รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

สารเคลือบผิวคอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าลอยสำหรับใช้งานในสภาวะกรด

(Coating materials for concrete prepared from alkali-activated fly ash for application in acid condition)

จัดทำโดย

รองศาสตราจารย์ ดร. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้

จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 103139

สัญญาเลขที่ 38/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

สารเคลือบผิวคอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าลอยสำหรับใช้งานในสภาวะกรด

(Coating materials for concrete prepared from alkali-activated fly ash for application in acid condition)

จัดทำโดย

รองศาสตราจารย์ ดร. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ทำจากเถ้าลอยในกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์แบบใช้ถ่านหินบด (เถ้าลอย PCC) เพื่อเป็นสารเคลือบที่ทนต่อสภาพแวดล้อมกรด และเกลือ โดยการนำจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เตรียมจากเถ้าลอย PCC ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 15 โมลาร์ ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 โดยมวล และอัตราส่วนโดยมวลของทรายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 2 มาเคลือบปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ แล้วดึงขึ้นทันที และใช้เวลาในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 30 วินาที และ 60 วินาที นำตัวอย่างเคลือบไปบ่มที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำ สารละลาย 5% $MgSO_4$ สารละลาย 3% H_2SO_4 และสารละลาย 0.005% H_2SO_4 เป็นระยะเวลา 1 เดือน และ 3 เดือน ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction, Infrared spectroscopy, โครงสร้างระดับจุลภาค, ความแข็ง, pH และ Ca^{2+} ของสารละลายที่ใช้บ่มตัวอย่าง รวมทั้งแรงยึดติดระหว่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์กับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ และค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการจุ่มเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ทำให้มีความหนาของวัสดุเคลือบมากขึ้น ความหนาของวัสดุเคลือบลดลงตามระยะเวลาการแช่ในสารละลาย ส่วนความคงทนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่อสภาวะต่างๆแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สามารถทนกรดที่มีความเข้มข้นต่ำ (0.005% H_2SO_4) ได้ดีกว่ากรดที่มีความเข้มข้นสูง (3% H_2SO_4) อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความคงทนต่อกรด 3% H_2SO_4 ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะระยะเวลาการแช่กรด 3 เดือนขึ้นไป

Abstract

This research studied on the properties of geopolymer mortar made from the pulverized lignite coal combustion fly ash (PCC fly ash). These geopolymers were used as coating material for resistant to acid and salt environments. The geopolymer mortar was prepared from PCC fly ash mixed with sodium silicate and 15 M sodium hydroxide, which mass ratio of 2. Sand – to – fly ash mass ratio of 2 was used. Cement mortar was dip – coated in geopolymer mortar. Samples were dipped into fresh geopolymer mortar for 30 and 60 seconds and then pulled up. Coated samples were cured at 65°C for 24 h. Then, the samples were immersed in water and solutions of 5% $MgSO_4$, 3% H_2SO_4 and 0.005% H_2SO_4 for 1 and 3 months. X-ray diffraction, Infrared spectrophotometry, microstructure, hardness, pH and Ca^{2+} leaching test of immersed solution were analyzed. Bonding strength and compressive strength of geopolymer mortar were also measured.

The results indicated that increase in time of dip-coating with geopolymer mortar on cement mortar resulted in increased in the thickness of coating material. The dimension of coating material decreased with time of immersion in a solution. The durability of geopolymer mortar with different immersion condition showed that geopolymer mortar was resistant to low acid concentration (0.005% H_2SO_4) more than that acid concentration (3% H_2SO_4). However, geopolymer mortar had more resistant to 3% H_2SO_4 acid than cement mortar, significantly at curing age more than 3 months.

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ		i
Abstract		li
สารบัญรูป		vi
สารบัญตาราง		viii
บทที่ 1	**บทนำ**	1
1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2	วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3	ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5	Output ที่ได้จากโครงการ	3
บทที่ 2	**ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	4
2.1	ความเป็นมาของจีโอโพลิเมอร์	4
2.2	เถ้าลอย (Fly ash)	5
2.3	ระบบการเผาถ่านหิน	6
2.4	คุณสมบัติที่สำคัญของจีโอโพลิเมอร์	6
2.5	เทคนิคที่ใช้ทดสอบ	7
	2.5.1 เทคนิคX-ray diffraction spectroscopy (XRD)	7
	2.5.2 เทคนิค Infrared Spectroscopy (IR)	8
	2.5.3 การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย	8
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.7	สรุป	11
บทที่ 3	**ระเบียบวิธีวิจัย**	12
3.1	เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี	12
3.2	วิธีการทดลอง	13
	3.2.1 การเตรียมสารละลาย	13
	3.2.2 การเตรียมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	14

		หน้า
	3.2.3 การเตรียมตัวอย่างเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย PCC บนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	15
	3.2.4 การศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยเทคนิค Infrared spectroscopy	17
	3.2.5 การศึกษาจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค X-ray diffractrometer	17
	3.2.6 การศึกษาการยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย PCC บนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	17
	3.2.7 การศึกษากำลังอัด	18
บทที่ 4	**ผลการวิจัย**	
4.1	รูปร่างและลักษณะของเถ้าลอย	20
4.2	องค์ประกอบทางเคมี	20
	4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย PCC	20
	4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของทรายแม่น้ำ	21
4.3	การศึกษาน้ำหนักและความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	22
4.4	การทดสอบความแข็งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	23
4.5	การศึกษาค่า Ca^{2+} ในสารละลายที่แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนซีเมนต์มอร์ต้าร์	25
4.6	การศึกษาค่า pH ในสารละลายที่แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนซีเมนต์มอร์ต้าร์	26
4.7	การทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์โดยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)	28
4.8	การทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์โดยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR)	29
4.9	การวิเคราะห์โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป	32
4.10	การทดสอบการยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	34
4.11	การศึกษากำลังอัด	35
	4.11.1 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (Mortar)	35
	4.11.2 กำลังอัดปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ (Mortar)	38

		หน้า
บทที่ 5	**สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ**	40
5.1	สรุปผลการวิจัย	40
5.2	ข้อเสนอแนะ	41
บทที่ 6	**ผลผลิต**	42
	รายงานสรุปการเงิน	47
	บรรณานุกรรม	48
	ประวัตินักวิจัย	50

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์	4
2.2	เครื่องทดสอบกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์	9
3.1	การเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บนปูนซีเมนต์	16
3.2	การแช่สารละลาย	16
3.3	การยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	17
4.1	ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย PCC	20
4.2	XRD ของเถ้าลอย PCC	21
4.3	XRD ของทรายแม่น้ำ	22
4.4	ค่าเฉลี่ยความแข็งของจีโอโพลิเมอร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 0 วินาที (จุ่มแล้วนำขึ้นทันที) ที่บ่มในในสภาวะต่างๆ	23
4.5	ค่าเฉลี่ยความแข็งของจีโอโพลิเมอร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 30 วินาที ที่บ่มในในสภาวะต่างๆ	24
4.6	ค่าเฉลี่ยความแข็งของจีโอโพลิเมอร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 60 วินาที ที่บ่มในในสภาวะต่างๆ	24
4.7	ค่าเฉลี่ยของ Ca^{2+} ของในสารละลายที่บ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	25
4.8	ค่าเฉลี่ยของ pH ของสารละลายที่บ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	27
4.9	XRD ของเถ้าลอย PCC ทรายแม่น้ำ และจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์และแช่ในสารละลายที่อายุในการบ่ม 1 เดือน	28
4.10	หมู่ฟังก์ชันของเถ้าลอย PCC ทรายแม่น้ำ และจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายต่างๆ	30
4.11	หมู่ฟังก์ชันของเถ้าลอย PCC เกลือที่เกิดบนผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 และจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายต่างๆ	31
4.12	โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย	32
4.13	โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลายกรด 3% H_2SO_4	33

รูปที่		หน้า
4.14	โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4 (C_Geo_0.005a)	33
4.15	ค่าเฉลี่ยการยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เทียบกับความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (มิลลิเมตร)	35
4.16	ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในสภาวะต่างๆ	36
4.17	ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลายที่อายุ 1 เดือน 3 เดือน และ 6 เดือน	38

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ปริมาณส่วนผสมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	14
3.2	ปริมาณอัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์	15
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย PCC	21
4.2	น้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	22
4.3	ความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	22

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในยุคของกระแสโลกาภิวัตน์ การนำอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีเข้ามาใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตให้ดียิ่งขึ้นเพื่อเพียงพอกับความต้องการของมนุษย์ที่มีอย่างไม่จำกัดเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งผลกระทบของการนำอุตสาหกรรมเข้ามาใช้ทำให้เกิดมลพิษ และก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ส่วนหนึ่งของปัญหาที่เกิดขึ้นคือ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศถึงร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด ดังนั้นเพื่อเป็นการลดผลกระทบจากการผลิตปูนซีเมนต์ จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาที่จะลดปัญหาดังกล่าว โดยการนำเถ้าลอยวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้ามาผลิตเป็นวัสดุที่ใช้แทนปูนซีเมนต์ขึ้น

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ในรูปอสัณฐานเป็นองค์ประกอบหลักมาผสมกับด่างอัลคาไลซิลิเกต เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูง แล้วเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนเกิดการก่อตัวขึ้นและแข็งตัวด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่ (Polymerization) ได้เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สามารถให้กำลังรับแรงได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ (ปริญญา, 2548) นอกจากนี้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีความเหนียว สามารถที่จะยึดเกาะกับวัสดุอื่นได้ดี ไม่ว่าจะเป็นการยึดเกาะกับเนื้อคอนกรีต หรือเหล็ก ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาสำหรับใช้ซ่อมแซมในงานคอนกรีต (วีระพงษ์ และวันชัย, 2552) โดยสารตั้งต้นที่นิยมนำมาผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการเผาถ่านหินมี 3 แบบ คือ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลางและการเผาความร้อนต่ำ ซึ่งพบว่าเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินโดยใช้ความร้อนปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1100-1400 องศาเซลเซียล เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion, PCC) มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานที่ดี มีความเป็นอสัณฐานสูง เป็นเถ้าลอยที่นิยมใช้กันมากในการผสมกับปูนซีเมนต์ และวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่ที่เผาในลักษณะนี้จะเป็นเถ้าลอยประมาณร้อยละ 70-90 มีความไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าการเผาแบบอื่น โดยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย PCC มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนในสภาพกรดได้ดี และมีค่ากำลังอัดที่สูง (Chindaprasirt และคณะ, 2013)

วัสดุที่นำมาผลิตท่อระบายน้ำต้องมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เนื่องจากน้ำเสียเป็นน้ำทิ้งที่มีสารเจือปนมาก มีค่าความเป็นกรด และด่างค่อนข้างสูง แต่ท่อระบายน้ำที่ใช้กันมักผลิตจากปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณแคลเซียมสูงซึ่งทนต่อการกัดกร่อนไม่ดีเท่าที่ควร วัสดุบางชนิดมีราคาแพง และเกิดการชำรุด

เสียหายได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับที่มีค่าความเป็นกรด และด่างสูง การหาวัสดุที่สามารถทนการกัดกร่อนได้ดี และมีราคาถูก ตัวอย่างเช่น จีโอโพลิเมอร์มาใช้ในการเคลือบ หรือทำท่อระบายน้ำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติการยึดติด และปัจจัยที่มีผลต่อการยึดติดระหว่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยที่ได้จากการเผาแบบใช้ถ่านหินบดกับปูนซีเมนต์ โดยศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ เพื่อให้ได้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติที่ดีใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์สามารถนำไปใช้ในท่อระบายน้ำหรืองานซ่อมแซมได้อย่างเหมาะสม และยังช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตจากเถ้าลอย PCC กับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตจากเถ้าลอย PCC

1.2.3 เพื่อศึกษาน้ำหนัก และความหนาในการเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตจากเถ้าลอย PCC บนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

1.2.4 เพื่อศึกษาความคงทนต่อกรดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตจากเถ้าลอย PCC

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตจากเถ้าลอย PCC ที่มีอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อสารทั้งหมด เท่ากับ 0.60 อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 15 โมลาร์ โดยมวล เท่ากับ 2 และอัตราส่วนโดยมวลของทรายต่อเถ้าลอยเท่ากับ 2 ในการเคลือบปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

1.3.2 ศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตจากเถ้าลอย PCC หลังจากแช่ในสารละลายด้วยเทคนิค XRD และ IR

1.3.3 ศึกษาสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ที่ผลิตจากเถ้าลอย PCC ที่ยึดติดกับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

1.3.4 ศึกษาน้ำหนัก และความหนาในการเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผลิตจากเถ้าลอย PCC บนปูนซีเมนต์ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบแล้วนำขึ้นทันที และใช้เวลาในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 30 วินาที และ 60 วินาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำเถ้าลอยที่ได้จากการเผาแบบ PCC ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์

1.4.2 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพื่อนำไปใช้แทนปูนซีเมนต์ที่ใช้ในท่อระบายน้ำ

1.4.3 ความรู้ที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปพัฒนาการนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ได้

1.5 Output ที่ได้จากโครงการ

ผลงานบางส่วนได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการที่มีผู้ทรงคุณวุฒิร่วมกลั่นกรอง (Peer Review)

1. เรื่อง “สมบัติของวัสดุเคลือบที่ผลิตจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 จ. ชลบุรี

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเป็นมาของจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่มีซิลิกาและอะลูมินาในรูปอสัณฐานเป็นองค์ประกอบหลัก นำมาผสมกับด่างอัลคาไลซิลิเกตและด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ แล้วนำมาเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวแข็งและให้กำลังอัดได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กันได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา โดยใช้หลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ ดังนี้

$$M_n[-(SiO_2)_z - AlO_2-]_n \cdot wH_2O$$

โดย M คือ ธาตุอัลคาไลน์

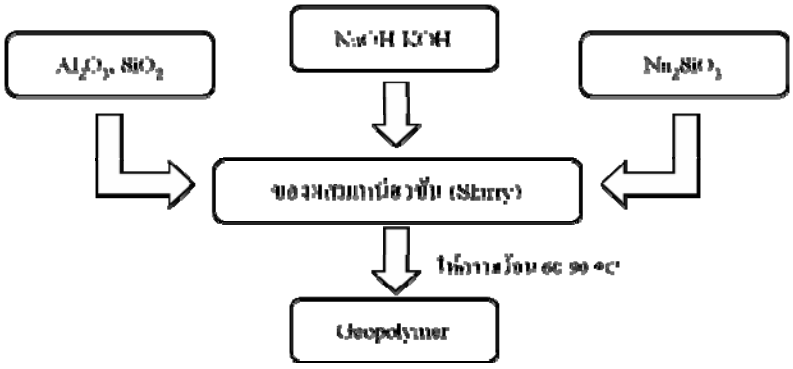
– คือ การยึดเกาะพันธะ

z คือ จำนวนโมเลกุล

n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

จีโอโพลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al กับสารละลายที่เป็นด่างสูงโดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาควบคู่กันด้วย ซึ่งพบว่าเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีซิลิกาและอลูมินาในรูปอสัณฐานเป็นองค์ประกอบจึงสามารถผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์ และรับแรงอัดได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวได้จากการผสมเถ้าลอยกับสารประกอบอัลคาไลซิลิเกต และสารอัลคาไฮดรอกไซด์ ดังแผนผังการผลิตจีโอโพลิเมอร์ (อุบลลักษณ์, 2549) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์

2.2 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่ผ่านการบดจนละเอียดจะถูกเผาเพื่อให้ได้พลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา เรียกว่าเถ้าถ่านก้นเตา ส่วนเถ้าถ่านหินที่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 200 ไมโครเมตรจะลอยไปกับอากาศร้อนเรียกว่า เถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกจับด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitaton) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและทำให้เกิดมลภาวะกับพื้นที่บริเวณใกล้เคียง เถ้าลอยที่ได้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและมีองค์ประกอบคล้ายกับปูนซีเมนต์ จึงมีแนวคิดที่นำเถ้าลอยมาใช้ในงานก่อสร้างเพื่อใช้แทนวัสดุปูนซีเมนต์ และเพื่อเป็นการลดปัญหาของมลภาวะทางอากาศที่เกิดขึ้นด้วย (ปริญญา, 2548)

ถ่านหินที่ใช้การเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามี 4 ชนิด ได้แก่ แอนทราไซด์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) และลิกไนต์ (Lignite) โดยถ่านหินแต่ละชนิดมีคุณภาพที่ต่างกัน ซึ่งถ่านหินที่มีคุณภาพดีให้ความร้อนสูงสุด มีปริมาณความชื้นต่ำ คือ แอนทราไซด์ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ตามลำดับ นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดนี้แล้วยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุดให้ความร้อนต่ำสุด มีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานไฟฟ้า

ชนิดของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618 สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1. ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซด์ และบิทูมินัส มีปริมาณรวมของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริคออกไซด์ มากกว่า 70% และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน ASTM C 618 มีวิธีการเก็บและทดสอบตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิดนี้จะมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) ต่ำ (เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ) ส่วนซิลิกาออกไซด์ (SiO_3) ที่มาจากแร่ดินเหนียวและควอตซ์ ถ่านหินแอนทราไซด์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงทำให้เป็นเถ้าถ่านหินที่มีซิลิกาออกไซด์ (SiO_3) สูง

2. ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณรวมของซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริคออกไซด์ มากกว่า 50% ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน ASTM C 618 เถ้าลอยชนิดนี้สามารถเรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง ส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยแร่ดินเหนียวที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์ต่ำ ทำให้เถ้าหินชนิด C มีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ต่ำ และซิลิกาออกไซด์ (SiO_3) ด้วย

เถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติปอซโซลาน นอกจากนี้เถ้าลอยชนิด C ยังมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองจากการมีปริมาณ CaO สูง ซึ่งเถ้าถ่านหินแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง โดยมีปริมาณของ CaO สูงถึงร้อยละ 40 ทำให้มีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง แต่ในปัจจุบันเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลงเหลือเพียงประมาณ 10 %

2.3 ระบบการเผาถ่านหิน

การเผาถ่านหินบดเป็นพลังงานเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้ามี 3 ระบบ ได้แก่ การเผาความร้อนสูง การเผาความร้อนปานกลาง การเผาความร้อนต่ำ (ปริญญา, 2548)

1. การเผาความร้อนสูง

การเผาความร้อนสูง เป็นการเผาในเตาเผาแบบใช้แรงลมที่อุณหภูมิสูงถึง 1500 - 1700 °C เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะหลอมละลายปะทะกันเป็นเม็ดหรือก้อน เถ้าถ่านหินที่เหลือส่วนใหญ่เป็นเถ้าก้นเตาและตกลงสู่อ่างน้ำด้านล่าง ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กส่วนน้อยจะเป็นเถ้าลอยที่มีลักษณะเป็นเม็ดแก้วใส (Vitreous particle)

