



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

Resistance to Chloride Penetration of Fly Ash Based Geopolymer

นามผู้วิจัย นายภูมิภัทร์ สามหมอ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รongศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รongศาสตราจารย์ตระกุล อร่ามรักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รongศาสตราจารย์ก่อโชค จันทวางกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รongศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

Resistance to Chloride Penetration of Fly Ash Based Geopolymer

โดย

นายภูมิภัทร์ สามหมอ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภูมิภัทร์ สามหมอ 2553: ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จาก
เถ้าลอย ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D. 126 หน้า

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณสมบัติความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของ
จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยศึกษาการซึมผ่านของของคลอไรด์ กำลังรับแรงอัด โครงสร้าง
จุลภาค ปริมาตรและการกระจายขนาดของโพรง จากอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของเถ้าลอยชนิด C
และชนิด F อัตราส่วนสารละลายต่างต่อเถ้าลอยร้อยละ 55 และ 65 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
มีความเข้มข้น 6, 10 และ 14 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียม
ไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทราย 1:0, 1:2 และ 1:4 ฟังเหล็กภายใน
ตัวอย่างให้มีระยะหุ้มของจีโอโพลิเมอร์โดยรอบเท่ากับ 25 มม. ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์
โดยการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 ทำการวัดระยะเวลาการซึม
ผ่านของคลอไรด์ในช่วงเวลา 3, 10, 20, 40 และ 70 วัน

จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นจะให้กำลัง
รับแรงอัดและความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์สูงขึ้น จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F
มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยชนิด C นอกจากนี้ยังพบว่า
การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมทำให้ความสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้น

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Bhumibhat Sammor 2010: Resistance to Chloride Penetration of Fly Ash Based Geopolymer. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prasert Suwanvitaya, Ph.D. 126 pages.

The objective of this study was to determine resistance to chloride ingress of fly ash based geopolymer. The study chloride penetration, compressive strength, microstructure, pore volume and pore size distribution. The mixtures used class C and class F fly ash, alkaline liquid to fly ash ratio by mass of 55 and 65 percent, concentration of sodium hydroxide solution of 6, 10 and 14 Molar, sodium silicate solution to sodium hydroxide solution ratio by mass of 1:1, fly ash to sand ratio by mass of 1:0, 1:2 and 1:4. Steel bars were embedded in specimens with covering of 25 mm. Chloride penetration tests were made by immersing specimens in 3 percent sodium chloride solution. Penetration depths were measured at 3, 10, 20, 40 and 70 days.

The results revealed that high concentration of sodium hydroxide solution content increased the compressive strength and increased the resistance to chloride penetration. The geopolymers from class F fly ash were more resistant to chloride ingress than those from class C. It was also found that increase in fly ash content increased the resistance to chloride penetration.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ประเสริฐ สุวรรณวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร. ตระกูล อร่ามรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ. วัชรินทร์ วิทยกุล ประธานการสอบ ปากเปล่าขั้นสุดท้าย รศ. จีรพัฒน์ โชติกไกร ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ผศ.ดร. อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี ผู้แทน บัณฑิตวิทยาลัย และรศ. ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา ที่ให้คำปรึกษาในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการ ตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ทุก ๆ คน ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ใฝ่ถามทุกข์สุขและให้กำลังใจมาโดยตลอด จนทำให้การดำเนินการวิจัยผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดคุณประโยชน์อันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบความดีทั้งปวง แต่ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ผู้มีพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และเพื่อน ๆ ทุกคน

ภูมิภัทร์ สามหมอ
เมษายน 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	38
อุปกรณ์	38
วิธีการ	41
ผลและวิจารณ์	51
ผล	51
วิจารณ์	90
สรุปและข้อเสนอแนะ	98
สรุป	98
ข้อเสนอแนะ	101
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	102
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	107
ภาคผนวก ข ภาพวัสดุ อุปกรณ์และกระบวนการทดลอง	114
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	126

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปฏิภาคส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด C	44
2	ปฏิภาคส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด F	45
3	ปฏิภาคส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ต้าร์	46
4	องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยเทคนิค EDS	69
5	องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 (Spectrum P1)	70
6	องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 (Spectrum P2)	71
7	องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 (Spectrum P1)	72
8	องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 (Spectrum P2)	73
9	องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 (Spectrum P1)	74
10	องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 (Spectrum P2)	75
11	องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 (Spectrum P1)	76
12	องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 (Spectrum P2)	77
13	ปริมาณสัดส่วนของโพรงประเภทต่าง ๆ ในจีโอโพลิเมอร์เพสต์	82
14	ขนาดและการกระจายตัวของโพรงในจีโอโพลิเมอร์เพสต์	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเถ้าลอย	108
ก2	ระยการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C	109
ก3	ระยการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F	110
ก4	ระยการซึมผ่านของคลอไรด์ของซีเมนต์มอร์ต้าร์	111
ก5	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C ที่อายุ 28 วัน	111
ก6	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F ที่อายุ 28 วัน	112
ก7	กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์ ที่อายุ 28 วัน	113

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะของตัวอย่างและรูปแบบการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์	48
2	การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากแก้วลอยชนิด C	54
3	การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วลอยชนิด C (อัตราส่วนแก้วลอยต่อทรายเท่ากับ 1:2)	54
4	การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วลอยชนิด C (อัตราส่วนแก้วลอยต่อทรายเท่ากับ 1:4)	55
5	การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากแก้วลอยชนิด F	55
6	การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วลอยชนิด F (อัตราส่วนแก้วลอยต่อทรายเท่ากับ 1:2)	56
7	การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วลอยชนิด F (อัตราส่วนแก้วลอยต่อทรายเท่ากับ 1:4)	56
8	ผลของอัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยชนิด C	59
9	ผลของอัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยชนิด F	59
10	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยชนิด C	60
11	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยชนิด F	60
12	ผลของอัตราส่วนแก้วลอยต่อทรายต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยชนิด C	61
13	ผลของอัตราส่วนแก้วลอยต่อทรายต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยชนิด F	61
14	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากแก้วลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 ที่กำลังขยาย 500 เท่า	64

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า	64
16	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 ที่กำลังขยาย 500 เท่า	65
17	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า	65
18	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 ที่กำลังขยาย 500 เท่า	66
19	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า	66
20	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 ที่กำลังขยาย 500 เท่า	67
21	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า	67
22	EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 (Spectrum P1)	70
23	EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 (Spectrum P2)	71
24	EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 (Spectrum P1)	72
25	EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 (Spectrum P2)	73
26	EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 (Spectrum P1)	74
27	EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 (Spectrum P2)	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 (Spectrum P1)	76
29	EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 (Spectrum P2)	77
30	XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0	79
31	XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0	79
32	XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0	80
33	XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0	80
34	การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C และชนิด F	84
35	ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับ แรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C และชนิด F	85
36	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงและ การกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0	86
37	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงและ การกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0	87
38	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงและ การกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0	87

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาตร โพรงและการกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0	88
40	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตร โพรง	88
41	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการกระจายของโพรง	89
ภาพผนวกที่		
ข1	เหล็กกลิ้งกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.50 มม. ยาว 100 มม.	115
ข2	แบบหล่อพีวีซีสำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มม. ยาว 125 มม.	115
ข3	แบบหล่อพีวีซีสำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27.50 มม. ยาว 55 มม.	116
ข4	การติดตั้งเหล็ก	116
ข5	การติดตั้งแบบหล่อพีวีซี	117
ข6	ถ้ำลอยชนิด C และถ้ำลอยชนิด F	117
ข7	การเตรียมส่วนผสมจีโอ โพลิเมอร์เพสต์	118
ข8	การเตรียมส่วนผสมจีโอ โพลิเมอร์มอร์ตาร์	118
ข9	การเตรียมส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์	119
ข10	การเตรียมส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมถ้ำลอย	119
ข11	เครื่องผสมแบบ Bench Mounting Mixer ขนาด 10 ลิตร	120
ข12	การผสมจีโอ โพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์	120
ข13	การเทจีโอ โพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อพีวีซี	121
ข14	การกระทุ้งจีโอ โพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์	121

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข15	การปาดหน้าจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์	122
ข16	การถอดแบบจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์	122
ข17	ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์หลังจากถอดแบบ	123
ข18	การบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์	123
ข19	การแช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3	124
ข20	การกดตัวอย่างเพื่อผ่าซีกหลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์	124
ข21	การฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ในตรทความเข้มข้น 0.1 N บนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์	125
ข22	การทดสอบกำลังรับแรงอัด	125

ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

Resistance to Chloride Penetration of Fly Ash Based Geopolymer

คำนำ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันมากในการก่อสร้าง โดยเฉพาะกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานในกระบวนการผลิตสูงมาก นับตั้งแต่การระเบิดหิน การย่อย การลำเลียง การเผาและการบดละเอียด กระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการแพร่กระจายของก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) จนเกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ซึ่งมีผลต่อสภาวะ โลกร้อน จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีความพยายามในการพัฒนาวัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ลง โดยมีแนวคิดในการนำสารปอซโซลานที่มีซิลิกา (Silica, SiO₂) และอะลูมินา (Alumina, Al₂O₃) เป็นองค์ประกอบหลักมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยสารปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง (อุบลรัตน์, 2551) แหล่งแรกเป็นปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (Artificial Pozzolan) ในภาคอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าและตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast Furnace Slag) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการถลุงเหล็ก เป็นต้น และในภาคเกษตรกรรม เช่น เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) และเถ้าชานอ้อย (Bagasse) เป็นต้น แหล่งที่สองเป็นสารปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) เช่น เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash) และดินขาว (Kaolin) เป็นต้น สารดังกล่าวทั้งหมดจัดเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan Materials) ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยในตัวเองหรือไม่มีเลย แต่เมื่อผสมกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Ca(OH)₂] และมีความชื้นจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (ถนัดกิจ, 2551)

