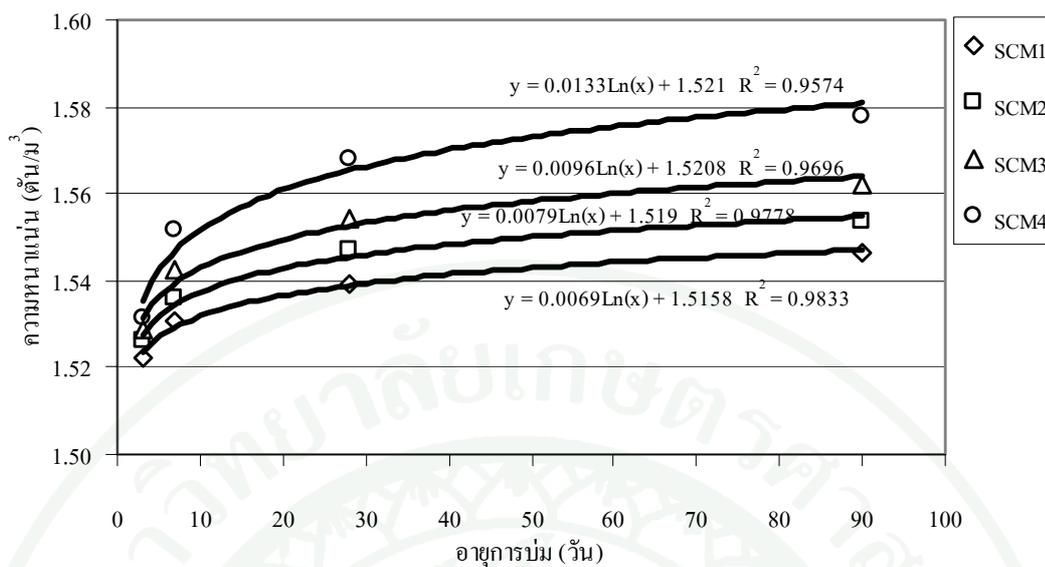
ภาพที่ 122 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณน้ำในดิน

ความหนาแน่นเปียกของดินซีเมนต์แสดงในตารางที่ 55 และภาพที่ 123 เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้น ดินซีเมนต์ SCM1 มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า SCM2, SCM3 และ SCM4 ตามลำดับ ดินซีเมนต์ที่มี OPC เป็นสารผสมเพิ่มจะมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าดินซีเมนต์ที่มีปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM เป็นสารผสมเพิ่มในทุกช่วงอายุการบ่มเดียวกัน

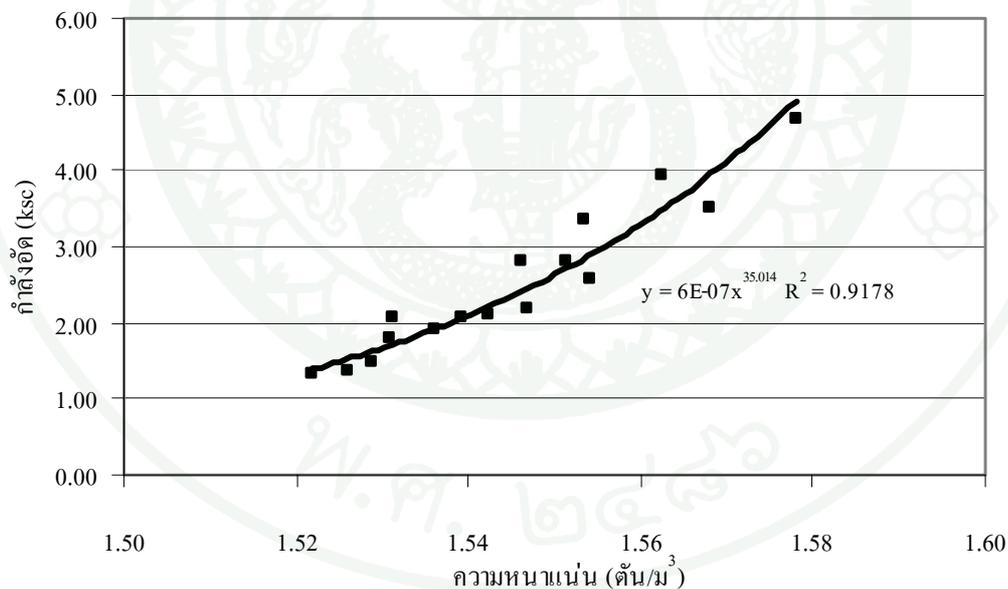
ภาพที่ 124 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความหนาแน่น พบว่าความหนาแน่นของดินซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของผลึกแข็ง ถักทอประสานปกคลุมอยู่ในมวลดิน ส่งผลทำให้ความหนาแน่นในดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 55 ความหนาแน่นเปียกของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นดินซีเมนต์ (ตัน/ม <sup>3</sup> )			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
SCM1	1.523	1.531	1.544	1.545
	1.518	1.528	1.536	1.548
	เฉลี่ย	1.525	1.534	1.538
SCM2	1.522	1.531	1.539	1.546
	1.524	1.540	1.543	1.551
	เฉลี่ย	1.526	1.530	1.548
SCM3	1.528	1.538	1.550	1.553
	1.526	1.536	1.547	1.553
	เฉลี่ย	1.527	1.538	1.553
SCM4	1.530	1.541	1.552	1.565
	1.529	1.548	1.557	1.563
	เฉลี่ย	1.529	1.542	1.554
เฉลี่ย	1.531	1.551	1.570	1.575
	1.533	1.554	1.562	1.580
	เฉลี่ย	1.530	1.549	1.572
เฉลี่ย	1.531	1.551	1.568	1.578



ภาพที่ 123 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเปียกของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

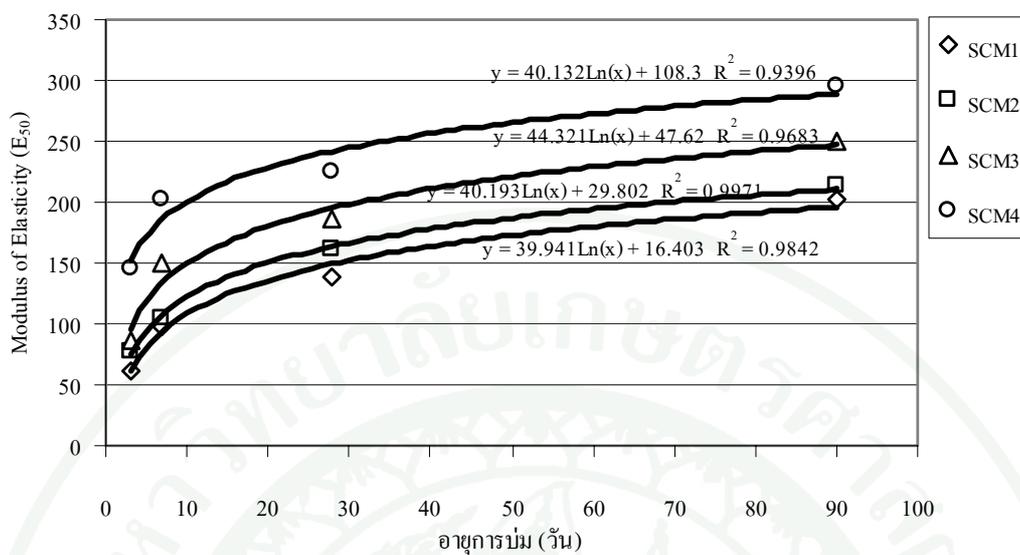


ภาพที่ 124 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความหนาแน่น

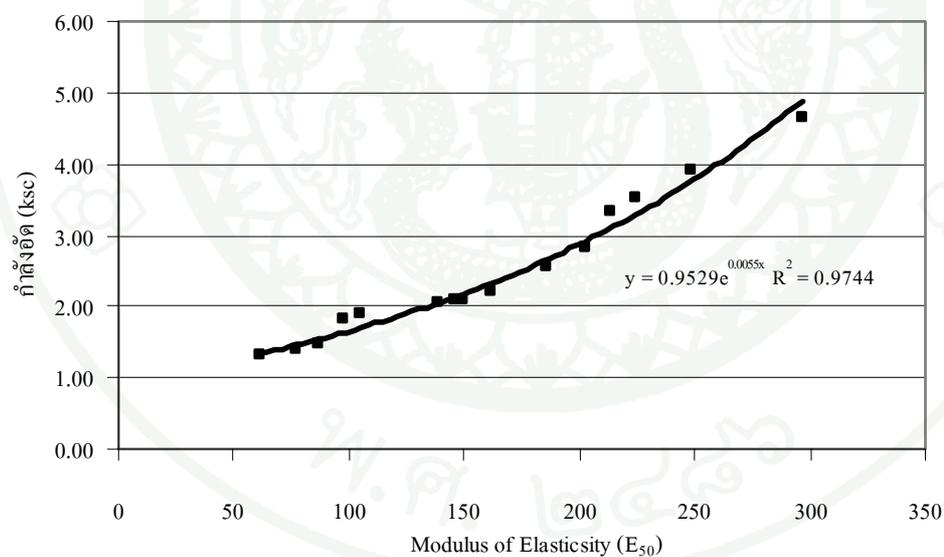
ตารางที่ 56 Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

ตัวอย่าง	Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ )			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
SCM1	57.563	96.276	137.637	201.593
	65.736	97.939	138.102	202.242
	60.395	99.367	139.919	203.309
เฉลี่ย	61.231	97.861	138.553	202.381
SCM2	69.931	104.986	166.136	209.918
	81.625	106.636	158.036	212.742
	80.063	102.694	159.929	216.419
เฉลี่ย	77.206	104.772	161.367	213.026
SCM3	84.236	145.866	182.195	244.289
	88.675	150.798	184.278	248.202
	89.142	153.584	191.333	255.019
เฉลี่ย	87.351	150.083	185.935	249.170
SCM4	145.515	197.280	222.456	285.359
	145.053	205.429	220.376	295.847
	147.373	206.654	229.394	308.285
เฉลี่ย	145.980	203.121	224.075	296.497

Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์แสดงตามตารางที่ 56 และ ภาพที่ 125 ค่า Modulus of Elasticity มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกๆ ตัวอย่างตามอายุการบ่ม ดินซีเมนต์ SCM4 ให้ค่า Modulus of Elasticity สูงสุดเมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ตัวอย่างอื่นๆ ดินซีเมนต์ SCM4 ให้ค่า Modulus of Elasticity เท่ากับ 296.497 ที่อายุการบ่ม 90 วัน ซึ่งเมื่อเทียบกับดินเหนียวอ่อนก่อนปรับปรุงคุณภาพแล้ว ค่า Modulus of Elasticity สูงขึ้นจากเดิมประมาณ 50 เท่า (Modulus of Elasticity ก่อนปรับปรุงคุณภาพมีค่าระหว่าง 5.84-7.06) ค่า Modulus of Elasticity มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าการรับกำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงตามภาพที่ 126



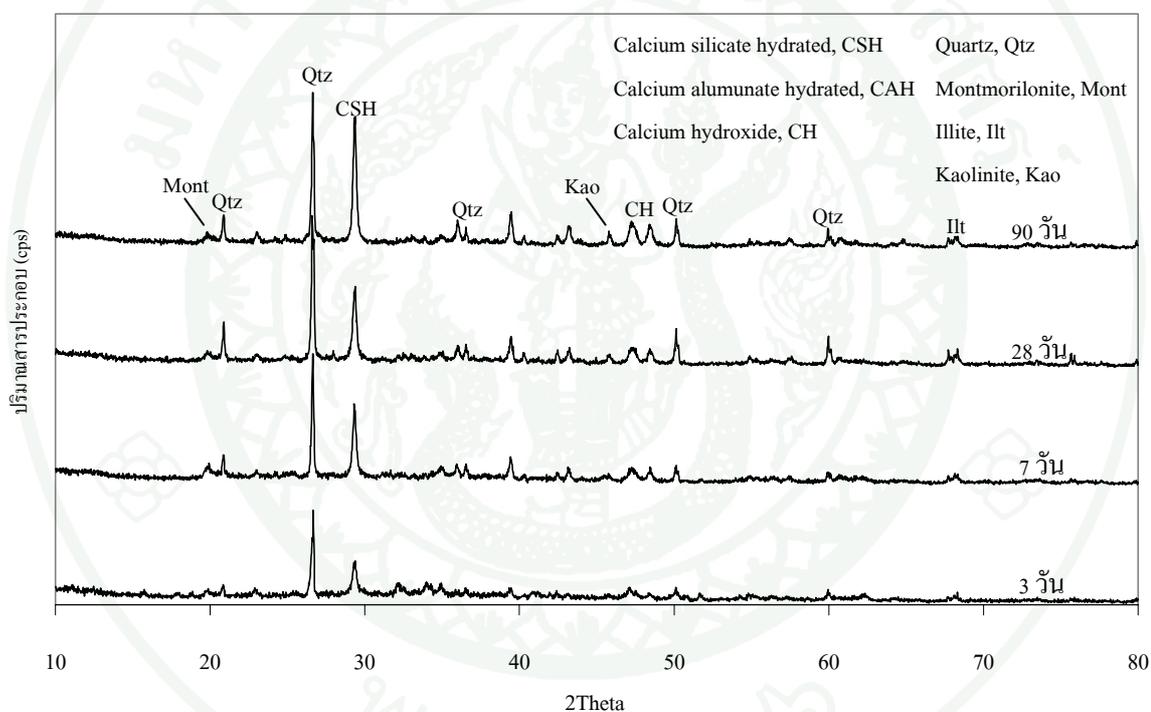
ภาพที่ 125 การเปลี่ยนแปลง Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 126 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและ Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ )

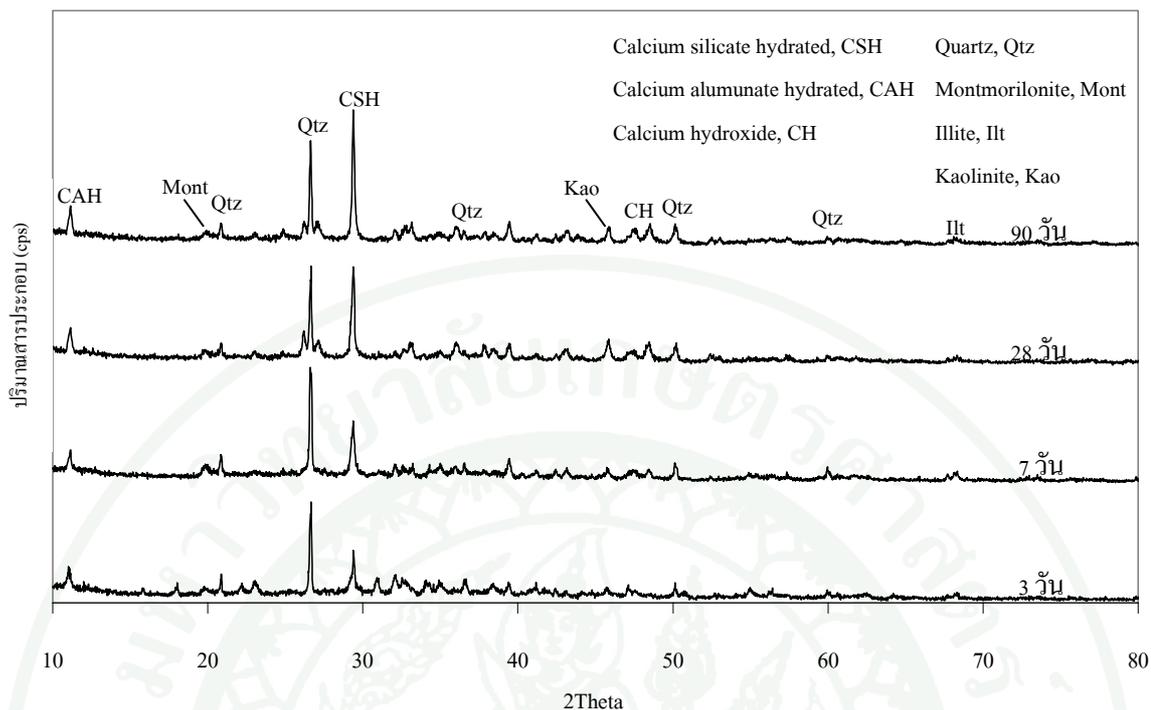
การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารผสมเพิ่ม โดยวิธีวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่างๆ

สำหรับดินซีเมนต์ทุกตัวอย่าง เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพด้วย OPC และ GCM แล้ว พบว่าเกิดสารผลิตภัณฑ์หลักจำพวก CSH และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เกิดขึ้น และมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม โดยสามารถสังเกตได้จากความสูงของพีค (Intensity) ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงตามภาพที่ 127 - ภาพที่ 130



ภาพที่ 127 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของดินซีเมนต์ SCM1 ที่อายุการบ่มต่างๆ





ภาพที่ 130 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของดินซีเมนต์ SCM4 ที่อายุการบ่มต่างๆ

กลไกปฏิกิริยาการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์สามารถอธิบายได้จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD กล่าวคือ SCM4 มีสารประกอบหลักตั้งต้นของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  ลดลงตามลำดับที่อายุการบ่ม และมีอัตราการลดลงสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่าง SCM3 และ SCM2 ที่มีความละเอียดต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับ SCM1 พบว่า SCM1 มีอัตราการลดลงของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  ค่อนข้างน้อย ดังแสดงในตารางที่ 57

ปริมาณของสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH ของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ดังแสดงในตารางที่ 58 ปริมาณ CSH ของ SCM4 มีปริมาณสูงสุดในทุกช่วงอายุการบ่มเมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ตัวอย่างอื่นๆ ปริมาณของ CSH ในดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM ทั้ง 3 ความละเอียดมีปริมาณสูงกว่าปริมาณของ CSH ในดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย OPC การเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์หลัก CSH แสดงตามภาพที่ 133 โดยปริมาณของ CSH ที่เกิดจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มีปริมาณมากขึ้นตามค่าความละเอียดที่เพิ่มขึ้นซึ่งเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่  $SCM4 > SCM3 > SCM2$  ตามลำดับ ผลการศึกษาอัตราการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  และการเกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH สอดคล้องกับผลการศึกษาที่รายงานโดย Kamon and Nontananandh (1990)