2. การเผาความร้อนปานกลาง

การเผาถ่านหินบดในการเผาความร้อนปานกลางใช้ใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 1100 - 1400 °C เป็นการเผาในเตาแบบถ่านหินบด (Pulverized coal combustion, PCC) เถ้าถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นเถ้าลอย ส่วนที่เหลือจะเป็นเถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา เถ้าลอยที่ได้จากการเผานี้ประมาณ 70-90% มีขนาดและความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ รวมถึงมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน มีความเป็นอสัณฐานสูง และมีความไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าการเผาแบบอื่น จึงเป็นเถ้าลอยที่เหมาะสำหรับแทนที่ปูนซีเมนต์ และผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนในสภาพกรดได้ดี และมีค่ากำลังอัดที่สูง ซึ่งโรงไฟฟ้าที่ใช้การเผาในลักษณะนี้คือ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

3. การเผาความร้อนต่ำ

การเผาความร้อนต่ำเป็นการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed combudtion) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านหินไม่เกิน 900 °C ซึ่งค่อนข้างต่ำ ทำให้เถ้าถ่านหินที่ได้มีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) และมีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง สามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้ แต่ไม่ดีเท่าเถ้าลอยที่ได้จากการเผาความร้อนปานกลาง

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงนิยมใช้เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินบด หรือ PCC เป็นสารตั้งต้นของการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากเถ้าลอยชนิดนี้ประมาณ 70 – 90 % มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งมีความไวในการเกิดปฏิกิริยา โดยจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากเถ้าลอยนี้มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนในสภาพกรดได้ดี และมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตวัสดุอื่น เช่น ดินขาวเผาและเถ้าแกลบ

2.4 คุณสมบัติที่สำคัญของจีโอโพลิเมอร์

2.4.1 ความคงทนต่อการกัดกร่อนโดยกรด (วิเชียร และกิตติกร, 2555)

คอนกรีตธรรมดานั้นมีสภาพเป็นด่างอาจทำให้สึกกร่อนได้โดยสารเคมีหลายชนิด เช่น กรดคาร์บอนิก (H_2CO_3), กรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดไนตริก (HNO_3), กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นต้น ซึ่งคอนกรีตธรรมดามีความทนทานต่อกรดได้ไม่ดีเท่าที่ควรการสึกกร่อนโดยกรดอาจพบ

ไม่มากเท่ากับซัลเฟต แต่ก็เป็นการสึกกร่อนที่รุนแรง และทำให้คอนกรีตนั้นได้รับความเสียหาย โดยของเหลวที่มีค่า pH ต่ำกว่า 6.5 และหากต่ำกว่า 4.5 ก็จะก่อให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงมาก

กรดที่อาจมาทำลายคอนกรีตนั้นอาจมาได้จากหลายแหล่ง โดยอาจเกิดจากฝนกรด ซึ่งอาจมีกรดซัลฟิวริก หรือ กรดคาร์บอนิก ปะปนอยู่จากโรงงานหรือแหล่งผลิตที่มีการใช้กรดในการผลิต หรือได้กรดเป็นผลพลอยได้ของการผลิต หรืออาจมาจากระบบบำบัดน้ำเสียและท่อระบายน้ำเสียจากบ้านเรือน โดยเฉพาะท่อบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม หากเป็นท่อที่ทำจากคอนกรีตอาจทำให้ท่อเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานที่ไม่ยาวนานนัก เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์นั้นมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา จึงทำให้มีการต้านทานกรดที่ดีกว่า

2.4.2 ความคงทนต่อการกัดกร่อนโดยซัลเฟต

เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำให้ซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตเกิดความเสียหายได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือ แมกนีเซียมซัลเฟต มักจะพบอยู่ในน้ำเสียจากบ้านเรือน แหล่งน้ำพุร้อนธรรมชาติ หรือบริเวณที่อยู่ใกล้ทะเล

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟต ขึ้นกับสภาพแวดล้อม โดยที่สภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง ก็จะทำให้การกัดกร่อนโดยซัลเฟตนั้นมากขึ้นตามไปด้วย ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตยากขึ้น อาจทำให้ความเสียหายนั้นลดน้อยลงได้ (วิเชียร และคณะ, 2551)

จีโอโพลิเมอร์นั้นจะถูกทำลายได้หากถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต แต่การทำลายจะต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา โดยจีโอโพลิเมอร์จะเกิดการสูญเสียอิออนของอัลคาไลน์ในซัลเฟต การสูญเสียอัลคาไลน์ดังกล่าวจะทำให้เกิดความเค้นและรอยแตก ซึ่งส่งผลต่อการรับแรงของจีโอโพลิเมอร์ แต่จากการศึกษาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตพบว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นน้อยมาก ทั้งด้านการรับแรงและการขยายตัว (ปริญญา, 2548)

2.5 เทคนิคที่ใช้ทดสอบ

2.5.1 เทคนิคX-ray diffraction spectroscopy (XRD) (แม้น และคณะ, 2552)

เทคนิค X-ray diffraction ใช้วิเคราะห์สมบัติของวัสดุ และวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยิงผ่านผลึกชั้นต่างๆในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law ซึ่งวิธีนี้สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยตัวอย่างที่นำมาทำการวิเคราะห์นั้นอาจมีลักษณะเป็นของแข็ง หรือเป็นผงละเอียด และยังสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางได้อีกด้วย

เมื่อรังสีเอกซ์กระทบกับผลึกหนึ่งจะเกิดการกระจัดกระจายของรังสีเป็นผลเนื่องมาจากการเร่งขึ้นและการหน่วงลงของอิเล็กตรอน เกิดการส่งถ่ายทางอิเล็กตรอน (Electronic transitions) การดูดซับของ

รังสิเอ็กซ์ การกระเจิง และการเลี้ยวเบน ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้จะเกิดในลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุที่จะสามารถนำไปทำการวิเคราะห์ทางเคมีได้

2.5.2 เทคนิค Infrared Spectroscopy (IR) (แม้น และคณะ, 2552)

อินฟาเรดสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์เพื่อใช้ในการตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสาร โดยศึกษาการดูดกลืนแสงในช่วงของคลื่นอินฟาเรดที่ทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลและมีผลต่อการสั่นของพันธะโมเลกุล

หลักการทำงานของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ชนิด Fourier transform spectrometer จะเป็นลำแสงเดี่ยวที่สามารถวัดลำแสงได้ทีเดียวทุกช่วงความยาวคลื่น โดยอุปกรณ์ที่เรียกว่า อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านเข้าสู่อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ จากนั้นจะผ่านเข้าไปยังบีมสปลิตเตอร์และถูกแบ่งลำแสงออกเป็น 2 ทาง โดยลำแสงที่หนึ่งจะถูกสะท้อนไปยังกระจกที่อยู่กับที่ อีกลำแสงหนึ่งจะถูกสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ซึ่งจะเลื่อนออกห่างจากบีมสปลิตเตอร์เป็นระยะทางเท่าๆกัน และจะมาบรรจบกันอีกครั้งทำให้เกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้าง จากนั้นจะถูกส่องผ่านไปยังตัวอย่าง ดีเทคเตอร์จะวัดความเข้มของแสงของแต่ละคลื่นขณะที่กระจกเลื่อนไปมา โดยทำการสุ่มวัดและได้กราฟที่เรียกว่า อินเตอร์เฟอร์โรแกรม (Interferogram) ออกมา จากนั้นคอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลออกมาเป็นค่าความเข้มของแสงทุกความยาวคลื่นที่ส่องผ่านตัวอย่าง และจะได้ออกมาเป็น IR สเปกตรัม

2.5.3 การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย (ปริญญา, 2547)

การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืนยันคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่นำมาทดสอบเป็นไปตามแบบที่วางไว้ และสามารถนำมาใช้งานได้ ซึ่งจะทดสอบตามอายุที่กำหนด โดยรูปทรงที่ใช้ทดสอบกำลังอัดมี 2 แบบ คือ แบบรูปทรงกระบอกที่นิยมใช้ในสหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส และแคนาดา และแบบรูปลูกบาศก์จะนิยมใช้ในอังกฤษ เยอรมัน และประเทศในยุโรป โดยการทดสอบกำลังอัดแบบรูปลูกบาศก์จะมีแบบหล่อเถ้าลอยรูปลูกบาศก์สำหรับงานจีโอโพลิเมอร์แบบพลาสติกขนาด 5×5×5 ซม.^{3} ในแบบหนึ่งอันจะมี 3 ช่อง ซึ่งจะเทจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมเสร็จลงไปจนเต็ม และปาดให้เรียบเสมอกันทั้ง 3 ช่อง จากนั้นหุ้มด้วยฟิล์มใส แล้วนำไปอบตามระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นนำจีโอโพลิเมอร์ออกจากตู้อบพร้อมแกะออกจากแบบ ทิ้งไว้ที่สภาวะควบคุม เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำไปทดสอบด้วยเครื่องอัดกำลัง โดยวัดค่ากำลังอัดที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการแตก

รูปที่ 2.2 เครื่องทดสอบกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang และคณะ (2010) ได้ศึกษาการเคลือบวัสดุลงบนผิวของคอนกรีตสามารถยืดอายุการใช้งานคอนกรีตที่ใช้ในสภาพแวดล้อมทางทะเลได้ โดยวัสดุที่ใช้เคลือบจะไปยับยั้งไอออนที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อน ซึ่งในปัจจุบันการใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยป้องกันคอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทางทะเล งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ คือ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ การซึมผ่าน การป้องกันการกัดกร่อน และความแข็งแรงของพันธะรวมถึงความคงที่ของปริมาณจีโอโพลิเมอร์ โดยการเคลือบจีโอโพลิเมอร์บนผิวของคอนกรีตประมาณ 2 ชั่วโมง จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้จะเติมตะกรันเตาถลุงเหล็ก (GBFS) ลงไปในเกาลินซึ่งเป็นสารตั้งต้นปริมาณ 10% เพื่อลดการซึมผ่านของจีโอโพลิเมอร์ ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้จะพัฒนากำลังอัดที่ช้าแต่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงพันธะเฉลี่ยระหว่างจีโอโพลิเมอร์กับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์หรือระหว่างจีโอโพลิเมอร์กับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์สูงกว่า 1.5 เมกกะปาสคาล ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการติดกันของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ในปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์กับจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นได้ดีเมื่อเตรียมจีโอโพลิเมอร์ด้วยด่างอัลคาไลน์ที่มีความเข้มข้นสูง

ชรินทร์และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ทำการเตรียมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 หลังจากหล่อตัวอย่างทดสอบแกะแบบ และ บ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบกำลังอัดที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน นอกจากนั้นได้ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว (ใช้เหล็กข้ออ้อยเส้นผ่าศูนย์กลาง 12, 16 และ 20 มม. เกรด SD 30) ที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และมีการพัฒนากำลังอัดใน

อัตราที่สูงในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นกำลังอัดมีอัตราการเพิ่มลดลง อย่างไรก็ตามในกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 14 โมลาร์ มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าต่ำลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์

วิเชียร และกิรติกร (2555) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วน Si/Al ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และกรดซัลฟิวริค เตรียมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลุ่มแรกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของ Si/Al คงที่เท่ากับ 1.98 กลุ่มที่ 2 ใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH คงที่เท่ากับ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของ Si/Al เท่ากับ 2.2, 2.4, 2.6 และ 2.8 หล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. ทำการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในอากาศ และแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก และแช่ในกรดซัลฟิวริคที่ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 และ 180 วัน ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริคที่อายุ 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตลอดจนทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอากาศที่อายุ 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของ NaOH ที่มากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วน Si/Al นอกจากนี้พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเนื่องจากกรดซัลฟิวริคมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของ NaOH สูงขึ้น

Rattanasak และ Chindaprasirt (2009) ได้ศึกษาการชะของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (AlO_2) จากเถ้าถ่านหินลิกไนต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ โดยเตรียมตัวอย่างเถ้าถ่านหินให้เป็นสารแขวนลอยที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกัน นำสารที่ได้ไปวิเคราะห์หาซิลิกาและอะลูมินาที่ระยะเวลาต่างกัน และทำการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ผลทดลองแสดงให้เห็นว่าการชะละลายของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสารละลายที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์เวลาการชะที่ 10 นาที ซึ่งทำให้จีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลังอัดสูงถึง 65 เมกกะปาสคาล ซึ่งสามารถเทียบปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ผลิตได้จากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าลอย จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยการเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากการผสมเถ้าลอยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โดยใช้อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยมวล และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5, 10 และ 15 โมลาร์ โดยใช้วิธีผสมแบบธรรมดา และ

แบบแยก แล้วให้ความร้อนกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อศึกษาสมบัติต่าง รวมถึงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ต้าร์ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงว่าและกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับวิธีการผสม ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3/NaOH

2.7 สรุป

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเถ้าลอย PCC มีความสามารถในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่ทนต่อการกัดกร่อน สามารถรับแรงอัดได้ และสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี จึงสามารถนำจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นำไปประยุกต์ใช้การเคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์หรือคอนกรีตเพื่อยืดอายุการใช้งานของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์หรือคอนกรีตที่ใช้ในงานที่สัมผัสกับสารละลายที่มีฤทธิ์ต่อการกัดกร่อนเช่น ในท่อระบายน้ำทิ้งที่มีสารเจือปนที่มีค่าความเป็นกรด และด่างค่อนข้างสูงได้

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

การทดลองนี้ศึกษาศักยภาพการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอย PCC โดยการเตรียมเถ้าลอย PCC ผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ชนิดมอร์ต้าร์เคลือบบนผิวของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ เพื่อทำการศึกษาน้ำหนัก และความหนาของจีโอโพลิเมอร์ที่ยึดติดกับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ จากนั้นนำจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ไปทำการทดสอบความแข็ง วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างด้วยเทคนิค IR และ XRD รวมทั้งการเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เพื่อทดสอบกำลังอัด เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยหรืออุตสาหกรรมต่อไป

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

เครื่องมือ

1. ตู้ดูดควัน
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก (3000 ± 0.5 กรัม) รุ่น EKO
3. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง Mettler รุ่น AE 200
4. เครื่องทดสอบกำลังอัด ขนาด 100 KN รุ่น CB-10M
5. เครื่องทดสอบความแข็ง รุ่น Shore hardness test standard model LAC-J
6. ตู้อบรุ่น BINDER
7. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น Leo 1450VP ศูนย์กล้องจุลทรรศน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
8. เครื่อง X-ray diffractrometer (XRD) รุ่น Panalytical/Expert ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
9. เครื่อง Infrared spectroscope (IR) รุ่น PERKIN ELMER System 2000 FT-IR คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยบูรพา
10. เครื่องวัด pH รุ่น PH-107
11. เครื่องวัด pNa Hanna รุ่น HI98202 Soft Water Tester
12. ดิจิตอลเวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์
13. เครื่องผสมมือ Philips รุ่น Mixer HR 1456
14. เครื่องผสมขนาด 5 ลิตร รุ่น LNK 530
15. เครื่องสั่นสำหรับไล่ฟองอากาศ

อุปกรณ์

1. แบบหล่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์พลาสติกขนาด 5×5×5 ซม.^{3}
2. แบบหล่อปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ทองเหลืองขนาด 5×5×5 ซม.^{3}
3. แบบหล่อปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ซิลิโคลนขนาด 2.75×5×1 ซม.^{3}
4. แบบหล่อปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ซิลิโคลนขนาด 2.75×8×3 ซม.^{3}
5. ฟิล์มหุ้มอาหาร
6. ตะแกรงเบอร์ 8 (รูเปิด 2.36 มิลลิเมตร)

สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (98% NaOH ; MW = 40 g/mol ; บริษัท Sigma Thasco Chemical; เกรดการค้า)

2. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) MW = 122.06 g/mol; (SiO_2 = 30%, Na_2O = 9%, H_2O = 61; Commercial grade) โดย SiO_2: Na_2O = 3.2 โดยน้ำหนัก

3. แมกนีเซียมซัลเฟต (98% $MgSO_4$; MW = 120.415 g/mol; เกรดการค้า)

4. กรดซัลฟิวริก (98% H_2SO_4; MW = 98.08 g/mol; เกรดการค้า)

6. ตัวอย่างเถ้าลอยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงเผาแบบใช้ถ่านหินบด (เถ้าลอย PCC) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

7. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

8. ทรายคัดขนาด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (รูเปิด 2.36 มิลลิเมตร)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ NaOH ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร สำหรับเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ชั่ง NaOH 600 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตรในบีกเกอร์พลาสติก

2. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 5% w/v $MgSO_4$ สำหรับแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ชั่ง $MgSO_4$ 153 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 3 ลิตร (เทียบเท่ากับความเข้มข้น 0.42 โมลาร์) วัดค่า pH ได้เท่ากับ 7.5

3. สารละลายกรดซัลฟิวริก 3% v/v H_2SO_4 สำหรับแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ตวง 98% H_2SO_4 ด้วยกระบอกตวง ปริมาตร 92 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 3 ลิตร (เทียบเท่ากับความเข้มข้น 0.50 โมลาร์) วัดค่า pH ได้เท่ากับ 0.3

4. สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.005% v/v H_2SO_4 สำหรับแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ตวง 3% H_2SO_4 ที่เตรียมจาก 98% H_2SO_4 ด้วยกระบอกตวง ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 3 ลิตร (เทียบเท่ากับความเข้มข้น 0.001 โมลาร์) วัดค่า pH ได้เท่ากับ 3

3.2.2 การเตรียมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

การศึกษาการเคลือบและทดสอบการยึดติดระหว่างวัสดุจีโอโพลิเมอร์กับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็น 0.55 และทรายเป็น 2.75 เท่าของปูนซีเมนต์และเนื่องจากปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการเคลือบและทดสอบการยึดติดมีขนาดไม่เท่ากัน การเตรียมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์จึงเตรียมได้จากปริมาณส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนผสมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

ปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ทราย (กรัม)	จำนวนตัวอย่างต่อหนึ่งครั้งการเตรียม
สำหรับเคลือบขนาด 2.75×5×1 ซม.^{3}	200.0	110.0	400.0	20
สำหรับทดสอบการยึดติด ขนาด 3×8×2.75 ซม.^{3}	500.0	275.0	1375.0	12
สำหรับทดสอบกำลังอัด ขนาด 5×5×5 ซม.^{3}	500.0	275.0	1375.0	3