เนื่องจากประเทศไทยมีเถ้าลอยเป็นจำนวนมากจากการเผาถ่านหินของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าหลายแห่ง โดยเฉพาะจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าลอยเหล่านี้มีปริมาณมากพอต่อการนำไปใช้งาน จึงได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมของคอนกรีตมากกว่าสารปอซโซลานชนิดอื่น ๆ อีกทั้งเถ้าลอยมีราคาไม่สูงมากนักเมื่อนำไปทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนจึงเป็นการลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงได้และยังเป็นการนำของเหลือทิ้งไปใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์อย่างกว้างขวาง สารซีเมนต์ดังกล่าว คือ สารจีโอโพลิเมอร์ สามารถสังเคราะห์ได้จากสารปอซโซลาน เมื่อผสมกับสารละลายต่างและสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานได้เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ และเมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะสามารถก่อตัวและแข็งตัวจนมีกำลังรับแรงได้ โดยไม่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ ถ้าลดยเป็นสารปอซโซลานชนิดหนึ่งที่มีสารประกอบซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์ได้

จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุประกอบจากการผสมรวมกันของวัสดุปอซโซลาน สารละลายต่างมวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ น้ำและสารผสมเพิ่มอื่น ๆ เมื่อแข็งตัวแล้วเนื้อของจีโอโพลิเมอร์จะเป็นวัสดุพรุน (Porous Materials) มีโพรงกระจายอยู่ทั่วไปและมีความต่อเนื่องเช่นเดียวกันกับคอนกรีต จึงทำให้ก๊าซ ความชื้นและไอออนของสารเคมีสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตโดยผ่านทางระบบโพรง การที่ผิวของเหล็กเสริมมีคอนกรีตห่อหุ้มไว้ทำให้ความชื้นและออกซิเจนต้องซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปจึงจะทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ ความสามารถซึมได้ของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับความพรุนหรือโพรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเนื้อของคอนกรีตและความหนาของคอนกรีตที่ห่อหุ้มผิวของเหล็กเสริม (Covering) ถ้าโพรงต่อเชื่อมกันอย่างต่อเนื่องจะทำให้เนื้อของคอนกรีตมีความสามารถในการซึมผ่านได้ดี แต่ถ้าคอนกรีตมีเนื้อแน่น มีโพรงน้อยและไม่ต่อเนื่องกันก็จะทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ

โครงสร้างที่ดี จะต้องมิกำลังรับแรงอัดตามต้องการและคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศหรือสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน โดยยังสามารถคงรูป คุณภาพและคุณสมบัติในขณะใช้งานได้ดี เช่นเดิม หากวัสดุไม่มีความทนทาน โครงสร้างจะเกิดการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร ซัลเฟตเป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่พบทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ในดินหรือน้ำใต้ดินบริเวณที่มีขีปนจะมีซัลเฟตปนอยู่ ในบริเวณที่แห้งแล้งจะมีความเข้มข้นของปริมาณซัลเฟต สารอินทรีย์ที่ผุเน่าจะก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกำมะถันและซัลเฟต โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีซัลเฟตจะเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบภายในคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว แตกร้าวและมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง แม้ว่าซัลเฟตที่มีสถานะเป็นของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตแต่จะมีการทำลายที่รุนแรงเมื่ออยู่ในสภาพเปียกชื้นและจะรุนแรงมากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน โครงสร้างที่อาจถูกทำลายโดยซัลเฟตได้ง่าย ได้แก่ ท่อระบายน้ำโสโครก อาคารส่งน้ำเพื่อระบบชลประทาน ฐานรากและพื้นอาคาร รวมทั้งโครงสร้างในทะเลหรืออยู่ริมทะเล ในขณะที่

คลอไรด์ยังคงเป็นปัญหาใหญ่ที่นำไปสู่การกัดกร่อนของโครงสร้าง คลอไรด์จะไม่ทำความเสียหายต่อเนื้อของคอนกรีตโดยตรงแต่จะทำให้เหล็กเสริมถูกกัดกร่อน โดยไอออนของคลอไรด์จะซึมผ่านระยะหุ้มคอนกรีตเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริม ไอออนของคลอไรด์จะไปทำลายฟิล์มที่เคลือบผิวของเหล็กเสริม เมื่อเหล็กเสริมสัมผัสกับน้ำและออกซิเจน สะสมไอออนจนมีปริมาณมากพอก็จะเริ่มกระบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริม มีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง รวมทั้งสนิมที่เกิดจากการกัดกร่อนจะขยายตัวและดันให้เนื้อของคอนกรีตเกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนได้ง่าย หากโครงสร้างต้องเผชิญกับสภาวะการกัดกร่อนโดยตรงอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง รวมทั้งทำให้กำลังและอายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง

จีโอโพลิเมอร์มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับคอนกรีตและด้วยปัญหาดังกล่าวจึงควรมีการศึกษาและพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ด้านความทนทาน (Durability) ต่อสารเคมี เพื่อให้ได้วัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคอนกรีตและมีความเหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งเป็นการลดปริมาณของเสียจากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม รวมทั้งเป็นการเพิ่มศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ด้วย อย่างไรก็ตามแม้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะมีจุดเด่นด้านกำลังรับแรงอัด แต่ก็ยังมีข้อด้อยอีกหลายประการที่ต้องมีการศึกษาและพัฒนาศักยภาพอีกหลายด้านอย่างละเอียดก่อนนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาระยะการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ในช่วงเวลาต่าง ๆ
2. เพื่อให้ทราบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
4. เพื่อหาค่าประกอบทางเคมีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
5. เพื่อหาค่าประกอบของธาตุต่าง ๆ จากโครงสร้างผลึกที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X - Ray Diffraction (XRD)
6. เพื่อหาขนาดและการกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์โดยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)
7. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสม การทำปฏิกิริยา การซึมผ่านของคลอไรด์ กำลังรับแรงอัด ขนาดและการกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์

ขอบเขตการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณสมบัติด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของ จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์จากอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของเถ้าลอยชนิด C และชนิด F อัตราส่วนสารละลายต่างต่อเถ้าลอยร้อยละ 55 และ 65 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีความเข้มข้น 6, 10 และ 14 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทราย 1:0, 1:2 และ 1:4 ส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์จะมี 3 อัตราส่วนผสม ได้แก่ อัตราส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยเถ้าลอยชนิด C ร้อยละ 30 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยชนิด F ร้อยละ 30 ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทราย 1:2.75 ทดสอบให้มีค่าร้อยละของการไหล 110 ± 5 ฟิงเกอร์ภายในตัวอย่างทุกอัตราส่วนผสมให้มีระยะหุ้มโดยรอบเท่ากับ 25 มม. ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 ทำการวัดระยะเวลาการซึมผ่านของคลอไรด์ในช่วงเวลา 3, 10, 20, 40 และ 70 วัน หากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ทุกอัตราส่วนผสมและศึกษาโครงสร้างจุลภาค ขนาดและการกระจายของโพรงในบางอัตราส่วนผสม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคูณสมบัติความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่เหลือทิ้งจากระบบอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพื่อนำมาใช้ในงานโครงสร้างทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ที่กระบวนการผลิตมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษานี้ทำให้ทราบการซึมผ่านของคลอไรด์ซึ่งส่งผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์ ทำให้ความทนทานและกำลังของโครงสร้างลดลง ผลของการศึกษาจึงใช้เป็นข้อมูลในการช่วยพัฒนาศักยภาพจีโอโพลิเมอร์ก่อนนำมาใช้งานจริง นอกจากนี้ผลการศึกษายังสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลและเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ต่อไป

การตรวจเอกสาร

เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อนำพลังงานไปผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นคุณสมบัติทางกายภาพ ขนาดอนุภาค รูปร่างของเถ้าลอยและคุณสมบัติทางเคมีจึงขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน ความสม่ำเสมอของเนื้อถ่านหิน ความละเอียดของก้อนถ่านหินก่อนเผา ความสม่ำเสมอในการเผา ระดับอุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนในการเผาและวิธีการดักจับเถ้าลอย

1. คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยขนาดเล็กจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมและผิวเรียบ เนื่องจากผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า ส่วนเถ้าลอยขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระ มีรูเล็ก ๆ ที่ผิวและอาจมีปริมาณคาร์บอนสูง เถ้าลอยส่วนมากจะมีสีเทา สีน้ำตาลจนถึงสีดำ มีขนาดอนุภาคตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 200 ไมโครเมตร โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15 - 30 ไมโครเมตร และมีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.2 - 2.8

2. องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยในแต่ละแหล่งจะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหินและกระบวนการเผา แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ไอออนไดรอกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ 80 - 90 ดังนั้นองค์ประกอบดังกล่าวจึงใช้เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของถ่านหิน โดยมาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดผลรวมของซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์และไอออนไดรอกไซด์ไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่จะนำไปใช้งานได้และประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI)

3. ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C 618 ได้แบ่งเถ้าลอยโดยอาศัยองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลักในการแบ่ง โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด C และชนิด F โดยชนิด C ต้องมีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ อะลูมินา ออกไซด์และไอออนไตรออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 70 แต่ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ส่วนชนิด F ต้องมีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์และไอออนไตรออกไซด์ตั้งแต่ร้อยละ 70 ขึ้นไป และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ของเถ้าลอยทั้งสองประเภทต้องไม่เกินร้อยละ 6 โดยชนิด F ยอมให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้สูงถึงร้อยละ 12 ได้ แต่ต้องมีการทดสอบคุณภาพจากห้องทดลองในส่วนของปริมาณ SO_3 โดยกำหนดไว้ให้มีไม่เกินร้อยละ 5 เถ้าลอยชนิด C ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์หรือซับบิทูมินัส เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำที่มีปริมาณคาร์บอนน้อย ส่วนใหญ่จะมีค่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 จึงสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าลอยเองได้ ส่วนเถ้าลอยชนิด F ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส มีปริมาณคาร์บอนหลงเหลืออยู่มากจึงเป็นถ่านหินคุณภาพดี คือ ให้ปริมาณความร้อนมาก เพราะมีปริมาณความร้อนสูง ส่วนใหญ่จะมีค่าแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 จึงมีลักษณะเป็นสารปอซโซลานเพียงอย่างเดียว