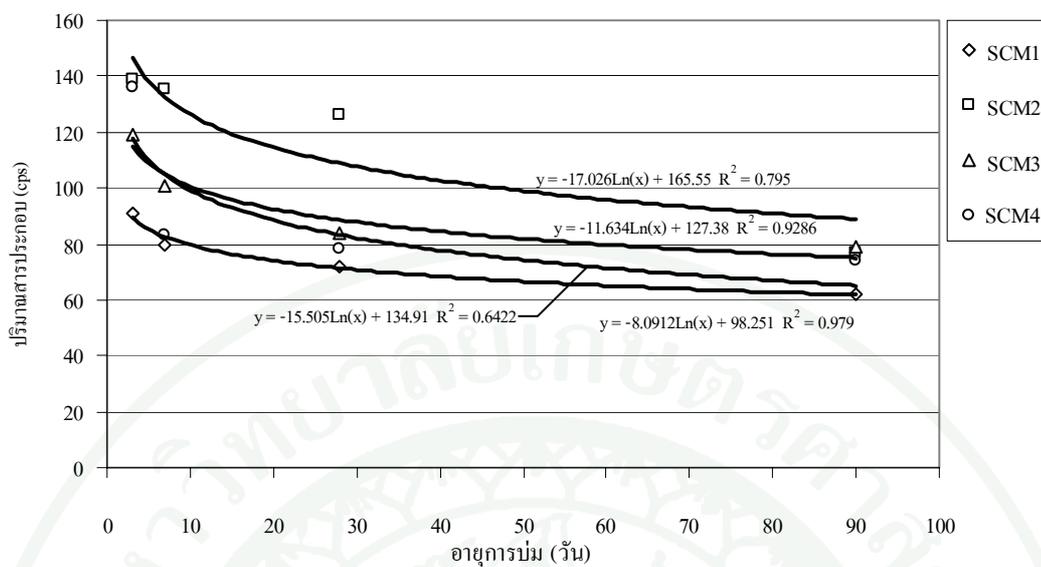
ตารางที่ 58 และภาพที่ 134 แสดงปริมาณของ CAH มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ปริมาณ CAH ของ SCM4 มีปริมาณสูงสุดในทุกช่วงอายุการบ่มเมื่อเทียบกับดินซีเมนต์ตัวอย่างอื่นๆ ปริมาณของ CAH ในดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มีปริมาณสูงกว่าปริมาณของ CAH ในดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย OPC ในขณะที่ดินซีเมนต์ SCM1 มีปริมาณของ CAH ค่อนข้างคงที่และมีแนวโน้มปริมาณการเกิดชัดเจน ทั้งนี้สอดคล้องกับปริมาณสารประกอบหลักที่คำนวณได้จากสมการของ Bouge (ตารางที่ 33) เนื่องจากปริมาณของ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มีค่าสูงกว่า OPC ทำให้สารผลิตภัณฑ์ CAH ในดินซีเมนต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM เป็นสารผสมเพิ่มมีค่าสูงกว่า CAH ของดินซีเมนต์ที่ใช้ OPC เป็นสารผสมเพิ่ม

ตารางที่ 57 แสดงปริมาณสารประกอบหลัก  $C_3S$  และ  $C_2S$  ของดินซีเมนต์

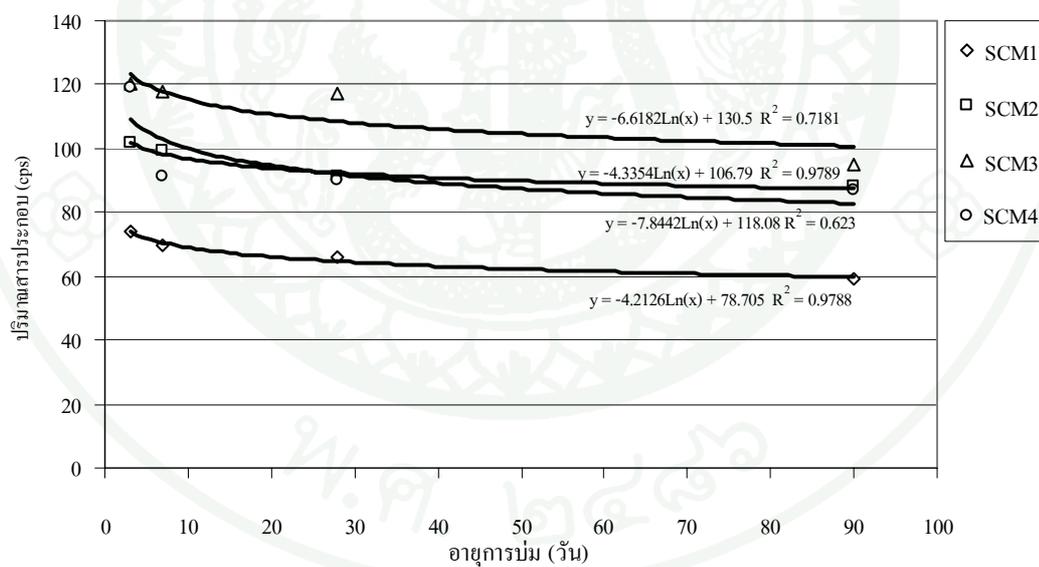
ตัวอย่าง	$C_3S$ (cps)				$C_2S$ (cps)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
SCM1	91	80	72	62	74	70	66	59
SCM2	139	135	126	77	102	99	91	88
SCM3	119	101	84	79	120	118	117	95
SCM4	136	83	78	74	119	91	90	87

ตารางที่ 58 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ CAH ของดินซีเมนต์

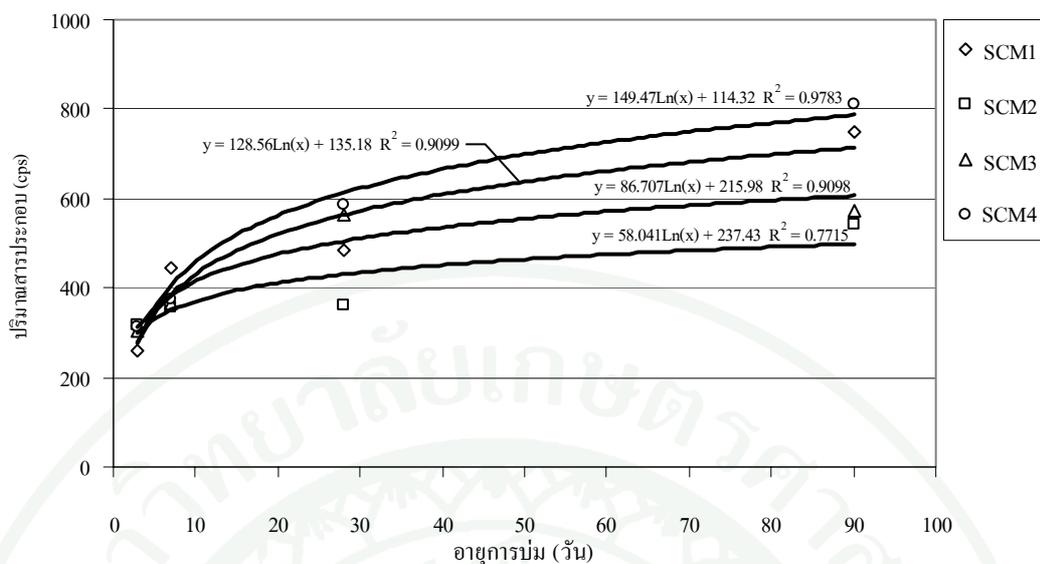
ตัวอย่าง	CSH (cps)				CAH (cps)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
SCM1	259	444	486	750	88	84	86	87
SCM2	318	359	363	541	171	198	205	212
SCM3	305	366	564	572	162	192	207	219
SCM4	311	374	586	812	175	203	226	247



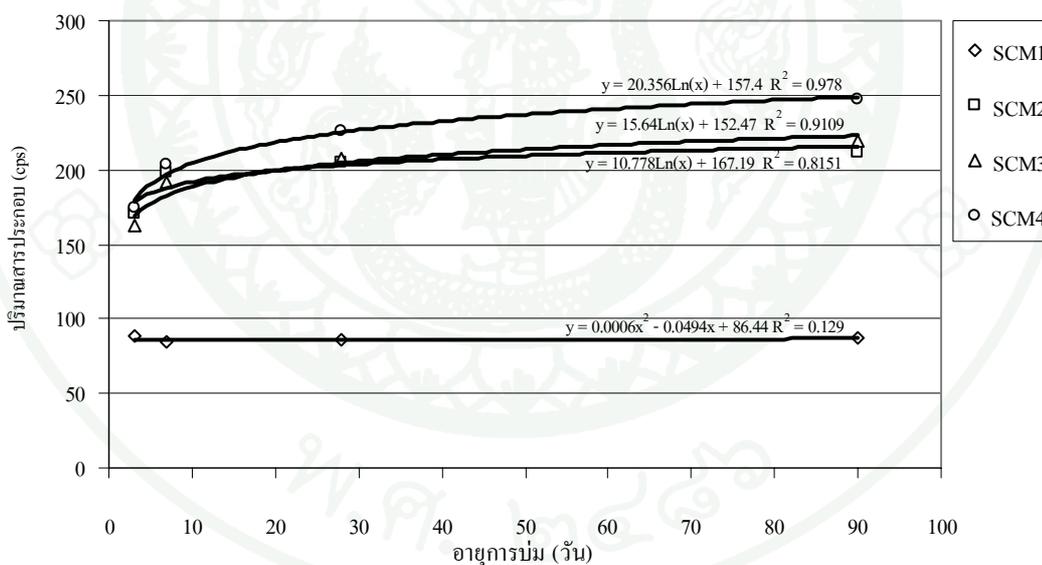
ภาพที่ 131 ปริมาณ  $C_3S$  ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 132 ปริมาณ  $C_2S$  ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 133 ปริมาณ CSH ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ



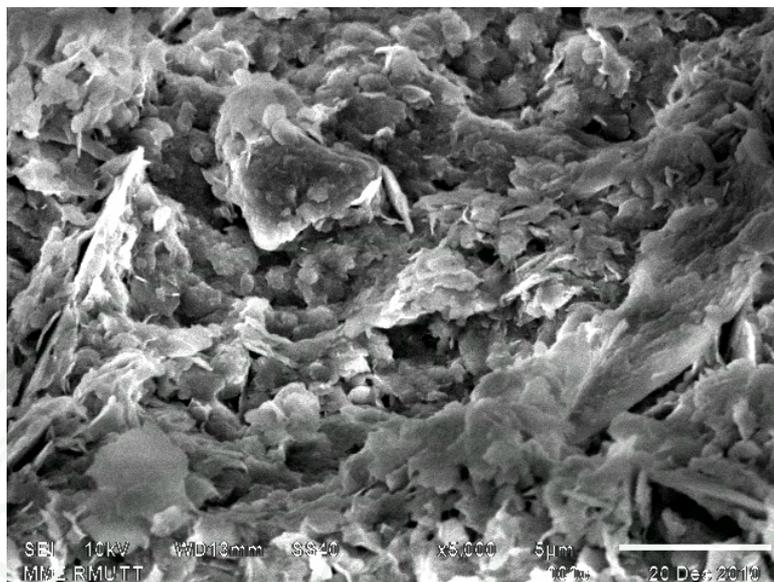
ภาพที่ 134 ปริมาณ CAH ของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่างๆ

สารผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ CAH ที่เกิดขึ้นมีผลต่อการเพิ่มของกำลังอัดของดินซีเมนต์ซึ่ง SCM4 มีปริมาณ CSH และ CAH ในปริมาณที่สูงกว่า จึงให้ค่ารับกำลังอัดที่มากกว่า นอกจากนี้ดินซีเมนต์ที่ใช้สารผสมเพิ่มที่มีความละเอียดสูงกว่าจะมีปริมาณ CSH และ CAH ที่สูงกว่าสารผสมเพิ่มที่มีความละเอียดต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการรับกำลังอัดเช่นเดียวกัน ภาพที่ 134 แสดงให้เห็นว่า SCM1 ไม่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของ CAH ในขณะที่ SCM2 SCM3 และ SCM4 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของ CAH ตามอายุการบ่มอย่างชัดเจน

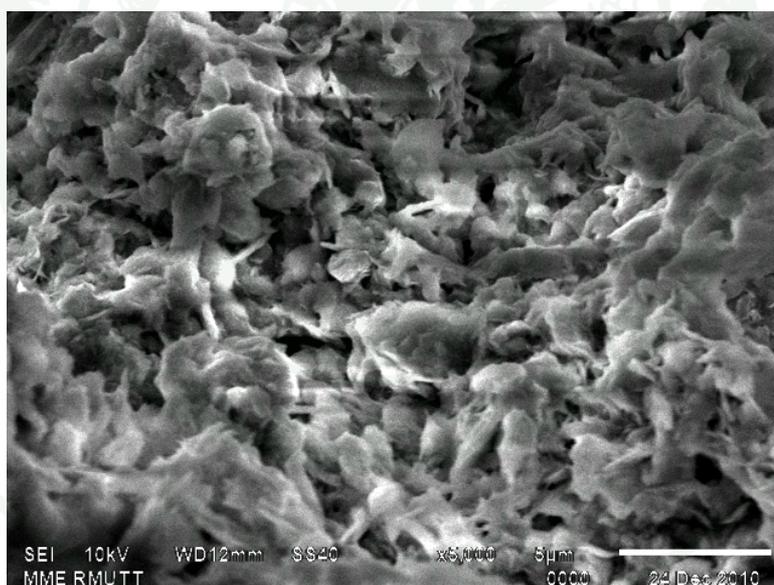
การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์ สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับจุลภาคด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC และปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM

ภาพที่ 135 แสดงโครงสร้างของดินซีเมนต์ผสม OPC (SCM1) พบว่าสารผลิตภัณฑ์ CSH ปกคลุมผิวของโครงสร้างดิน และมีปริมาณที่แน่นขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

โครงสร้างของดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยสารผสมเพิ่มปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM แสดงตามภาพที่ 136 - ภาพที่ 138 ซึ่งพบสารผลิตภัณฑ์ Ettringite และ CSH เชื่อมประสานแทรกอยู่ในอนุภาคดินตั้งแต่เริ่มต้นทำปฏิกิริยา ทั้งนี้ปฏิกิริยาในภาพรวมจะดีขึ้นมาก เมื่อปูนซีเมนต์ GCM มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ช่องว่างระหว่างเม็ดดินน้อยลง เกิดการพัฒนากำลังอัด การเปลี่ยนแปลงในระดับจุลภาคนี้ พบว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด และผลการวิเคราะห์ด้วย XRD

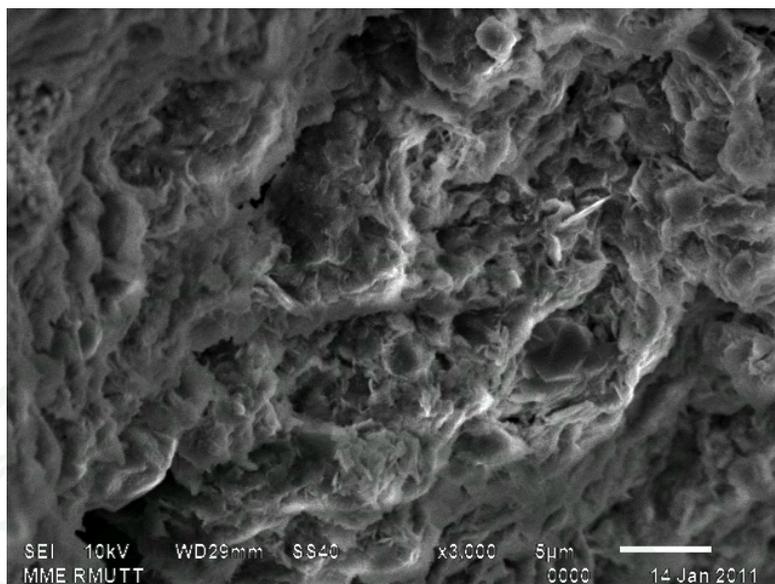


(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 5000)

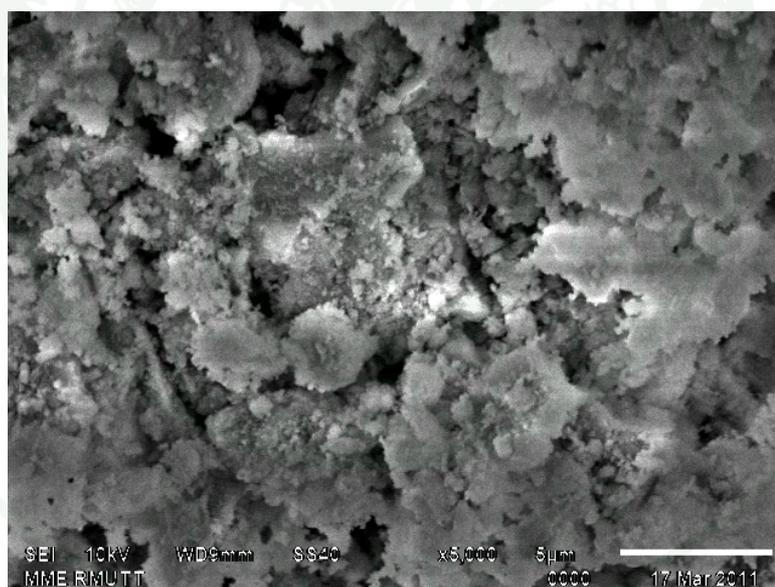


(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5000)

ภาพที่ 135 โครงสร้างดินซีเมนต์ SCM1 ที่อายุการบ่มต่างๆ

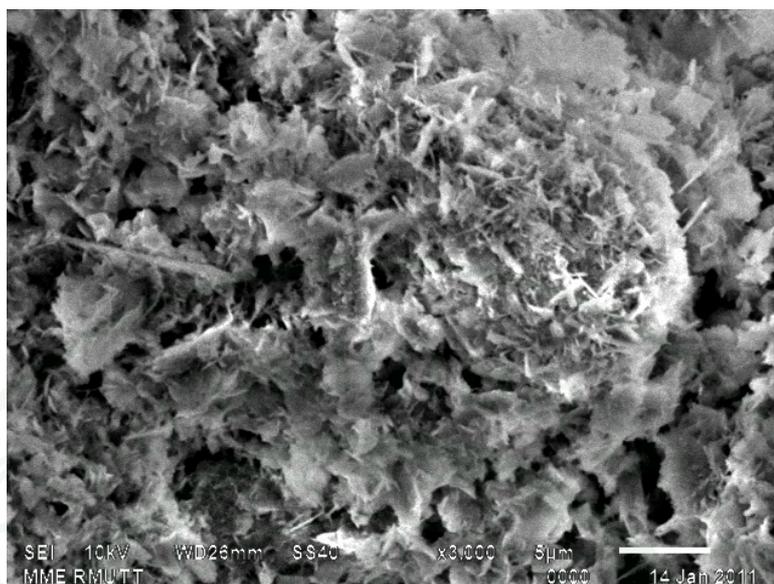


(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)

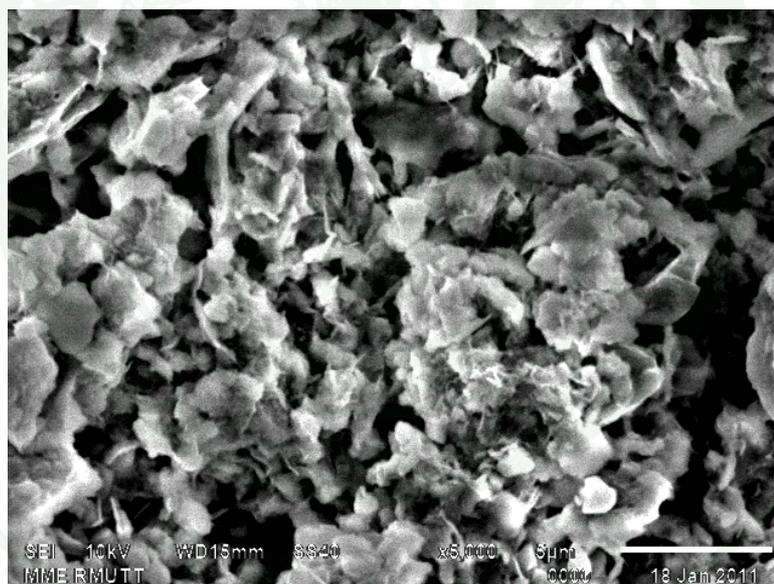


(ง) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 135 (ต่อ)