โดยมีขั้นตอนการเตรียมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์สำหรับเคลือบขนาด 2.75×5×1 ซม.^{3} และสำหรับทดสอบการยึดติดขนาด 3×8×2.75 ซม.^{3} ดังนี้

1. เตรียมส่วนผสมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้สำหรับศึกษากำลังอัด ตามตารางที่ 3.1
2. ผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 กับน้ำผสมกันด้วยเครื่องผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที
3. ใส่ทรายลงในของผสมของปูนซีเมนต์กับน้ำ แล้วผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที
4. เทปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ลงแบบหล่อซิลิโคน (แบบซิลิโคนที่ใช้สำหรับเคลือบจีโอโพลิเมอร์ขนาด 2.75×5×1 ซม^3 และแบบซิลิโคนที่ใช้สำหรับทดสอบการยึดติดจีโอโพลิเมอร์ขนาด 3×8×2.75 ซม.^{3})
5. นำไปไล่ฟองอากาศด้วยเครื่องสั่นเป็นเวลา 30 วินาที
6. ทิ้งปูนซีเมนต์ให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. แกะปูนซีเมนต์ออกจากแบบหล่อ หลังจากนั้นนำไปบ่มในน้ำ

3.2.3 การเตรียมตัวอย่างเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย PCC บนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

งานวิจัยนี้ศึกษาการเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ โดยการเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ใช้อัตราส่วนของ Na_2SiO_3 ต่อ 15 โมลาร์ NaOH เท่ากับ 2 และใช้ทรายเป็นปริมาณ 2 เท่าของน้ำหนักเถ้าลอยดังอัตราส่วนผสมที่แสดงตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณอัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์	เถ้าลอย PCC (กรัม)	15 M NaOH, N (กรัม)	Na_2SiO_3, G (กรัม)	ทราย (กรัม)	G/N	S/T	จำนวนตัวอย่างต่อหนึ่งครั้งการเตรียม
สำหรับทดสอบการยึดติด	60.0	13.0	26.5	120.0	2.0	0.60	10
สำหรับเคลือบปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์	180.0	40.0	80.0	360.0	2.0	0.60	12
สำหรับทดสอบกำลังอัด	240.0	53.0	106.0	480.0	2.0	0.60	36

หมายเหตุ S/T คือ เถ้าลอย/เถ้าลอยรวมสารละลาย

มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. นำปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่เตรียมไว้สำหรับเคลือบขนาด 2.75×5×1 ซม.^{3} จากตอนที่ 3.2.2ขึ้นจากน้ำ และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. ชั่งน้ำหนัก และวัดค่า Dimension พร้อมทั้งวัดระยะจากปลายด้านยาวด้านหนึ่งของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ขึ้นมา 1 ซม. และขีดเส้นไว้เพื่อเป็นส่วนที่ใช้จับตอนที่จุ่มเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

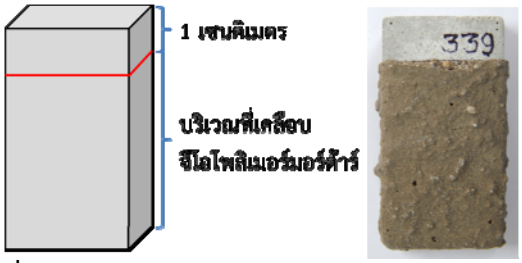
3. เตรียมส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้สำหรับเคลือบ ตามตารางที่ 3.2

4. เตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยผสมเถ้าลอย PCC กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 15 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ผสมของผสมด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที

5. เททรายลงของผสมในข้อ 4. หลังจากนั้นผสมของผสมด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที ได้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

6. เทจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ลงในภาชนะที่ใช้สำหรับเคลือบ

7. นำปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ชั่งน้ำหนัก และวัดค่า Dimension ไว้แล้วมาจุ่มเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ให้ถึงขีดที่กำหนดไว้ โดยใช้ระยะเวลาในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 0 วินาที (จุ่มแล้วนำขึ้นทันที) 30 วินาที และ 60 วินาที ซึ่งในแต่ละครั้งจะเตรียมตัวอย่างพร้อมกัน 12 ก้อน ดังแสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 การเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บนปูนซีเมนต์

7. นำปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่เคลือบด้วยจีโอโพลิเมอร์ไปอบที่อุณหภูมิ 65 ºC เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

8. ชั่งน้ำหนัก และวัดค่า Dimension ของตัวอย่างหลังอบ ลบกับน้ำหนักและค่า Dimension ของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ก่อนนำมาเคลือบจะได้น้ำหนักและความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ เปรียบเทียบน้ำหนักและความหนากับเวลาที่ใช้ในการเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

9. จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างที่ใช้วิธีการจุ่มเคลือบแล้วนำขึ้นทันที และใช้ระยะเวลาในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 30 วินาที และ 60 วินาที แต่ละตัวอย่างจำนวน 36 ก้อน วัดค่า Dimension แล้วแบ่งแต่ละตัวอย่างเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

- บ่มในน้ำที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน
- บ่มในสารละลาย 5% $MgSO_4$ ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน
- บ่มในสารละลาย 3% H_2SO_4 ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน
- บ่มในสารละลาย 0.005% H_2SO_4 ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน

รูปที่ 3.2 การแช่สารละลาย

10. นำไปทดสอบความแข็งตามอายุการบ่มโดยผลการทดสอบจะเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง

3.2.4 การศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยเทคนิค Infrared spectroscopy

นำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์มาบดให้เป็นผงละเอียด และนำมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค Infrared spectroscopy

3.2.5 การศึกษาจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค X-ray diffractrometer

เพื่อศึกษาอสัณฐานวิทยา โดยนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์มาบดเป็นผง วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ในช่วง 10-50° 2θ

3.2.6 การศึกษาการยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย PCC บนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาการยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จะศึกษาการยึดติดในลักษณะของความแข็งแรงของพันธะเคมีตาม ASTM C321 (Bond Strength of Chemical-Resistant Mortars) โดยจีโอโพลิเมอร์ศึกษามีอัตราส่วนของ Na_2SiO_3 ต่อ 15 M NaOH เท่ากับ 2 และผสมทรายลงไปเป็น 2 เท่าของเถ้าลอย ดังปริมาณส่วนผสมดังตารางที่ 3.2 ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

1. นำปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่เตรียมไว้สำหรับทดสอบการยึดติดขนาด 3×8×2.75 ซม.^{3} จากตอนที่ 3.2.2 ขึ้นจากน้ำ และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

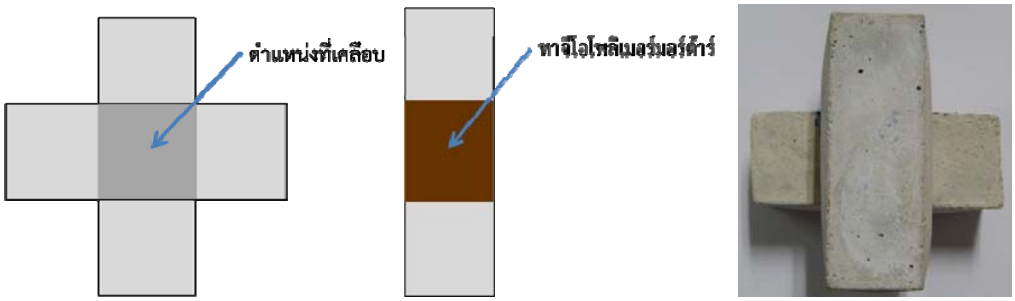
2. วางปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ 2 ก้อนขวางเป็นเครื่องหมายบวก แล้วขีดเส้นตำแหน่งที่ปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ประกบกันเป็นเครื่องหมายบวก

3. เตรียมส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้สำหรับทดสอบการยึดติด ตามตารางที่ 3.2

4. เตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยผสมเถ้าลอย PCC กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 15 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ผสมของผสมด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที

5. เททรายลงในของผสมในข้อ 4. หลังจากนั้นผสมของผสมด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที ได้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

6. นำจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มาทาในตำแหน่งที่ขีดเส้นไว้ของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ก้อนแรกให้มีความหนาเท่ากับ 1, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร หลังนำปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ก้อนที่ 2 มาประกบกับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ก้อนแรกในลักษณะของเครื่องหมายบวกเหมือนเดิม ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

7. นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

8. เตรียมตัวอย่างที่แต่ละความหนาจำนวน 10 ตัวอย่าง

9. นำตัวอย่างไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 3 °C ที่อายุ 7 วัน

10. นำไปทดสอบยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ตาม ASTM C321 (Bond Strength of Chemical-Resistant Mortars) ด้วยเครื่อง Universal testing machine ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน โดยผลการทดสอบจะเป็นค่าเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ 3 ก้อน

3.2.7 การศึกษากำลังอัด

3.2.7.1 การศึกษากำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

การเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย PCC สำหรับทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนของ Na_2SiO_3 ต่อ 15 M NaOH เท่ากับ 2 และผสมทรายลงไปเป็น 2 เท่าของน้ำหนักเถ้าลอย ดังปริมาณส่วนผสมดังตารางที่ 3.2 ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

1. เตรียมส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้สำหรับศึกษากำลังอัด ตามตารางที่ 3.2

2. ผสมเถ้าลอย PCC กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (15 M NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ผสมของผสมด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที

3. เททรายลงของผสมในข้อ 2. และผสมด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที ได้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

4. เทจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ลงแบบหล่อแบบหล่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์พลาสติกขนาด 5×5×5 ซม^3 นำไปไล่ฟองอากาศด้วยเครื่องสั่นเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำมาหุ้มด้วยฟิล์มใส และนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

5. จากนั้นแกะจากแบบหล่อ ทำการเตรียมตัวอย่างจำนวน 36 ก้อน แล้วแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

- บ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 3 °C ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน
- บ่มในสารละลาย 5% $MgSO_4$ ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน
- บ่มในสารละลาย 3% H_2SO_4 ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน
- บ่มในสารละลาย 0.005% H_2SO_4 ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน

6. นำไปทดสอบกำลังอัดมาตรฐาน ASTM C109 (Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) ด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามอายุการบ่มโดยผลการทดสอบจะเป็นค่าเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ 3 ก้อน

3.2.7.2 การศึกษากำลังอัดปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

การเตรียมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์จากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 สำหรับทดสอบกำลังอัด โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็น 0.55 และทรายเป็น 2.75 เท่าของปูนซีเมนต์ ดังปริมาณส่วนผสมดังตารางที่ 3.1 ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

1. เตรียมส่วนผสมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้สำหรับศึกษากำลังอัด ตามตารางที่ 3.1

2. ผสมปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง กับน้ำผสมกันด้วยเครื่องผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที

3. ใส่ทรายลงในของผสมของปูนซีเมนต์กับน้ำ แล้วผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมเป็นเวลา 1 นาที

4. เทปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ลงแบบหล่อแบบหล่อทองเหลืองขนาด 5×5×5 ซม.^{3}

5. นำไปไล่ฟองอากาศด้วยเครื่องสั่นเป็นเวลา 30 วินาที

6. ทิ้งปูนซีเมนต์ให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

7. จากนั้นแกะจากแบบหล่อ ทำการเตรียมตัวอย่างจำนวน 36 ก้อน แล้วแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

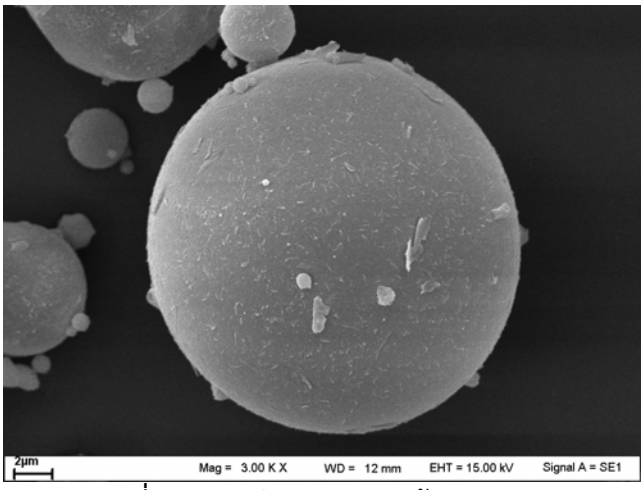
- บ่มในน้ำที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน
- บ่มในสารละลาย 5% $MgSO_4$ ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน
- บ่มในสารละลาย 3% H_2SO_4 ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน
- บ่มในสารละลาย 0.005% H_2SO_4 ที่อายุ 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน

8. นำไปทดสอบกำลังอัดมาตรฐาน ASTM C109 (Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) ด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามอายุการบ่มโดยผลการทดสอบจะเป็นค่าเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ 3 ก้อน

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอธิปรายผลการวิจัย

4.1 รูปร่างและลักษณะของเถ้าลอย

เถ้าลอย PCC ที่ใช้ในการทดลองมีสีน้ำตาลแดง ขนาดตั้งแต่เล็กมากกว่า 1 ไมครอนไปจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 15 – 30 ไมครอน ส่วนใหญ่มีรูปร่างที่เป็นทรงกลมเนื่องจากการหลอมตัวเมื่อมีการเผาด้วยอุณหภูมิปานกลาง (1100 - 1400 °C) โดยเถ้าลอยขนาดใหญ่ที่เกิดจากการรวมกันของเถ้าลอยขนาดเล็กจะมีผิวขรุขระ และรูปร่างที่ไม่แน่นอน ส่วนเถ้าลอยขนาดเล็กจะมีลักษณะเป็นทรงกลมและผิวเรียบเนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (ปริญญา, 2548) อนุภาคของเถ้าลอย PCC ที่ถ่ายด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 3000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย PCC

4.2 องค์ประกอบทางเคมี

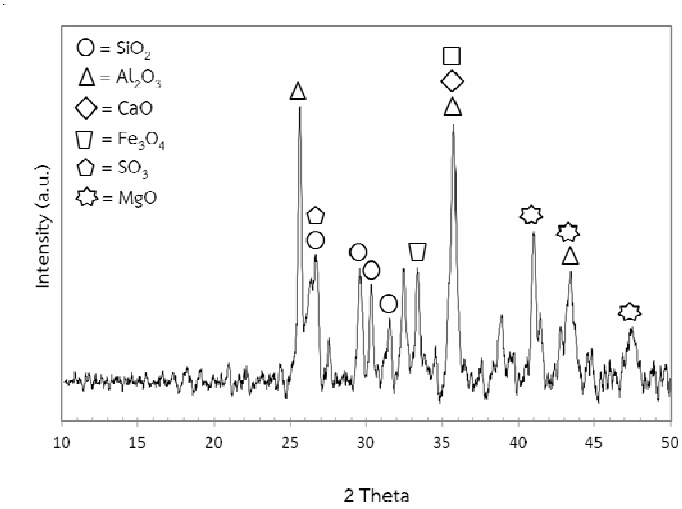
4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย PCC

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย PCC ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) แสดงข้อมูลในตารางที่ 4.1 พบว่าเถ้าลอย PCC พบว่าองค์ประกอบเคมีคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งประกอบไปด้วย SiO_2, Al_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ เมื่อรวมตัวกับสารประกอบอื่นๆ ในสภาวะเบสที่เกิดจาก $Ca(OH)_2$ จะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวคล้ายกับปูนซีเมนต์ และสามารถก่อตัวเป็นจีโอโพลิเมอร์ในสภาวะเบสได้ ซึ่งนอกจาก SiO_2, Al_2O_3 และ CaO ยังพบ Fe_2O_3, SO_3 และ MgO ด้วย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย PCC

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณธาตุในตัวอย่าง (%wt)
ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2)	35.75
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	24.76
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	16.24
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	12.66
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	3.28
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	2.55
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.16
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1.56

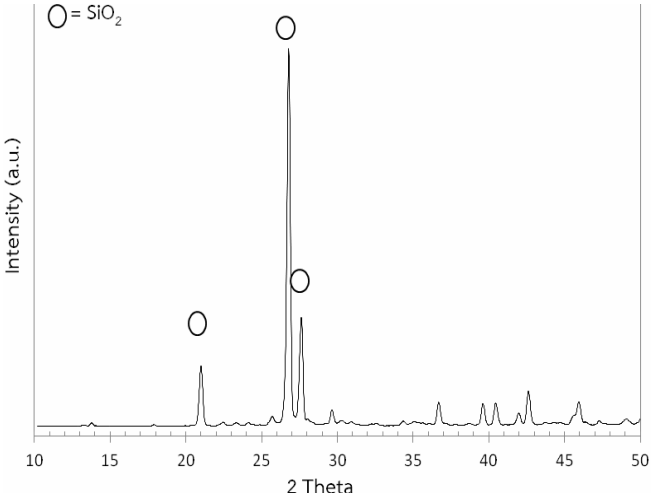
การวิเคราะห์เถ้าลอย PCC ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเถ้าลอย PCC แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าเถ้าลอย PCC มีควอตซ์ (SiO_2) ที่ 26° และยังพบ Al_2O_3, CaO, Fe_2O_3, SO_3 และ MgO เป็นองค์ประกอบซึ่งสอดคล้องกับผล XRF และมีฐานพีกที่กว้างเล็กน้อย ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเถ้าลอย PCC มีความอสัณฐานเพียงบางส่วน เนื่องจากเป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินด้วยอุณหภูมิปานกลาง (1100-1400 °C) จึงเกิดปฏิกิริยาก่อตัวเป็นจีโอโพลิเมอร์ได้ (ปริญญา, 2548)



รูปที่ 4.2 XRD ของเถ้าลอย PCC

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของทรายแม่น้ำ

สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบของทรายแม่น้ำที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าทรายแม่น้ำมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญเพียงอย่างเดียว และมีฐานพีกที่แคบซึ่งสามารถระบุได้ว่าทรายแม่น้ำ และมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.3 XRD ของทรายแม่น้ำ

4.3 การศึกษาน้ำหนักและความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

การศึกษาน้ำหนักและความหนาของจีโอโพลิเมอร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ โดยการหาน้ำหนักและความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ เปรียบเทียบน้ำหนักและความหนากับเวลาที่ใช้ในการเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ โดยผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่างจำนวน 36 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

เวลาที่ใช้จุ่มเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (วินาที)	น้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (กรัม)	(±)SD
0 (จุ่มแล้วนำขึ้นทันที)	3.3196	0.50
30	3.3968	0.45
60	3.5771	0.51