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบอสัณฐาน (Amorphous) ค้นพบครั้งแรกโดย ดร. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 และนิยามขึ้นครั้งแรกโดย Devitodovits ชาวฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1970 สารผสมอะลูมิโนซิลิเกตมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอริกอนินทรีย์ จีโอโพลิเมอร์ คือ ส่วนผสมของแร่ธาตุซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับซีโอไลต์ แต่โครงสร้างจะอยู่ในรูปอสัณฐาน

สารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โพลิไซอะเลตส์ (Polysialates) เป็นสารประเภทหนึ่งของวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่ไม่มีรูปพรรณสัณฐานที่แน่นอน ประกอบกันขึ้นที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่า จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยการผสมสารปอซโซลานกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) ซึ่งได้แก่ อัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) และอัลคาไลซิลิเกต (Alkali silicate)

และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนในช่วง 60 - 100 องศาเซลเซียส จะก่อตัว แข็งตัวจนสามารถรับกำลังได้และใช้เป็นวัสดุประสานได้เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์

สารจีโอโพลิเมอร์ใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้โมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (Polymer) การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการที่ 1



โดย	M	=	ธาตุอัลคาไล
	-	=	การยึดเกาะ (Bound)
	z	=	จำนวนโมเลกุลของ Si - O ₂ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
	N	=	ปริมาณโมเลกุลของการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ (Degree of Polymerization)
	w	=	จำนวนโมเลกุลของน้ำ

1. ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization)

สารจีโอโพลิเมอร์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีรูปร่างสัญญาณแน่นอนเป็นส่วนประกอบของสารลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) และสารกึ่งผลึก (Semi - Crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารที่มีอะลูมินาและซิลิกาที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลจะสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่าจนเกิดการก่อตัวและให้กำลังรับแรงอัดได้ดี ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชั้น ดังนี้

1.1 การชะละลาย (Dissolution) เกิดขึ้นเมื่อผสมกับสารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดการชะละลายสารประกอบต่าง ๆ โดยซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะเป็นสารหลักที่ถูกชะละลายออกมา เมื่อเกิดการชะละลายมากขึ้นส่วนหนึ่งของเถ้าลอยจะถูกทำลายที่ผิวทำให้เกิดเป็นช่องว่างที่ผิวและสารละลายด่างจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น

1.2 การทำปฏิกิริยาถูกโซ่ (Polymerization) ผลผลิตเบื้องต้นของปฏิกิริยาเป็นหน่วยปริมาตร ปริมาตรสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบ 4 แขน กับออกซิเจนจะกระจายอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (Meta - stable) ซึ่งมีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบด้วยหน่วยปริมาตรสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สามและสี่หน่วย ได้แก่ โพลีไซอะเลต (Polysialate, PS) โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate siloxo, PSS) และ โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ ปริมาณของ SiO_4 เพิ่มขึ้นจากหนึ่งเป็นสามหน่วย เมื่อปฏิกิริยาเกิดมากการเชื่อมโยงของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกันก็จะเกิดมากขึ้นและหนาแน่นขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นและสามารถรับแรงได้

ปฏิกิริยาถูกโซ่ของจีโอโพลิเมอร์มีความซับซ้อนมากและยังไม่สามารถที่จะอธิบายได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามสามารถเขียนปฏิกิริยาหลักได้ดังสมการที่ 1 สารประกอบซิลิกาและอะลูมินาเมื่อผสมกับสารอัลคาไลไฮดรอกไซด์ อัลคาไลซิลิเกตและน้ำจะทำปฏิกิริยาได้เป็นหน่วยโพลีไซอะเลตที่มีประจุบวกของอัลคาไลทำให้เกิดความสมดุล หน่วยโพลีไซอะเลตจะทำปฏิกิริยากับอัลคาไลไฮดรอกไซด์ต่อ เกิดเป็นลูกโซ่โพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงขวางกัน

2. คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์

2.1 ความสามารถทำงานได้ (Workability) ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอัลคาไลไฮดรอกไซด์ ชนิดของอัลคาไลไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่ออัลคาไลไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของอัลคาไลไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถทำงานได้ลดลง การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เป็นอัลคาไลไฮดรอกไซด์จะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณภาพดีกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) และที่อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่ออัลคาไลไฮดรอกไซด์ต่ำจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความสามารถทำงานได้ค่อนข้างดี การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่ออัลคาไลไฮดรอกไซด์ทำให้ค่าร้อยละของการไหลแผ่ลดลง การเพิ่มความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ทำได้โดยการเพิ่มปริมาณน้ำ ทั้งนี้จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงด้วย การเพิ่มความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ทำได้โดยการใช้สารลดน้ำพิเศษ แต่การใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่มากจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงค่อนข้างมาก การเพิ่มปริมาณน้ำจึงเป็นวิธีการที่ดีกว่าการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Chindaprasirt *et al*, 2007)

2.2 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ นอกจากจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น สารละลายโซเดียมซิลิเกต ละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิและวิธีการบ่ม

2.2.1 สารละลายโซเดียมซิลิเกตและละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ มีผลต่อกำลังรับแรงอัด โดยจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ต่ำ เท่ากับ 0.67 - 1.00 จะให้กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์สูงเท่ากับ 1.50 - 3.00

2.2.2 อุณหภูมิของการบ่ม อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งในการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ที่สำคัญมาก อุณหภูมิที่ใช้กันอยู่ระหว่าง 60 - 100 องศาเซลเซียส กำลังรับแรงอัดจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการบ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ต้องมีการป้องกันการสูญเสียความชื้น ซึ่งจะทำให้จีโอโพลิเมอร์เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวได้ เนื่องจากการสูญเสียน้ำทำให้ผิวของจีโอโพลิเมอร์เกิดการแตกร้าวจากการแห้งและสภาพภายในจีโอโพลิเมอร์จะแห้งมาก ซึ่งส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาและทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ต่ำลง การใช้ความร้อนในการบ่มเป็นการเร่งปฏิกิริยา ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงตั้งแต่อายุน้อย แต่หลังจากนั้นการใช้ความร้อนในการบ่มจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นไม่มากเท่าไร เนื่องจากได้เร่งปฏิกิริยาจนสมบูรณ์ไประดับหนึ่งแล้ว การทำปฏิกิริยาหลังจากนั้นจึงเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ

2.2.3 ระยะเวลาในการบ่ม การบ่มจีโอโพลิเมอร์ในอุณหภูมิสูงต้องใช้เวลาพอสมควร โดยควรใช้เวลาประมาณ 24 - 48 ชั่วโมง ซึ่งระยะเวลาการบ่มเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

2.2.4 ช่วงเวลาก่อนการบ่ม (Delay Time) หลังจากการผสมแล้วการปล่อยให้จีโอโพลิเมอร์ทำปฏิกิริยาเบื้องต้นชั่วระยะเวลาหนึ่งประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง จะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงขึ้น เมื่อนำไปบ่มจะลดการแตกร้าว ช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ค่อนข้างสมบูรณ์และทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

2.3 การคืบและการหดตัว (Creep and Shrinkage) ปัจจัยที่มีผลต่อการคืบและการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ ปริมาณของน้ำ คุณสมบัติของเถ้าลอย มวลรวม กำลังรับแรงอัด อุณหภูมิ ความชื้น รูปร่างและขนาดของจีโอโพลิเมอร์ จากการศึกษาการคืบโดยใช้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 150 × 300 มม. พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมี

การคืบน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยเพิ่มขึ้นไม่มากเมื่อเวลานานขึ้นและพบว่าการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตน้อยมากหลังจากระยะเวลา 1 ปี คือประมาณ 100 ไมโครสตรอน (Wallah and Rangan, 2006)

2.4 การคงทนต่อการกัดกร่อนของกรด (Acid Resistance) คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูง จึงมีสภาพเป็นด่างทำให้เกิดการกัดกร่อนจากกรดได้ง่าย การใช้วัสดุปอซโซลานผสมคอนกรีตสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากกรดได้ดีขึ้น จีโอโพลิเมอร์จะมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าคอนกรีตจึงมีความทนทานต่อกรดได้ดีกว่า จากการศึกษาโดยนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์แช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (Sulphuric acid, H_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันเป็นระยะเวลา 1 ปี จะสามารถเห็นผิวของตัวอย่างเกิดการกัดกร่อนและผิวของตัวอย่างจะเกิดการกัดกร่อนมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น ส่วนของการเปลี่ยนแปลงขนาดจากการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงขนาดร้อยละ 3 หลังจากแช่เป็นระยะเวลา 1 ปี (Wallah and Rangan, 2006)

2.5 การคงทนต่อการทำลายของซัลเฟต (Sulfate Resistance) การเกิดเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อจีโอโพลิเมอร์นั้นว่ามีความสำคัญโดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในสภาพแวดล้อมทะเล เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล ซัลเฟตอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด จากการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของจีโอโพลิเมอร์ โดยการแช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์รูปทรงระบอกในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate, Na_2SO_4) เปรียบเทียบกับการแช่ในน้ำและในสภาพอุณหภูมิปกติ หลังจากแช่เป็นระยะเวลา 1 ปี จีโอโพลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงความยาว รูปร่าง ตลอดจนกำลังรับแรงอัด โดยตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่าร้อยละ 0.015 (Wallah and Rangan, 2006)

ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์

คลอไรด์จะไม่กัดกร่อนต่อคอนกรีตโดยตรง แต่คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมจนคอนกรีตบริเวณนั้นเกิดการผุกร่อนแตกร้าวเสียหาย โดยการซึมผ่านของคลอไรด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