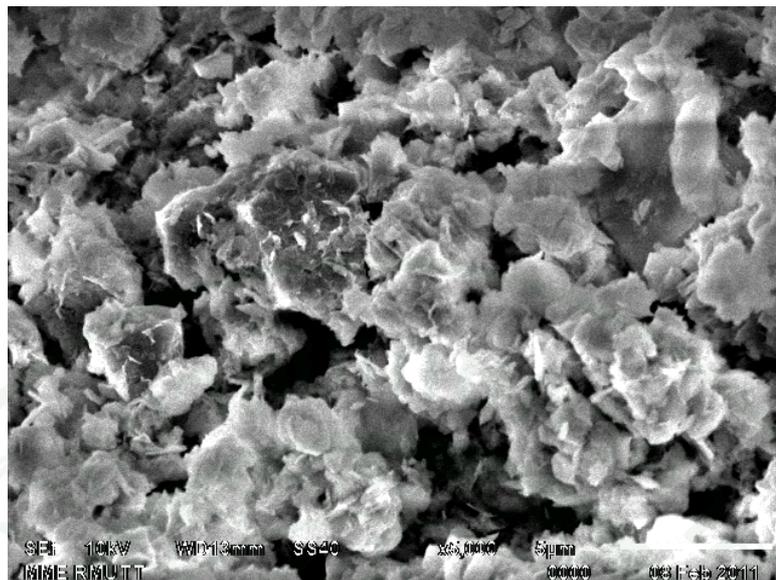


(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 3000)

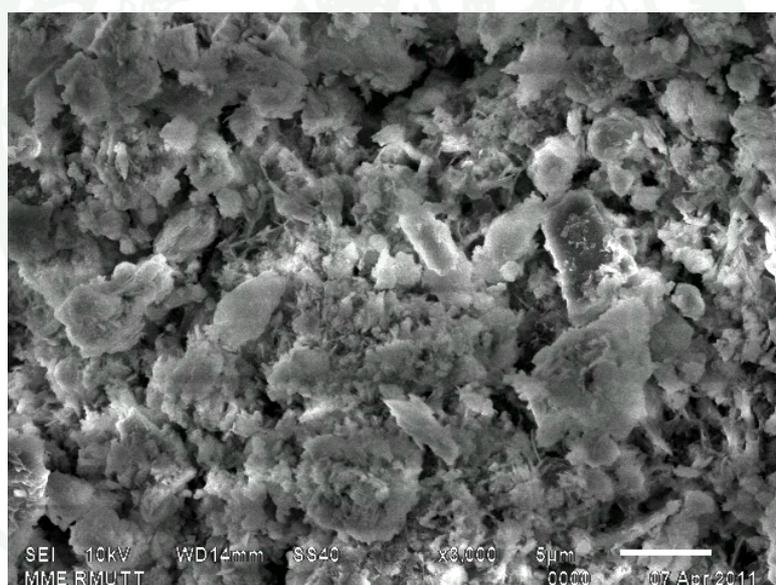


(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5000)

ภาพที่ 136 โครงสร้างดินซีเมนต์ SCM2 ที่อายุการบ่มต่างๆ

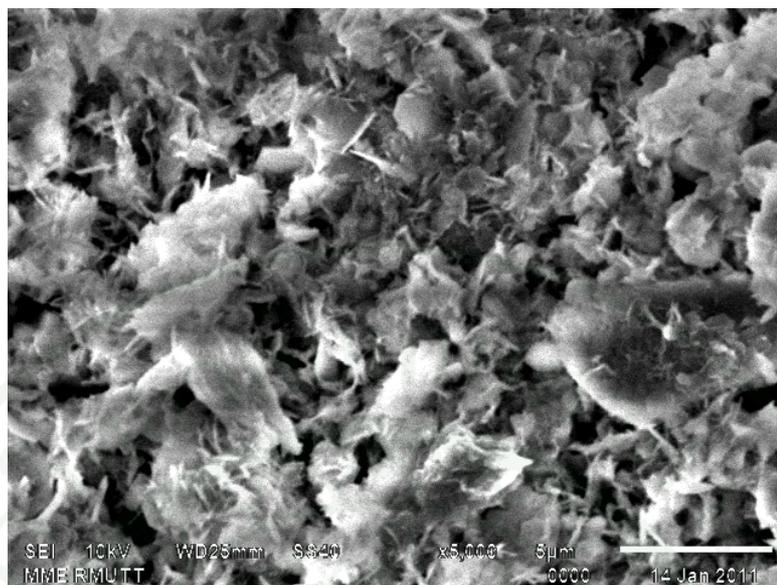


(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 5000)

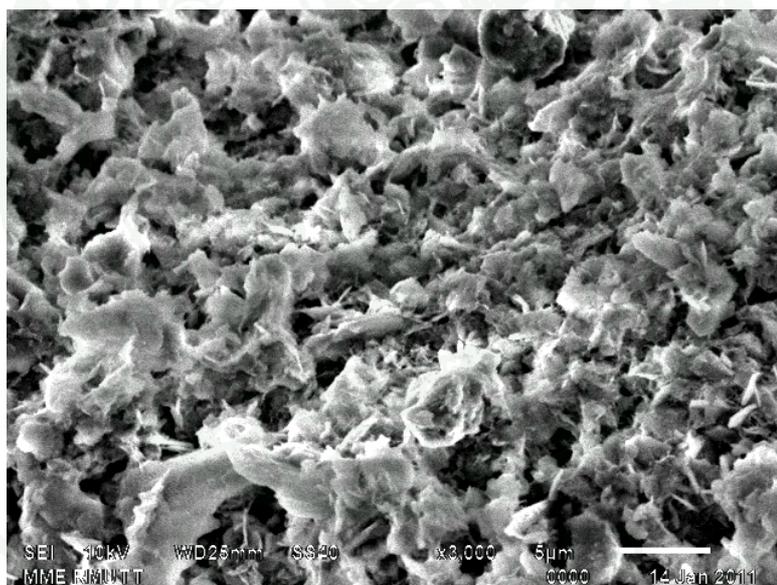


(ง) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 136 (ต่อ)

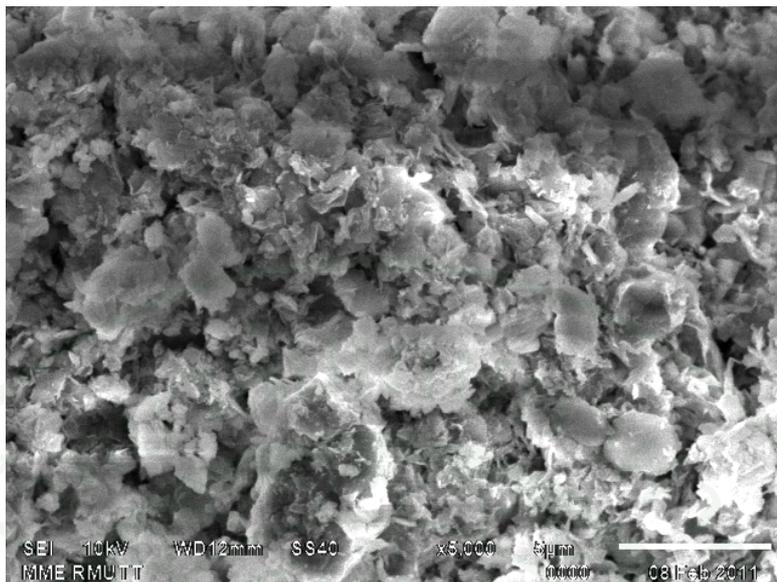


(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 5000)

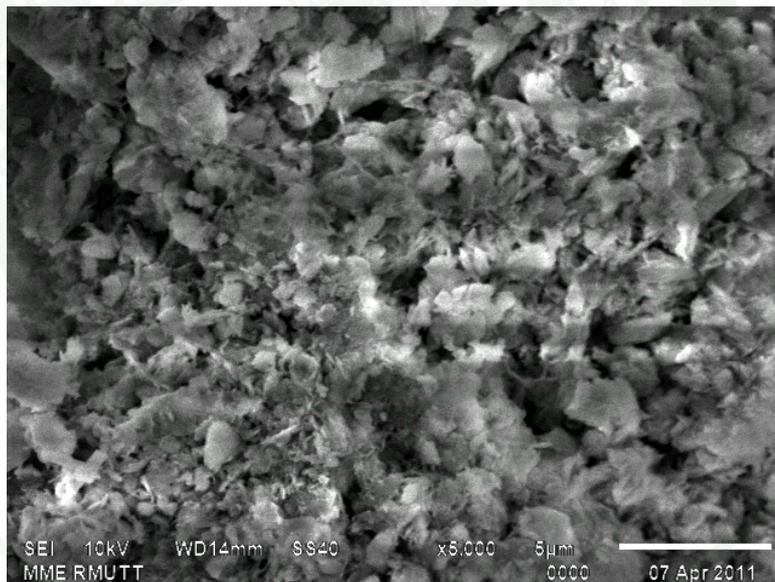


(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 137 โครงสร้างดินซีเมนต์ SCM3 ที่อายุการบ่มต่างๆ

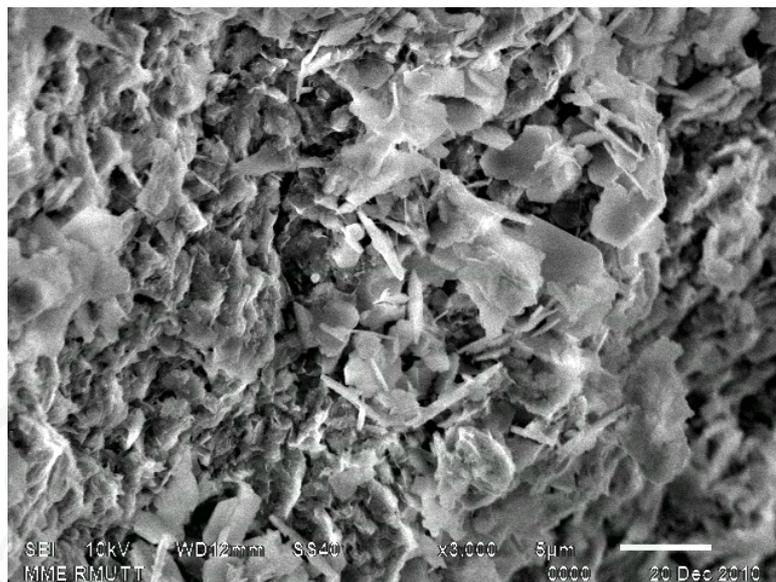


(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 5000)

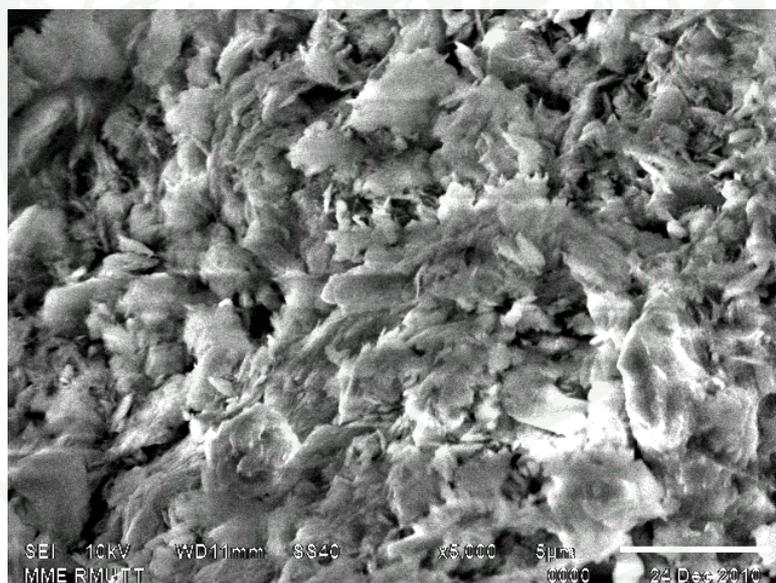


(ง) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 137 (ต่อ)

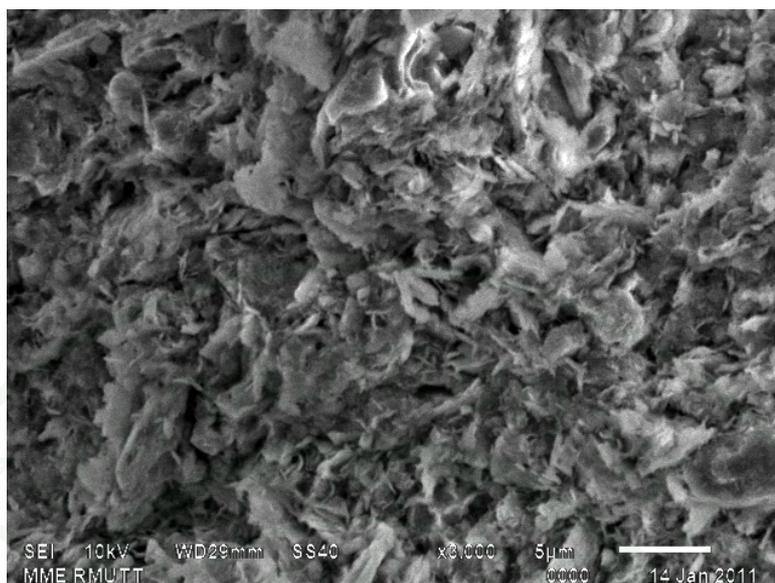


(ก) อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 3000)

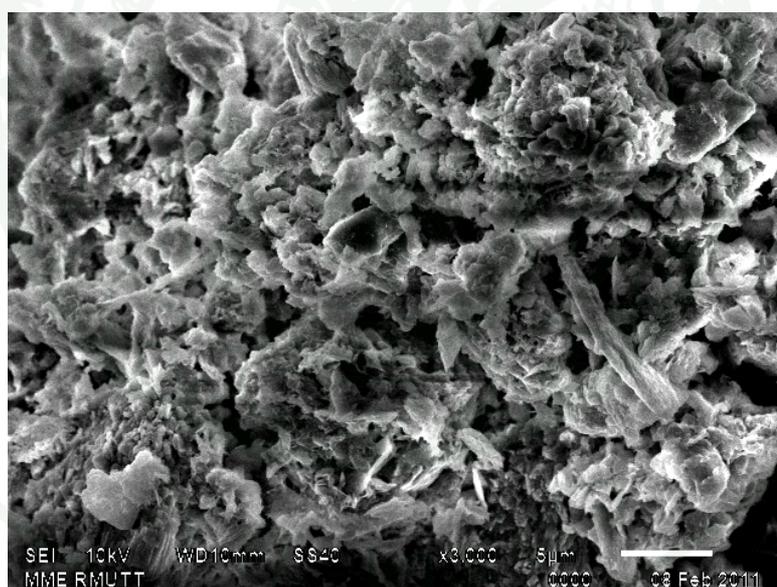


(ข) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5000)

ภาพที่ 138 โครงสร้างดินซีเมนต์ SCM4 ที่อายุการบ่มต่างๆ



(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)



(ง) อายุการบ่ม 90 วัน (กำลังขยาย x 3000)

ภาพที่ 138 (ต่อ)

### การวัดแรงกดของดินซีเมนต์

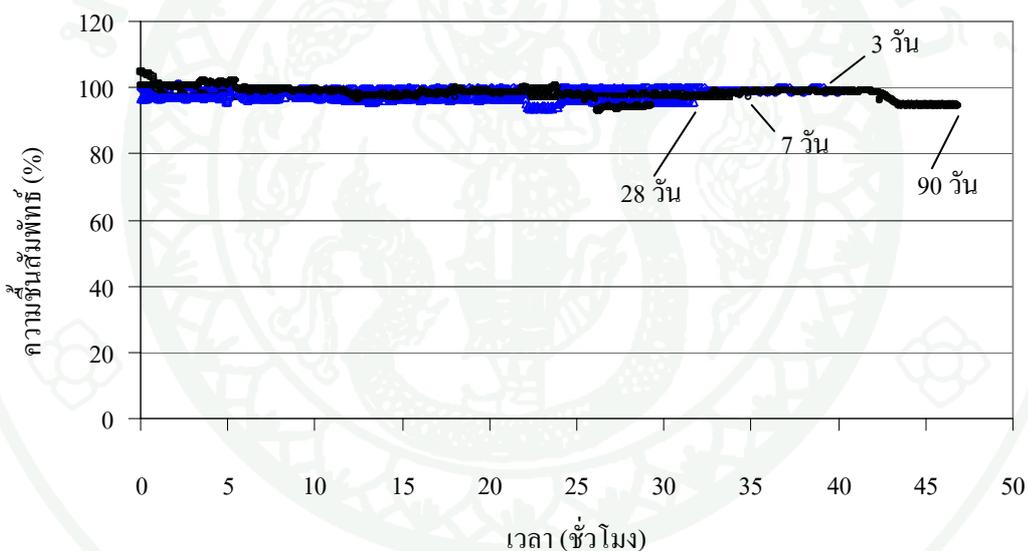
ผลการวัดแรงกดรวมของดินซีเมนต์แสดงตามตารางที่ 59 ดินซีเมนต์ SCM1 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 99.00, 97.00, 95.65 และ 94.70 % ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน และให้ค่าแรงกดรวมเท่ากับ 1,500 4,100 6,000 และ 7,800 kPa ตามลำดับ ซึ่งเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลง และค่าแรงกดรวมมีค่าสูงขึ้น ดินซีเมนต์ SCM2, SCM3 และ SCM4 ให้ผลค่าทดสอบแรงกดมีแนวโน้มและทิศทางไปในแนวเดียวกันกับ SCM1 แต่ให้ผลค่าแรงกดสูงกว่าในทุกกรณีของทุกระยะเวลาการบ่ม

ตารางที่ 59 ผลการวัดแรงกดในดินซีเมนต์

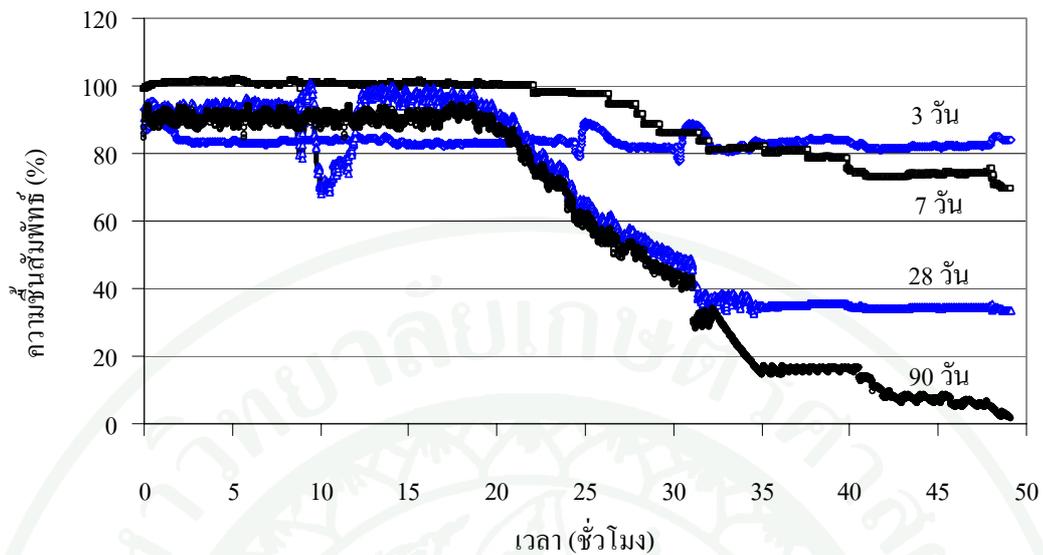
ตัวอย่าง	อายุการบ่ม			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
<b>SCM1</b>				
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	99.00	97.00	95.65	94.70
แรงกดรวม (kPa)	1,500	4,100	6,000	7,800
เวลาที่ทดสอบ (ชม.)	40.3	33.8	31.7	46.9
<b>SCM2</b>				
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	83.90	69.55	33.55	1.72
แรงกดรวม (kPa)	24,000	49,000	147,000	540,000
เวลาที่ทดสอบ (ชม.)	49.1	49.1	49.1	49.1
<b>SCM3</b>				
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	74.50	49.50	1.45	0.01
แรงกดรวม (kPa)	39,000	95,000	570,000	> 1,200,000
เวลาที่ทดสอบ (ชม.)	74.5	81.6	70.4	31.2
<b>SCM4</b>				
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	0.01	0.01	0.01	0.01
แรงกดรวม (kPa)	> 1,200,000	> 1,200,000	> 1,200,000	> 1,200,000
เวลาที่ทดสอบ (ชม.)	95.4	82.8	76.3	48.9