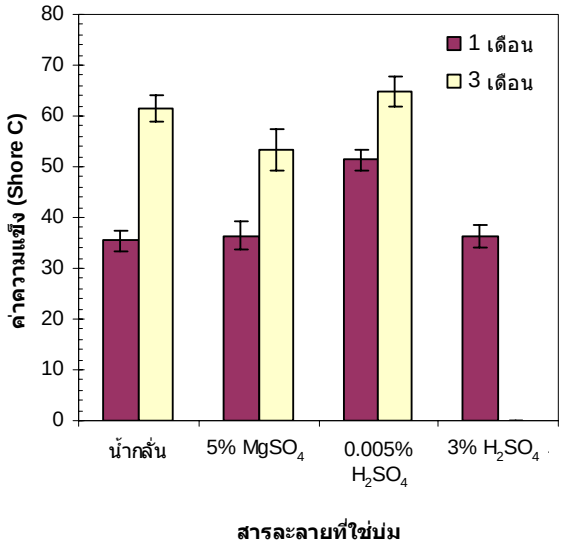
ตารางที่ 4.3 ความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

เวลาที่ใช้จุ่มเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (วินาที)	ความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (มิลลิเมตร)	(±)SD
0 (จุ่มแล้วนำขึ้นทันที)	1.20	0.20
30	1.25	0.19
60	1.27	0.13

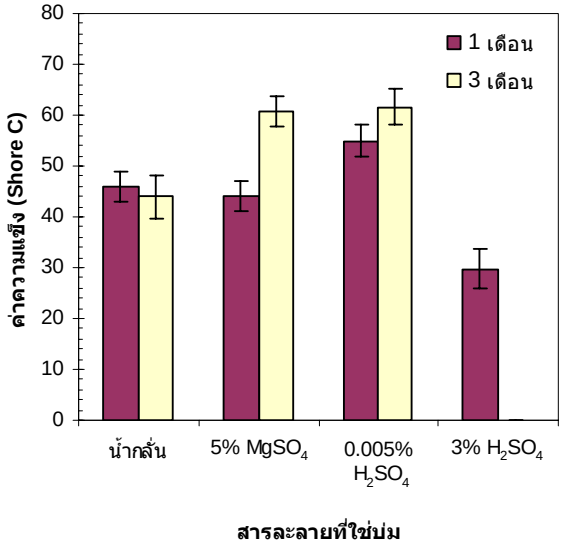
จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีผลต่อความหนาและน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ โดยแนวโน้มของความหนาและน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 0, 30 และ 60 วินาที จะเห็นได้ว่าเมื่อเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ 0 วินาที (จุ่มแล้วนำขึ้นทันที) ความหนาและน้ำหนักเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าที่เคลือบมีค่าที่ต่ำสุดเท่ากับ 1.20 ± 0.20 มิลลิเมตร และ 3.3196 ± 0.50 กรัม ตามลำดับ และมีความหนาและน้ำหนักเฉลี่ยสูงสุดที่ 60 วินาที ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.27 ± 0.13 มิลลิเมตร และ 3.5771 ± 0.51 กรัม ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบจะช่วยเพิ่มการชะตัวซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ของเถ้าลอยได้จำนวนมาก ซึ่งทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ในขณะที่เป็นของผสมเหนียวข้น (Slurry) มีความเหนียวมากขึ้นจึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สามารถเคลือบติดอยู่บนผิวของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ได้ดียิ่งขึ้น

4.4 การทดสอบความแข็งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

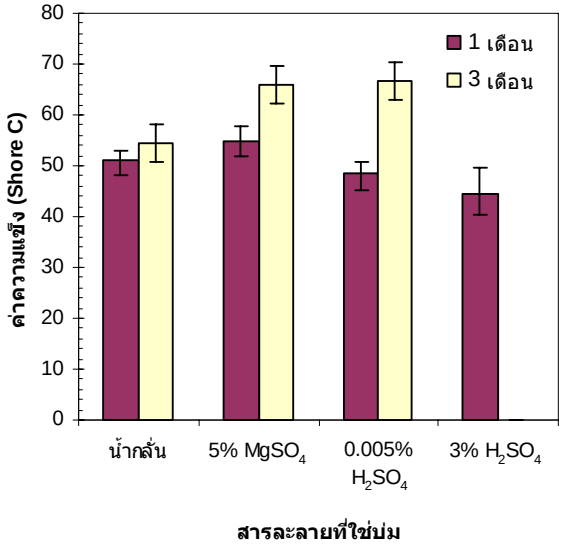
การศึกษาความแข็งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานสูงสุดต่อการเกิดรอยกดของพื้นผิวจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ครบกำหนดอายุการบ่ม 1 เดือน และ 3 เดือน ในสภาวะการบ่มต่างที่แตกต่างกันไปทดสอบด้วยเครื่อง Durometer Type C (Shore C) เพื่อเป็นการศึกษาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ในสภาวะการบ่มต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 (Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ จำนวน 3 ตัวอย่าง ดังนี้



รูปที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยความแข็งของจีโอโพลิเมอร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 0 วินาที (จุ่มแล้วนำขึ้นทันที) ที่บ่มในในสภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความแข็งของจีโอโพลิเมอร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 30 วินาที ที่บ่มในในสภาวะต่างๆ



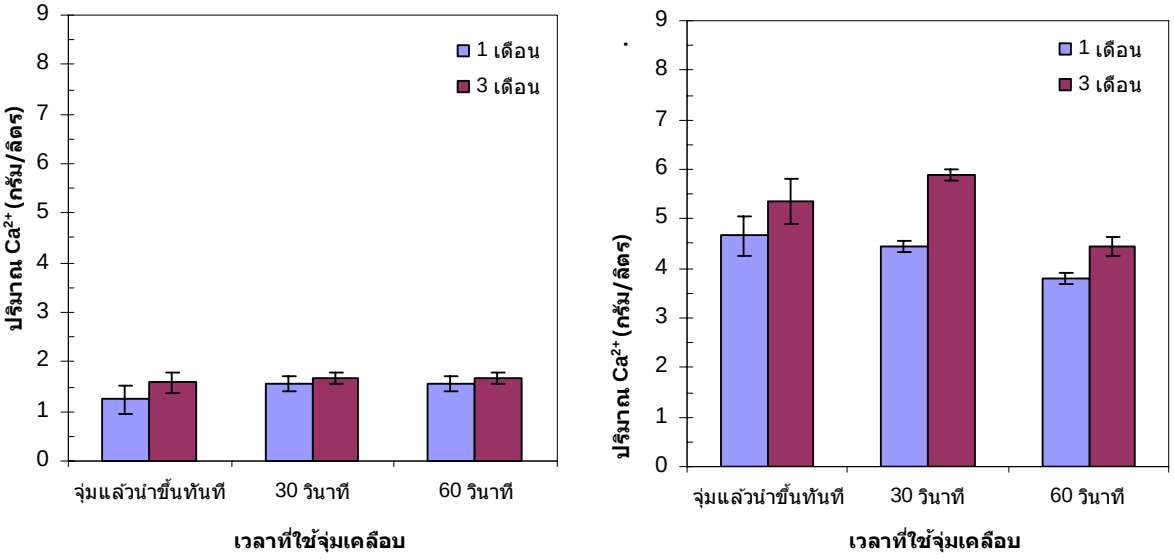
รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความแข็งของจีโอโพลิเมอร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 60 วินาที ที่บ่มในในสภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 - 4.6 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์เมื่อใช้เวลาในการเคลือบ 0 วินาที (จุ่มแล้วนำขึ้นทันที) 30 วินาที และ 60 วินาที ที่บ่มในน้ำ สารละลาย 5% w/v $MgSO_4$, 3% v/v H_2SO_4 และ 0.005% v/ H_2SO_4 เมื่อวัดด้วยเครื่องกด Shore C พบว่าตัวอย่างที่บ่มในสภาวะต่างๆ มีความแข็งอยู่ในช่วงของความแข็งปานกลางจนถึงแข็งมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของเดือนที่ 1 ที่บ่มในภาวะต่างๆพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มใน 3% H_2SO_4 มีค่าความแข็งต่ำสุด เนื่องจาก 3% H_2SO_4 เป็นกรดที่

ความเข้มข้นสูงจึงสามารถกัดกร่อนจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีความเป็นด่างสูงได้ง่าย (ปริญญา, 2548 และ Rattanasak et al., 2010) ส่วนในเดือนที่ 3 พบว่าค่าความแข็งจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์และบ่มในภาวะต่างๆ ส่วนมากมีแนวโน้มของความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดือนที่ 1 ยกเว้นตัวอย่างที่บ่มใน 3% v/v H_2SO_4 ตัวอย่างถูกกัดกร่อนด้วยกรดจนหมด ทำให้ไม่สามารถทดสอบความแข็งได้ ซึ่งอาจแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ความหนาไม่พอที่จะต้านทานกรดไม่ให้เข้าไปทำลายปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้เคลือบ หรืออาจแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ทนต่อสภาวะกรดที่มีความเข้มข้นสูงได้ต่ำเมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่บ่มใน 0.005% v/v H_2SO_4 ที่มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 3 แต่ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนของค่าความแข็งอาจมีมากเนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีทรายแม่น้ำซึ่งมีขนาดใหญ่เป็นองค์ประกอบทำให้ผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบไม่เรียบเท่าที่ควร

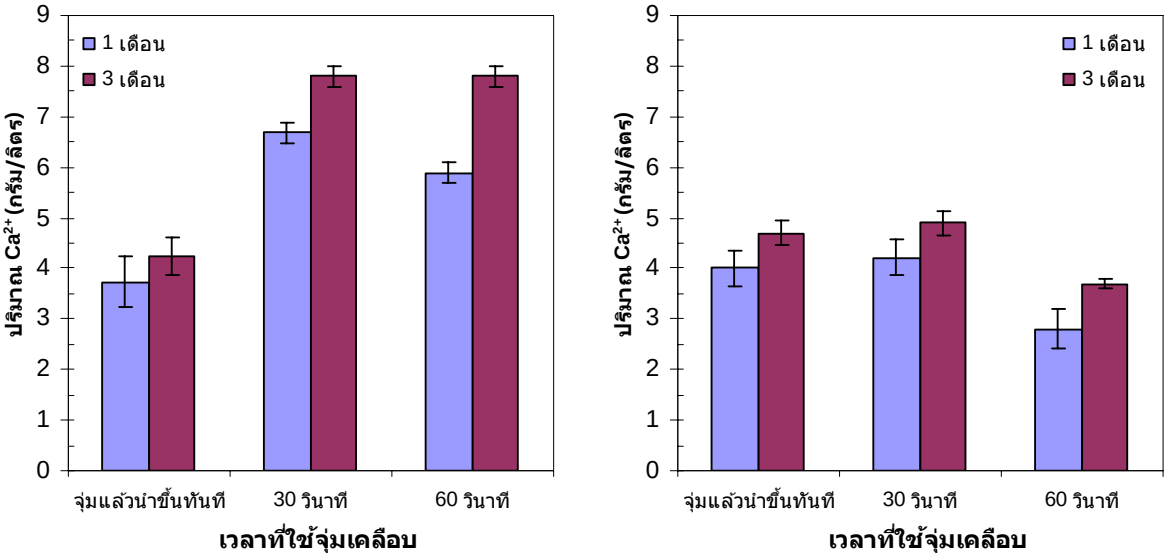
4.5 การศึกษาค่า Ca^{2+} ในสารละลายที่แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนซีเมนต์มอร์ต้าร์

การศึกษาผลของค่า Ca^{2+} ที่เปลี่ยนแปลงของน้ำ (pH=7.2), สารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ (pH=7.5), สารละลาย 3% v/v H_2SO_4 (pH=0.3) และ สารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4 (pH=3) เมื่อแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่อายุในการบ่ม 1 เดือน และ 3 เดือน เพื่อเป็นการศึกษาปริมาณแคลเซียมของจีโอโพลิเมอร์ที่ถูกชะด้วยสารละลาย เมื่อบ่มในสภาวะที่ต่างกัน โดยจะใส่สารละลายที่แช่จีโอโพลิเมอร์ให้มีความสูงประมาณ 2.5 ซม. คิดเป็นปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 55 มล. ซึ่งการเติมสารละลายให้กับตัวอย่างจะเติมเมื่อสารละลายลดลงจากขีดที่ระบุไว้ โดย 2 สัปดาห์แรกจะต้องเติมสารละลายทุก 2-3 วัน เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ การเติมสารละลายทุก 15 วัน ซึ่งผลของการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ดังนี้



(ก) น้ำ (ข) 5% w/v $MgSO_4$

รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของ Ca^{2+} ของในสารละลายที่บ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์



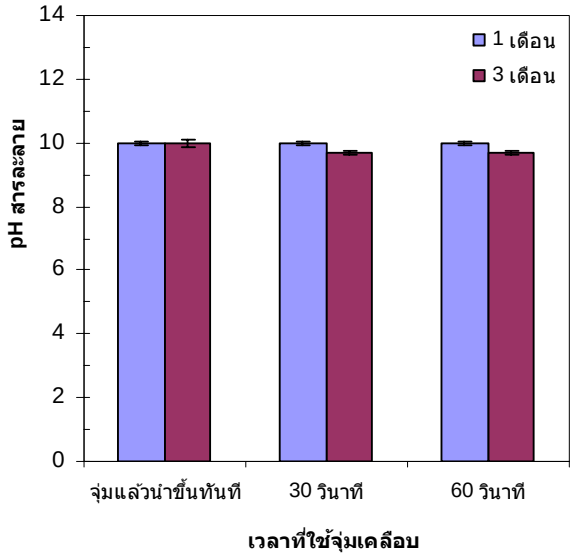
(ค) 3% w/v H_2SO_4 (ง) 0.005% w/v H_2SO_4

รูปที่ 4.7 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยของ Ca^{2+} ของในสารละลายที่บ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

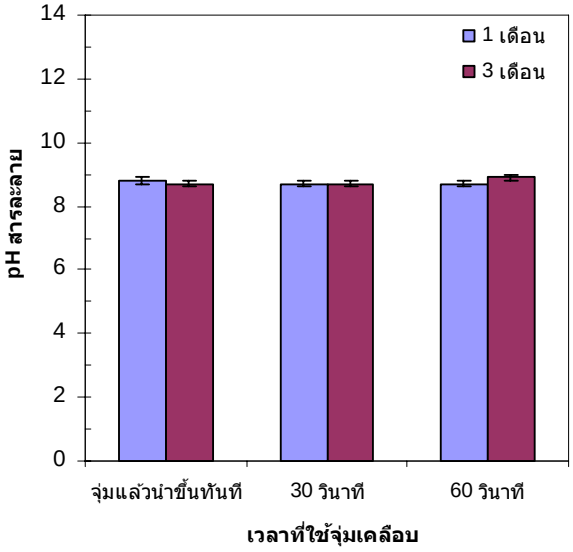
จากรูปที่ 4.7 พบว่าค่า Ca^{2+} ของน้ำ สารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ สารละลาย 3% v/v H_2SO_4 และสารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4 ที่แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้ระยะเวลาในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 0 วินาที (จุ่มแล้วนำขึ้นทันที) 30 วินาที และ 60 วินาที เมื่อเปรียบเทียบค่า Ca^{2+} สารละลายที่แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์กับค่า Ca^{2+} สารละลายเริ่มต้น พบว่าในน้ำ สารละลาย 5% w/v $MgSO_4$, 3% v/v H_2SO_4 และ 0.005% v/v H_2SO_4 เมื่อแช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แล้วมีค่า Ca^{2+} เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า Ca^{2+} ที่อยู่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ถูกชะออกมาในสารละลายที่ใช้บ่ม โดยในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 พบปริมาณ Ca^{2+} เนื่องจากสารละลายมีความเป็นกรดที่เข้มข้นสูง สามารถทำชะผิวขจีโอโพลิเมอร์ได้ดี และเมื่อแช่ในสารละลายกรดดังกล่าวที่เวลา 3 เดือน จะเกิดการหลุดลอกของเนื้อจีโอโพลิเมอร์ ทำให้กรดเข้าไปชะแคลเซียมในชิ้นส่วนผูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ได้ดี

4.6 การศึกษาค่า pH ในสารละลายที่แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนซีเมนต์มอร์ต้าร์

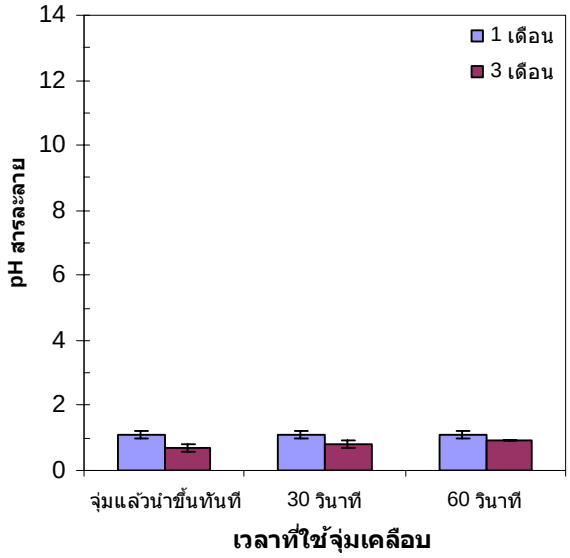
การศึกษาผลของค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงของน้ำ (pH=7.2), สารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ (pH=7.5), สารละลาย 3% v/v H_2SO_4 (pH=0.3) และ สารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4 (pH=3) เมื่อแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่อายุในการบ่ม 1 เดือน และ 3 เดือน เพื่อเป็นการศึกษาการค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความเป็นด่างสูง โดยผลของการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง ดังนี้