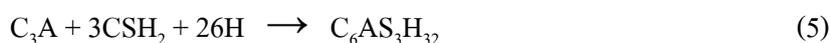
1. ระยะเวลา

Soroka (1993) อธิบายว่าระยะเวลาที่คลอไรด์ซึมผ่านเนื้อคอนกรีตจนกระทั่งคลอไรด์มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.4 ที่ระยะหนึ่งวัดจากผิวของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความพรุนของคอนกรีตลดลง หรือระยะที่มีปริมาณวิกฤตที่เวลาหนึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

Neville (1995) อธิบายว่ายิ่งมีคอนกรีตหุ้มมากเท่าใด เวลาที่ใช้จนกระทั่งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับของเหล็กเสริมถึงค่าวิกฤตจะมากขึ้น ระยะคอนกรีตหุ้มมีส่วนสัมพันธ์กับคุณภาพของคอนกรีต หากคุณภาพของคอนกรีตดีจะสามารถลดระยะหุ้มคอนกรีตลงได้

2. ปริมาตรโพรงและการกระจายขนาดของโพรง

โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์เริ่มจากเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะขยายตัวเข้าไปในโพรงหรือช่องว่าง ผลิตผลไฮเดรชันเรียกรวม ๆ ว่าซีเมนต์เจล (Cement Gel) โดยปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำเป็นดังสมการ ดังนี้



โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง ช่องว่างในซีเมนต์เพสต์และน้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว

2.1 ของแข็ง ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) เป็นสารที่ทำให้กำลังกับคอนกรีต มีปริมาณมากที่สุด ในซีเมนต์เพสต์ คือ มีอยู่ประมาณร้อยละ 50 - 70 แคลเซียมซัลโฟอะลูมินตและซัลโฟเฟอร์ไรด์ มีอยู่ประมาณร้อยละ 10 - 15 แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่เหลือจะแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ มีอยู่ประมาณร้อยละ 20 - 25 โดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์และอนุภาคของซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดก็ยังคงมีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ด้วย

2.2 ช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.2.1 โพร่งเจล (Gel Voids or Tobermorite Gel) หมายถึง โพร่งที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.0005 - 0.01 ไมโครเมตร (0.5 - 10 นาโนเมตร) จากการศึกษพบว่าโพร่งเจลเหล่านี้มิได้มีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำที่จะเคลื่อนที่ผ่านโพร่งภายในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากขนาดของโพร่งที่จะส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำเกิดขึ้นได้นั้นต้องมีรัศมีไม่น้อยกว่า 500 อังสตรอม (1 อังสตรอม = 10^{-10} เมตร) โพร่งเจลมีผลน้อยมากต่อกำลังรับแรงอัดและการซึมผ่าน แต่จะมีผลต่อการหดตัวและการคืบของคอนกรีต

2.2.2 โพร่งคาปิลลารี (Capillary Voids) หมายถึง โพร่งคอนกรีตที่ภายในประกอบด้วยน้ำ ซึ่งพร้อมที่จะถูกดึงเพื่อนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นโพร่งคอนกรีตที่เป็นที่ว่างเหล่านี้จึงยังไม่ถูกอุดรูหรือถูกเติมเต็มโดยไฮเดรทซีเมนต์เพสต์ ด้วยเหตุนี้ปริมาตรและขนาดของโพร่งคาปิลลารีจึงขึ้นอยู่กับระยะห่างของอนุภาคของซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาในคอนกรีตสดและระดับของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Degree of Hydration) นอกจากนี้ยังพบว่าโพร่งคาปิลลารีนั้นมีขนาดใหญ่กว่าโพร่งเจลมากและเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านได้ ในกรณีซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพร่งคาปิลลารีจะมีขนาดเล็กอยู่ประมาณ 0.01 - 0.05 ไมโครเมตร เท่านั้น แต่ในกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูงพบว่าโพร่งคาปิลลารีจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึงประมาณ 0.30 - 0.50 ไมโครเมตร แต่โดยทั่วไปหากกล่าวถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพร่งคาปิลลารีมักจะ หมายถึงโพร่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01 - 10 ไมโครเมตร และจากการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพร่งคาปิลลารีที่มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านได้นั้นมีขนาดอยู่ระหว่าง

0.12 - 0.16 ไมโครเมตร โพรงคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.05 ไมโครเมตร มีผลต่อกำลังรับแรงอัด และการซึมผ่าน ส่วนโพรงคาปิลลารีที่มีขนาดเล็กกว่า 0.05 ไมโครเมตร ส่งผลต่อการหดตัวและการคืบของคอนกรีต

2.2.3 โพรงอากาศ (Air Void or Entrapped Air) หมายถึง โพรงคอนกรีตที่ภายในประกอบด้วย น้ำ ซึ่งพร้อมที่จะถูกดึงเพื่อนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งที่ตั้งใจและไม่ได้ตั้งใจ โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศที่เกิดขึ้นอาจมีขนาดใหญ่ถึง 3 มิลลิเมตร และหากมีการใส่สารกักฟองอากาศ อาจจะทำให้ฟองอากาศนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 - 200 ไมโครเมตร ฟองอากาศจะส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านมาก โดยทั่วไปฟองอากาศมักหมายถึง โพรงที่มีขนาดใหญ่กว่าโพรงคาปิลลารี นั่นคือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 10 ไมโครเมตร โพรงประเภทนี้เกิดขึ้นจากกระบวนการผสมคอนกรีตและกรรมวิธีการทำให้แน่น (Compaction Pore) โพรงอากาศที่มีขนาดใหญ่และจำนวนมากจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและการซึมผ่าน

2.3 น้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว (Hydrate Cement Paste, HCP) น้ำที่อยู่ใน HCP สามารถอยู่ได้หลายรูปแบบ การแบ่งรูปแบบของน้ำที่อยู่ใน HCP แบ่งโดยพิจารณาจากความยากในการเคลื่อน น้ำออกจาก HCP ซึ่งน้ำสามารถออกจาก HCP เมื่อได้รับความร้อน ซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสถานะแข็ง ประกอบไปด้วยสารต่าง ๆ ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ การสูญเสียน้ำในซีเมนต์เพสต์จะส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการหดตัว (Shrinkage) น้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

2.3.1 น้ำที่สามารถระเหยได้ง่าย (Water Vapour) เป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่ของซีเมนต์เพสต์ น้ำประเภทนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ได้แก่ ความชื้นในอากาศและอุณหภูมิ

2.3.2 น้ำคาปิลลารี (Capillary Water) คือ น้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่กว่า 5 นาโนเมตร ซึ่งเป็นน้ำอิสระจากอิทธิพลของแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ จากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถแบ่งน้ำคาปิลลารีออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดแรกเป็นน้ำในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร เรียกว่าน้ำอิสระ (Free Water) เมื่อนำน้ำอิสระออกจากเพสต์แล้วจะไม่ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง ส่วนน้ำชนิดที่สองเป็นน้ำที่เกิดจากแรงดึงคาปิลลารี (Capillary Tension) ในช่องว่างขนาด 5 - 50 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อน้ำชนิดนี้ระเหยออกไปจะส่งผลทำให้ซีเมนต์เกิดการหดตัวได้

2.3.3 น้ำที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Water) คือ น้ำที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของของแข็งซึ่งถูกยึดไว้ด้วยแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเฟสดี โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับอยู่รอบ ๆ ผิวสัมผัสของของแข็งในเฟสดี เรียกแรงยึดเหนี่ยวนี้ว่าแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) น้ำในส่วนนี้จะเรียงตัวกันไม่เกิน 5 โมเลกุล (ความหนาแน่นไม่เกิน 1.3 นาโนเมตร) น้ำส่วนนี้จะถูกขับออกโดยทำให้เฟสดีแห้งเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าประมาณร้อยละ 30 การสูญเสีย น้ำในส่วนนี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ซีเมนต์เฟสดีเกิดการหดตัว

2.3.4 น้ำระหว่างชั้น (Interlayer Water) เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของ C-S-H เนื่องจากโครงสร้างของ C-S-H มีลักษณะเป็นชั้น ๆ โดยแรงดึงดูดแต่ละชั้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน น้ำส่วนนี้อยู่ใน Gel Pore ของซีเมนต์เฟสดี (มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร) น้ำส่วนนี้ถูกยึดไว้อย่างแข็งแรงโดยผิวของของแข็งในช่องว่าง การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้ความร้อนสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 11 โครงสร้างของ C-S-H จะหดตัวเมื่อสูญเสียน้ำดังกล่าวไป

2.3.5 น้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Chemically Combined Water) เป็นน้ำที่เป็นส่วนประกอบของผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Product) น้ำในส่วนนี้น้ำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมี การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้ซีเมนต์เฟสดีและน้ำสลายตัวไปเป็นสารอื่นหรือที่เรียกว่าการสลายตัวของสาร (Decomposition) เช่น การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ CaO กับน้ำ

Soroka (1993) อธิบายว่าไอออนของคลอไรด์จะเกิดขึ้นในน้ำ ดังนั้นจะเกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ก็ต่อเมื่อมีน้ำอยู่ในระบบโพรง กลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นทั้งการดูดซึมน้ำแบบคาปิลลารี (Capillary Suction) หรือการแพร่อย่างง่ายของไอออนในน้ำในโพรงที่อยู่หนึ่ง ในกรณีแรกจะเกิดกับคอนกรีตที่ค่อนข้างแห้ง น้ำจะเป็นตัวกลางในการพาไอออนของคลอไรด์เข้าไปในเนื้อคอนกรีต ในกรณีหลังจะเกิดกับคอนกรีตที่อิ่มตัวหรือค่อนข้างอิ่มตัว น้ำจะเป็นเสมือนตัวกลางให้ไอออนแพร่เข้าไปในคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกแล้วแห้งสลับกันจะเกิดกลไกทั้งสองกรณี ซึ่งอัตราการแทรกซึมของไอออนของคลอไรด์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

คลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามเวลาและจะลดลงตามระยะห่างจากผิวคอนกรีต ในการป้องกันเหล็กเสริมเกิดการเสียดสภาพพาสซีฟจะต้องป้องกันไม่ให้ไอออนของคลอไรด์เข้าถึงเหล็กเสริมและมีความเข้มข้นเกินค่าวิกฤต (Critical Concentration) ซึ่งสามารถ

ทำได้โดยให้คอนกรีตหุ้มมีเนื้อแน่นและมีความหนาเพียงพอ การเสียดสภาพพาสีฟจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์สูงเกินค่าค่าหนึ่ง คลอไรด์ส่วนหนึ่งที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจะเข้าไปรวมกับเฟสของอะลูมินาที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีเพียงคลอไรด์อิสระเท่านั้นที่อาจทำให้เกิดการเสียดสภาพพาสีฟ โดยปกติในการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์จะหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณทั้งหมดจะต้องเกินปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เกิดการเสียดสภาพพาสีฟหรือที่เรียกว่าปริมาณวิกฤตหรือปริมาณขนวน (Threshold) ขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำในโพรงและมักจะแสดงในรูปร้อยละของน้ำหนักซีเมนต์ ปริมาณวิกฤตยังขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นด้วย เช่น ส่วนประกอบของซีเมนต์ โดยทั่วไปสำหรับคอนกรีตที่ไม่เกิดการบ่อนั้น ปริมาณวิกฤตคือร้อยละ 0.4 ของน้ำหนักซีเมนต์ และจะลดลงเป็นศูนย์เมื่อ pH เป็น 9 ซึ่งเป็นค่า pH ที่ทำให้เกิดการเสียดสภาพพาสีฟ เนื่องจากน้ำในโพรงมีค่าความเป็นด่างต่ำ

Chindaprasirt *et al.* (2000) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของโพรงคาปิลลารี (Capillary Pore) ตามระยะเวลาเมื่อบ่มในน้ำจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารซีเมนต์ สารซีเมนต์ที่มีเกล็ดลอยเป็นส่วนประกอบจะมีปริมาณของโพรงคาปิลลารีมากในช่วงต้น ๆ แต่กลับลดลงเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น

Sabine (2008) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของโพรงและสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ในซีเมนต์พาสต์ด้วยความแตกต่างของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, 0.45 และ 0.60 และอุณหภูมิการทดสอบใช้เท่ากับ 45, 80 และ 105 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิมิผลต่อการปรับปรุงขนาดการกระจายตัวของโพรงในตัวอย่าง โดยโพรงคาปิลลารีเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนเพิ่มความต่อเนื่องของโพรงและทำให้การแพร่กระจายของคลอไรด์เพิ่มขึ้นด้วย

3. กำลังรับแรงอัด

เมื่อคอนกรีตถูกออกแบบให้มีความพรุนน้อย ๆ จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาความพรุนกับความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์พบว่าเมื่อความพรุนน้อย ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์จะสูงขึ้น ดังนั้นความพรุน กำลังรับแรงอัดและความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือหากต้องการออกแบบคอนกรีตให้สามารถต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ได้จะต้องพิจารณาถึงความพรุนและกำลังรับแรงอัดด้วย

Van *et al.* (2003) กำลังรับแรงอัดเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการประเมินความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ทั้งนี้เนื่องจากการวัดกำลังรับแรงอัดสามารถทำได้ง่ายและราคาในการทดสอบไม่สูงมากนัก อีกทั้งการวัดการพัฒนาำลังรับแรงอัดเป็นการวัดค่าเบื้องต้นของการนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างในหลากหลายรูปแบบ กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างโดยสรุปได้ดังนี้ คือ

1. กำลังของเฟสที่เป็นเจล (Gel Phase Strength)
2. อัตราส่วนของเฟสที่เป็นเจลต่อปริมาณอนุภาคของอะลูมิเนียมและซิลิกอน (Al-Si) ที่ไม่ถูกชะละลาย
3. การกระจายตัว (Distribution) และความแข็ง (Hardness) ของขนาดอนุภาคอะลูมิเนียมและซิลิกอน ที่ไม่ถูกชะละลาย
4. ธรรมชาติความเป็นผลึกอสัญฐานของจีโอโพลิเมอร์ (Amorphous Nature of Geopolymer) หรือดีกรีของความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity)
5. การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวระหว่างส่วนเฟสที่เป็นเจล (Gel Phase) และส่วนของอนุภาคของอะลูมิเนียมและซิลิกอน ที่ไม่ถูกชะละลาย
6. ปริมาณร้อยละของ CaO, K₂O ในส่วนผสม รวมทั้งชนิดของสารอัลคาไลที่ใช้
7. อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมในระหว่างการชะละลายของแร่ธาตุแต่ละชนิด โดยสารอัลคาไลและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) จะยังคงหลงเหลืออนุภาคที่ไม่ถูกชะละลายหรือไม่ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ ดังนั้นความแข็ง (Hardness) ของแร่ธาตุแต่ละชนิดจึงมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดด้วย ในระหว่างกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของแร่ธาตุในส่วนผสม มวลรวมที่ผสมเข้าไป เช่น ทราย ก็มีส่วนในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดด้วย

Swanepoel *et al.* (2002) ได้ศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลยผสมดินขาวเผา โดยถูกผสมและกระตุ้นด้วยสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำเป็นส่วนประกอบ แล้วนำตัวอย่างที่ได้เข้าบ่มร้อนในตู้อบเพื่อเร่งปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน คือ 6, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้กำลังรับแรงอัดได้สูงสุด คือ ใช้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

Palomo *et al.* (1999) ได้ทำการศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลย พบว่ามีตัวแปรหลายตัวที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของการบ่ม เวลาในการก่อตัว และชนิดของตัวกระตุ้นซึ่งได้แก่สารละลายต่างสูงจำพวกโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิที่อยู่ในช่วงที่พอเหมาะจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลยได้ โดยจะอยู่ในช่วง 60 - 90 องศาเซลเซียส

Hardjito *et al.* (2004) ได้รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากถั่วลยแคลเซียมต่ำ พบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีหลายตัวแปร คือ

1. อุณหภูมิของการบ่มที่เพิ่มขึ้นในช่วง 30 - 90 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิขึ้นมากกว่า 60 องศาเซลเซียส จะไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นสูง จะทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนโดยมวลที่สูงขึ้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นด้วย
3. ระยะเวลาของการบ่มตัวอย่างที่นานขึ้นในช่วง 6 - 96 ชั่วโมง จะทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น โดยพบว่าระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นจะช่วยพัฒนาปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันให้เกิดขึ้นได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มของระยะเวลาการบ่มที่มากกว่า 48 ชั่วโมง ก็ไม่ได้เพิ่มกำลังรับแรงอัดอย่างชัดเจนนัก

4. การเติมสารลดน้ำพิเศษ (Naphthalene Base) ในปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักแก้วลอมจะ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ได้ โดยจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อ กำลังรับแรงอัด แต่การเพิ่มสารลดน้ำที่มากกว่าร้อยละ 2 ของน้ำหนักแก้วลอมพบว่าจะมีผลทำให้ กำลังรับแรงอัดลดลง

5. ระยะเวลาก่อนการบ่มร้อนตัวอย่าง (Delay Time) หากเพิ่มขึ้นเป็น 60 นาที จะไม่มีผลกระทบต่อ กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์และยังสามารถยี้ระยะเวลาการก่อตัวได้ถึง 120 นาที ภายหลัง การผสม โดยไม่เกิดการก่อตัวขึ้นและไม่เกิดการทำลายกำลังรับแรงอัดแต่อย่างใด

6. อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำต่อของแข็งในจีโอโพลิเมอร์ โดยน้ำหนักรวมของน้ำในการผสม คือ น้ำหนักรวมของน้ำในสารละลายโซเดียมซิลิเกต สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำหนัก รวมของน้ำที่เติมเพิ่ม ส่วนน้ำหนักรวมของของแข็งในจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Solid) คือ น้ำหนักรวม ของแก้วลอม เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์และของแข็งในสารละลายโซเดียมซิลิเกต ได้แก่ น้ำหนักของ Na_2O และ SiO_2 โดยถ้าอัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

วิเชียร และคณะ (2550) ได้ศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังรับแรงอัด การซึมผ่านของ คลอไรด์และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมแก้วลอมแม่เมาะ โดยใช้คอนกรีตจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มีการแทนที่ด้วยแก้วลอมไม่แยกขนาดและแก้วลอมแยกขนาดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก กำหนดให้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ในทุกส่วนผสม ทำการหล่อคอนกรีตขนาด $200 \times 200 \times 200$ มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. โดยมีคอนกรีตหุ้มเหล็กหนา 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปา จนมีอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างไปแช่ในน้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่าง มาเจาะทดสอบกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ระดับความลึก ต่าง ๆ ภายหลังจากที่แช่คอนกรีตเป็นเวลา 4 ปี ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มีการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เล็กน้อยและการใช้แก้วลอมในการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ใน คอนกรีตและลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ดี คอนกรีตที่ผสมแก้วลอมแยกขนาดละเอียดมีการซึมผ่าน ของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้แก้วลอมไม่แยกขนาด นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ ผสมแก้วลอมมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมแก้วลอมมีแนวโน้มลดลง

4. สภาพแวดล้อม

บริเวณที่โครงสร้างมีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมทะเล (Basic Exposure Zones) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 บริเวณ โดยแต่ละบริเวณมีกลไกการซึมผ่านที่แตกต่างกันไป ดังนี้