เนื่องด้วยอุปกรณ์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่สามารถอ่านค่าที่ต่ำกว่า 0% ได้ ทำให้การคำนวณแรงดูดรวมสามารถคำนวณได้สูงสุดไม่เกิน 1,200,000 kPa คังคินซีเมนต์ SCM4 พบว่าค่าแรงดูดในคังคินซีเมนต์สูงกว่า 1,200,000 kPa ในทุกช่วงอายุการบ่ม แต่ระยะเวลาที่ใช้ทดสอบมีช่วงเวลาดทดสอบน้อยลง

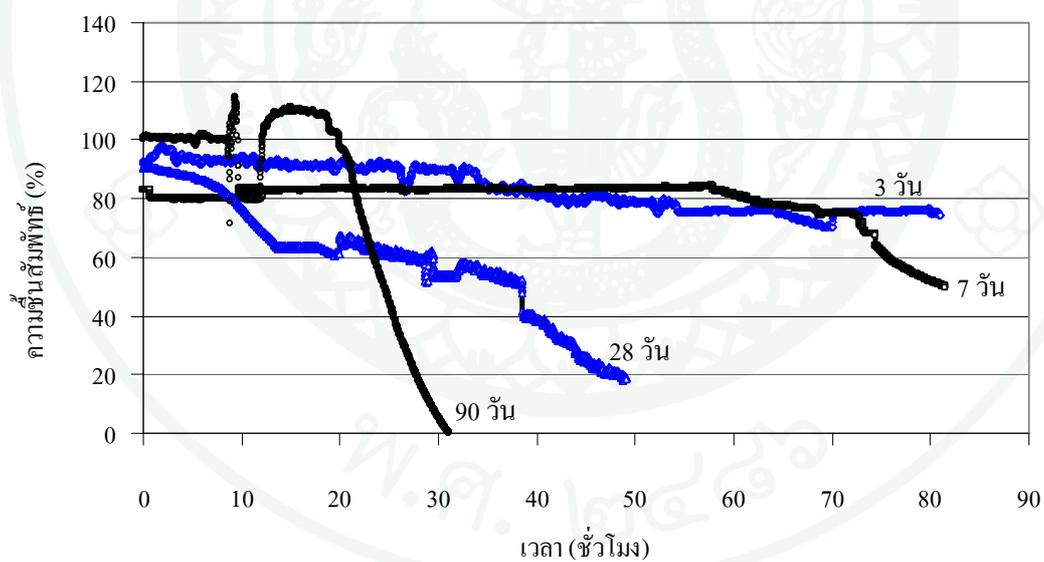
สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงตามอายุการบ่มในทุกๆ ตัวอย่าง คังคินซีเมนต์ SCM1 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 90% ทุกอายุการบ่ม ในขณะที่ SCM2, SCM3 และ SCM4 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า โดย SCM4 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เข้าใกล้ 0% ในทุกช่วงอายุการบ่มและใช้ระยะเวลาทดสอบลดลง คังคินซีเมนต์ที่มีปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM เป็นสารผสมเพิ่มให้ค่าแรงดูดรวมสูงกว่า คังคินซีเมนต์ที่มี OPC เป็นสารผสมเพิ่มในทุกๆ ตัวอย่าง



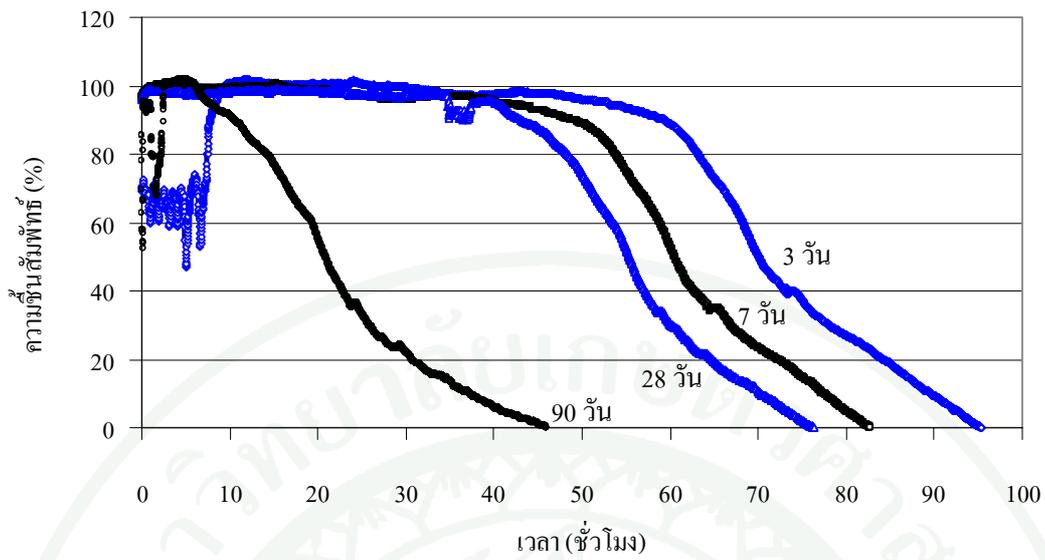
ภาพที่ 139 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของคังคินซีเมนต์ SCM1



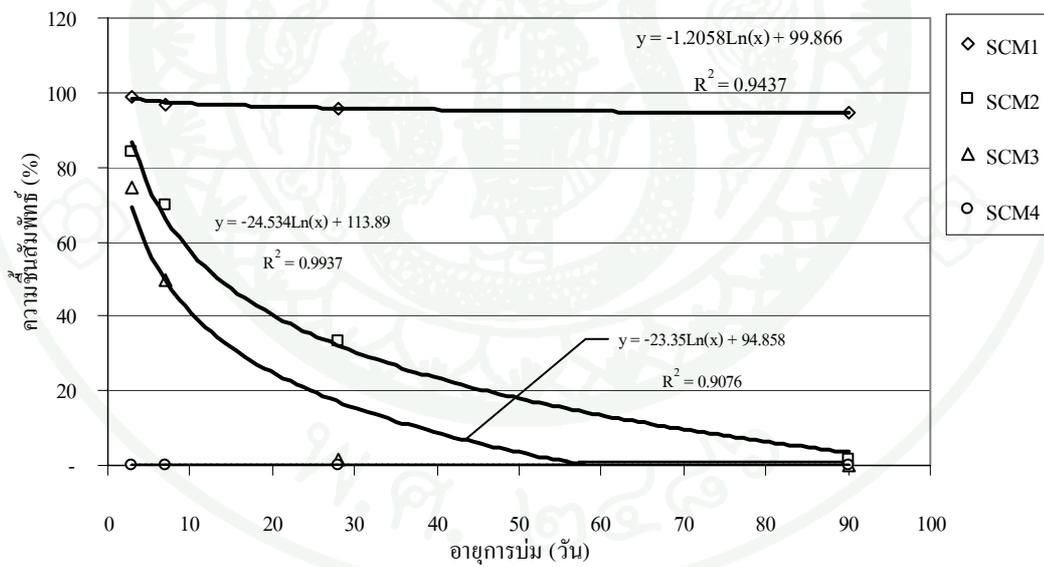
ภาพที่ 140 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ SCM2



ภาพที่ 141 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ SCM3



ภาพที่ 142 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ SCM4

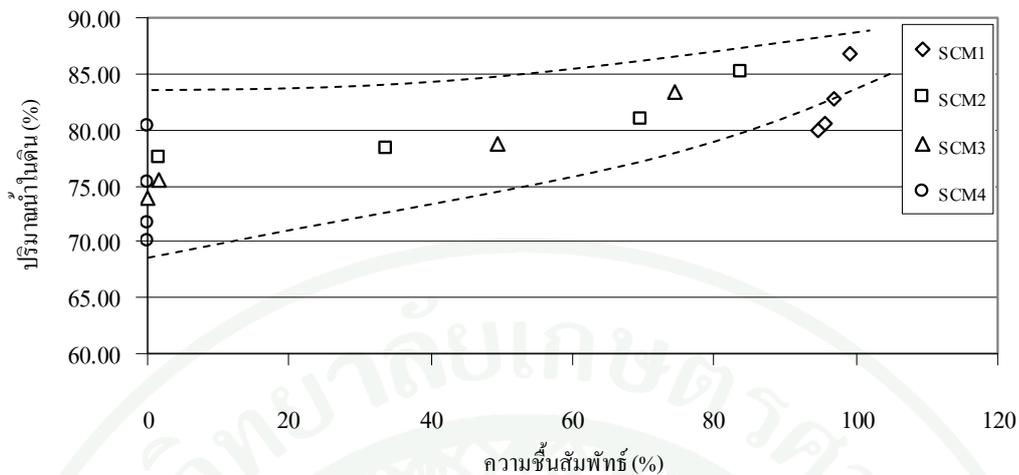


ภาพที่ 143 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่ม

การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ SCM1, SCM2, SCM3 และ SCM4 แสดงตามภาพที่ 139, 140, 141 และ 142 ตามลำดับ พบว่า SCM1 มีอัตราการเปลี่ยนความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างน้อย ไม่สังเกตเห็นความแตกต่าง ในขณะที่ SCM2, SCM3 และ SCM4 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และสามารถเห็นอัตราการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนในดินซีเมนต์ SCM4 เมื่อสังเกตระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบพบว่า มีระยะเวลาลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ใช้เวลาในการปรับสถานะเข้าสู่สมดุลย์ในขณะวัดค่าแรงคูดเร็วขึ้น จากลักษณะของกราฟทั้ง 4 ตัวอย่างพบว่า กราฟของ SCM1 มีลักษณะค่อนข้างเรียบขนานกับแกน Y ซึ่งเป็นค่าของเวลา ในขณะที่กราฟ SCM2, SCM3 และ SCM4 มีลักษณะค่อนข้างชัน แสดงว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์อย่างรวดเร็ว

ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มแสดงตามภาพที่ 143 พบว่ามีค่าลดลงตามอายุการบ่มในทุกๆ ตัวอย่าง ดินซีเมนต์ SCM1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของ SCM2 ใกล้เคียงกับ SCM3 เมื่อสังเกตความชันของกราฟพบว่า SCM2 มีความชันน้อยกว่า SCM3 เล็กน้อย ในขณะที่ SCM4 ไม่สามารถสังเกตความชันของกราฟได้เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

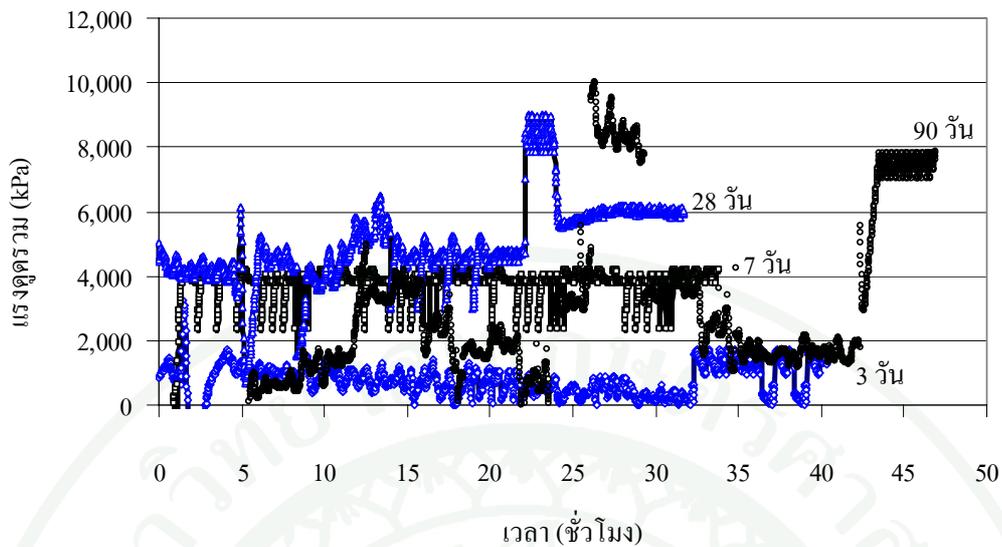
การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์แปรผันกับปริมาณน้ำในดินซีเมนต์ จากภาพที่ 144 พบว่าความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำในมวลดินที่เพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มลงไป ในดิน น้ำในดินจะถูกนำไปใช้การทำปฏิกิริยา ทำให้ปริมาณน้ำในมวลดินลดลง ในขณะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินต่อไปตามอายุการบ่ม น้ำจะถูกนำไปใช้ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำในดินลดลง และเมื่อทำการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์ในระบบปิด พบว่ามีค่าลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีอัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วและมากกว่า ทำให้ SCM4 ซึ่งมีค่าความละเอียดสูงที่สุด มีปริมาณน้ำในมวลดินน้อย และค่าความความชื้นสัมพัทธ์ลดต่ำลงในอัตราที่รวดเร็วด้วยระยะเวลาอันสั้น



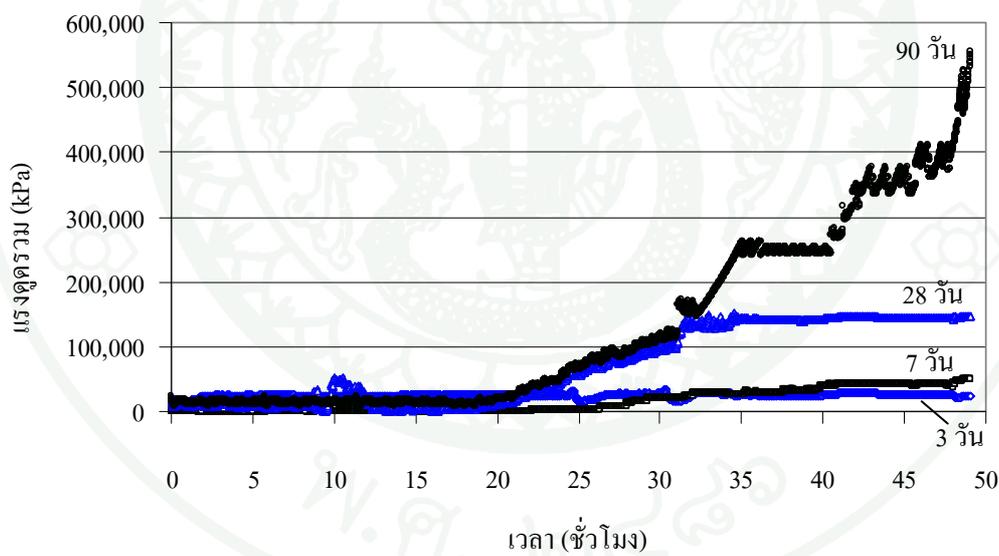
ภาพที่ 144 ความชื้นสัมพัทธ์กับปริมาณน้ำในดินของดินซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ SCM1, SCM2, SCM3 และ SCM4 แสดงตามภาพที่ 145, 146, 147 และ 148 ตามลำดับ พบว่า SCM1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมค่อนข้างน้อย มีค่าเท่ากับ 1,500, 4,100, 6,000 และ 7,800 kPa ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วันตามลำดับ ในขณะที่ SCM2 เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์มากขึ้น โดยเฉพาะที่อายุการบ่มที่ 90 วัน มีค่าสูงเท่ากับ 540,000 kPa ค่าแรงคูรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่มในดินซีเมนต์ SCM3 มีค่าเท่ากับ 570,000 kPa ที่อายุ 28 วัน และมากกว่า 1,200,000 kPa ที่อายุ 90 วัน ภาพที่ 148 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ SCM4 ซึ่งสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ได้อย่างชัดเจน และพบว่ามีค่าแรงคูรวมมากกว่า 1,200,000 kPa ทุกอายุการบ่ม แต่ระยะเวลาที่ใช้บันทึกค่าลดลงตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

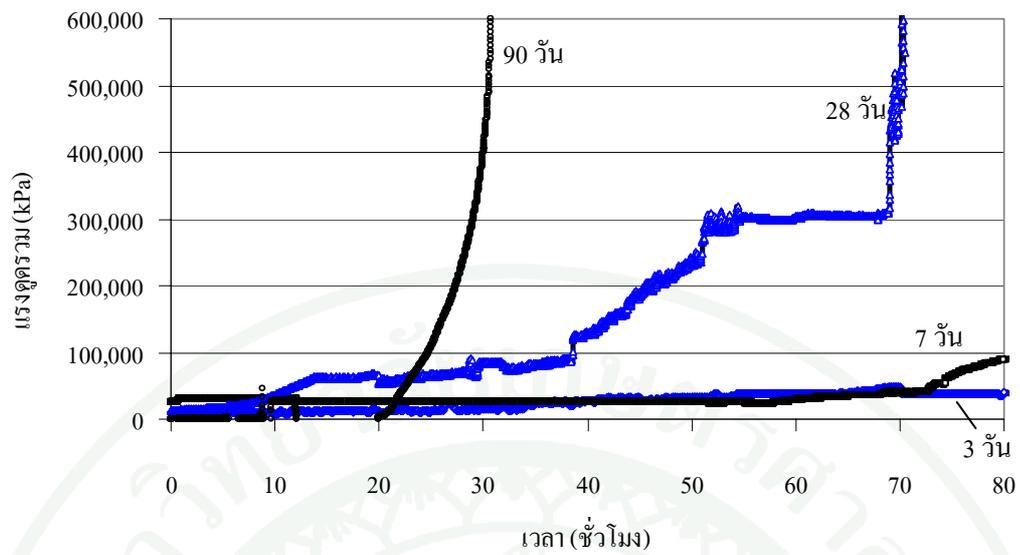
เมื่อสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟตามภาพที่ 145 - ภาพที่ 148 พบว่ากราฟของ SCM1 มีลักษณะค่อนข้างเรียบขนานกับแกน Y ซึ่งเป็นค่าของเวลา ในขณะที่กราฟ SCM2, SCM3 และ SCM4 มีลักษณะค่อนข้างชัน โดยกราฟ SCM4 มีความชันของกราฟเกือบ 90 องศาในทุกช่วงอายุการบ่ม ซึ่งแสดงว่ามีการพัฒนาแรงคูรวมของดินซีเมนต์อย่างรวดเร็ว



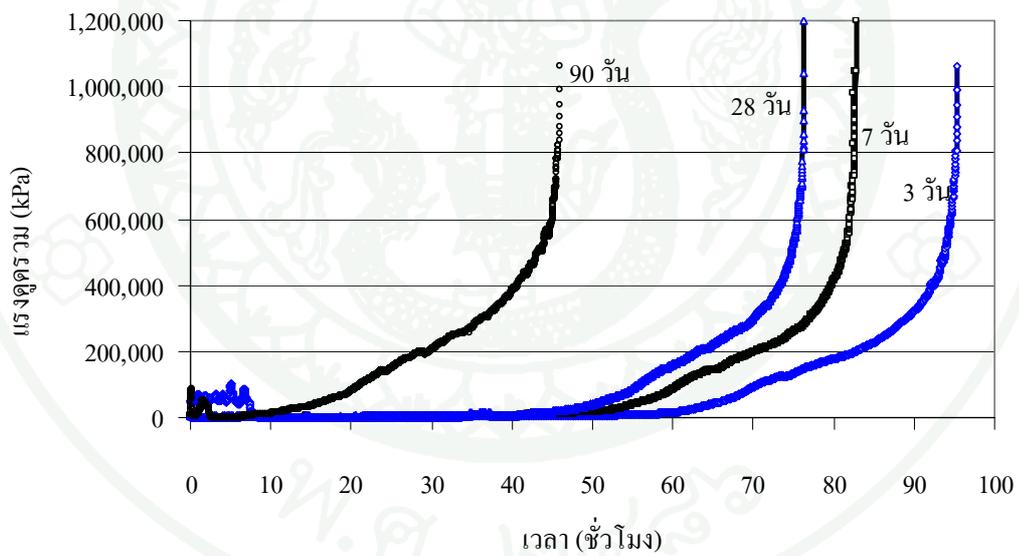
ภาพที่ 145 การเปลี่ยนแปลงแรงดันรวมของดินซีเมนต์ SCM1