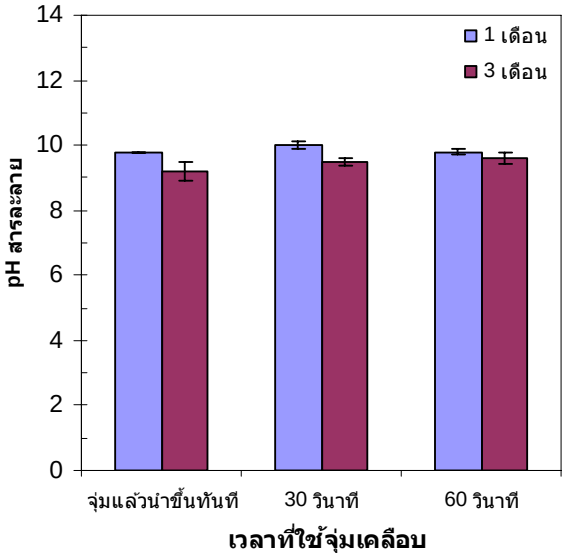
(ก) น้ำ



(ข) 5% w/v $MgSO_4$



(ค) 3% w/v H_2SO_4



(ง) 0.005% w/v H_2SO_4

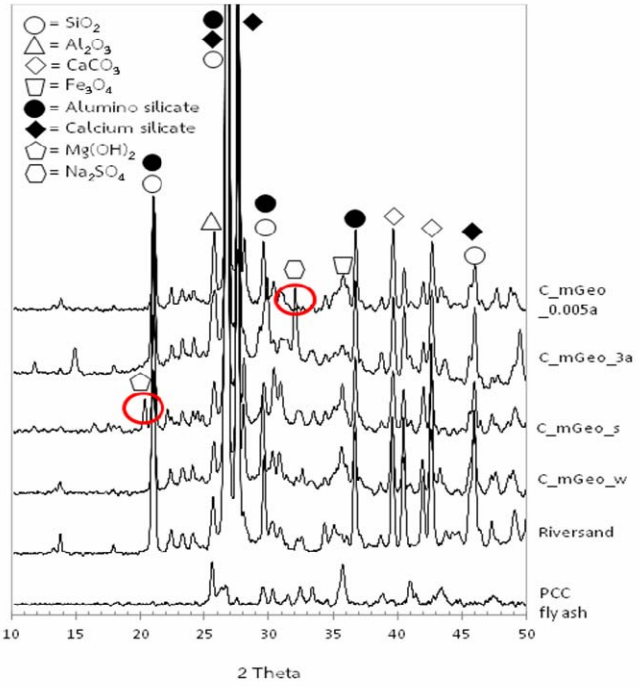
รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของ pH ของสารละลายที่บ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่า pH ของสารละลายที่แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้ระยะเวลาในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 0 วินาที (จุ่มแล้วนำขึ้นทันที) 30 วินาที และ 60 วินาที พบว่าค่า pH ของสารลายจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับค่า pH สารละลายตั้งต้น เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความเป็นด่างสูง ที่มาจาก NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงที่ใช้ในการผสม จึงทำให้สารละลายที่ใช้แช่มี pH เพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อย OH^- ที่มาจาก NaOH ที่ใช้ในการผสมไปในสารละลายทีแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่า pH ของสารละลายของเดือนที่ 1 กับเดือนที่ 3 พบว่าค่า pH ของ

สารละลายในเดือนที่ 3 มีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยจากเดือนที่ 1 อาจเกิดเนื่องจากปริมาณ OH^- ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มาจาก NaOH ที่ใช้ในการผสมมีปริมาณที่ลดลงจากที่ได้ปลดปล่อย OH^- ในสารละลายในเดือนที่ 1 ในบางส่วน นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากอย่างมาก จาก pH = 0.3 เพิ่มขึ้นไปเป็น pH ที่อยู่ในช่วง 0.7-1.1 เนื่องจาก 3% v/v H_2SO_4 มีความเข้มข้นสูง จึงมีผลต่อ pH ของสารละลายที่ใช้ในการแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์อย่างเห็นได้ชัด

4.7 การทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์โดยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

การทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบองค์ประกอบของวัสดุเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในน้ำ (pH=7.2), สารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ (pH=7.5), สารละลาย 3% v/v H_2SO_4 (pH=0.3) และ สารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4 (pH=3) ที่อายุในการบ่ม 1 เดือน กับเถ้าลอย PCC และทรายแม่น้ำ ซึ่งเป็นสารตั้งต้น แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 XRD ของเถ้าลอย PCC ทรายแม่น้ำ และจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์และแช่ในสารละลายที่อายุในการบ่ม 1 เดือน

หมายเหตุ PCC fly ash = เถ้าลอย PCC Riversand = ทรายแม่น้ำ

C_mGeo_w = จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในน้ำ

C_mGeo_s = จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$

C_mGeo_3a = จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4

C_mGeo_0.005a = จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4

จากรูปที่ 4.19 เมื่อวิเคราะห์จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายต่างๆ พบองค์ประกอบของมอร์ต้าร์ที่มีองค์ประกอบที่คล้ายกัน คือ พบผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน เช่น อะลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate) และแคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) นอกจากนี้ยังพบฐานกว้างตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 28° ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอโพลิเมอร์ของเถ้าลอยในสภาวะเบสและในตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 20° ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ (C_mGeo_s) ยังพบ $Mg(OH)_2$ ที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาของ Mg^{2+} (จากสารละลาย $MgSO_4$) กับ OH^- (จาก NaOH ที่ใช้ในการผสม) อีกด้วย เป็นการแสดงให้เห็นว่าเกลือของ $MgSO_4$ ที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำให้จีโอโพลิเมอร์เกิดความเสียหาย และนอกจากนี้ยังพบผลึกสารตั้งต้นที่ไม่เกิดปฏิกิริยา เช่น ควอตซ์ (SiO_2) ทั้งที่มาจากเถ้าลอยและทราย, Fe_3O_4, CaO, Al_2O_3 และ $CaCO_3$ อีกด้วย

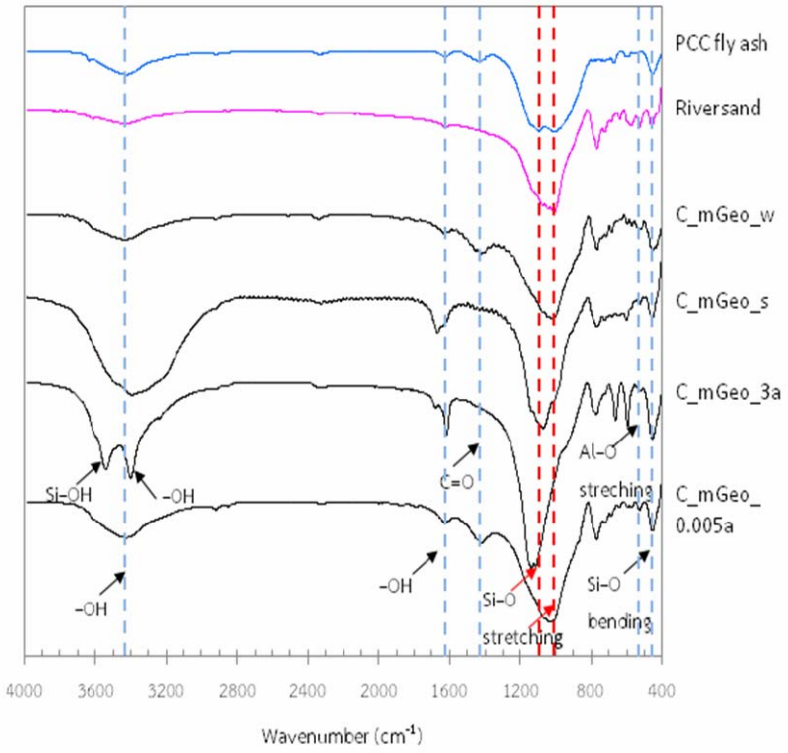
เมื่อเปรียบเทียบ XRD ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 กับ 0.005% v/v H_2SO_4 พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 พบพีกของ Na_2SO_4 ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 32° แต่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ใน 0.005% v/v H_2SO_4 ไม่พบพีกนี้ ซึ่ง Na_2SO_4 อาจเกิดจากที่ 3% v/v H_2SO_4 เป็นกรดมีความเข้มข้นสูงกว่า 0.005% v/v H_2SO_4 สามารถชะโซเดียมไอออนจากสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ (โซเดียมจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผสม) ได้มากกว่า 0.005% v/v H_2SO_4 จึงสามารถพบเกลือที่เกาะอยู่บนผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ใน 3% v/v H_2SO_4 ร่วมด้วย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าจีโอโพลิเมอร์ที่แช่อยู่ในสารละลายกรดเข้มข้นสูงจะถูกกัดกร่อนและทำลายได้เร็วกว่าที่แช่อยู่ในสารละลายกรดเข้มข้นต่ำ

4.8 การทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์โดยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR)

การทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR) เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนไปของเถ้าลอย PCC เทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายต่างๆ ที่อายุการบ่ม 1 เดือน ดังรูปที่ 4.10

จากผลวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของเถ้าลอย PCC ตั้งต้น และจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายต่างๆ ที่อายุการบ่ม 1 เดือน ด้วยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR) ในช่วงเลขคลื่น 4000-400 cm^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าสเปคตรัมของเถ้าลอยตั้งต้น PCC (PCC fly ash) ที่ตำแหน่งประมาณ 3420 cm^{-1} และ 1620 cm^{-1} เป็นพีกของหมู่ฟังก์ชัน –OH stretching และ –OH bending ของโมเลกุลน้ำในเถ้าลอย นอกจากนี้ที่ตำแหน่งประมาณ 1410 cm^{-1} ยังพบพีกของ C=O ในสารประกอบ $-CO_3^{2}$ อีกด้วย ซึ่งนอกจากจะพบพีกที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังพบพีกของ Si–O ทั้งที่เป็น Si–O stretching และ Si–O bending ที่ตำแหน่งประมาณ 1100 cm^{-1} และ

400 cm^{-1} รวมถึงยังพบพีกเล็กของ Al–O stretching ที่ตำแหน่งประมาณ 530 cm^{-1} อีกด้วย (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009) และในการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลทรายแม่น้ำพบว่าทรายแม่น้ำมีหมู่ฟังก์ชันของ Si–O จาก SiO_2 เพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าทรายมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ (ธีรานี, 2537)



รูปที่ 4.10 หมู่ฟังก์ชันของเถ้าลอย PCC ทรายแม่น้ำ และจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายต่างๆ

หมายเหตุ PCC fly ash = เถ้าลอย PCC Riversand = ทรายแม่น้ำ

C_mGeo_w = จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในน้ำ

C_mGeo_s = จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$

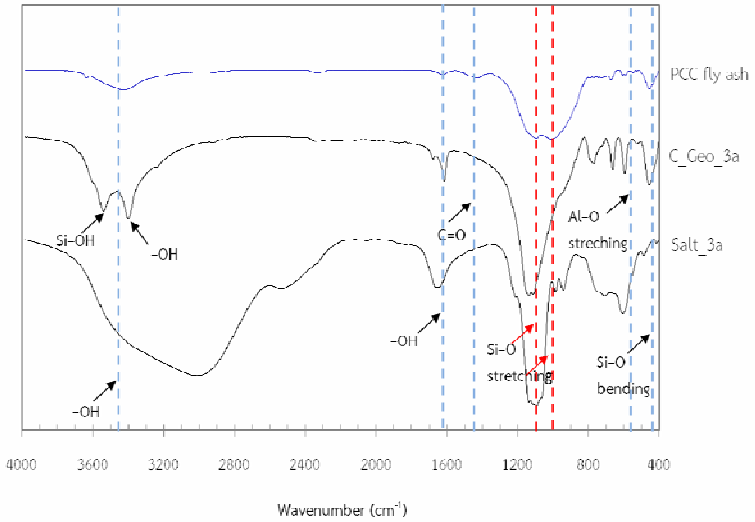
C_mGeo_3a = จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4

C_mGeo_0.005a = จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4

เมื่อเปรียบเทียบสเปคตรัมระหว่างเถ้าลอย PCC (PCC fly ash) กับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายต่างๆ ที่อายุการบ่ม 1 เดือนก็ยังพบหมู่ฟังก์ชันเช่นเดียวกับในเถ้าลอย PCC แต่ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีพีกของ –OH stretching และ –OH bending มีความกว้างและเห็นได้เด่นชัดกว่าพีกของเถ้าลอย PCC เนื่องจากใช้สารละลาย NaOH ในการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีน้ำในโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เพิ่มขึ้น (Panias al et., 2007) แต่

พบว่าสเปคตรัมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์และแช่ในสารละลาย 3% H_2SO_4 (C_mGeo_3a) ที่ตำแหน่งประมาณ 3600-3400 cm^{-1} ควรที่จะเกิดพีกของ –OH stretching แต่เกิดเป็น Doublet พีกบริเวณนั้น ซึ่งอาจเกิดจากการแตกตัวของ Si–O ของอะลูมิโนซิลิเกต และแคลเซียมซิลิเกตที่อยู่ในจีโอโพลิเมอร์ ไปทำปฏิกิริยากับ H_2SO_4 เกิดเป็น Si–OH ที่ตำแหน่งประมาณ 3600 cm^{-1} และเกิด –OH ที่ตำแหน่ง 3400 cm^{-1} ดังรูปที่ 4.10

นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ยังมีการเลื่อนตำแหน่งของพีก (Peak shift) ของหมู่ฟังก์ชัน Si–O stretching จากเดิมที่พบในเถ้าลอย PCC ที่ตำแหน่ง 1100 cm^{-1} ไปยังตำแหน่ง 1025 cm^{-1} ซึ่งเป็นการเลื่อนไปตำแหน่งของเลขคลื่นที่ต่ำลง แสดงถึงค่าพลังงานที่ลดลงและเกิดการก่อพันธะของ Si–O ใหม่ จากเดิมที่เป็นพันธะของ SiO_2 ในเถ้าลอย PCC ไปเป็น Si–O ที่ได้จากสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและอะลูมิโนซิลิเกตในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009; Chindaprasirt al et., 2009 และ Lee al et., 2002) อย่างไรก็ตามพบว่าในสเปคตรัมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์และแช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 (C_mGeo_3a) เพียงสเปคตรัมเดียวที่ไม่เห็นการเลื่อนตำแหน่งของพีก (Peak shift) ของหมู่ฟังก์ชัน Si–O stretching อาจเกิดจากเกลือที่อยู่บนผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ใน 3% v/v H_2SO_4 มาบดบังการเลื่อนตำแหน่งของพีก (Peak shift) ของหมู่ฟังก์ชัน Si–O stretching เพราะเมื่อเปรียบเทียบสเปคตรัมของ 3% H_2SO_4 (C_mGeo_3a) กับเกลือที่เกิดบนผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 3% H_2SO_4 (Salt_3a) ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 หมู่ฟังก์ชันของเถ้าลอย PCC เกลือที่เกิดบนผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 และจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายต่างๆ

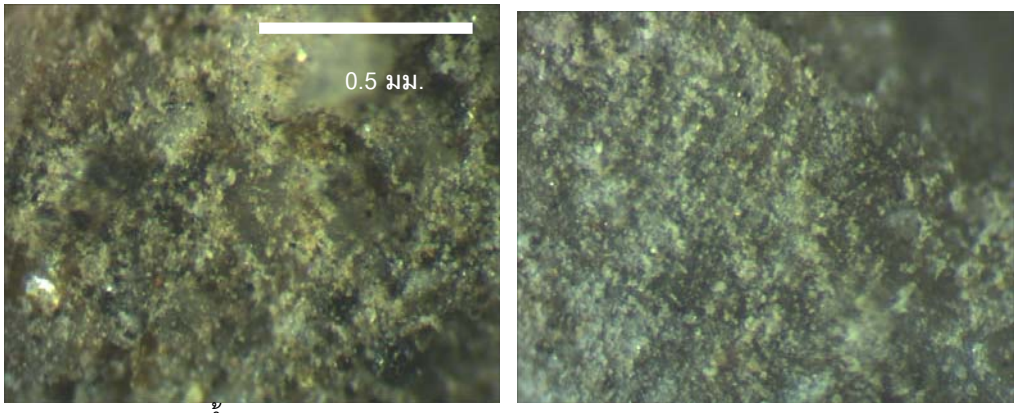
หมายเหตุ PCC fly ash = เถ้าลอย PCC

C_mGeo_3a = จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4

Salt_3a = เกลือที่เกิดบนผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 3% H_2SO_4

4.9 การวิเคราะห์โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป

การศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์และแช่ในน้ำ (pH=7.2), สารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ (pH=7.5), สารละลาย 3% v/v H_2SO_4 (pH=0.3) และสารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4 (pH=3) ที่อายุการบ่ม 1 เดือน จากภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป ที่กำลังขยาย 80 เท่า



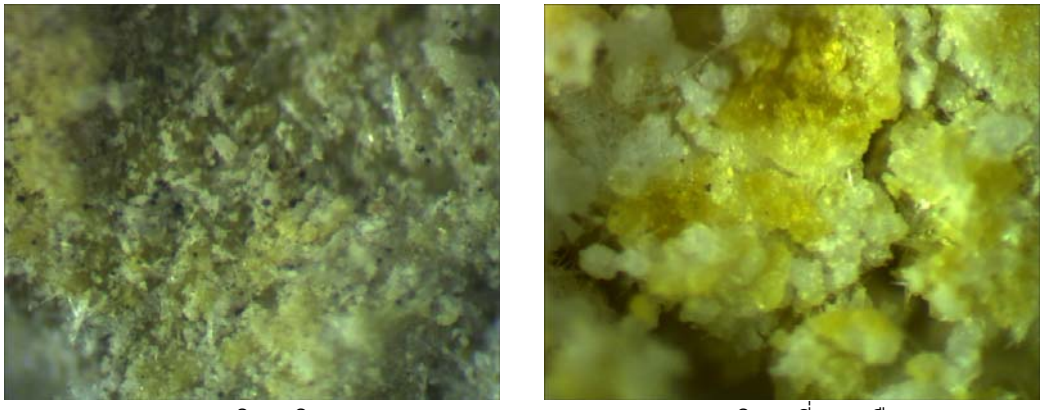
(ก) น้ำ (C_Geo_w) (ข) 5% w/v $MgSO_4$ (C_Geo_s)

รูปที่ 4.12 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย

จากรูปที่ 4.12 (ก) โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์และแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่าโครงสร้างของจีโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเพียงอนุภาคของทรายแม่น้ำ (สีน้ำตาลอ่อน) แทรกอยู่บริเวณช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอย (สีดำ) จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มีลักษณะเนื้อแน่นไม่มีรอยแตก เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความเสถียรในน้ำ คือ ไม่แตกตัวเมื่อแช่น้ำ (อุบลลักษณ์และปริญญา, 2552) เมื่อแช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ (C_Geo_3a) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) เป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่ามีอนุภาคของทรายแม่น้ำ (สีน้ำตาลอ่อน) แทรกอยู่บริเวณช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอย (สีดำ) และนอกจากนี้ยังพบเกลือของซัลเฟต (สีขาว) เกาะอยู่บริเวณผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์อีกด้วย ซึ่งเกลือที่มาเกาะนั้นอาจเกิดมาจาก Mg^{2+} (จากสารละลาย $MgSO_4$) กับ OH^- (จาก NaOH ที่ใช้ในการผสม) ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็น $Mg(OH)_2$ ที่มีสีขาวและมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่บริเวณที่ผิวของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งการเกิด $Mg(OH)_2$ มีสมการดังนี้

$$Mg^{2+} + 2OH^- \longrightarrow Mg(OH)_2 \qquad .....4.1$$

นอกจากอาจจะมี $Mg(OH)_2$ เกิดขึ้นแล้วยังอาจเกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO•SiO_2•8H_2O$) ซึ่งเป็นผลจาการทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมไอออนกับซิลิกาได้อีกด้วย (Skalny al et, 2002)