4.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Marine Atmospheric Zone) ในบริเวณนี้ไม่มีการสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงแต่ละอองหรือไอทะเลสามารถส่งถ่ายผ่านอากาศได้ (Air Blown or Blown Spray) โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ระยะห่างของโครงสร้างจากชายฝั่งทะเล โดยระดับความเข้มข้นของ คลอไรด์จะแปรผกผันกับระยะห่าง ความเร็วลม กลไกการซึมผ่านโดยในบริเวณนี้จะเป็นกลไกการแพร่ของไอทะเลและคลอไรด์ (Gas Diffusion) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตจำเป็นต้องใช้ความชื้นเป็นตัวกลางในการแพร่ ดังนั้นการแพร่ของไอน้ำ (Water Vapour Diffusion) จากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีต จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้เนื้อคอนกรีตเกิดความชื้นและเหมาะสมต่อการแพร่ของคลอไรด์ไอออนด้วย

4.2 บริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเหล็กมากที่สุด เนื่องจากเกิดสถานะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) ในวงรอบที่มีความถี่มากที่สุด โดยน้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตแห้งโดยวิธีการดูดซึม (Capillary Adsorption) จนกระทั่งคอนกรีตอิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกแห้งลงน้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไป ทั้งคราบเกลือไว้ภายในผิวคอนกรีต เมื่ออยู่ในสภาวะเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น การแพร่ของคลอไรด์ไอออนจะซึมเข้าสู่ภายในด้วยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณที่ผิวเกิดการสะสมของเกลือคลอไรด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะเข้าสู่คอนกรีตและเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตในบริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) นี้ คอนกรีตจะเปียกเร็วแต่แห้งช้ากว่ามากและภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นกลไกการแพร่ของคลอไรด์บริเวณนี้จึงมากกว่าการแพร่ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) และในทำนองเดียวกันในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงก็จะเกิดการแพร่ได้มากกว่าในบริเวณที่คอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone or Seabed Zone)

4.3 บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) ในบริเวณนี้มีกลไกการแพร่ที่แพร่คล้ายกับบริเวณที่มีคลื่นและละออง (Splash Zone) แต่มีสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) ในวงรอบที่น้อยกว่า จึงทำให้บริเวณน้ำขึ้นน้ำลงมีโอกาสเกิดสนิมรองลงมาจากบริเวณที่มีคลื่นและละอองและที่สำคัญอีก

คือ ถึงแม้ว่าบริเวณนี้จะมีความเข้มข้นของออกซิเจนมากก็ตาม แต่อัตราการแพร่ของออกซิเจนจะถูกจำกัดด้วยช่วงเวลาที่ยอนกรีตอยู่ในสภาพเปียก

4.4 บริเวณที่ยอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา (Submerged Zone or Seabed Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเหล็กน้อยที่สุด เนื่องจากบริเวณนี้มีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่เนื้อคอนกรีตต่ำมากเนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตทั้งหมดเป็นช่องว่างที่อึดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยมากทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นได้น้อยตามไปด้วย

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง โดยการเกิดจะประกอบด้วยอัตราต่าง ๆ เช่น สถานที่ สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม การใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้คลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งหรือมีช่วงแห้งที่ยาวนานกว่าช่วงเปียกจะมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนของสนิมได้มากกว่าคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเลซึ่งเป็นช่วงเปียกที่ยาวนานกว่าช่วงแห้ง โดยการกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นเมื่อคลอไรด์ไอออนมีปริมาณมากพอที่ผิวเหล็กเสริม (Threshold Content of Chloride Ions) ซึ่งพบว่าช่วงนี้จะมีค่าความเป็นด่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต

5. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูง จะเกิดความพรุนในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นและขนาดในช่องว่างของคอนกรีตใหญ่ขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง รวมทั้งเพิ่มความสามารถในการแพร่กระจายผ่านได้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลกระทบในการแพร่กระจายของคลอไรด์

Ababneh *et al.* (2003) ศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อึดด้วย โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50, 0.55 และ 0.60 บ่มจนอายุครบ 28 วัน ทำการทดสอบการซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 5 ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าสูงทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์สูงขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าสูงทำให้ความพรุนในเนื้อคอนกรีตมีค่ามากขึ้น เมื่อพิจารณาในแต่ละระยะการซึมผ่านของ

คลอไรด์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 มีปริมาณคลอไรด์อิสระน้อยที่สุด ตามด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และ 0.60 ตามลำดับ เนื่องจากความทึบแน่นของคอนกรีต

Buddy *et al.* (2001) ศึกษาการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสม High - reactivity Metakaolin (HRM) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.50 และขนาดความละเอียดน้อยกว่า 0.20 ไมโครเมตร (μm) โดยนำมาแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 8 และ 12 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 และ 0.40 ทดสอบโดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และสูง 200 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ทดสอบที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ HRM แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ

6. ชนิดของวัสดุปอชโซลาน

วัสดุประสานที่ใช้งานคอนกรีตมีหลายชนิด เช่น เถ้าลอย ดินขาวเผา เถ้าแกลบ เถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าปลาล้มน้ำมัน เป็นต้น วัสดุเหล่านี้ล้วนเป็นของเหลือจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเกือบทั้งสิ้น การใช้วัสดุปอชโซลานเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะด้านความคงทน ในส่วนของเถ้าลอยนำมาแทนที่ซีเมนต์บางส่วนเพื่อการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์

ปริญญา และ อุกฤษณ์ (2548) ศึกษาผลของเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่มีต่อกำลังและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และ 0.60 แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและเถ้าลอยร้อยละ 40 - 80 โดยน้ำหนัก พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบจะมีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ 28 วัน แต่ถ้าอายุของคอนกรีตมากขึ้นที่ 90 วัน พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบจะให้กำลังที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตที่ผสมทั้งเถ้าลอยและเถ้าแกลบในสัดส่วน 60:20:20 จะมีกำลังที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในด้านความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม

7. ความละเอียดของวัสดุประสาน

ชัยชาญ และคณะ (2549) ได้ศึกษาการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีความละเอียดแตกต่างกัน โดยใช้เถ้าลอย 3 ขนาด ได้แก่ เถ้าลอยไม่คัดขนาด เถ้าลอยคัดขนาดละเอียดสุร้อยละ 45 และเถ้าลอยคัดขนาดละเอียดสุร้อยละ 10 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ร้อยละ 30 ในทุกส่วนผสม แซ่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 วัดการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์โดยใช้การวัดการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C 1202 จากการทดสอบพบว่า การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อวัดโดยการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมเถ้าลอยและเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้นและการทดสอบโดยการแซ่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 6 เดือน ให้ผลที่สอดคล้องกัน

8. การบ่ม

การบ่มคอนกรีตมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในหลาย ๆ ด้าน เช่น กำลังรับแรงอัด และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้นสามารถต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชันได้ดี การบ่มด้วยการเพิ่มอุณหภูมิหรือการบ่มด้วยไอน้ำส่งผลให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ในระยะต้น เนื่องจากการบ่มด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่การบ่มคอนกรีตด้วยการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้สูงกว่าคอนกรีตที่บ่มแบบปกติ โดยความร้อนทำให้โพรงคาปิลลารีเพิ่มขึ้นและเกิดความต่อเนื่อง

Chindaprasirt *et al.* (2007) พบว่าการระเหยออกไปของความชื้นอย่างต่อเนื่องภายใต้ความร้อนสูงจะส่งผลเสีย โดยทำให้ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถพัฒนากำลังได้อย่างน่าพอใจ การเติมน้ำเข้าไปในส่วนผสมช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ การมีน้ำในจีโอโพลิเมอร์และการระเหยออกไปในระยะเวลาต่อมา มีบทบาทหลักที่สำคัญอย่างมากต่อการเกิดรอยร้าวในโครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นการทำให้แห้งอย่างรวดเร็วในระหว่างการบ่มจึงเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยง

Van Jaarsveld *et al.* (2003) พบว่าการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานจะมีผลทำให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์อ่อนแอลง ดังนั้นการเหลือน้ำในโครงสร้างในปริมาณเพียงเล็กน้อยจึงมีความจำเป็นเพื่อที่จะป้องกันการแตกร้าว การยืดระยะเวลาการบ่มที่อุณหภูมิสูง

ออกไปจะหยุดยั้งการพัฒนาโครงสร้างเจลของการสังเคราะห์อีโพลีเมอร์ในส่วนผสม ลดการสูญเสียในปฏิกิริยา (Dehydration) และลดการหดตัวที่มากเกินไป (Excessive Shrinkage) ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาของการบ่มวัสดุอีโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำจะเป็นประโยชน์มากกว่าต่อการพัฒนากำลัง

Bakker (1988) กล่าวว่าส่วนประกอบของคอนกรีตและอุณหภูมิที่ใช้บ่มมีความสำคัญกับโครงสร้างของโพรง เมื่อเพิ่มระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชันความสามารถในการซึมผ่านได้จะลดลง ซึ่งเป็นจริงเมื่อคอนกรีตไม่มีการสูญเสียน้ำเท่านั้น หากสูญเสียน้ำระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเปลี่ยนไปตามระยะจากผิว เนื่องจากการลดลงของความชื้นทำให้ความสามารถในการซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น หากบ่มไว้นานการซึมผ่านของคลอไรด์ก็จะลดลง

9. อุณหภูมิ

Soroka (1993) อัตราการแพร่ของคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยในสภาพอากาศร้อนคลอไรด์จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ถึงเหล็กเสริมน้อยกว่าในสภาพอากาศปานกลาง

Wangwichit (1997) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยใช้ระดับอุณหภูมิในการศึกษาเป็น 3 ระดับ คือ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่ามอร์ตาร์ควบคุมมีความลึกของการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ขณะที่มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีการซึมผ่านลดลง นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการเพิ่มการซึมผ่านในมอร์ตาร์ทั้ง 2 ชนิด แต่ที่ระดับน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีความลึกของการซึมผ่านมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 30 และ 40 องศาเซลเซียส มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีความต้านทานการซึมผ่านได้มากกว่า สำหรับผลของปริมาณการแทนที่ซีเมนต์พบว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณการแทนที่สูงขึ้น ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 30 และ 40 องศาเซลเซียส มีการซึมผ่านของคลอไรด์ค่อนข้างคงที่ทุกระดับปริมาณการแทนที่ซีเมนต์

กลไกการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

ปกติแล้วคลอไรด์จะมีอยู่ในสภาพแวดล้อมทั่ว ๆ ไป ไอออนของคลอไรด์จะเกิดขึ้นในน้ำ ส่วนการแทรกซึมของคลอไรด์จะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีน้ำอยู่ในโพรงของวัสดุ น้ำจึงเป็นตัวกลางที่นำพา ไอออนของคลอไรด์เข้าไปในโพรงของของวัสดุ ความสามารถซึมผ่านได้นั้นถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากของคอนกรีตในด้านความทนทานต่อการสัมผัสกับน้ำทะเล ละอองน้ำทะเล หรือกระทั่ง ไอ่น้ำทะเล เนื่องจากคลอไรด์ไอออนนั้นมีคุณสมบัติที่สามารถทำลายฟิล์มของออกไซด์ที่ผิวของ เหล็กเสริมได้ ซึ่งหากมีความชื้นและออกซิเจนเพียงพอเหล็กเสริมนั้นก็เกิดสนิมได้ง่ายและ ลูกกลมจน โครงสร้างได้รับความเสียหายเป็นอันมาก โดยกลไกการเคลื่อนที่ของ ไอออนที่จะเข้าสู่ เนื้อคอนกรีตนั้นมีหลายกลไกด้วยกัน เช่น กลไกการแพร่ (Diffusion) กลไกการดูดซับ (Capillary Adsorption) และกลไกความดันของน้ำ (Hydrostatic Pressure) เป็นต้น ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นกลไกประเภทใดก็ตามการ เคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่เนื้อคอนกรีตนั้นล้วนแล้วแต่จะต้องอาศัยการเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่ เนื้อคอนกรีต โดยอาศัยระบบโพรงคอนกรีต (Pore System) เป็นช่องทางเข้าถึงเหล็กเสริม เนื่องจากคอนกรีต นั้นเป็นวัสดุที่มีรูพรุน (Porous Material) ซึ่งเปรียบเสมือนท่อเป็นจำนวนมาก โดยโพรงต่าง ๆ เหล่านี้ จะมีความแตกต่างกันทั้งประเภท โพรงที่มีความต่อเนื่องกันและไม่ต่อเนื่องกัน อีกทั้งยังมีความ แตกต่างในเรื่องการกระจายของปริมาณ โพรง (Pore Size Distributions) ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยทางด้าน กายภาพที่ส่งผลต่อการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ไอออนทั้งสิ้น

ปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมดที่มีอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต (Total Chloride) พบว่าเป็นผลรวม ของคลอไรด์ 2 ประเภท คือ ประเภทที่หนึ่ง คือ คลอไรด์ประเภทตรึงอยู่กับที่ (Fixed Chloride or Bound Chloride) ซึ่งถูกจับยึดอยู่ในไฮดรอกซีไซด์เฟส (คลอไรด์ส่วนที่ถูกยึดจับอยู่ที่ผิวของผลึกกันซ์ที่เกิด จากปฏิกิริยาไฮดรอกซีไซด์) และส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปไปในรูปแบบของสารประกอบแคลเซียม-คลอไรด์อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Chloride Aluminate Hydrate) ซึ่งรู้จักโดยทั่วไปว่าเป็นเกลือของฟรีเดิล (Friedel's Salts) หรือที่ถูกดูดซับด้วยผิวของโพรงเจล (Gel Pore) และบางส่วนอาจถูกดูดซับที่ผิวของ ผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก คุณสมบัติหลักของคลอไรด์ประเภทตรึงอยู่กับที่ คือ ไม่สามารถ ละลายน้ำได้ ส่งผลให้คลอไรด์ประเภทนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อเนื่องเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่อยู่ลึกเข้าไปจนถึงเหล็กเสริมได้ ส่วนคลอไรด์ประเภทที่สอง คือ คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) เป็นคลอไรด์ที่ สามารถละลายน้ำได้ ละลายอยู่ในโพรงของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์ส่วนนี้สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อคอนกรีต ในบริเวณที่มีระดับความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่าจนถึงผิวเหล็กเสริมได้โดยอาศัย ความชื้นผ่านกลไกการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ทำให้สภาพความเป็นต่างของคอนกรีตในบริเวณดังกล่าวลดลง

อย่างไรก็ตามคลอไรด์อิสระนั้นสามารถถูกจับยึดและเปลี่ยนเป็นคลอไรด์ประเภทตรึงอยู่กับที่ได้ โดยไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ซึ่งมีอยู่ในปูนซีเมนต์โดยอาศัยกระบวนการทางเคมี ดังนั้นหากสามารถขัดขวางหรือดักจับคลอไรด์ในส่วนนี้ไว้ได้ก็จะสามารถช่วยยืดระยะเวลาของการเริ่มกระบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริมออกไปได้มากขึ้น ซึ่งถ้าลดยในส่วนผสมของคอนกรีตสามารถช่วยจับยึดไอออนของคลอไรด์ไว้ได้บางส่วน ทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเกลือสามารถลดปริมาณ ไอออนของคลอไรด์ในส่วนที่จะเข้าไปทำให้เกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริมได้ (คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบหรือวิธีการซึมผ่านของไอออนของคลอไรด์เข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้ตามลักษณะดังต่อไปนี้

1. กลไกคาпилลารีหรือกลไกการดูดซึม (Capillary Adsorption)

เมื่อคอนกรีตมีการสัมผัสกับสถานะแวดล้อมที่มีคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล เป็นไปได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตอาจจะต้องเผชิญกับการเกิดสถานะเปียกสลับแห้ง (Wetting and Drying Process) เมื่อคลอไรด์สัมผัสกับผิวที่แห้งจะถูกดูดซึมเข้าสู่ภายในโพรงคอนกรีตโดยแรงตึงผิว (Capillary Action) การดูดซึ่มมักจะเกิดการเคลื่อนที่เมื่อเกิดความแตกต่างของความชื้น (Moisture Gradient) ขึ้น โดยจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีความชื้นมากไปยังจุดที่มีความชื้นน้อยกว่า โดยทั่วไปการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยการดูดซึมจะมีความลึกเพียงเล็กน้อยแต่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว คลอไรด์ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าถึงระดับเหล็กเสริมได้ด้วยกลไกนี้โดยตรง ยกเว้นบริเวณที่คอนกรีตที่ใช้มีคุณภาพต่ำและเหล็กเสริมมีระยะหุ้มของคอนกรีตน้อย แต่กลไกนี้ก็เป็นจุดเริ่มต้นและผลักดันให้เกิดกลไกอื่น ๆ ในการซึมผ่านของคลอไรด์เข้าสู่เหล็กเสริมให้เกิดได้ง่ายและเร็วขึ้น

2. กลไกความดันของน้ำ (Hydrostatic Pressure)

การใช้ความดันของน้ำหรือสารละลายในการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยระดับความลึกของของเหลว (Pressure Head) ซึ่งกลไกการแพร่ของคลอไรด์ด้วยวิธีนี้มักจะเกิดกับโครงสร้างคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเลที่มีความลึกมากพอสมควร โดยความสัมพันธ์ของแรงดันและระดับความลึกนี้สามารถอธิบายได้โดยการใช้สมการของดาร์ซี (Darcy's Equation or Darcy's Law)

3. กลไกการแพร่ (Diffusion)

วิธีที่มีความนิยมมากที่สุดในการจำลองสภาพการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีต โดยใช้หลักการของการแพร่ใน 1 มิติ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า อธิบายได้ด้วยกฎข้อที่ 1 ของการแพร่ หรือ Fick's First Law โดยเป็นการพิจารณาเมื่อความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางเพียงอย่างเดียว โดยไม่ขึ้นกับเวลา หรือที่เรียกว่า สภาวะคงที่ (Steady State) แต่ในทางปฏิบัติการพิจารณาว่าความเข้มข้นนั้นจะคงที่เมื่อเทียบกับเวลานั้นเป็นไปได้ นั่นคือความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางและเวลาหรือที่เรียกว่า สภาวะไม่คงที่ (Non - Steady State) อธิบายได้ด้วยกฎข้อที่ 2 ของการแพร่ หรือ Fick's Second Law

สมนึก และคณะ (2542) อธิบายว่าคลอไรด์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือคลอไรด์ที่ถูกเก็บกักไว้ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นคลอไรด์ที่เก็บกักจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Bound) โดยไอออนคลอไรด์ได้ถูกรวมเข้ากับผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์และปฏิกิริยาทางกายภาพ (Physical Bound) ไอออนของคลอไรด์จะถูกดูดซับที่ผิวของผลึกไฮดรอกไซด์ และประเภทที่สองคือคลอไรด์อิสระ เป็นสารละลายคลอไรด์ที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต สามารถแพร่ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าได้ เมื่อคลอไรด์แพร่เข้าไปจะทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงเพราะไอออนที่หนักกว่าจะเข้าไปแทนที่ไฮดรอกไซด์ไอออน ดังนั้นเมื่อคลอไรด์อิสระแพร่เข้าไปถึงตำแหน่งของเหล็กเสริมจะทำให้ค่า pH ของคอนกรีตรอบ ๆ เหล็กเสริมลดลง

การแพร่ของโมเลกุลตามกฎของฟิค

การแพร่ของโมเลกุลหรือการถ่ายเทโมเลกุล หมายถึง การถ่ายเทหรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแต่ละตัวผ่านของไหลอย่างอิสระ (Random) ถ้ากำหนดให้เส้นทางของโมเลกุลมีเพียงการเดินทางที่เป็นเส้นตรงและสามารถเปลี่ยนทิศทางเมื่อเกิดการกระทบกระแทกกับโมเลกุลอื่นจากการชนกัน เนื่องจากการเดินทางของโมเลกุลเป็นไปอย่างอิสระ ดังนั้นการแพร่ของโมเลกุลจึงเรียกว่า Random - Walk Process