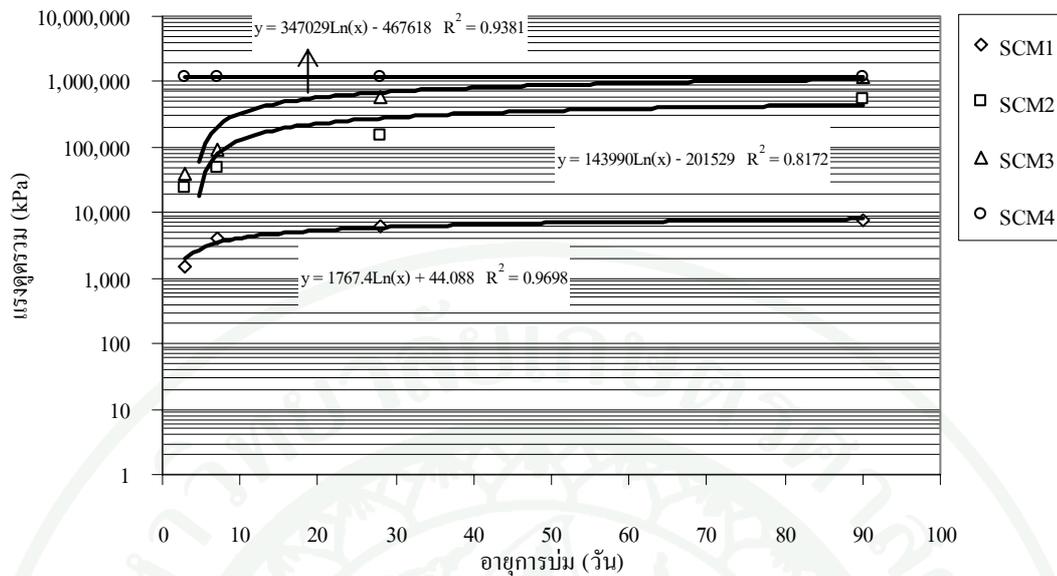
ภาพที่ 146 การเปลี่ยนแปลงแรงดันรวมของดินซีเมนต์ SCM2



ภาพที่ 147 การเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ SCM3



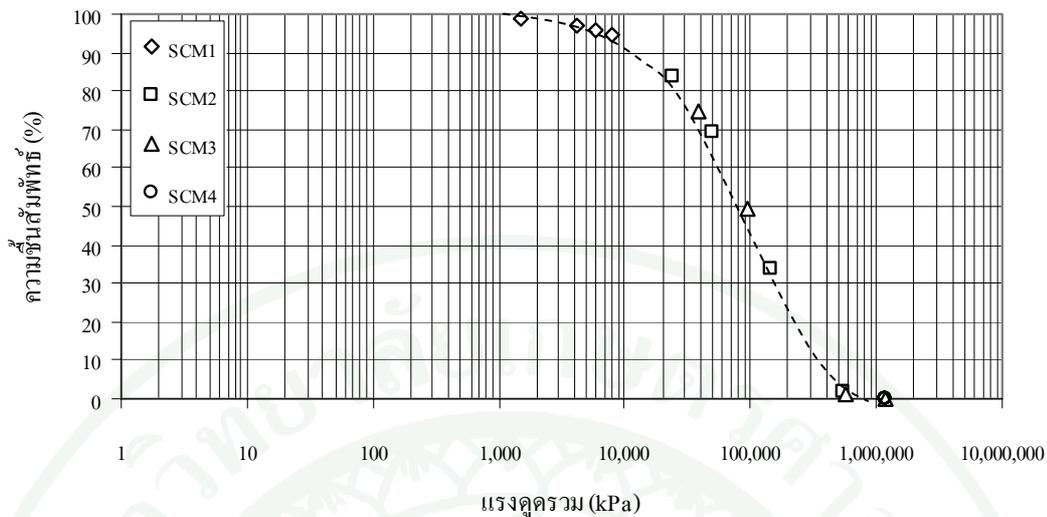
ภาพที่ 148 การเปลี่ยนแปลงแรงคูรวมของดินซีเมนต์ SCM4



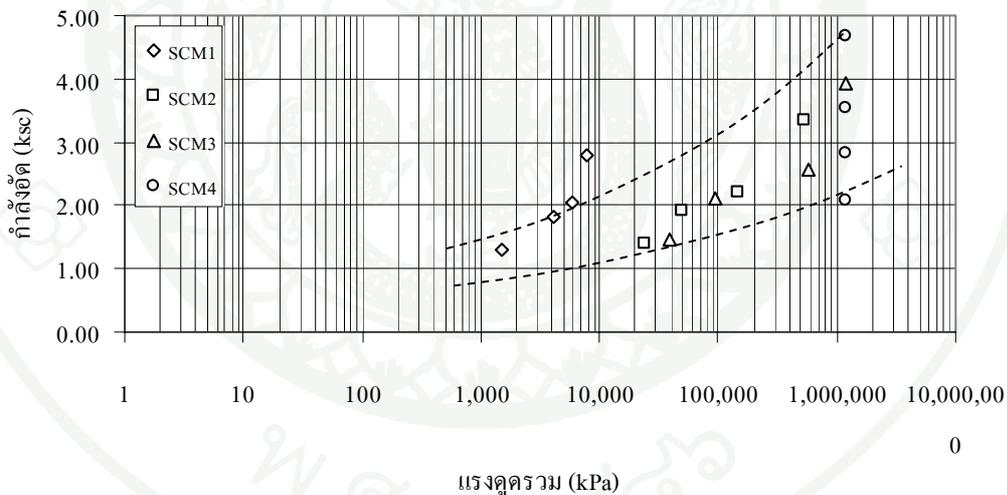
ภาพที่ 149 การเปลี่ยนแปลงแรงดัดรวมของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่ม

ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดัดรวมของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มแสดงตามภาพที่ 149 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มในทุกๆ ตัวอย่าง ดินซีเมนต์ SCM1 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย เมื่อดูลักษณะจากกราฟพบว่าเกือบจะเป็นแนวอนขนานกับอายุการบ่ม ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัดรวมของ SCM2 ใกล้เคียงกับ SCM3 มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับ SCM4 ไม่สามารถสังเกตความชันของกราฟได้เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ทำให้ไม่สามารถคำนวณแรงดัดรวมได้มากกว่า 1,200,000 kPa ได้

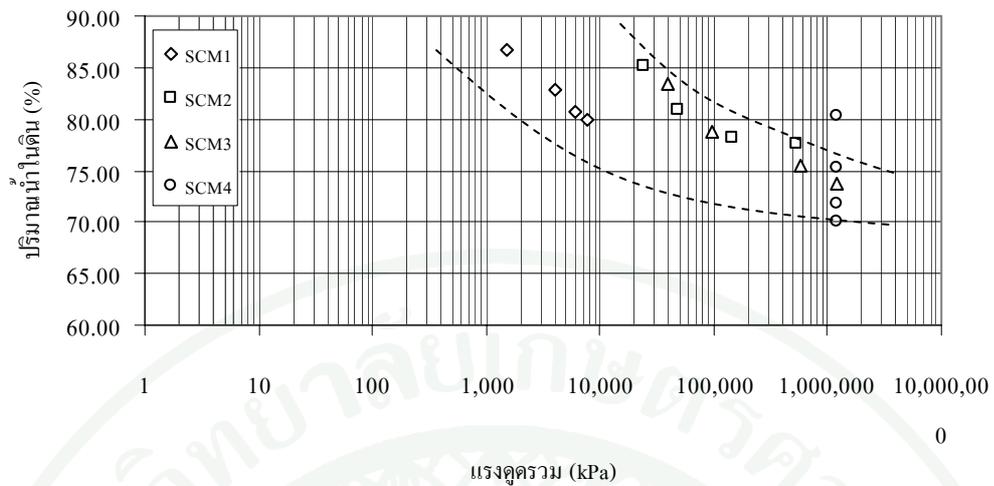
แรงดัดรวมของดินซีเมนต์กับความชื้นสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์มีความสัมพันธ์ดังแสดงตามภาพที่ 150 เมื่อนำความชื้นสัมพัทธ์มาพล็อต (Plot) กราฟกับแรงดัดรวมในลักษณะล็อกสเกล (Log scale graph) พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงในขณะที่แรงดัดรวมของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยดินซีเมนต์ SCM1 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงที่สุดแต่มีค่าแรงดัดรวมต่ำที่สุด จึงอยู่ด้านบนของกราฟความสัมพันธ์ ส่วนดินซีเมนต์ SCM4 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่สุดและมีค่าแรงดัดรวมสูงที่สุด จึงอยู่ด้านล่างของกราฟความสัมพันธ์ ในขณะที่ดินซีเมนต์ SCM2 และ SCM3 มีค่าความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์กับค่าแรงดัดรวมอยู่กึ่งกลางระหว่าง SCM1 กับ SCM4 จึงอยู่ในตำแหน่งบริเวณแนวกลางของกราฟ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดรวมของดินซีเมนต์กับความชื้นสัมพัทธ์มีความสอดคล้องกัน



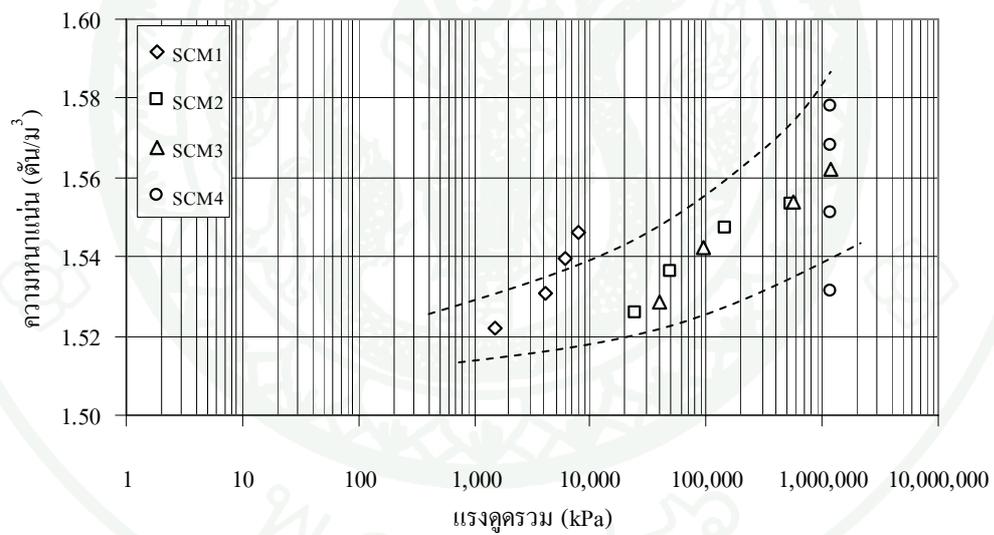
ภาพที่ 150- แรงคูรวมกับความชันสัมพัทธ์ของดินซีเมนต์



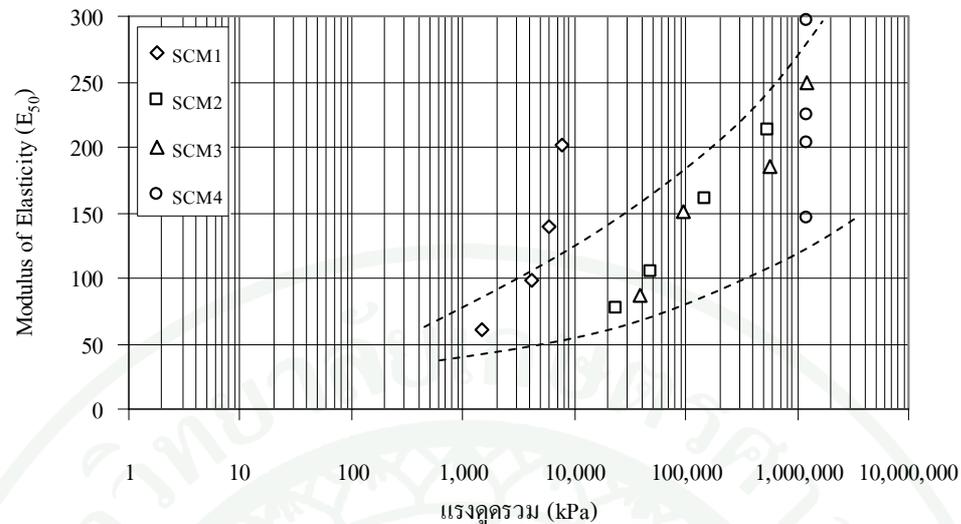
ภาพที่ 151- แรงคูรวมกับกำลังอัดของดินซีเมนต์



ภาพที่ 152 แรงคูรวมกับปริมาณน้ำในดินของดินซีเมนต์



ภาพที่ 153 แรงคูรวมกับความหนาแน่นของดินซีเมนต์



ภาพที่ 154 แรงคู่ควบกับ Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงแรงคู่ควบของดินซีเมนต์แปรผันกับกำลังอัดของดินซีเมนต์ จากภาพที่ 151 พบว่าแรงคู่ควบจะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มลงไปดิน น้ำในมวลดินจะถูกดูดเข้าไปในการทำปฏิกิริยาเกิดสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีผลทำให้กำลังของดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินต่อไปตามอายุการบ่ม น้ำจะถูกดูดเข้าไปในจำนวนที่มากขึ้น ทำให้แรงคู่ควบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วและมากกว่า ทำให้ SCM4 ซึ่งมีค่าความละเอียดสูงที่สุดมีแรงคู่ควบสูงที่สุด ซึ่งผลการทดสอบแรงคู่ควบในดินซีเมนต์นี้สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด ผลการทดสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และผลการสังเกตการเปลี่ยนแปลงในระดับจุลภาคด้วยกล้อง SEM

เมื่อนำค่าแรงคู่ควบของดินซีเมนต์มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ของแรงคู่ควบกับปริมาณน้ำในดินของดินซีเมนต์พบว่าแรงคู่ควบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในดินลดลง ดังแสดงตามภาพที่ 152 ส่วนแรงคู่ควบกับความหนาแน่นของดินซีเมนต์มีความสัมพันธ์ดังภาพที่ 15 3 แรงคู่ควบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของดินที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งคล้ายกับความสัมพันธ์ของแรงคู่ควบกับ Modulus of Elasticity ( $E_{50}$ ) ของดินซีเมนต์ ดังแสดงตามภาพที่ 154

ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีผลต่อแรงคู่ควบระหว่างอนุภาคในมวลดิน เนื่องจากโครงสร้างดินเกิดช่องว่างขนาดเล็กระดับจุลภาค (Micropore space) ที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ที่พัฒนาตามอายุการบ่ม ซึ่งสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ในระดับจุลภาคอย่างชัดเจนตามอายุการบ่ม

นอกจากการนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ไปใช้ในงานปรับปรุงดินเหนียวอ่อนแล้ว ยังได้นำไปประยุกต์ใช้ผลิตคอนกรีตพรุน (Porous concrete) ซึ่งในช่วง 3 ทศวรรษที่ผ่านมาประเทศสหรัฐอเมริกาและอังกฤษ ได้พัฒนาคอนกรีตพรุนใช้สำหรับทำเป็นทางเดินเท้าหรือถนน เพื่อลดการสิ้นเปลือง ประเทศญี่ปุ่นก็ได้นำคอนกรีตพรุนไปประยุกต์ใช้ก่อสร้างถนนหรือที่จอดรถ สำหรับในประเทศไทยงานคอนกรีตพรุนได้ถูกพัฒนาในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา (ถนัดกิจ และคณะ, 2551) โดยนำมาประยุกต์ใช้วางระบบท่อในงานทางเดินเท้า (ฟุตบอลคอนกรีตพรุน) งานตกแต่งสวนและการปลูกพืชบนอาคาร (Hydroponics Cultivation) หรือคอนกรีตพรุนในงานบำบัดน้ำเสีย (Chareerat et al, 2009; ถนัดกิจและคณะ, 2553)

จากการวิจัยร่วมกับศุภกิจและคณะ (2554) พบว่าคอนกรีตพรุนที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ สามารถนำไปใช้งานได้ในระดับปานกลาง โดยนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM มาผลิตก้อนคอนกรีตพรุนรูปลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ซม<sup>3</sup> ตัวอย่างคอนกรีตพรุนถูกออกแบบที่อัตราส่วนโพรงเท่ากับ 30 % โดยใช้มวลรวมหยาบ (หินปูน) ขนาดผ่านตะแกรง 3/8" และค้ำตะแกรงเบอร์ 4 อัตราส่วนเปสต์ต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 0.235 อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสาน (w/c) อยู่ในช่วง 0.30 - 0.60 และสารผสมเพิ่มอยู่ในช่วง 1 - 3% สำหรับสัญลักษณ์และสัดส่วนผสมของคอนกรีตพรุนแสดงดังตารางที่ 60 ตัวอย่างคอนกรีตพรุนจะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนโพรงและความชื้นผ่านของน้ำ และทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้มาตรฐานการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้า ASTM C109-91 ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน

ผลการทดสอบสมบัติทางด้านกายภาพและวิศวกรรมของคอนกรีตพรุนที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM เปรียบเทียบกับคอนกรีตพรุนที่ผลิตจาก OPC แสดงดังตารางที่ 61 พบว่าค่าอัตราส่วนโพรงรวมและอัตราส่วนโพรงต่อเนื่องของ MIX-1 มีค่าสูงกว่า MIX-2 และ MIX-3 ตามลำดับ ซึ่งค่าอัตราส่วนโพรงดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกล่าวคือที่อัตราส่วนโพรงสูงกว่าจะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 60 สัญลักษณ์ตัวอย่างคอนกรีตพูนที่อัตราส่วนโพรงเท่ากับ 30%

ตัวอย่าง	ชนิดปูนซีเมนต์ (%)		w/c ratio	สารลดน้ำ (Type F) (%)	ความละเอียด ( $\text{cm}^2/\text{กรัม}$ )
	OPC	GCM			
MIX-1	100	0	0.30	1.0	3,100
MIX-2	0	100	0.60	3.0	6,600
MIX-3	20	80	0.60	3.0	5,860*

หมายเหตุ: ความละเอียด MIX-3 กำหนดตามอัตราส่วนผสมระหว่าง OPC และ GCM

ตารางที่ 61 ผลการทดสอบสมบัติคอนกรีตพูน

ตัวอย่าง	อัตราส่วน โพรงรวม (%)	อัตราส่วน โพรงต่อเนื่อง (%)	สัมประสิทธิ์ความ ซึมผ่านของน้ำ ( $\text{cm}/\text{วินาที}$ )	กำลังอัด (ksc)	
				7 วัน	28 วัน
MIX-1	18.80	18.48	0.81	109.67	114.00
MIX-2	17.20	13.12	0.68	40.64	52.60
MIX-3	13.20	12.80	0.55	54.43	73.60



(ก) MIX-1 (OPC)