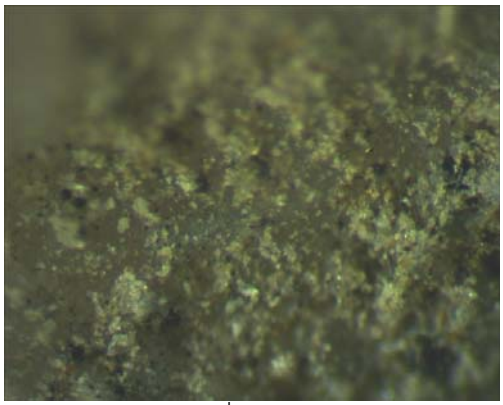
(ก) บริเวณผิว (ข) ปริเวณที่พบเกลือ

รูปที่ 4.13 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลายกรด 3% H_2SO_4

จากรูปที่ 4.13 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 (C_Geo_3a) ระยะเวลา 1 เดือน พบว่าอนุภาคของทรายแม่น้ำ (สีน้ำตาลอ่อน) แทรกอยู่บริเวณช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอย (สีดำ) และนอกจากนี้ยังพบเกลือเกาะอยู่บนผิวของของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แสดงดังรูป 4.13 (ข) ร่วมด้วย โดยเกลือที่พบอาจเป็นโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่อาจเกิดจากซิลิกา (SiO_2) ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและอยู่ในจีโอโพลิเมอร์มาทำปฏิกิริยากับ NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงที่ในการผสม เกิดเป็นโซเดียมซิลิเกต ($Na_2O•SiO_2$) และเมื่อโซเดียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกได้เป็นสารประกอบของกรดซาลิซิก (H_2SiO_4) ออกมาในสารละลาย และได้เกลือโซเดียมซัลเฟต ที่อาจเกาะอยู่บนผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ซึ่งมีปฏิกิริยาการเกิดดังนี้ (อุบลลักษณ์และปริญญา, 2552)

$$SiO_2 + 2NaOH \longrightarrow Na_2O•SiO_2 + H_2O \quad .....4.2$$

$$Na_2O•SiO_2 + 2\ H_2SO_4 + H_2O \longrightarrow H_2SiO_4 + Na_2SO_4 \quad .....4.3$$



รูปที่ 4.14 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4 (C_Geo_0.005a)

จากรูปที่ 4.14 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4 (C_Geo_0.005a) ระยะเวลา 1 เดือน พบว่าโครงสร้างของจีโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเพียงอนุภาคของทรายแม่น้ำ (สีน้ำตาลอ่อน) แทรกอยู่บริเวณช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอย (สีดำ) ไม่พบรอยแตก หรือโพรงอากาศ เนื่องจากความเข้มข้นของกรดที่ใช้มีความเข้มข้นไม่สูงมากจึงอาจเกิดการกัดกร่อนและการชะองค์ประกอบของจีโอโพลิเมอร์ออกมาเพียงเล็กน้อย

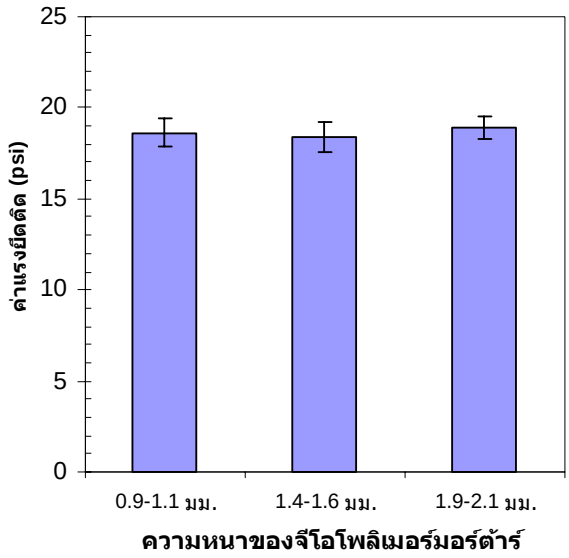
เมื่อเปรียบเทียบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 กับ 0.005% v/v H_2SO_4 จากรูปที่ 4.13 (ก) และ รูปที่ 4.14 ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 ซึ่งเป็นกรดความเข้มข้นสูงทำให้เกิดการสึกกร่อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ได้มาก และรุนแรง อาจส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 0.005% v/v H_2SO_4 โดยจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 3% v/v H_2SO_4 จะพบเกลือที่เกาะอยู่บนผิว ส่วนจีโอโพลิเมอร์ที่แช่ใน 0.005% v/v H_2SO_4 เป็นกรดที่มีความเข้มข้นต่ำจะไม่พบเกลือที่มาเกาะอยู่บนผิว แต่พบเพียงเนื้อของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีอนุภาคเถ้าลอยกับอนุภาคของทรายแม่น้ำที่เกาะรวมตัวกันอยู่ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าจีโอโพลิเมอร์ที่แช่อยู่ในสารละลายกรดเข้มข้นสูงจะถูกกัดกร่อนและทำลายได้เร็วกว่าที่แช่อยู่ในสารละลายกรดเข้มข้นต่ำ

4.10 การทดสอบการยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บนผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์

การศึกษาแรงยึดติดของของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ซึ่งจะศึกษาการยึดติดในลักษณะของความแข็งแรงของพันธะเคมีตาม ASTM C321 (Bond Strength of Chemical-Resistant Mortars) เพื่อเป็นการทดสอบคุณสมบัติการยึดติดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่นำไปยึดติดกับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำคุณสมบัติการยึดติดมาพัฒนาสำหรับใช้ซ่อมแซม และนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป โดยเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ยึดติดระหว่างปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ 2 ก้อน ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.9-1.1, 1.4-1.6 และ 1.9-2.1 มิลลิเมตร แล้วบ่มตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25±3ºC เป็นเวลา 7 วัน โดยผลของการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.15

จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่าเฉลี่ยการยึดติดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อเทียบกับความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีผลต่อกำลังยึดติดเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อช่วงของความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ยึดติดกับปูนซีเมนต์ 2 ก้อนที่ 0.9-1.1 มิลลิเมตร ค่าการยึดติดเฉลี่ยของจีโพลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 18.6 ± 0.77 psi เมื่อเพิ่มช่วงความหนาของจีโอโพลิมอร์ต้าร์เป็น 1.4-1.6 มิลลิเมตร ค่าการยึดติดของจีโพลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 18.4 ± 0.86 psi แต่เมื่อเพิ่มช่วงของความหนาของจีโอโพลิมอร์ต้าร์เป็น 1.9-2.0 มิลลิเมตร ค่าการยึดติดของจีโพลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 18.9 ± 0.58 psi จะเห็นว่าค่าการยึดติดมีค่าใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่าความหนาที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าแรงยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ อาจเกิดจากช่วงของความหนาที่ใช้ในการทดลองนั้นต่างกันไม่มาก และเครื่องที่ใช้ทดสอบสามารถอ่านค่าทศนิยมได้เพียง 1 ตำแหน่ง ซึ่งจะ

เห็นจากช่วงความหนาของจีโอโพลิมอร์ต้าร์ 1.9-2.1 มิลลิเมตร มีค่าการยึดติดของจีโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่ที่ 0.9-1.1 มิลลิเมตร และ 1.4-1.6 มิลลิเมตร มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งที่ช่วงความหนาของจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวอาจมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้อย่างมีนัยสำคัญ

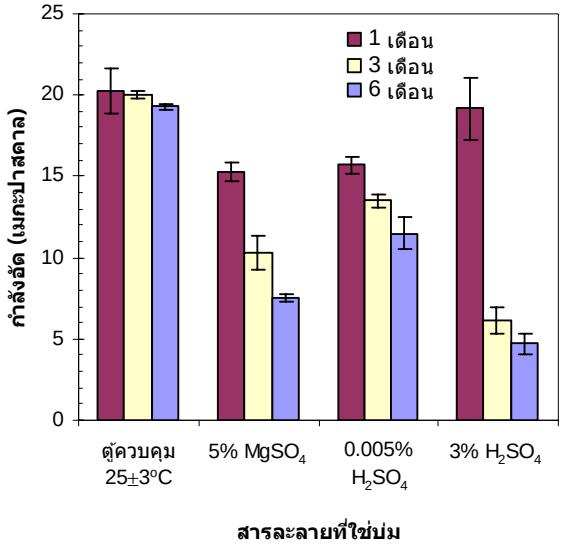


รูปที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยการยึดติดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เทียบกับความหนาของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (มิลลิเมตร)

4.11 การศึกษากำลังอัด

4.11.1 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (Mortar)

การศึกษาผลของกำลังอัดเป็นการศึกษาค่าแรงอัดที่สูงสุดที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ก้อนลูกบาศก์ขนาด 5×5×5 ซม.^{3} จำนวน 3 ตัวอย่างเกิดการแตกจนเสียรูป กำลังอัดเป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักในการทำวิจัยเรื่องจีโอโพลิเมอร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง ในงานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าจากเถ้าลอยที่ได้จากการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (PCC) ผสมทรายลงไปเป็น 2 เท่าของน้ำหนักเถ้าลอย โดยนำจีโอโพลิเมอร์ที่ครบกำหนดอายุการบ่ม 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือนนำไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM C109 (Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) โดยผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จำนวน 3 ก้อน ดังนี้



รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในสภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 แสดงค่าเฉลี่ยกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 3°C บ่มในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$, 3% v/v H_2SO_4 และ 0.005% v/v H_2SO_4 ที่ช่วงเวลาต่างๆ พบว่าอายุการบ่มและสภาวะในการบ่มเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ดังนี้

จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 3 °C มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 1 เดือน และเมื่อบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ 6 เดือน พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อย อาจเกิดจากการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย (NaOH) สูงถึง 15 โมลาร์ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงทำให้เกิดสารประกอบโซเดียมซิลิเกตที่เกิดจากซิลิกาที่ถูกเบสชะออกมาจับกับโซเดียมไอออนในโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินพอ นอกจากนี้ยังพบซีโอไลต์ก่อตัวในจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง ซึ่งซีโอไลต์และสารประกอบโซเดียมซิลิเกตมีผลเสียต่อค่ากำลังอัด ทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น (Rattanasak et al., 2010)

จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ มีค่ากำลังอัดลดลงตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 3°C แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ตัวอย่างเสียกำลังอัดเมื่อบ่มในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ เนื่องจากตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สูญเสียไอออนของอัลคาไลน์ในสารละลายซัลเฟต ซึ่งไอออนอัลคาไลน์เป็นตัวที่ทำให้เกิดความสมดุลด้านประจุไฟฟ้าของการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ การสูญเสียไอออนของอัลคาไลน์ดังกล่าวทำให้เกิดความเค้น และรอยแตก ทำให้ส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ (ปริญญา, 2548) โดยปฏิกิริยาที่สามารถพบในจีโอโพลิเมอร์มีดังนี้ (Chindaprasirt et al., 2013)

Mg^{2+} (aq) + SO_4^{2-} (aq) + $Ca(OH)_2$ (s) ⟶ $Mg(OH)_2$ (s) + $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (s)

$3Mg^{2+}$ (aq) + $3SO_4^{2-}$ (aq) + $3CaO \cdot SiO_2$ (s)

⟶ $3Mg(OH)_2$ (s) + $3CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (s) + SiO_2 (s)

$6Mg^{2+}$ (aq) + $6SO_4^{2-}$ (aq) + $2[3CaO \cdot SiO_2]$ (s) + $17H_2O$ (l)

⟶ $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ (s) + $6[CaSO_4 \cdot 2H_2O]$ (s) + $3Mg(OH)_2$ (s)

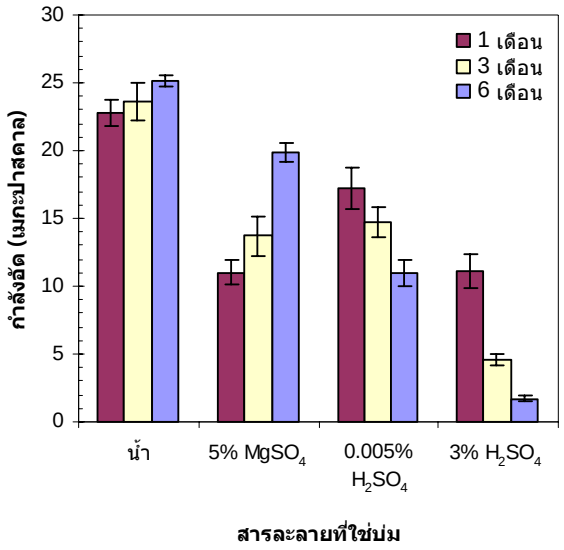
จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 0.005% w/v H_2SO_4 มีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นจาก 1 เดือน และ 3 เดือน เมื่อเทียบกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 3 °C แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ตัวอย่างเสียกำลังอัดเมื่อบ่มในสารละลาย 0.005% w/v H_2SO_4 เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความเป็นด่างสูงจึงถูกทำลายโดยกรดที่มีความเข้มข้นต่ำได้เพียงเล็กน้อย การกัดกร่อนของกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมที่ละลายน้ำได้ และการที่กรดไปทำลายลูกโซ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (Depolymerization) และการเกิดผลึกของซีโอไลต์ (Zeolites) (ปริญญา, 2548 และ Rattanasak et al., 2010) แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นจาก 1 เดือน และ 3 เดือน มีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเกิดจากการเกิดสารประกอบใหม่ภายในรูพรุนต่างๆ (Chindaprasirt et al., 2013)

จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 3% w/v H_2SO_4 มีค่ากำลังอัดลดลงตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 3 °C แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ตัวอย่างเสียกำลังอัดเมื่อบ่มในสารละลาย 3% w/v H_2SO_4 เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความเป็นด่างสูงจึงถูกทำลายโดยกรดที่มีความเข้มข้นสูงได้ง่าย การกัดกร่อนของกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมที่ละลายน้ำได้ และการที่กรดไปทำลายลูกโซ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (Depolymerization) และการเกิดผลึกของซีโอไลต์ (Zeolites) (ปริญญา, 2548 และ Rattanasak et al., 2010)

เมื่อเปรียบเทียบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 3% w/v H_2SO_4 (กรดที่มีความเข้มข้นสูง) กับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 0.005% w/v H_2SO_4 (กรดที่มีความเข้มข้นต่ำ) พบว่าที่ 1 เดือน จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในสารละลาย 3% w/v H_2SO_4 มีกำลังอัดที่สูงกว่าในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 0.005% w/v H_2SO_4 แต่เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในสารละลาย 3% w/v H_2SO_4 มีกำลังอัดลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 0.005% w/v H_2SO_4 ซึ่งแสดงว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์นั้นสามารถทนต่อกรดที่มีความเข้นข้นต่ำได้ดี

4.11.2 กำลังอัดปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ (Mortar)

การศึกษาผลของกำลังอัดเป็นการศึกษาค่าแรงอัดที่สูงสุดที่ทำให้ปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ก้อนลูกบาศก์ขนาด 5×5×5 ซม.^{3} จำนวน 3 ตัวอย่างเกิดการแตกจนเสียรูป กำลังอัดเป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง ในงานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยนำจีโอโพลิเมอร์ที่ครบกำหนดอายุการบ่ม 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือนนำไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM C109 (Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars) โดยผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จำนวน 3 ก้อน ดังนี้



รูปที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลายที่อายุ 1 เดือน 3 เดือน และ 6 เดือน

จากรูปที่ 4.17 เป็นค่าเฉลี่ยกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่บ่มในน้ำ บ่มในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$, 3% v/v H_2SO_4 และ 0.005% v/v H_2SO_4 ที่ช่วงเวลาต่างๆ พบว่าอายุการบ่มและสภาวะในการบ่มเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ ดังนี้

การบ่มปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ในน้ำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างเนื่องจากน้ำช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างสมบูรณ์มากขึ้น เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เป็นผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะส่งผลให้การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์เป็นไปอย่างต่อเนื่อง (ธีรวัฒน์ และคณะ, 2548; จันทนา, 2550)

เมื่อเทียบกับตัวอย่างปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ กับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่บ่มในน้ำ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์เสียกำลังอัดเมื่อบ่มในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ อาจเกิดจากสารซัลเฟตสามารถทำลายโครงสร้างของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์โดยจะไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) แคลเซียมอะลูมิโนไฮเดรต (CAH) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ทำให้

ได้ยิปซัม แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium sulfoaluminate) หรือเอททริงไกต์ (Ettringgite) เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างเสียกำลังอัด แต่เมื่อพิจารณากำลังอัดตัวอย่างปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 5% w/v $MgSO_4$ ที่เวลาในการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นจาก 1 เดือน, 3 เดือน และ 6 เดือน พบว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น อาจเกิดได้จากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะไปแทรกตัวในรูพรุนของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมที่ในปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ทำให้เกิดเอททริงไกต์ (Ettringgite) แทรกตามช่องว่างทำให้ขนาดของรูพรุนรูโพรงลดลงเป็นผลให้กำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์มีค่าเพิ่มขึ้นได้ (ปริญญา และชัย, 2552)

ปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 0.005% w/v H_2SO_4 มีค่ากำลังอัดที่ลดลงเล็กน้อยตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นจาก 1 เดือน และ 3 เดือน เนื่องจากปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์มีความเป็นด่างสูงจึงถูกทำลายโดยกรดที่มีความเข้มข้นต่ำได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยการกัดกร่อนของกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ (ธีรวัฒน์และคณะ, 2548)

ปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 3% w/v H_2SO_4 มีค่ากำลังอัดลดลงตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์มีความเป็นด่างสูง และมีปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สูง จึงถูกทำลายโดยกรดที่มีความเข้มข้นสูงได้ง่าย (ธีรวัฒน์และคณะ, 2547) โดยการกัดกร่อนของกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ เกิดการสูญเสียน้ำหนัก จึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลงอย่างมาก (ปริญญา, 2548)

เมื่อเปรียบเทียบปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 3% w/v H_2SO_4 (กรดที่มีความเข้มข้นสูง) กับปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 0.005% w/v H_2SO_4 (กรดที่มีความเข้มข้นต่ำ) พบว่าที่ ปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่บ่มในสารละลาย 3% w/v H_2SO_4 และ 0.005% w/v H_2SO_4 มีกำลังอัดที่ลดลงตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น แต่ปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่บ่มในสารละลาย 3% w/v H_2SO_4 มีกำลังอัดลดลงอย่างรวดเร็วกว่าในปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์บ่มในสารละลาย 0.005% w/v H_2SO_4 ซึ่งแสดงว่าปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์นั้นจะสูญเสียกำลังอัดทั้งที่บ่มในกรดที่มีความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษารูปร่างลักษณะและองค์ประกอบของเถ้าลอย PCC เถ้าลอยส่วนใหญ่มีรูปร่างที่เป็นทรงกลมขนาด 1 ไมครอนไปจนถึง 200 ไมครอน มีองค์ประกอบเคมีที่ประกอบไปด้วย SiO_2, Al_2O_3 และ CaO ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญที่สามารถก่อตัวเป็นจีโอโพลิเมอร์ในสภาวะเบสได้

ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์นั้น การเพิ่มระยะเวลาในการจุ่มเคลือบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์บนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ ทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มของความหนาและน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น และมีความแข็งในสภาวะการบ่มต่างๆ ในช่วงความแข็งปานกลางจนถึงแข็งมาก ความแข็งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนซีเมนต์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นยกเว้นเมื่อบ่มใน 3% H_2SO_4 ที่ไม่สามารถวัดค่าความแข็งได้ที่อายุการบ่ม 3 เดือนได้ เนื่องจากตัวอย่างถูกทำลายด้วยกรดที่มีความเข้มข้นสูงจนหมด ส่วนค่า pH และค่า Ca^{2+} ในสารละลายที่แช่ตัวอย่าง พบว่าค่า pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มข้น เนื่องจากปลดปล่อย OH^- ที่มาจาก NaOH ที่ใช้ในการผสมไปในสารละลายที่แช่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ส่วนค่า Ca^{2+} ในสารละลายที่แช่ตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น และพบผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน เช่น อะลูมิโนซิลิเกต และแคลเซียมซิลิเกต และในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 5% $MgSO_4$ และ 3% H_2SO_4 ยังพบเกลือที่เกาะและทำลายผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ แต่ไม่พบเกลือในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในสารละลาย 0.005% H_2SO_4 แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์ที่แช่อยู่ในสารละลายกรดเข้มข้นสูงจะถูกกัดกร่อน และทำลายได้เร็วกว่าที่แช่อยู่ในสารละลายกรดเข้มข้นต่ำ

การศึกษากำลังอัดของวัสดุแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์และปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ให้กำลังอัดสูงสุด ประมาณ 22-25 เมกะปาสคาล ที่ภาวะควบคุมที่อายุการบ่ม 1 เดือน แต่เมื่อบ่มในสารละลายกรด จีโพลิเมอร์และปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์มีกำลังอัดลดลงเนื่องจากการสูญเสียไอออนอัลคาไลน์ และแคลเซียมไอออนของจีโพลิเมอร์ถูกกัดกร่อน อย่างไรก็ตาม วัสดุจีโอโพลิเมอร์ทนต่อกรดที่มีความเข้นข้นต่ำได้ดี และมีค่ากำลังอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ควบคุมโดยเฉพาะเมื่อแช่ในกรดเนื่องจากในปูนซีเมนต์แคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงจึงถูกกัดกร่อนได้ง่าย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ลดความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็น 10 โมลาร์ เพื่อลดการเกิดซีโอไลต์ (Zeolite) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่มีส่วนทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ลดลง

2. เพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอย/เถ้าลอยรวมสารละลาย (S/T) จาก 0.60 เป็น 0.65 เพื่อให้จีโอโพลิเมอร์มีเนื้อที่แน่นขึ้น ลดการเป็นรูพรุน

3. ควรเปลี่ยนวิธีการเคลือบจากวิธีจุมเคลือบ (Dip coating method) เป็นวิธีการหล่อเทลงแบบ (mold casting coat) เพื่อให้ได้ผิวเคลือบและความหนาสม่ำเสมอ และคงทนต่อสภาวะกรดความเข้มข้นสูง

4. เพิ่มขนาดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการยึดติด เพื่อให้ได้ค่าและข้อมูลที่ละอียดขึ้น

บทที่ 6
ผลผลิต

ผลงานบางส่วนได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการที่มีผู้ทรงคุณวุฒิร่วมกลั่นกรอง (Peer Review)

1. เรื่อง “สมบัติของวัสดุเคลือบที่ผลิตจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-10 กรกฎาคม 2558 ณ โรงแรมเดอะซายน์ พัทยาเหนือ จ.ชลบุรี จ. ชลบุรี

สมบัติของวัสดุเคลือบที่ผลิตจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอย

Properties of coating material prepared from fly ah geopolymer mortar

ชีววร ศิริผล[1] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์[1*] และ ปริญญา จินดาประเสริฐ[2]

[1] *ภาควิชาคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี*

[2] *ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของสารเคลือบที่ผลิตจากจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยสำหรับเคลือบวัสดุซีเมนต์ เพื่อประยุกต์ใช้งานภายใต้สภาวะความเป็นกรดและเกลือ โดยบ่มตัวอย่างวัสดุเคลือบที่อุณหภูมิ 65 $^{\circ}$C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างบ่มในน้ำ (pH = 7.2) สารละลาย 5% $MgSO_4$ (pH = 7.5), และ 0.005% H_2SO_4 (pH = 3) เป็นเวลา 1 และ 3 เดือน ทำการวัดค่า pH และปริมาณ Ca^{2+} ของสารละลายที่ใช้แช่ และวัดค่าความแข็งของสารเคลือบ ผลการทดลองพบว่าสารเคลือบที่ผลิตจากจีโอโพลิเมอร์มีความคงทนต่อสภาวะการแช่ได้ดี โดยเฉพาะในสารละลาย 0.005% H_2SO_4 (pH = 3) ที่มีค่า pH ใกล้เคียงกับน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมก่อนการปรับสภาพ

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์, สารเคลือบ, เถ้าลอย, ค่าความแข็ง

Abstract

This research investigated the properties of coating material prepared from fly ah geopolymer mortar in order to apply this material under acid and saline conditions. Coating samples were cured at 65 $^{\circ}$C for 24 hr and then immersed in water (pH = 7.2), 5% $MgSO_4$ (pH = 7.5), and 0.005% H_2SO_4 (pH = 3) solutions for 1 and 3 months. pH and Ca^{2+} measurements of immersed solutions were carried out. Hardness (Shore C) of coating material was also performed. Results showed that geopolymeric coating material was resistant in immersed conditions, particularly in 0.005% H_2SO_4 (pH = 3) which generally was pH of the industrial wastewater.

Keywords: Geopolymer, Coating material, Fly ash, Hardness

* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)
E-mail address: ubolluk@buu.ac.th

1. คำนำ

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน คือของเสียอุตสาหกรรมที่ต้องการการกำจัดที่ดี และมีการใช้เถ้าลอยให้เกิดประโยชน์อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเถ้าลอยจากการเผาความร้อนปานกลาง (Pulverized coal combustion) หรือเถ้าลอย PCC จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เถ้าลอยบางส่วนสามารถนำผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง แต่ยังคงสมบัติการเป็นวัสดุประสานที่ดี [1] อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตยังมีข้อจำกัด คือปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ผสมจะไม่เกิน 50% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ นอกจากการนำเถ้าลอย PCC มาผสมกับปูนซีเมนต์แล้ว ยังมีการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์อื่น เช่นผลิตเป็นสารซีโอไลต์ [2] การสกัดเอาธาตุต่างๆ ออกมาจากเถ้าลอย [3] อย่างไรก็ตามยังมีปริมาณเถ้าลอย PCC จำนวนมากที่เหลือทิ้งและต้องการถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ในปัจจุบัน มีการศึกษาและพัฒนาวัสดุประสานชนิดใหม่ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมหลักมากขึ้น วัสดุดังกล่าว เรียกว่า วัสดุจีโอโพลิเมอร์ [4] วัสดุนี้มีสมบัติที่ทนกรด และได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบในเถ้าลอย PCC กับสารละลายซิลิเกตและสารละลายเบส ในสภาวะการใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีสมบัติคล้ายสารซีเมนต์ โดยใช้หลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) ออกซิเจน (O) และอะลูมิเนียม (Al) ต่อกันเป็นโมเลกุลลูกโซ่ สารประกอบดังกล่าวทนต่อสภาวะกรดได้ดี [5]

โดยทั่วไป ท่อในโรงงานบางประเภทจะต้องสัมผัสกับน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด เพื่อเข้าสู่กระบวนการบำบัดก่อนปรับสภาพน้ำเสียให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5-9 ตามมาตราฐานอุตสาหกรรม ท่อลำเลียงต้องเป็นท่อที่ทนการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งมีราคาแพง เมื่อเทียบกับท่อคอนกรีต แต่สมบัติของคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ต้าร์จะไม่ทนต่อสภาวะความเป็นกรดสูง และเกิดการกัดกร่อนได้เร็ว เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมในส่วนผสมสูง [6]

ดังนั้นเพื่อให้ท่อคอนกรีตสามารถใช้งานในสภาวะกรด เช่นท่อลำเลียงน้ำเสีย (ก่อนและหลังปรับสภาพ) และเป็นการใช้ประโยชน์เถ้าลอย PCC ให้มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยผลิตเป็นสารเชื่อมประสานจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เคลือบผิวปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ต้อง

สัมผัสสภาวะกรด เพื่อสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของคอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ต้าร์ให้ยาวนานได้

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

ในการผลิตสารเคลือบพวกจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ใช้เถ้าลอย PCC จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นส่วนผสมหลัก วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) และใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (31% SiO_2 และ 9% Na_2O) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 15 โมล่าร์ (15 M NaOH) นอกจากนี้ ใช้ทรายแม่น้ำคัดขนาด 30/20 ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (รูเปิด 0.85 มม.) และค้างตะแกรงเบอร์ 30 (รูเปิด 0.6 มม.)

แกนกลางสำหรับนำจีโอโพลิเมอร์มาเคลือบจะผลิตโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และทรายแม่น้ำคัดขนาด 30/20

สารละลายที่ใช้บ่ม ได้แก่น้ำกลั่น (pH = 7.2), สารละลาย 5% $MgSO_4$ (pH = 7.5), และ 0.005% H_2SO_4 (pH = 3)

2.2 การเตรียมปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์และสารเคลือบจีโอโพลิเมอร์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ต้าร์ : ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 2.75 ผสมส่วนผสมให้เข้ากันและเทลงในแบบซิลิโคนทรงกระบอกขนาด 10x10x100 มม.^{3} บ่มในอากาศข้ามคืน ก่อนแกะแบบ

สารเคลือบจีโอโพลิเมอร์ : ใช้เถ้าลอย 60 ส่วน สารละลายโซเดียมซิลิเกต 27 ส่วน 15 M NaOH 13 ส่วนโดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันและเติมทรายคัดขนาดปริมาณ 2 เท่าโดยน้ำหนักของเถ้าลอยผสมลงไป แล้วเทลงในแบบเคลือบพลาสติกแล้วจุ่มแกนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ลงไป รอประมาณ 30 วินาที แล้วจึงดึงแกนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ขึ้น ก่อนนำไปอบที่ 65 $^{\circ}$C เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ แกะแบบ แล้วบ่มในสารละลาย ตัวอย่างบ่มในน้ำกลั่น, สารละลาย 5% $MgSO_4$, และ 0.005% H_2SO_4 เป็นเวลา 1 และ 3 เดือน ตัวอย่างเคลือบจะมีความหนาในช่วง 5±1 มม. โดยระหว่างการบ่ม หากระดับสารละลายลดลง จะทำการเติมสารละลายให้อยู่ในระดับเริ่มต้นตลอดการทดลอง

2.3 การวิเคราะห์สารเคลือบจีโอโพลิเมอร์

ทำการวัดค่า pH และปริมาณ Ca^{2+} ของสารละลายที่ใช้บ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง pH meter และเครื่องวัดปริมาณแคลเซียม ตามลำดับ และวัดค่าความแข็งของสารเคลือบ ด้วยเครื่องวัดความแข็ง (Durometer - Shore C) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง 5 ก้อน นอกจากนี้ ศึกษาผิวของสารเคลือบด้วยเครื่อง Optical microscope

3. ผลการทดลอง

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

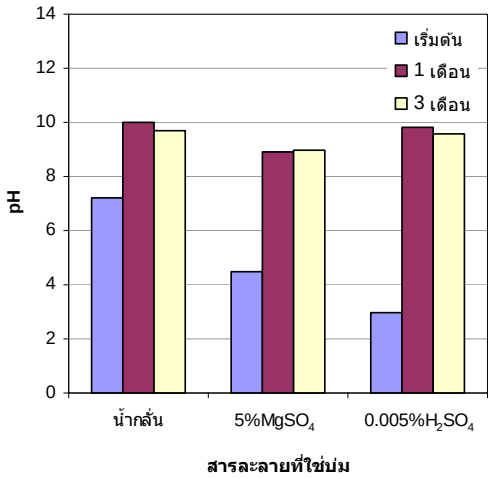
การวิเคราะห์เถ้าลอย PCC ด้วยเทคนิค XRF ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเถ้าลอยมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2, Al_2O_3 และ CaO ที่ 35.8, 24.8, 16.3 % ตามลำดับ เมื่อ SiO_2, Al_2O_3 ทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส จะเกิดการก่อตัวเป็นโพลิเมอร์เจลที่เป็นสายโซ่ของ Si-O-Al ได้ และสามารถเกิดสารประกอบ $Ca(OH)_2$ ซึ่งหากทำปฏิกิริยาต่อกับ SiO_2 ในเถ้าลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ด้วย [7]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย PCC

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%wt)	องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%wt)
SiO_2	35.8	SO_3	3.4
Al_2O_3	24.8	K_2O	2.7
CaO	16.3	MgO	2.4
Fe_2O_3	12.7	Na_2O	1.9

3.2 pH ของสารละลายที่ใช้บ่มตัวอย่าง

สารเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์จะบ่มในน้ำกลั่น (pH = 7.2), สารละลาย 5% $MgSO_4$ (pH = 7.5), และ 0.005% H_2SO_4 (pH = 3) โดยสารละลายกรด pH = 3 เป็นตัวแทนน้ำเสียที่มีสภาวะความเป็นกรดอย่างรุนแรง โดยรูปที่ 1 แสดงค่า pH ของสารละลายที่ใช้บ่ม ที่อายุการบ่ม 1 และ 3 เดือน



รูปที่ 1 ค่า pH ของสารละลายที่ใช้บ่มตัวอย่างเคลือบ

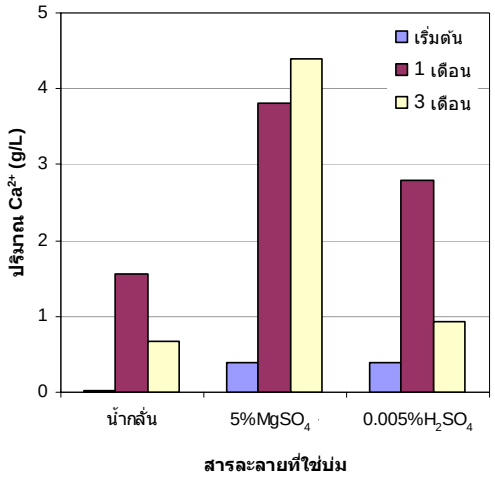
จากรูป 1 พบว่าค่า pH ของสารละลายที่บ่มสารเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับค่า pH ของสารละลายเริ่มต้น เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีความเป็นเบสสูง ที่มาจากสารละลาย NaOH และสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการผสม เมื่อบ่มจีโอโพลิเมอร์ในน้ำ หรือสารละลายต่างๆ สารละลายลายจะชะผิวจีโอโพลิเมอร์ และมีการปลดปล่อย OH^- ที่มาจาก NaOH ที่ใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ออกมาสู่สารละลาย ทำให้ค่า pH อยู่ในช่วง 9-10 ในสารละลาย 0.005% H_2SO_4 มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH มากอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสารละลายกรดสามารถชะและกัดกร่อนผิวจีโอโพลิเมอร์ได้ดีกว่าสารละลายอื่นๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่า pH ของสารละลายที่ใช้บ่มที่อายุ 1 และ 3 เดือน พบว่าค่า pH ของสารละลายต่างกันเล็กน้อย

ซึ่งอาจเนื่องจากการเกิดฟิล์มบางคลุมผิวจีโอโพลิเมอร์และป้องกันการกัดกร่อนได้

3.3 ปริมาณแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ของสารละลายที่ใช้บ่มตัวอย่าง

รูปที่ 2 แสดงปริมาณ Ca^{2+} ในสารละลายที่ใช้บ่ม โดยปริมาณ Ca^{2+} เริ่มต้นในน้ำกลั่น, สารละลาย 5% $MgSO_4$, และ 0.005% H_2SO_4 มีค่าปริมาณ Ca^{2+} คือ 0.023, 0.38 และ 0.40 g/L เมื่อบ่มสารเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์ลงในสารละลายดังกล่าว พบว่าปริมาณ Ca^{2+} ในสารละลายเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะในช่วง 1 เดือนแรก โดยเฉพาะในสารละลาย 5% $MgSO_4$ พบปริมาณ Ca^{2+} สูงสุดที่ประมาณ 4 g/L ในขณะที่ในกรด 0.005% H_2SO_4 พบปริมาณ Ca^{2+} ประมาณ 2.8 g/L ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายทั้งสองมีความสามารถในการชะผิวจีโอโพลิเมอร์สูง [5] อีกทั้งเถ้าลอย PCC ที่ใช้มีปริมาณแคลเซียมในส่วนผสมสูง จึงทำให้ค่าดังกล่าวสูงขึ้นด้วย

เมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น จะเกิดผิวบางที่ผิวจีโอโพลิเมอร์ป้องกันการกัดกร่อนและการชะ Ca^{2+} ออกสู่ระบบ นอกจากนี้ Ca^{2+} ในสารละลายกรดอาจเกิดการตกตะกอนเป็นของแข็งหรือเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ หรือเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต ทำให้ค่าที่วัดได้จากเครื่อง (วัดในรูป Ca^{2+}) มีค่าลดลง

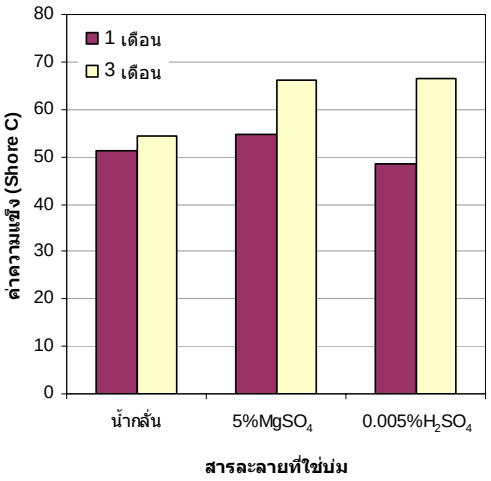


รูปที่ 2 ปริมาณ Ca^{2+} ในสารละลายที่ใช้บ่มตัวอย่างเคลือบ

3.4 ค่าความแข็งของสารเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

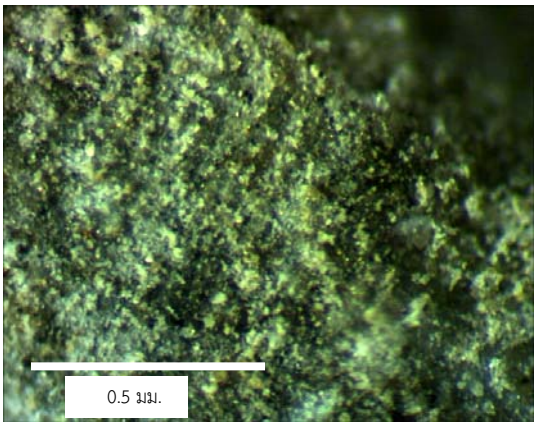
การศึกษาความแข็งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับความต้านทานสูงสุดต่อการเกิดรอยกดของสารเคลือบผิวจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ ที่อายุการบ่ม 1 และ 3 เดือน ในสภาวะการบ่มในสารละลายต่างๆ ด้วยเครื่อง Durometer - Shore C ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ จำนวน 3 ตัวอย่าง กดตัวอย่างละ 10 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 3

เมื่อวัดค่าความแข็ง พบว่า ตัวอย่างที่บ่มในสภาวะต่างๆ มีความแข็งอยู่ในช่วงของความแข็ง 50 -68 ซึ่งแสดงความแข็งระดับปานกลางถึงแข็ง (Medium to hard) โดยในช่วงการบ่มเดือนที่ 1 สารเคลือบผิวจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มใน 0.005% H_2SO_4 มีค่าความแข็งต่ำสุด คือ 49C เนื่องจากกรดสามารถกัดกร่อนจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีความเป็นด่างสูงได้ง่าย [5] ในขณะที่สารเคลือบผิวที่บ่มใน 5% $MgSO_4$ มีค่าความแข็งสูงสุด เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นเป็น 3 เดือน ค่าความแข็งสูงขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อบ่มในสารละลาย 5% $MgSO_4$ และ 0.005% H_2SO_4 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารละลายทั้งสองจะชะผิวจีโอโพลิเมอร์เกิดเป็นสารประกอบใหม่ขึ้นที่ผิว ซึ่งสารดังกล่าวได้แก่ $Mg(OH)_2$ ที่มักเกิดขึ้นเป็นของแข็งเคลือบที่ผิว (ในกรณีที่บ่มใน 5% $MgSO_4$) และเกิดเป็น Na_2SO_4 (ในกรณีที่บ่มใน 0.005% H_2SO_4) สารประกอบทั้งสองสามารถเกิดบริเวณผิวจีโอโพลิเมอร์ และส่งผลด้านความแข็งแก่จีโอโพลิเมอร์ได้ [5,8,9]



รูปที่ 3 ค่าความแข็ง (Shore C) ของวัสดุเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์เมื่อบ่มในสารละลายต่างๆ

3.5 ผิวของสารเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์



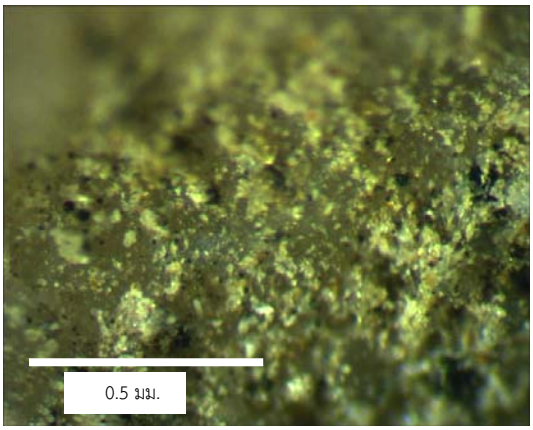
รูปที่ 4 ภาพถ่ายพื้นผิววัสดุเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์ เมื่อบ่มใน 5% $MgSO_4$ เป็นเวลา 1 เดือน

รูปที่ 4 แสดงผิวของสารเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในสารละลาย 5% $MgSO_4$ พบว่ามีอนุภาคของทรายแม่น้ำ (สีน้ำตาลอ่อน) แทรกอยู่บริเวณช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอย (สีดำ) และนอกจากนี้ยังพบเกลือของซัลเฟต (สีขาว) เกาะอยู่บริเวณผิวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์อีกด้วย ซึ่งเกลือที่เกาะนั้นอาจเกิดมาจาก Mg^{2+} (จากสารละลาย $MgSO_4$) กับ OH^- (จากสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการผสม) ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็น

$Mg(OH)_2$ ที่มีสีขาวและมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่บริเวณที่ผิวของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งการเกิด $Mg(OH)_2$ มีสมการดังนี้ [8,9]

$$Mg^{2+} + 2OH^{-} \rightarrow Mg(OH)_2 \quad (1)$$

นอกจากอาจจะมี $Mg(OH)_2$ เกิดขึ้นแล้วยังอาจเกิดสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO{\bullet}SiO_2{\bullet}8H_2O$) ซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมไอออนกับซิลิกาได้อีกด้วย [8]



รูปที่ 5 ภาพถ่ายพื้นผิววัสดุเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์ เมื่อบ่มใน 0.005% H_2SO_4 เป็นเวลา 1 เดือน

รูปที่ 5 แสดงผิวของสารเคลือบผิวชนิดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในสารละลาย 0.005% H_2SO_4 พบว่าโครงสร้างของจีโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเพียงอนุภาคของทรายแม่น้ำ (สีน้ำตาลอ่อน) แทรกอยู่บริเวณช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอย (สีดำ) ส่วนคราบขาวอาจเป็นเกลือเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) [7-10]

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติของสารเคลือบชนิดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เคลือบบนซีเมนต์มอร์ต้าร์ พบว่าสารเคลือบดังกล่าวมีสมบัติที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความแข็งระดับปานกลางถึงแข็ง และความแข็งของผิวเคลือบมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม มีปริมาณ Ca^{2+} ในช่วง 3-4.5 g/L ซึ่งมีค่าสูงในช่วงเดือนแรกเนื่องจากเถ้าลอย PCC ที่ใช้มีปริมาณสูง โดยสารละลาย 5% $MgSO_4$ มีความสามารถในการชะ Ca^{2+} ออกมาจากผิวของสารเคลือบได้ดีกว่า สารละลาย 0.005% H_2SO_4

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 38/2558

เอกสารอ้างอิง

[1] ปริญญา จินดาประเสริฐ, เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). พิมพ์ครั้งที่ 2, พ.ศ. 2548, สมาคมคอนกรีตไทย. กรุงเทพ.

[2] H. Tanaka, A. Fujii, Effect of stirring on the dissolution of coal fly ash and synthesis of pure-form Na-A and -X zeolites by two-step process. Advanced Powder Technology 20, 473-479, 2009.

[3] JW. Phair, JD. Smith, JSJ. van Deventer, Characteristics of aluminosilicate hydrogels related to commercial 'Geopolymer'. Materials Letters 57, 4356-4367, 2003.

[4] J. Davidovits, Geopolymer: Inorganic polymeric new materials, Journal of thermal analysis 37, 1633-1659, 1991.

[5] P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, S. Taebuanhuad, Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer, Materials and Structures 46(3), 375-381, 2013.

[6] MR. Lindeburg, Civil engineering reference manual for the PE exam. 13th edition, Professional Publications, Inc. California, 2012.

[7] P. Chindaprasirt, P. Paisitsrisawat, U. Rattanasak, Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkali-activated composite, Advanced Powder Technology 25(3), 1087-1093, 2014.

[8] J. Skalny, J. Marchard, I. Oder, Sulfate attack on concrete. 1st Edition, Spon Press, New York, 2002.

[9] P. Chindaprasirt, S. Jenjirapanya, U. Rattanasak, Characterizations of FBC/PCC fly ash geopolymeric composites, Construction and Building Materials 66(1), 72-78, 2014.

[10] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ, เถ้าแกลบในงานคอนกรีต, พ.ศ. 2552, สำนักพิมพ์ไชน์ แอนด์ เอ็นจีเนียริ่ง.

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย 103139 สัญญาเลขที่ 38/2558

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ สารเคลือบผิวคอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าลอยสำหรับใช้งานในสภาวะกรด

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน รศ.ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2557 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558

ระยะเวลาการดำเนินงาน 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2557

<u>รายรับ</u>

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50 %)	122,500	บาท	เมื่อ	21 พย. 2557
งวดที่ 2 (40 %)	98,000	บาท	เมื่อ	19 พค. 2558
งวดที่ 3 (10 %)	24,500	บาท	เมื่อ	หลังจากส่งรายงานฉบับสมบูรณ์
รวม	245,500	บาท		

<u>รายจ่าย</u>

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าตอบแทน	46,000	46,000	-
2. ค่าจ้าง	30,000	30,000	-
3. ค่าวัสดุ	65,200	65,200	-
4. ค่าใช้สอย	79,300	79,300	
5. ค่าครุภัณฑ์	-		-
6. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ			
- ค่าธรรมเนียมการอุดหนุนสถาบัน	24,500	25,400	-
รวม	245,000	245,000	-

รศ.ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

บรรณานุกรม

จันทนา สุขุมานนท์ (2550) INSEE Concrete Handbook (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: บริษัทเซอร์ตัสเพรส จำกัด.

ชรินทร์ เสนาวงษ์, เกียรติสุดา สมนา และวิชัย ชาลี (2553) กำลังอัดและการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน.*วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 15*(1), 13-22.

ธีรวัฒน์ สินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, และปริญญา จินดาประเสริฐ (2548) ผลกระทบของความละเอียดเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมด และขนาดโพรงในเพสต์. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. 28*(1), 17-28.

ธีรานีย์ โชติกไกร (2537) การพัฒนาการวิเคราะห์เคมีของทรายแต่ละประเภท. ฝ่ายวิเคราะห์วิจัยแร่และหินกองวิเคราะห์, กรมทรัพยากรธรณี, กระทรวงอุตสาหกรรม.

ปริญญา จินดาประเสริฐ (2547) เถ้าลอยในงานคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย

ปริญญา จินดาประเสริฐ (2548) เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง) (พิมพ์ครั้งที่ 2). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2552) ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต (พิมพ์พิเศษครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ

แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ (2552) หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ ฉบับปรับปรุงใหม่ (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด

วิเชียร ชาลี และกิตติกร เจริญพร้อม (2555) การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., 35*(2), 157-171.

วิเชียร ชาลี, รัฐพล สมนา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2551) ผลกระทบของเถ้าถ่านหิน 3 แหล่งต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต, การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ ครั้งที่ 2, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 107-115.

วีระพงษ์ พิกุลประยงค์ และวันชัย ยอดสุดใจ. (2552). คุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุซ่อมแซม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี : หน้า 1801-1805.

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2549). วัสดุจีโอโพลิเมอร์. *วารสารโยธาสาร. 18*(5), 55-56.

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ (2552) เถ้าแกลบในงานคอนกรีต (พิมพ์ครั้งที่ 1). นครราชสีมา: พิมพ์ไซน์ แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง, 101-114.

Chindaprasirt, P., Jatirapitakkul, C., Chalee, C., and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the chalacteristices of fly ash and bottom ash geopolymers. Waste Management, 29, 539.

Chindaprasirt, P., Rattanasak, U., and Taebuanhuad S. (2013). Resistance to acid and sulfate solution of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer. Material and Structures, 46, 375-381.

Lee, WKW., Van Deventer, JSJ. (2002). Structural reorganization of class F fly ash in alkaline silicate solution. Colloids and Surfaces A, 211, 49.

Rattanasak, U., and Chindaprasirt, P. (2009). Influene of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. Minerals Engineering. 22(12), 1073-1078.

Rattanasak, U., Chindaprasirt, P., and Suwanvitaya, P. (2010). Development of high volume rice husk ash alumino silicate composites. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 17(5), 654-659.

Panias, D., Giannopoulou, IP., and Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-bases geopolymers. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects, 301(1-3), 246-354.

Skalny J., Marchard J., and Oder I. (2002). Sulfate attack on concrete. 1st Edition. Spon Press. New York.

Zhang, Z., Yao, X., and Zhu H. (2010). Potential application of geopolymers as protection coating for marine concrete I. Basic Properties. Applied Clay Science, 49(1-2), 1-6.

ประวัตินักวิจัย

นักวิจัย (ชื่อ-สกุล ภาษาไทย) อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์
(ชื่อ-สกุล ภาษาอังกฤษ) Ubolluk Rattanasak

การทำงาน

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
สถานที่ทำงาน: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ. เมือง
จังหวัด ชลบุรี รหัสไปรษณีย์ 20131
โทรศัพท์ 038-103-066 โทรสาร 038-393-494
e-mail: ubolluk@buu.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	สถาบัน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปีที่สำเร็จ	2540		
ปริญญาโท สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	สถาบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีที่สำเร็จ	2542		
หัวข้อวิทยานิพนธ์ที่ทำ	Compressive strength and heavy metal leaching behaviour of mortars containing spent catalyst		
ปริญญาเอก สาขาวิชา	Chemical Engineering	สถาบัน	The University of Birmingham, UK
ปีที่สำเร็จ	2548		
หัวข้อวิทยานิพนธ์ที่ทำ	Microstructural study of pozzolan-cement composites in combination with superplasticising admixtures		

ทุนการศึกษา

นักเรียนทุนสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พ.ศ. 2540-2542 (ระดับการศึกษาปริญญาโท)
นักเรียนทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พ.ศ. 2544-2548 (ระดับการศึกษาปริญญาเอก)

ประสบการทำงาน

วิศวกรโครงการ ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2542-2544

ตำแหน่งอื่นๆ

คณะกรรมการวิชาการ สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
คณะกรรมการที่ปรึกษาด้านวิชาการเกี่ยวกับอันตรายของฝุ่นบนผิวคอนกรีตผสมเสร็จ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมและพิษวิทยา

สาขาวิชาที่เชี่ยวชาญ

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ วัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน วัสดุประสานจากเถ้าลอย การใช้ประโยชน์จากของเสียอุตสาหกรรม

รางวัล

2013 TRF-CHE-Scopus Young Researcher Award (สาขา Engineering & Multidisciplinary Technology)
เกียรติบัตรเสนอผลงานวิจัยดีเยี่ยมแบบโปสเตอร์ ในงานประชุมนักวิจัยรุ่นใหม่..พบ..เมธีวิจัยอาวุโสสกว. พศ. 2553
รางวัลบุคลากรดีเด่นด้านวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ปี พ.ศ. 2554
รางวัลบุคลากรดีเด่นด้านวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ปี พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัย (บทความวิจัยระดับนานาชาติ)

1. Manisara Eiamwijit, Katavut Pachana, Supranee Kaewpirom, **Ubolluk Rattanasak**, Prinya Chindaprasirt, 2015, Comparative study on morphology of ground sub-bituminus FBC fly ash geopolymeric material, Advanced Powder Technology 26(4), 1053 -1057..
2. Winatthakan Phuchaduek, Tongsai Jamnongkan, **Ubolluk Rattanasak**, Siridech Boonsang, Supranee Kaewpirom, 2015, Improvement in physical and electrical properties of poly(vinyl alcohol) hydrogel conductive polymer composites, Journal of Applied Polymer Science 132(28), 1-9.
3. **Ubolluk Rattanasak**, Prinya Chindaprasirt, 2015, Properties of alkali activated silica fume-Al(OH)3-fluidized bed combustion fly ash, Materials and Structures 41(3), 531-540-531-540.
4. Prinya Chindaprasirt, Supichart Jenjirapanya, **Ubolluk Rattanasak**, 2014, Characterizations of FBC/PCC fly ash geopolymeric composites, Construction and Building Materials, Construction and Building Materials 66(1), 72-78.
5. Prinya Chindaprasirt, Pattanapong Paisitsrisawat, **Ubolluk Rattanasak**, 2014, Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkali-activated composite, Advanced Powder Technology, 25(3), 1087-1093.
6. Prinya Chindaprasirt, Siwanant Thaiwitcharoen, Supranee Kaewpirom, **Ubolluk Rattanasak**, 2013, Controlling ettringite formation in FBC fly ash geopolymer concrete, Cement & Concrete Composites 41(1), 24–28.
7. Prinya Chindaprasirt, **Ubolluk Rattanasak**, Sompop Taebuanhuad, 2013, Role of microwave radiation in curing the fly ash geopolymer, Advanced Powder Technology 24(3), 703-707.

8. Prinya Chindaprasirt, **Ubolluk Rattanasak**, Sompop Taebuanhuad, 2013, Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer, Materials and Structures 46(3), 375-381.
9. Prinya Chindaprasirt, **Ubolluk Rattanasak**, Pimdao Vongvoradit, Supichart Jenjirapanya, 2012, Thermal treatment and utilization of Al-rich waste in high calcium fly ash geopolymeric materials, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 19(9), 872-878.
10. Prinya Chindaprasirt, **Ubolluk Rattanasak**, Chai Jaturapitakkul, 2011, Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions in geopolymeric materials, Cement and Concrete Composites 33(1), 55-61.
11. **Ubolluk Rattanasak,** Kanokwan Pankhet, Prinya Chindaprasirt, 2011, Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 18(3), 364-369.
12. Prinya Chindaprasirt, **Ubolluk Rattanasak,** 2011, Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash, Materials and Design 32(2), 723–727.
13. **Ubolluk Rattanasak**, Prinya Chindaprasirt, Prasert Suwanvitaya, 2010, Development of high volume rice husk ash alumino-silicate composite, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 17(5), 654-659.
14. Prinya Chindaprasirt, **Ubolluk Rattanasak,** 2010, Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer, Waste Management 30(4), 667-672.
15. **Ubolluk Rattanasak,** Prinya Chindaprasirt, 2009, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, Minerals Engineering 22(12), 1073-1078
16. Prinya Chindaprasirt, Chai Jaturapitakkul, **Ubolluk Rattanasak**, 2009, Influence of fineness of rice husk ash and additives on the properties of lightweight aggregate, Fuel 88(1), 158-162.
17. Prinya Chindaprasirt, Wichian Chalee, Chai Jaturapitakkul, **Ubolluk Rattanasak**, 2009, Comparative study on characteristic of fly ash and bottom ash geopolymers, Waste Management 29(2), 539-543.
18. **Ubolluk Rattanasak,** Kevin Kendall, 2005, Pore structure of cement/pozzolan composites by x-ray microtomography. Cement and Concrete Research 35(4), 637-640.
19. **Ubolluk Rattanasak**, Chai Jaturapitakkul, Tippaban Sudaprasert, 2001, Compressive strength and heavy metal leaching behavior of mortars containing spent catalyst, Waste Management and Research 19(5), 456-464.