(ข) MIX-2 (GCM)



(ค) MIX-3 (GCM80 : OPC20)

ภาพที่ 155 ตัวอย่างคอนกรีตพูนก่อนทดสอบ

ที่มา: สุภกิจ และคณะ (2554)



(ก) MIX-2 (GCM)



(ข) MIX-3 (GCM80 : OPC20)

### ภาพที่ 156 ตัวอย่างคอนกรีตพรุนหลังทดสอบ

ที่มา: ศุภกิจและคณะ (2554)

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนที่ผลิตโดยใช้ปูนซีเมนต์ OPC และ GCM พบว่าทุกสัดส่วนผสมมีการพัฒนากำลังตามอายุการบ่ม โดย MIX-1 มีค่ากำลังสูงกว่า MIX-2 ประมาณ 2.7 เท่า อย่างไรก็ตาม การแทนที่ปูนซีเมนต์ GCM ด้วยปูนซีเมนต์ OPC ประมาณ 20% โดยน้ำหนัก จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เช่น ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของ MIX-3 มีค่าสูงถึง 73.60 ksc ซึ่งสูงกว่า MIX-2 ประมาณ 1.40 เท่าที่อายุการบ่มเดียวกัน ลักษณะของตัวอย่างคอนกรีตพรุนภายหลังการพิบัติของ MIX-2 และ MIX-3 แสดงดังภาพที่ 156 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า MIX-2 จะมีรอยแตกชัดเจนกว่า MIX-3 นอกจากนี้ยังพบการหลุดร่อนของมวลรวมหยาบบริเวณผิวของตัวอย่างมากกว่าตัวอย่างใน MIX-3 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

### การพิจารณานำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ไปใช้งาน

การนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์ไปใช้งานนั้น ราคาต้นทุนเป็นปัจจัยหลักสำคัญในการพิจารณา แต่เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เป็นการผลิตในห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการคิดต้นทุนการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงต้องอยู่บนพื้นฐานเดียวกัน ดังนี้

1. วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร เครื่องมือ ที่ใช้ในกระบวนการเผา และการผลิตเป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด

2. ประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้เผาให้ความร้อน เป็นประเภทเดียวกัน

3. การเผาตัวอย่างมีรูปแบบการเผาแบบเดียวกัน

4. การเผาตัวอย่างมีปริมาณการเผาต่อครั้งเท่ากัน

5. การบดละเอียดปูนเม็ดเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ ใช้วิธีการบดที่เหมือนกัน และพลังงานที่ใช้ในการบดมีค่าเท่ากัน

6. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการเผา มีราคาเท่ากัน

กากอุตสาหกรรมเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิต จึงไม่คิดเป็นราคาต้นทุนในส่วนของตัวเองกากอุตสาหกรรมเอง ดังนั้นจะคิดเฉพาะค่าเดินทางขนส่งจากแหล่งกำเนิดมายังโรงงานการผลิตปูนซีเมนต์เท่านั้น การคำนวณหาต้นทุนของค่าเดินทางขนส่งคิดบนพื้นฐาน ดังนี้

1. การขนส่งวัตถุดิบใช้รถบรรทุก 10 ล้อ มีน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 21 ตันต่อเที่ยว เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเปล่าเท่ากับ 7 ตัน ดังนั้นคิดเป็นน้ำหนักบรรทุกวัตถุดิบที่บรรทุกได้เท่ากับ 14 ตันต่อเที่ยว

2. รถบรรทุก 10 ล้อ มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล 6 กม. ต่อ ลิตร

3. ราคาเฉลี่ยค่าน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลราคาดิตรละ 30.49 บาท (ราคาเฉลี่ยของสถานีบริการน้ำมันในเขตกรุงเทพมหานคร ณ เดือนเมษายน 2554)

4. ไม่คิดค่าสึกหรอ และค่าเสื่อมสภาพของรถบรรทุก

5. ระยะทางขนส่งจากแหล่งวัตถุดิบมายัง โรงงานการผลิตคิดที่ระยะทางดังนี้

- ผู้ผงหินปูน และปูนขาว คิกระยะทางที่ 2 กม. เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์จะมี วัสดุคิส่วนใหญ่เป็นจำพวกหินปูน ดังนั้นตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานจึงต้องใกล้แหล่งหินปูนให้มากที่สุด

- เปลือกหอยแครง ระยะทางไม่เกิน 10 กม.

- ตะกอนประปา ระยะทางไม่เกิน 10 กม.

ตารางที่ 62 แสดงราคาค่าขนส่งจากอุตสาหกรรมต่อ 1 เทียวรถบรรทุก ซึ่งมีระยะทางของแหล่งวัสดุคิมายัง โรงงานไม่เท่ากัน คิเป็นค่าน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมดเท่ากับ 121.92 บาท

ตารางที่ 62 การคำนวณราคาค่าขนส่งจากอุตสาหกรรมต่อ 1 เทียวรถบรรทุก (14 คัน)

ชนิดจากอุตสาหกรรม	ระยะทางในการขนส่ง (กิโลเมตร)	ค่าน้ำมันที่ใช้ในการขนส่ง (บาท/กิโลเมตร)	รวมราคา (บาท)
เปลือกหอยแครง	10	5.08	50.80
ผู้ผงหินปูน	2	5.08	10.16
ตะกอนประปา	10	5.08	50.80
ปูนขาว	2	5.08	10.16
รวม	24	20.32	121.92

สำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ปริมาณ 1 ตัน ต้องใช้วัสดุคิตั้งต้นประมาณ 1.5 ตัน เมื่อคำนวณตามสัดส่วนของวัสดุคิตั้งต้นของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ จะใช้ปริมาณเป็นดังนี้

เปลือกหอยแครง ใช้ปริมาณ  $1.5 \times 0.05 = 0.075$  ตัน

ผู้ผงหินปูน ใช้ปริมาณ  $1.5 \times 0.50 = 0.750$  ตัน

ตะกอนประปา ใช้ปริมาณ  $1.5 \times 0.25 = 0.375$  ตัน

ปูนขาว ใช้ปริมาณ  $1.5 \times 0.20 = 0.300$  ตัน

คำนวณค่าขนส่งวัสดุคิทั้งหมดคิเป็นต่อ 1 ตัน ดังรายละเอียดตามตารางที่ 63

ตารางที่ 63 การคำนวณราคาค่าขนส่งกากอุตสาหกรรมต่อ 1 ตัน

ชนิดกากอุตสาหกรรม	ต้นทุนน้ำมันต่อ 1 ตัน (บาท)	ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ (ตัน)	รวมราคา (บาท)
เปลือกหอยแครง	$50.80/14 = 3.63$	0.075	0.27
ฝุ่นผงหินปูน	$10.16/14 = 0.73$	0.750	0.54
ตะกอนประปา	$50.80/14 = 3.63$	0.375	1.36
ปูนขาว	$10.16/14 = 0.73$	0.300	0.22
รวม	$121.92/14 = 8.71$	1.500	13.06

ดังนั้นราคาต้นทุนเฉพาะค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์คิดเป็นราคาทั้งหมด 13.06 บาทต่อตัน เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนเฉพาะค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากหน้าโรงงานซึ่งมีค่า 14.51 บาทต่อตัน พบว่าปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมมีราคาถูกกว่าเล็กน้อย

ทั้งนี้ ราคาของปูนซีเมนต์สังเคราะห์อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางการขนส่งวัตถุดิบที่เปลี่ยนแปลงไป อาจมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามมูลค่าวัตถุดิบที่สูงขึ้น เช่น ตะกอนประปา โดยการคิดราคาในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานการประมาณราคาต่อระยะทางหนึ่งๆ เท่านั้น อย่างไรก็ตาม หากแม้ว่าราคาจะเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อมแล้ว จะก่อประโยชน์ที่คุ้มค่ากว่ามาก

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยนี้เสนอแนวคิดในการพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบหลัก โดยใช้หลักการผสมผสานองค์ประกอบทางเคมีจากผลรวมออกไซด์หลักของกากอุตสาหกรรมแต่ละประเภท สอดคล้องกับเกณฑ์ที่วิเคราะห์จากสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จากผลการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1. ปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม ประกอบด้วย

- สัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมที่เหมาะสม
- ความละเอียดของวัตถุดิบตั้งต้น
- รูปแบบและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า สัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมที่เหมาะสมและมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักตั้งต้นประกอบด้วย ตะกอนประปา อยู่ในช่วง 20 - 25% ผุ่นผงหินปูนอยู่ในช่วง 25 - 50% และเปลือกหอยแครงอยู่ในช่วง 5 - 70%

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบ ซึ่งได้แก่ ตะกอนประปา ผุ่นผงหินปูน เปลือกหอยแครง และปูนขาว ที่อัตราส่วน 25 : 50 : 5 : 20 ซึ่งเมื่อเผาด้วยรูปแบบการเผาที่อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสม กล่าวคือที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 7 °C ต่อนาที และอุณหภูมิสูงสุด 1,450 °C เกิดเป็นปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่มีสมบัติเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งทางด้านองค์ประกอบทางเคมี และด้านกายภาพ

2. จากการวิเคราะห์หลักไถของปฏิกิริยาเคมีตามช่วงอุณหภูมิของการเผาที่ระดับต่างๆ พบว่าในช่วงต้นวัตถุดิบมีการสลายตัวจากการสูญเสียน้ำในโครงสร้างและเกิด CaO ที่อุณหภูมิประมาณ 250 – 650 °C (Evaporation และ Calcination) จากนั้นเกิดการรวมตัวกันระหว่าง CaO กับ SiO<sub>2</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เกิดเป็น C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 1,000 – 1,300 °C สำหรับสารประกอบหลัก C<sub>3</sub>S และ C<sub>2</sub>S จะเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ในช่วงสุดท้ายของการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,300 – 1,450 °C

3. ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมมีองค์ประกอบทางเคมีเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type I เมื่อคำนวณปริมาณสารประกอบหลักตาม Bouge's Compounds พบว่าปูนซีเมนต์สังเคราะห์มีปริมาณสารประกอบ C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>4</sub>AF น้อยกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type I แต่มีปริมาณ C<sub>3</sub>A มากกว่า และมีระยะเวลาการก่อตัวค่อนข้างเร็วและมีการดูดซึมน้ำมาก จึงจัดอยู่ในกลุ่มของปูนซีเมนต์ประเภทแข็งตัวเร็ว (Rapid hardening type)

จากการศึกษาพบว่า ความละเอียด และปริมาณยิปซัม เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ กล่าวคือ มอร์ต้าที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่มีความละเอียดต่ำกว่า 2,000 ซม<sup>2</sup>/กรัม มีแนวโน้มเกิดการบวมตัวแตกร้าวในสภาพแช่น้ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อปูนซีเมนต์สังเคราะห์มีความละเอียดเพิ่มขึ้น (มากกว่า 3,500 ซม<sup>2</sup>/กรัม) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมอร์ต้าและความทนทานเพิ่มขึ้น

4. จากการวิเคราะห์สารประกอบในปูนซีเมนต์สังเคราะห์และสารผลิตภัณฑ์โดยใช้ X-Ray Diffraction (XRD) และสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์สังเคราะห์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ในช่วงต้น และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ในระยะยาวเช่นเดียวกับที่เกิดในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา สารผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์สังเคราะห์ได้แก่ Calcium Silicate Hydrate (CSH) Calcium Aluminate Hydrate (CAH) Ettringite และ Monosulphate Hydrate สารผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีผลต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้า

5. ปูนซีเมนต์สังเคราะห์สามารถประยุกต์ใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยมี การพัฒนากำลังรับแรงอัดตามอายุการบ่มและค่าความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับดิน ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I พบว่า มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าอย่าง ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นที่รวดเร็วเกิด Ettringite และ Monosulphate Hydrate ทำให้ปริมาณความชื้นลดลงอยู่ในช่วงเหมาะสมที่สารประกอบหลัก  $C_3S$ ,  $C_2S$  และ  $C_3A$  เกิดปฏิกิริยาเกิดสารผลิตภัณฑ์ Calcium Silicate Hydrate (CSH) Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ทำให้มีการพัฒนากำลังที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD

6. จากผลการทดสอบแรงดูดรวมของดินซีเมนต์พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) มีค่าลดลง ในขณะที่แรงดูดรวม (Total suction) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตามกำลังอัดของดิน ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดินซีเมนต์ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้น จะมีค่าแรงดูดรวมสูงขึ้นเช่นเดียวกัน กล่าวโดยสรุปคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีมีผลต่อแรงดูดรวม ระหว่างอนุภาคในมวลดิน ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างดินเกิดช่องว่างขนาดเล็กระดับจุลภาค (Micropore space) ที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่พัฒนาตามอายุการบ่ม ซึ่งสังเกตจากการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ในระดับจุลภาคอย่างชัดเจนตามอายุการบ่ม

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาเพื่อหาแหล่งวัตถุดิบของภาคอุตสาหกรรมแหล่งอื่นเพิ่มเติม โดยศึกษาจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีองค์ประกอบหลักเทียบเคียงกับวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เช่น เปลือกหอยต่างๆ เป็นตัวแทนวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียม หรือตะกอนสลัดจ์จากบ่อน้ำเสีย เป็นตัวแทนของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบจำพวกซิลิกาและอลูมินา เป็นต้น ทั้งนี้ภาคอุตสาหกรรมก่อนนำมาใช้ต้องไม่มีปริมาณโลหะหนักสูงเกินกว่ามาตรฐาน เพื่อยืนยันความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในสารวัตถุดิบตั้งต้น และสอดคล้องกับเกณฑ์การพิจารณา NICE Criteria

2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มขีดศักยภาพของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ให้มีกำลังอัดเทียบเคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type I และมีการพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์ให้เป็นปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษซึ่งมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานเฉพาะด้าน เช่น งานเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil cement column) เป็นต้น นอกจากนี้ควรมีการทดสอบสมบัติด้านอื่นๆ เช่น ความคงทนต่อการขัดสี ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน การเปลี่ยนแปลงสภาพเมื่ออยู่ในภาวะแช่น้ำนานๆ (Soaked condition) เป็นต้น

3. การผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการนี้มีข้อแตกต่างกับกระบวนการผลิตในระบบอุตสาหกรรมอยู่หลายประการ เช่น ลักษณะและขั้นตอนการเผาตัวอย่าง ขั้นตอนการลดอุณหภูมิเพื่อให้เกิดปูนเม็ด ลักษณะการบดและการผสมยิปซัม เป็นต้น ซึ่งจะมีผลสำคัญต่อองค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางกายภาพ ตลอดจนการรับกำลังอัดของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาผลกระทบถึงข้อแตกต่างระหว่างการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ กับการผลิตปูนซีเมนต์ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมดังกล่าวเพิ่มเติม

4. ควรมีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ (Sensitivity analysis) เช่น การวิเคราะห์ความละเอียดปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นต่ออัตราการพัฒนากำลังอัดและความสัมพันธ์ทางเศรษฐศาสตร์ ช่วงความละเอียดของสารตั้งต้นแต่ละประเภทที่เหมาะสม รูปแบบการเผาแบบต่างๆ ทั้งนี้ควรทำการศึกษากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากภาคอุตสาหกรรม เพื่อการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในชุมชนและยังเป็นการเผยแพร่ความรู้ให้แพร่หลาย ซึ่งอาจจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีราคาถูก

5. ในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมในเชิงพาณิชย์ ควรทำการวิเคราะห์เพื่อประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ตลอดอายุของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment แบบ Cradle to Grave) และกำหนดฉลากคาร์บอน (Carbon Footprint Labeling) แสดงระดับความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2550. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2550. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2554. ร่างแผนจัดการมลพิษ พ.ศ.2555-2559. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมประมง. 2554. การเลี้ยงหอยแครง. แหล่งที่มา: [http://www.fisheries.go.th/Dof\\_thai/knowledge/Aquacultures/Arca\\_sp/Arca\\_sp\\_index.htm](http://www.fisheries.go.th/Dof_thai/knowledge/Aquacultures/Arca_sp/Arca_sp_index.htm), 12 เมษายน 2554.

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2540. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540). กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

การประปานครหลวง. 2554. รายงานประจำปี 2553. การประปานครหลวง, กรุงเทพฯ.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2551. โรงไฟฟ้าแม่เมาะ. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

เกียรติคุณ ทองแดง. 2554. การใช้ประโยชน์และการประเมินวัฏจักรชีวิตของปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เกศรินทร์ พิมรักษา และ สกวรรณ ห่านจิตสุวรรณ. 2550. การผลิตวัสดุซีเมนต์ที่มีเบโไลท์เป็นองค์ประกอบสูงจากวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อประหยัดพลังงาน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสนอต่อกองทุนสนับสนุนงานวิจัย สกว.

จิตรกร วงศ์กรชาวลิต. 2543. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปาและการนำไปใช้งานเป็นวัสดุพอลิโพรไพลีนในงานคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ชัชวาล เศรษฐบุตร. 2540. **คอนกรีตเทคโนโลยี**. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, กรุงเทพฯ.

ธนศ มุณีแนม. 2546. **คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่ได้จากโรงประปาในการนำมาใช้งานเป็นวัสดุปอซโซลาน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์, ปริญญา จินดาประเสริฐ และ Shigemitsu Hatanaka. 2551. **คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์สำหรับการผลิตคอนกรีตพรุน**. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 4, จังหวัดอุบลราชธานี.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์, ยุวดี หิรัญ, สุมิตร นันทคำ และอนันศักดิ์ บุญก้อน. 2553. **การวางระบบท่อในงานทางเดินเท้าหรือฟุตบอลคอนกรีตพรุน**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15.

ปฏิภาณ สุทธิกุลบุตร. 2551. **ความขึ้นดินและการจัดการ**. เอกสารประกอบการสอน, คณะผลิตกรรมการเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปิติฤกษ์ หัสนันท์. 2547. **คุณสมบัติทางกลและความทนทานของมอร์ตาร์ผสมเถ้าตะกอนสลัดจ์จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และจານูมาศ บุญสนิท. 2552. **การสร้างหน่วยสเกลเพื่อใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบของโลหะหนัก (โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี) ที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสนอต่อกองทุนสนับสนุนงานวิจัย สกว.

\_\_\_\_\_. และ อริสรา ทองศรีนุ่น. 2549. **ผลของแคดเมียมที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์และวิเคราะห์การชะล้าง**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสนอต่อกองทุนสนับสนุนงานวิจัย สกว.

\_\_\_\_\_. และ เอกชัย ทวีกิจวานิช. 2548. **การศึกษาการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ที่ใช้กากของเสียอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสนอต่อกองทุนสนับสนุนงานวิจัย สกว.

มานะ อภิพัฒนะมนตรี. 2541. **วิศวกรรมปฐพีและฐานราก**. ตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2535. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. ม.ป.ท.

วสัน สุทธิบูรณ์. 2552. **การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบ Unconfined compression test ชนิดวัดแรงจุด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภกิจ นนทนานันท์, เกียรติคุณ ทองแดง, ณพล อยู่บรรพต, ดวงฤดี นายสุวรรณ, มณฑล ฐานุตตมวงศ์. 2554. **การใช้ประโยชน์ปูนซีเมนต์จากกากอุตสาหกรรมโดยผลิตเป็นคอนกรีตพรุน**. การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 49 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์.

สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย. 2543. **เถ้าลอยแม่เมาะ**. แหล่งที่มา: <http://flyash.learn.in.th/036.html>, 1 เมษายน 2554.

สมเกียรติ รอดดียิ่ง. 2541. **การพัฒนาคุณภาพอิฐมอญที่ผลิตจากตะกอนน้ำประปา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

สุขกมล วงศ์สุวรรณค์. 2545. **การวิเคราะห์ปูนขาวจากเปลือกหอยที่แหล่งโบราณคดีวังไผ่ อำเภอบ้านหมี่ จังหวัดลพบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. **การผลิตและการตลาดหอยแครง**. เอกสารวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร เลขที่ 114, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สายัณห์ ทัศนโกศล. 2545. **ความทนทานของคอนกรีตผสมปูนหิน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

อภินิติ โชติสังกาศ. 2549. **Unsaturated soil mechanics**. เอกสารประกอบการสอน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

\_\_\_\_\_. 2551. โครงการการศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำในประเทศไทย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เสนอต่อกองทุนสนับสนุนงานวิจัย สกว.

\_\_\_\_\_. และวิษณุพงศ์ พ่อลิละ. 2551. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์.

AitCin, P.C. 2007. **Binders for Durable and Sustainable Concrete**. Taylor & Francis, London and New york.

Alp, I., H. Deveci and H. Süngün. 2008. Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. **Journal of Hazardous Materials**. 159(2-3): 390-395.

Ampadu, K.O. and K. Torii. 2001. Characterization of ecocement pastes and mortars produced from incinerated ashes. **Cement and Concrete Research**. 31: 431-436.

August, U.E. and Y. Abba Mahmood. 2002. Ash from timber waste as cement replacement. **Cement & Concrete Composites**. 24: 219-222.

Aydın, S., A. Hilmi Aytac and R. Kambiz. 2009. Effects of fineness of cement on polynaphthalene sulfonate based superplasticizer–cement interaction. **Construction and Building Materials**. 23: 2402–2408.

Bhatty, M.S.Y. 1986. **Properties of Blended Cements Made with Portland Cement, Cement Kiln Dust, Fly ash, and Slag**. Proceedings, 8<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, Sub-them 3.1.

- Binifi, H., T. Huseyin and M.M. Kose. 2007. The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice. **Construction and Building Materials**. 21: 1122–1128.
- Bennison, P. 2001. **The design of reinforced cement-based protective coatings**. Cortec Corporation.
- Benstead, J. 2001. **Cement science: It is simple, cement**. Wapno beton.
- Bogue, R. H. 1955. **Chemistry of Portland Cement**. Newyork, Reinhold.
- Chareerat, T., S. Nontananandh, M. Prasertrungruang, P. Chindaprasirt, T. Nakagawa and S. Hatanaka. 2009. **Porous Concrete: Environmentally Friendly Applications in Thailand**. Proc. of the 16<sup>th</sup> Tri-University International Joint Seminar and Symposium, Mie University.
- Czernin, W. 1962. **Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers**. Crosby Lockwood, London.
- Department of Highways of Thailand (DOH) and Japan International Cooperation Agency, (JICA). 1998. **Manual for Design and Construction of Cement Column Method**./ n.p.
- Dyer, T.D. and R. K. Dhir. 2004. Hydration reactions of cement combinations containing vitrified incinerator fly ash. **Cement and Concrete Research**. 34: 849–856.
- Elliott, H.A. and L.M. Singer. 1988. Effect of Water Treatment Sludge on Growth and Elemental Composition of Tomato (*Lycopersicon Esculentum*) Shoot. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**. 345-354.

- Frías M., R. García, R. Vigil and S. Ferreiro. 2008. Calcination of art paper sludge waste for the use as a supplementary cementing material. **Applied CLAY Science**, CLAY-01411.
- Fredlund, D.G. and H. Rahardjo. 1993. **Soil mechanics for unsaturated soils**. Wiley, New York.
- Garcés, P., M. Pérez Carrión, E. García-Alcofel, J. Payá, J. Monzó and M.V. Borrachero. 2008. Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash. **Waste Management**. 28(12): 2495-2502.
- Hazairin, I.M. 2001. **Limestone Powder and Pozolanic Materials as a Raw Materials for Hydraulics Cement Alternative**. ITENAS, Bandung, Indonesia.
- Hewlett, P.C. 1998. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4th ed. Butterworth-Heinemann.
- Jawed, L., J. Skalny and J.F. Young. 1983. **Hydration of Portland Cement**. Structure and Performance of Cement, P. Barnes Ed., Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York.
- Jensen, O. and F. Hansan. 2001. Water-entrained cement-based materials: Principle and theoretical background. **Cement and Concrete Research**. 31(4): 647-654.
- Jill R, P., Chihpin Huang, Jung-Jen Kuo and Sheng-Huan Lin. 2008. Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement. **Waste Management**. 28(7): 1113-1118.
- Jose, A. A. 2010. Modelling of cement raw material compositional indices with direct sequential cosimulation. **Engineering Geology**. 114: 26-33.

- Kamon, M. and S. Nontananandh. 1990. Contribution of stainless-steel slag to the development of strength for seabed hedoro. **Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 30 (4): 63-72.
- \_\_\_\_\_. 1991. Combining Industrial Waste with Lime for Soil Stabilization. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**. 117(1): 25411.
- Khanbilvardi, R. and S. Afshari. 1995. Sludge Ash as Fine Aggregate for Concrete Mix. **Journal of Environmental Engineering**. 633-638.
- Lambe, T.W, A.S. Mitchaels and Z.C. Moh. 1959. **Improvement of soil-cement with alkali metal compounds**. Cited by Teerachat Ruenkraitersa and Suchate Eiamchoei. **Durability of soil cement**. Department of Highway, Bangkok, Thailand.
- Lin, K.L. and C.Y. Lin. 2005. Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. **Cement and Concrete Research**. 35: 1999-2007.
- Gany, M.S.J. 1997. **Cement and Concrete**. Chapman and Hall, London,
- Min, D., D. Hong, X. Lan and M. Tang. 1995. Mechanism of expansion in hardened cement pastes with hard-burnt free lime. **Cement and Concrete Research**. 25(2): 440-448.
- Mindess, S. and J.F. Young. 1981. **Concrete**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Mitchell, J.K and S.A. EI Jack. 1966. **The fabric of Soil-Cement and Its formation**. Proceedings of 14<sup>th</sup> National Conference Clay and Clay Minerals. 26: 297-305.
- Mokrzycki, E and U.A. Bochencyk. 2003. Alternative fuels for the cement industry. **Applied Energy**. 74(1-2): 95-100.

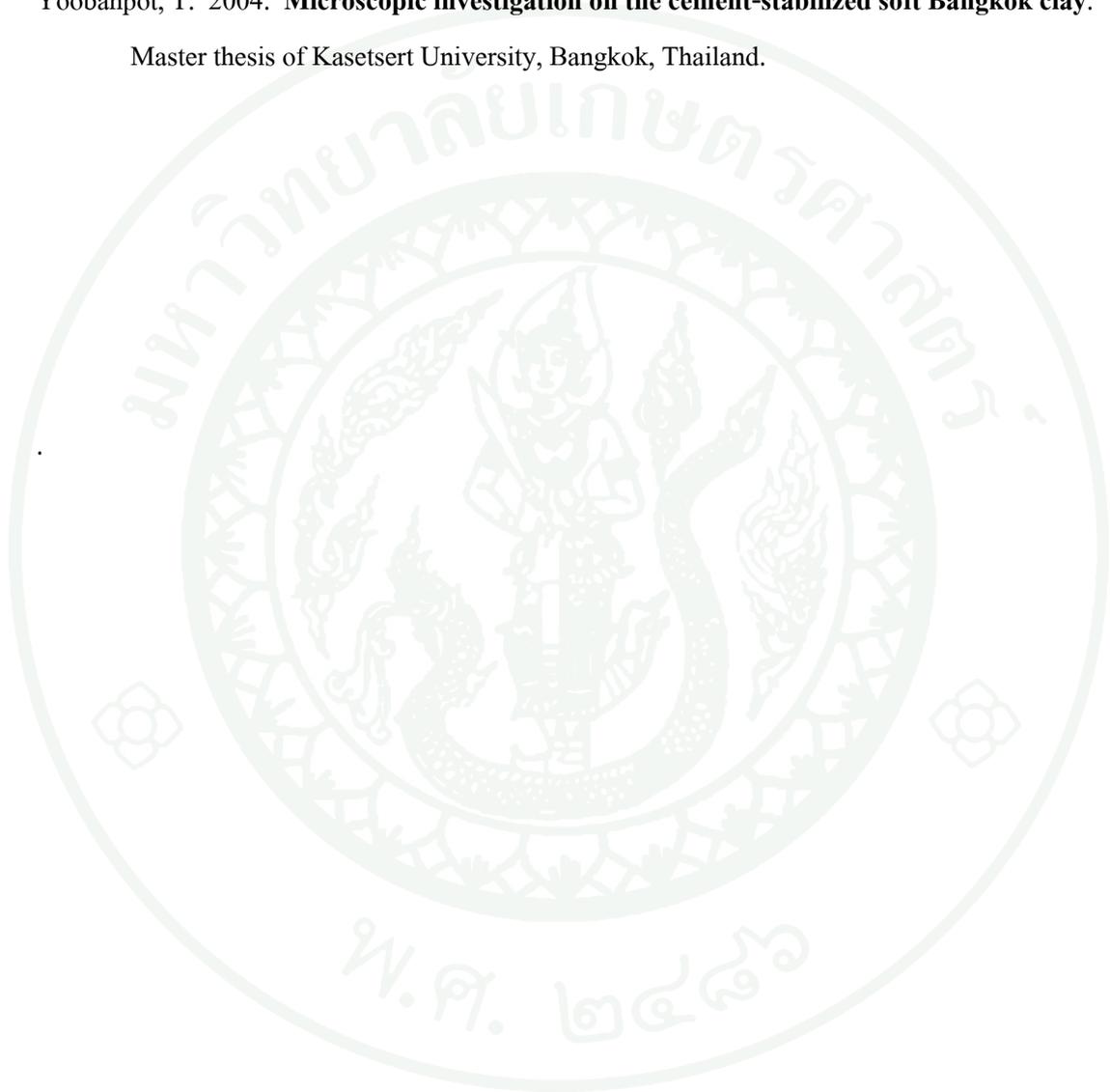
- Monzo, J., J. Paya, M. V. Borrachero and A. Corcoles. 1996. Use of Sewage Sludge Ash (SSA)-Cement Admixtures in Mortars. **Cement and Concrete Research**. 26(9): 1389-1398.
- \_\_\_\_\_. and E. Peris-Mora. 1999. Mechanical Behavior of Mortars Containing Sewage Sludge Ash (SSA) and Portland Cements with Different Tricalcium Aluminate Content. **Cement and Concrete Research**. 9(1): 87-94.
- Neville, A.M. 2002. **Properties of Concrete**. 4th ed. Pearson Education Limited. 844p.
- Nontananandh, S., M. Kamon and T. Seishi. 1991. **Environmental Geotechnology for Potential Waste Utilization**. Proc. of 9<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, Vol.1, pp.397-400.
- Nontananandh S. 1990. **Industrial Waste Utilization as Construction Materials by Chemical Stabilization**. Doctoral Dissertation of Kyoto University, Japan.
- \_\_\_\_\_, S. Boonyong, T. Yoobanpot and K. Chantawaragul. 2004. Strength Development of Soft Marine Clay Stabilized with Cement and Fly Ash. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**, 38: 539 – 552.
- \_\_\_\_\_, T. Yoobanpot and S. Boonyong. 2005. **Scanning electron microscopic investigation of cement stabilized soil**. Volume 3, GTE 23-27. *In Proc. of the 10<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering*, Engineering Institute of Thailand, Chonburi.
- Owner, M., K. Erdogdu and A. Gunlu. 2003. Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement. **Cement and Concrete Research**. 33: 463–469.
- Osborn, E.F. and A. Muan. 1964. **Revised and redrawn "Phase Equilibrium Diagrams of Oxide Systems"**. Published by the American Ceramic Society

- Pan, S., Dyi-Hwa Tseng, Chic-Chiang Lee and Chau Lee. 2003. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. **Cement and Concrete Research**. 33(1): 1749-1754.
- Pereira, F. R., R. James Ball, J. Rocha, J.A. Labrincha and G.C. Allen. 2008. New waste based clinkers: Belite and lime formulations. **Cement and Concrete Research**. 38(4): 511-521.
- Pimraksa, K., S. Hanjitsuwan and P. Chindapasirt. 2009. Synthesis of belite cement from lignite fly ash. **Ceramics Int** 168(1): 44–50.
- Pliskin, L. 1993. **La Fabrication du ciment**. Eyrolles, Paris.
- Puertas, F., I. Garcia-Diaz, A. Barba, M.F. Gazulla, M. Palacios, M.P. Gomez and S. Martinez-Ramirez. 2008. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. **Cement & Concrete Composites**. 30: 798–805.
- Saikia, N., S. Kato and T. Kojima. 2007. Production of cement clinkers from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash. **Waste Management**. 27: 1178–1189.
- Saitoh, S., Y.Suzuki and K.Shirai. 1985. **Hardening of soil improved by deep mixing method**. Cited by M.R. Hausman. **Engineering Principles of Ground Modification**. McGraw-Hill Publ. Co., Sydney.
- Shiha P.H., J.E. Changa and L.C. Chiang. 2003. Replacement of raw mix in cement production by municipal solid waste incineration ash. **Cement and Concrete Research**. 33: 1831–1836.

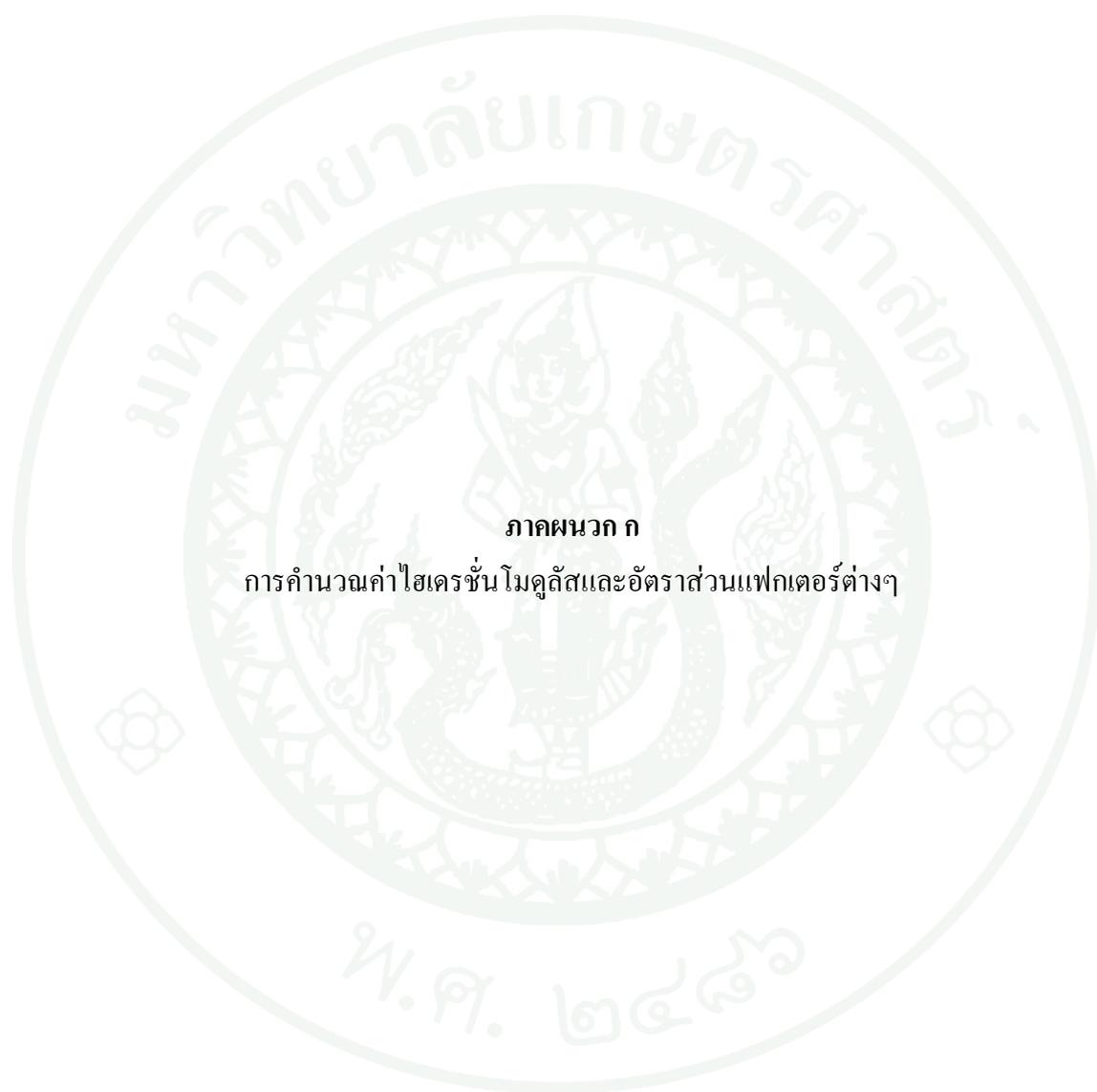
- Shimoda, T., S. Yokoyama and H. Hirao. 1999. **A New Portland Cement to Solve Municipal and Industrial Waste Problems.** *In Proc. of the International Conference “Creating with Concrete”*, University of Dundee, Scotland, UK.
- Swayze, M.A. 1962. The quaternary system  $\text{CaO-C}_3\text{A}_3\text{-C}_2\text{F-C}_2\text{S}$  as modified by saturation with magnesia. **Amer. J. Sci.** 244: 65-94.
- \_\_\_\_\_. 1997. **Cement Chemistry.** 2nd Ed. Academic Press, London.
- Temuujin, J. and A. van Riessen. 2009. Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer. **Journal of Hazardous Materials.** 164: 634–639.
- Tosun, K and B. Baradan. 2010. Effect of ettringite morphology on DEF-related expansion. **Cement & Concrete Composites.** 32: 271–280.
- Tsakiridis, P.E., G.D. Papadimitriou, S. Tsvilis, C. Koroneos. 2008. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. **Journal of Hazardous Materials.** 152(2): 805-811.
- Vangelatos, I., G.N. Angelopoulou and D. Boufounos. 2009. Utilization of ferroalumina as raw material in the production of Ordinary Portland Cement. **Journal of Hazardous Materials.** 168: 473–478.
- Wang, K.S., K.L. Lin and Z.Q. Huang. 2001. Hydraulic activity of municipal solid waste incinerator fly-ash-slag-blended eco-cement. **Cement and Concrete Research.** 3: 97-103.
- Yamazaki, U., H. Kamiaka and S. Kobayashi. 1980. **Role of expansive additive CaO in expansive cement.** *In Proc. of the 7<sup>th</sup> International Conference on Chemistry of Cement.* Paris, France.

Yan, P., F. Zheng, J. Peng and X. Qin. 2004. Relationship between delayed ettringite formation and delayed expansion in massive shrinkage-compensating concrete. **Cement & Concrete Composites**. 26: 687–693.

Yoobanpot, T. 2004. **Microscopic investigation on the cement-stabilized soft Bangkok clay**. Master thesis of Kasetsert University, Bangkok, Thailand.







ตารางผนวกที่ ก1 การคำนวณไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M1

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	32.34 (53.9/100 x 60)	0.00 (0.00/100 x 60)	0.04 (0.07/100 x 60)	0.01 (0.02/100 x 60)
ฝุ่นผงหินปูน	7.76 (51.7/100 x 15)	0.01 (0.06/100 x 15)	0.02 (0.11/100 x 15)	0.01 (0.04/100 x 15)
ตะกอนประปา	0.08 (0.04/100 x 20)	3.48 (17.39/100 x 20)	10.43 (52.17/100 x 20)	1.91 (9.56/100 x 20)
เถ้าลอย	0.83 (16.60/100 x 5)	1.00 (19.90/100 x 5)	1.84 (36.79/100 x 5)	0.50 (10.09/100 x 5)
ปูนขาว	0.00 (100/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)
รวม (%)	41.01	4.48	12.33	2.44

หมายเหตุ HM หรือ HR =  $41.01 / (4.48 + 12.33 + 2.44) = 2.13$

LSF =  $(100 \times 41.01) / [(2.8 \times 12.33) + (1.18 \times 4.48) + (0.65 \times 2.44)] = 99.03$

Ms หรือ SR =  $12.33 / (4.48 + 2.44) = 1.78$

Ma หรือ AR =  $4.48 / 2.44 = 1.84$

ตารางผนวกที่ ก2 การคำนวณไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M2

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	8.09 (53.9/100 x 15)	0.00 (0.00/100 x 15)	0.01 (0.07/100 x 15)	0.00 (0.02/100 x 15)
ฝุ่นผงหินปูน	31.02 (51.7/100 x 60)	0.04 (0.06/100 x 60)	0.07 (0.11/100 x 60)	0.02 (0.04/100 x 60)
ตะกอนประปา	0.08 (0.04/100 x 20)	3.48 (17.39/100 x 20)	10.43 (52.17/100 x 20)	1.91 (9.56/100 x 20)
เถ้าลอย	0.83 (16.60/100 x 5)	1.00 (19.90/100 x 5)	1.84 (36.79/100 x 5)	0.50 (10.09/100 x 5)
ปูนขาว	0.00 (100/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)
รวม (%)	40.02	4.51	12.35	2.44

หมายเหตุ HM หรือ HR =  $40.02 / (4.51 + 12.35 + 2.44) = 2.07$

LSF =  $(100 \times 40.02) / [(2.8 \times 12.35) + (1.18 \times 4.51) + (0.65 \times 2.44)] = 96.44$

Ms หรือ SR =  $12.35 / (4.51 + 2.44) = 1.78$

Ma หรือ AR =  $4.51 / 2.44 = 1.84$

ตารางผนวกที่ ก3 การคำนวณไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M3

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	29.65 (53.9/100 x 55)	0.00 (0.00/100 x 55)	0.04 (0.07/100 x 55)	0.01 (0.02/100 x 55)
ฝุ่นผงหินปูน	7.76 (51.7/100 x 15)	0.01 (0.06/100 x 15)	0.02 (0.11/100 x 15)	0.01 (0.04/100 x 15)
ตะกอนประปา	0.08 (0.04/100 x 20)	3.48 (17.39/100 x 20)	10.43 (52.17/100 x 20)	1.91 (9.56/100 x 20)
เถ้าลอย	0.83 (16.60/100 x 5)	1.00 (19.90/100 x 5)	1.84 (36.79/100 x 5)	0.50 (10.09/100 x 5)
ปูนขาว	5.00 (100/100 x 5)	0.00 (0/100 x 5)	0.00 (0/100 x 5)	0.00 (0/100 x 5)
รวม (%)	43.31	4.48	12.33	2.44

หมายเหตุ HM หรือ HR =  $43.31 / (4.48 + 12.33 + 2.44) = 2.25$

LSF =  $(100 \times 43.31) / [(2.8 \times 12.33) + (1.18 \times 4.48) + (0.65 \times 2.44)] = 104.63$

Ms หรือ SR =  $12.33 / (4.48 + 2.44) = 1.78$

Ma หรือ AR =  $4.48 / 2.44 = 1.84$

ตารางผนวกที่ ก4 การคำนวณไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M4

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	8.09 (53.9/100 x 15)	0.00 (0.00/100 x 15)	0.01 (0.07/100 x 15)	0.00 (0.02/100 x 15)
ฝุ่นผงหินปูน	28.44 (51.7/100 x 55)	0.03 (0.06/100 x 55)	0.06 (0.11/100 x 55)	0.02 (0.04/100 x 55)
ตะกอนประปา	0.08 (0.04/100 x 20)	3.48 (17.39/100 x 20)	10.43 (52.17/100 x 20)	1.91 (9.56/100 x 20)
เถ้าลอย	0.83 (16.60/100 x 5)	1.00 (19.90/100 x 5)	1.84 (36.79/100 x 5)	0.50 (10.09/100 x 5)
ปูนขาว	5.00 (100/100 x 5)	0.00 (0/100 x 5)	0.00 (0/100 x 5)	0.00 (0/100 x 5)
รวม (%)	42.43	4.51	12.35	2.44

หมายเหตุ HM หรือ HR =  $42.43 / (4.51 + 12.35 + 2.44) = 2.20$

LSF =  $(100 \times 42.43) / [(2.8 \times 12.35) + (1.18 \times 4.51) + (0.65 \times 2.44)] = 102.31$

Ms หรือ SR =  $12.35 / (4.48 + 2.44) = 1.78$

Ma หรือ AR =  $4.51 / 2.44 = 1.84$

ตารางผนวกที่ ก5 การคำนวณไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M5

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	37.73 (53.9/100 x 70)	0.00 (0.00/100 x 70)	0.05 (0.07/100 x 70)	0.01 (0.02/100 x 70)
ฝุ่นผงหินปูน	2.59 (51.7/100 x 5)	0.00 (0.06/100 x 5)	0.01 (0.11/100 x 5)	0.00 (0.04/100 x 5)
ตะกอนประปา	0.10 (0.04/100 x 25)	4.35 (17.39/100 x 25)	13.04 (52.17/100 x 25)	2.39 (9.56/100 x 25)
เถ้าลอย	0.00 (16.60/100 x 0)	0.00 (19.90/100 x 0)	0.00 (36.79/100 x 0)	0.00 (10.09/100 x 0)
ปูนขาว	0.00 (100/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)
รวม (%)	40.42	4.35	13.10	2.41

หมายเหตุ HM หรือ HR =  $40.42 / (4.35 + 13.10 + 2.41) = 2.04$

LSF =  $(100 \times 40.42) / [(2.8 \times 13.10) + (1.18 \times 4.35) + (0.65 \times 2.41)] = 93.18$

Ms หรือ SR =  $13.10 / (4.35 + 2.41) = 1.94$

Ma หรือ AR =  $4.48 / 2.44 = 1.81$

ตารางผนวกที่ 6 การคำนวณไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M6

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	2.07 (53.9/100 x 5)	0.00 (0.00/100 x 5)	0.00 (0.07/100 x 5)	0.00 (0.02/100 x 5)
ฝุ่นผงหินปูน	36.19 (51.7/100 x 70)	0.04 (0.06/100 x 70)	0.08 (0.11/100 x 70)	0.03 (0.04/100 x 70)
ตะกอนประปา	0.10 (0.04/100 x 25)	4.35 (17.39/100 x 25)	13.04 (52.17/100 x 25)	2.39 (9.56/100 x 25)
เถ้าลอย	0.00 (16.60/100 x 0)	0.00 (19.90/100 x 0)	0.00 (36.79/100 x 0)	0.00 (10.09/100 x 0)
ปูนขาว	0.00 (100/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)	0.00 (0/100 x 0)
รวม (%)	38.99	4.39	13.12	2.42

หมายเหตุ HM หรือ HR =  $38.99 / (4.39 + 13.12 + 2.42) = 1.96$

LSF =  $(100 \times 38.99) / [(2.8 \times 13.12) + (1.18 \times 4.39) + (0.65 \times 2.42)] = 89.62$

Ms หรือ SR =  $13.12 / (4.48 + 2.42) = 1.93$

Ma หรือ AR =  $4.39 / 2.42 = 1.81$

ตารางผนวกที่ 7 การคำนวณไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M7

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	26.95 (53.9/100 x 50)	0.00 (0.00/100 x 50)	0.04 (0.07/100 x 50)	0.01 (0.02/100 x 50)
ฝุ่นผงหินปูน	2.59 (51.7/100 x 5)	0.00 (0.06/100 x 5)	0.01 (0.11/100 x 5)	0.00 (0.04/100 x 5)
ตะกอนประปา	0.10 (0.04/100 x 25)	4.35 (17.39/100 x 25)	13.04 (52.17/100 x 25)	2.39 (9.56/100 x 25)
เถ้าลอย	0.00 (16.60/100 x 0)	0.00 (19.90/100 x 0)	0.00 (36.79/100 x 0)	0.00 (10.09/100 x 0)
ปูนขาว	20.00 (100/100 x 20)	0.00 (0/100 x 20)	0.00 (0/100 x 20)	0.00 (0/100 x 20)
รวม (%)	49.64	4.35	13.08	2.40

หมายเหตุ HM หรือ HR =  $49.64 / (4.35 + 13.08 + 2.40) = 2.50$

LSF =  $(100 \times 49.64) / [(2.8 \times 13.08) + (1.18 \times 4.35) + (0.65 \times 2.40)] = 114.55$

Ms หรือ SR =  $13.08 / (4.35 + 2.40) = 1.94$

Ma หรือ AR =  $4.35 / 2.40 = 1.81$

ตารางผนวกที่ ก8 การคำนวณไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M8

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	2.70 (53.9/100 x 5)	0.00 (0.00/100 x 5)	0.00 (0.07/100 x 5)	0.00 (0.02/100 x 5)
ฝุ่นผงหินปูน	25.85 (51.7/100 x 50)	0.03 (0.06/100 x 50)	0.06 (0.11/100 x 50)	0.02 (0.04/100 x 50)
ตะกอนประปา	0.10 (0.04/100 x 25)	4.35 (17.39/100 x 25)	13.04 (52.17/100 x 25)	2.39 (9.56/100 x 25)
เถ้าลอย	0.00 (16.60/100 x 0)	0.00 (19.90/100 x 0)	0.00 (36.79/100 x 0)	0.00 (10.09/100 x 0)
ปูนขาว	20.00 (100/100 x 20)	0.00 (0/100 x 20)	0.00 (0/100 x 20)	0.00 (0/100 x 20)
รวม (%)	48.65	4.38	13.10	2.41

หมายเหตุ HM หรือ HR =  $48.65 / (4.38 + 13.10 + 2.41) = 2.45$

LSF =  $(100 \times 48.65) / [(2.8 \times 13.10) + (1.18 \times 4.38) + (0.65 \times 2.41)] = 112.04$

Ms หรือ SR =  $13.10 / (4.38 + 2.41) = 1.93$

Ma หรือ AR =  $4.38 / 2.41 = 1.81$

ตารางผนวกที่ 9 การคำนวณไฮดรเจน โมดูลัสและอัตราส่วนแฟกเตอร์ต่างๆ ของ M9

ชนิด กาก อุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปลือกหอยแครง	2.70 (53.9/100 x 5)	0.00 (0.00/100 x 5)	0.00 (0.07/100 x 5)	0.00 (0.02/100 x 5)
ฝุ่นผงหินปูน	18.10 (51.7/100 x 35)	0.02 (0.06/100 x 35)	0.04 (0.11/100 x 35)	0.01 (0.04/100 x 35)
ตะกอนประปา	0.16 (0.04/100 x 40)	6.96 (17.39/100 x 40)	20.87 (52.17/100 x 40)	3.83 (9.56/100 x 40)
เถ้าลอย	0.00 (16.60/100 x 0)	0.00 (19.90/100 x 0)	0.00 (36.79/100 x 0)	0.00 (10.09/100 x 0)
ปูนขาว	20.00 (100/100 x 20)	0.00 (0/100 x 20)	0.00 (0/100 x 20)	0.00 (0/100 x 20)
รวม (%)	40.95	6.98	20.91	3.84

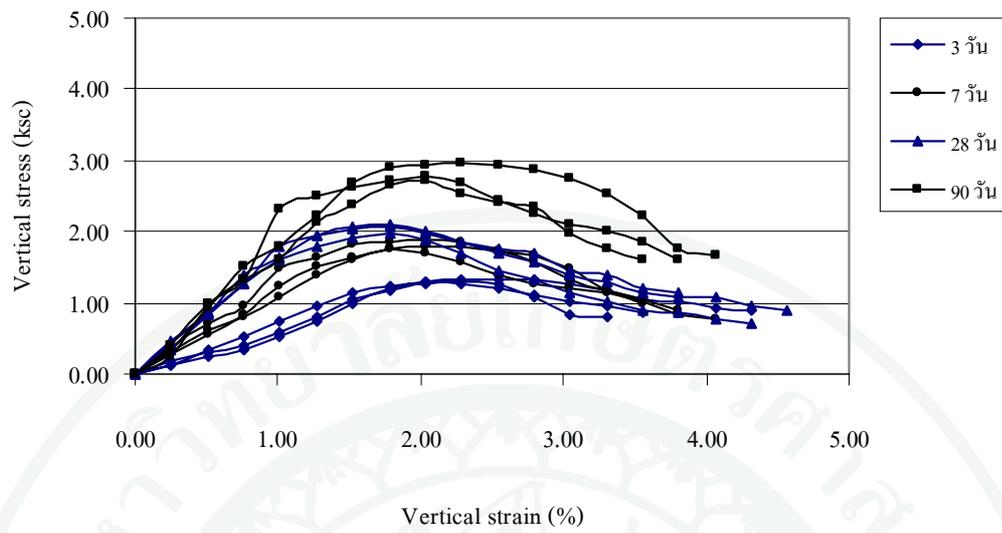
หมายเหตุ HM หรือ HR =  $40.95 / (6.98 + 20.91 + 3.84) = 1.29$

LSF =  $(100 \times 40.95) / [(2.8 \times 20.91) + (1.18 \times 6.98) + (0.65 \times 3.84)] = 59.11$

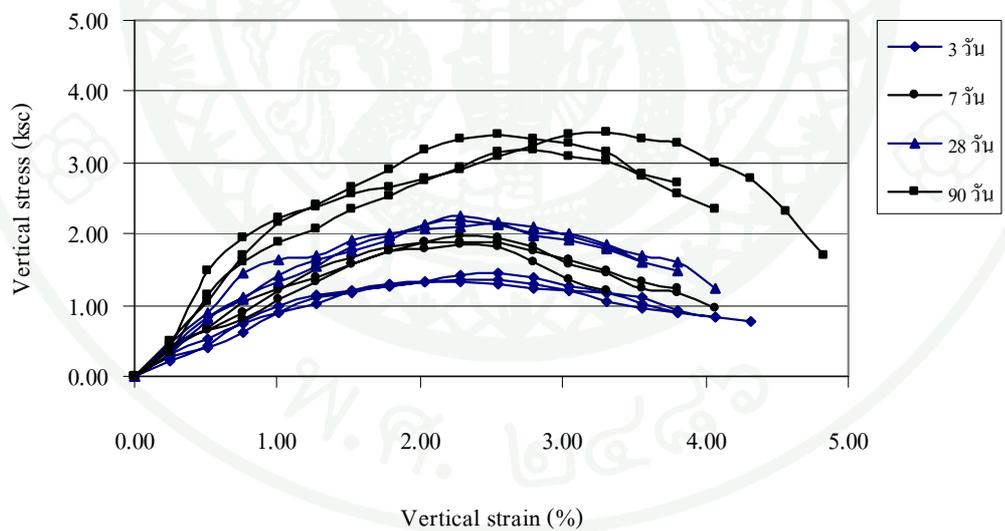
Ms หรือ SR =  $20.91 / (6.98 + 3.84) = 1.93$

Ma หรือ AR =  $6.98 / 3.84 = 1.82$

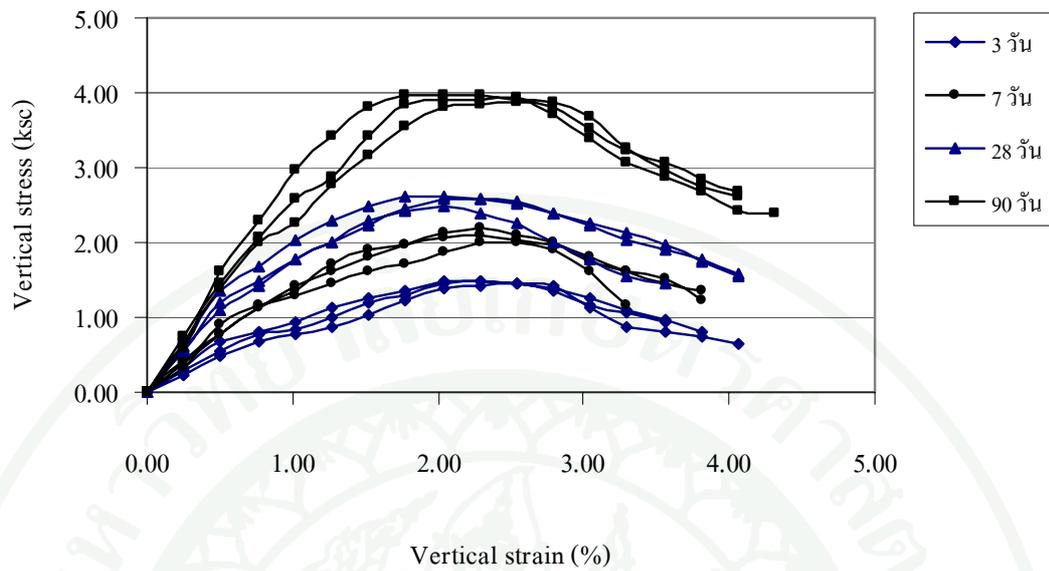




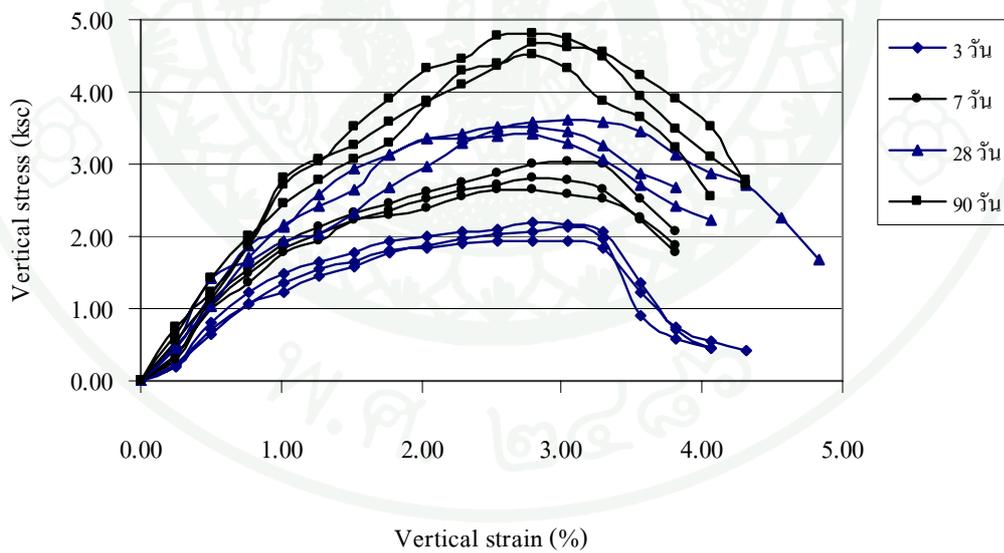
ภาพผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ SCM1



ภาพผนวกที่ ข2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ SCM2



ภาพผนวกที่ ข3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ SCM3



ภาพผนวกที่ ข4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ SCM4

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	นายณพล อยู่บรรพต
วัน เดือน ปี ที่เกิด	15 สิงหาคม 2520
สถานที่เกิด	จังหวัดชัยนาท
ประวัติการศึกษา	Master of Engineering (Civil Engineering) Kasetsart University, Bangkok, Thailand วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกร 6
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปี 2553 จากสำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) จำนวน 300,000 บาท