1. การแพร่ของโมเลกุล (Molecular Diffusion)

การถ่ายเทมวลโดยอาศัยการแพร่ของโมเลกุล เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลผ่านตัวกลางที่ไม่เคลื่อนที่ การแพร่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างของสถานะ ดังนี้

- 1.1 เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้น เรียกว่า การแพร่ธรรมดา (Ordinary Diffusion)
- 1.2 เกิดจากระบบที่มีความแตกต่างของความดันทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความดันสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความดันต่ำกว่า เรียกว่า การแพร่เนื่องจากความดัน (Pressure Diffusion)
- 1.3 เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ เรียกว่า การแพร่เนื่องจากความร้อน (Thermal Diffusion)
- 1.4 เกิดจากระบบถูกแรงภายนอกกระทำ เช่น แรงเคลื่อนไฟฟ้า แรงแม่เหล็ก เป็นต้น

การแพร่ของโมเลกุลที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้น เป็นกลไกที่พบมากกว่าการแพร่แบบอื่น ๆ โดยความเข้มข้นขึ้นกับตำแหน่ง เวลา อุณหภูมิ ความดันและลักษณะอื่น ๆ ของระบบ ซึ่งจะใช้นิยามปริมาณเป็น มวลต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา

2. กฎของฟิค (Fick's Law)

2.1 กฎข้อที่หนึ่งของฟิค (Fick's First Law) ใช้ในกรณีของการแพร่กระจายที่อยู่ในสถานะคงตัว (Steady State Diffusion) กล่าวคือระดับการแพร่เข้าหา (Downstream) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง

เมื่อเทียบกับเวลา นั่นคือ มีอัตราการแพร่กระจายคงที่ (Constant Flux) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการแพร่กระจายตามกฎข้อที่หนึ่งของฟิคได้ ดังแสดงในสมการที่ 6

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (6)$$

โดย J = อัตราการไหลหรือการซึมผ่าน (Diffusion Flux) ($\text{kg/m}^2\text{-s}$, $\text{moles/m}^2\text{-s}$)
 D_c = สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) (m^2/s)
 C = ความเข้มข้นของสารที่ระยะใด ๆ (kg/mm^3)
 x = ระยะใด ๆ (mm)

2.2 กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) ใช้ในกรณีการแพร่กระจายที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัว (Non - Steady State Diffusion) คือ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงการแพร่กระจายอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือระดับความเข้มข้นของสารขณะเกิดการแพร่กระจายจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลา ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการแพร่กระจายตามกฎของฟิค ได้ดังแสดงในสมการที่ 7

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (7)$$

โดย C = ความเข้มข้นของสารที่ระยะใด ๆ (kg/mm^3)
 t = เวลา (Year)
 D_c = สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) (m^2/s)
 x = ระยะใด ๆ (mm)

กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์

ปัญหาหลักของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ชายฝั่งทะเล คือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ เนื่องจากในน้ำทะเลมีอนุภาคของคลอไรด์ที่เป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 90 ซึ่งถือว่ามากกว่าอนุภาคชนิดอื่น ๆ เช่น โซเดียม ซัลเฟต แคลเซียมและแมกนีเซียม เป็นต้น อย่างไรก็ตามอนุภาคของคลอไรด์เพียงอย่างเดียวไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กโดยตรง แต่คลอไรด์มีคุณสมบัติในการเร่งให้การเกิดสนิมเกิดได้เร็วขึ้น

สนิมเหล็กเกิดจากกระบวนการทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเมื่อเหล็กสัมผัสกับความชื้นและออกซิเจนในอากาศ ผิวเหล็กก็จะเกิดสนิม และเกิดขั้วของเซลล์ไฟฟ้าขึ้น 2 ขั้ว คือ ขั้วบวกกับขั้วลบ ขั้วบวก หมายถึง ขั้วของเซลล์ไฟฟ้าที่เหล็กถูกออกซิไดซ์และกลายเป็นอนุภาคเหล็ก (Fe^{2+}) ส่วนขั้วลบ หมายถึง ขั้วของเซลล์ไฟฟ้าที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วบวกเข้ามา ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วต่าง ๆ ของเซลล์เป็นดังนี้



กลไกการเกิดสนิมโดยทั่วไป ในบริเวณที่เป็นขั้วของเซลล์ไฟฟ้าบวก พบว่าอนุภาคของเหล็กจะละลายอยู่ในสารละลายโดยจำนวนเท่ากับจำนวนปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วของเซลล์ไฟฟ้าลบ การแตกตัวของเหล็กกลายเป็นอนุภาค Fe^{2+} ดังแสดงในสมการที่ 8 จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกตัวกลาง ซึ่งการแตกตัวดังกล่าวจะเป็นผลทำให้เหล็กถูกกัดกร่อนลงไป อัตราการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับอัตราการแตกตัวเป็นอนุภาค Fe^{2+} และโดยทั่วไปจะถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วของเซลล์ไฟฟ้าลบ ตามสมการที่ 9

การเกิดสนิมเหล็กจะทำให้เนื้อเหล็กแตกหลุดร่อนออกมาเป็นหลุมบนผิว จะเกิดขึ้นเมื่อผิวเหล็กสัมผัสกับความชื้นและออกซิเจนในอากาศซึมเข้าไปทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำซึ่งเป็นสารละลายที่เป็นกลาง ทำให้บริเวณดังกล่าวมีขั้วของเซลล์ไฟฟ้าเป็นลบซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายเปลี่ยนไปและจะกลายเป็นสารละลาย Electrolyte ตามสมการที่ 9 อนุภาคไฮดรอกซิล (OH^-) ที่ซึมเข้าไปภายในจะทำปฏิกิริยากับอนุภาคเหล็กที่กระจายออกมาข้างนอกได้เป็นเฟอร์ริไฮดรอกไซด์ [$Fe(OH)_2$] หรือสนิมเหล็กและมีการสะสมบนเหล็กบริเวณขอบหลุม การ

เกิดปฏิกิริยาในลักษณะเช่นนี้จะเป็นการขัดขวางการซึมเข้าไปภายในของออกซิเจน จึงเป็นการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างเหล็ก น้ำ และออกซิเจนในบริเวณศูนย์กลางหลุมโดยอัตโนมัติ จากปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวจึงทำให้ผิวเหล็กเกิดเป็นหลุมขึ้น

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคเหล็กกับอนุภาคไฮดรอกซิลแล้วได้ออกไซด์เหล็กนั้น จะเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากออกไซด์เหล็กสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับจำนวนของออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมี เช่น ไฮดรอสเฟอรัสออกไซด์ (Hydrous ferrous oxide, $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) หรือเฟอรัสไฮดรอกไซด์ ออกไซด์เหล่านี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของเหล็กที่ออกซิเจนสามารถซึมเข้าไปถึง ออกไซด์เหล็กหรือสนิมทั่วไปจะเป็นไฮดรอสเฟอรัสออกไซด์ ตามสมการที่ 11 มีสีส้มถึงน้ำตาลแดง ส่วนออกไซด์เหล็กที่เกิดจากมารบิริสุทธิจะเป็นสีขาวถึงสีเขียวดำ



เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเกิดสนิมได้เมื่อมีองค์ประกอบ 3 ประการ คือ

1. ความแตกต่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Process) สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งความแตกต่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 - 10 เรียกว่า ระดับวิกฤต (Critical Level) ของความแตกต่าง

2. มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สถานะสารละลายและเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบ ๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว

3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่าง แต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Pores) จะไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม

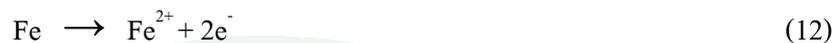
กลไกการกัดกร่อนโดยคลอไรด์

การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น เกิดได้หลายสาเหตุด้วยกัน โดยมีสาเหตุหลักมาจากสนิม ได้แก่ การเกิดรอยร้าวของโครงสร้างที่เกิดจากการหดตัวในขณะที่คอนกรีตแข็งตัว รอยต่อของคอนกรีตที่เกิดจากการก่อสร้าง สภาพแวดล้อม หรือเกิดจากสภาพการใช้งาน เป็นต้น โดยปกติแล้วและอากาศสามารถซึมผ่านเนื้อคอนกรีตไปถึงเหล็กเสริมได้ในปริมาณที่น้อยขึ้นอยู่กับความทึบของเนื้อคอนกรีต แต่การเกิดรอยร้าวของโครงสร้างจะเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้รวดเร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดสนิมของเสริมเร็วและรุนแรงมากขึ้นและอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การสูญเสียสภาพการเป็นค่า (Depassivation) เนื่องจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศและการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในสารละลายเข้าสู่โพรงในคอนกรีต โดยถ้ามีความเข้มข้นมากพอจะทำให้ความเป็นค่าของคอนกรีตลดลง ซึ่งสาเหตุนี้นำไปสู่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2543)

การเกิดสนิมเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่มีองค์ประกอบคือความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในความชื้นและออกซิเจน โดยธรรมชาติแล้วสภาพความเป็นค่าเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮดรชันมีค่า pH ประมาณ 12.0 - 13.0 จะช่วยต้านทานการเกิดสนิมได้ดีในระดับหนึ่ง จากฟิล์มออกไซด์ของเหล็กเสริม ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ซึ่งเป็นแผ่นบาง ๆ เรียกว่า Passivation Layer โดยแผ่นฟิล์มนี้ทำหน้าที่เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ไม่ให้เกิดสนิมจากการสัมผัสกับออกซิเจนและความชื้นโดยตรง หากฟิล์มนี้ถูกทำลายลงเหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้โดยง่าย ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า Depassivation ซึ่งกระบวนการนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้เมื่อสภาพความเป็นค่าของของคอนกรีตลดต่ำลงจนมีค่า pH 11.5 - 12.0 ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากสาเหตุหลายประการด้วยกัน เช่น การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชัน จากการซึมผ่านและชะล้างสภาพต่างด้วยน้ำ จากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการซึมผ่านของคลอไรด์อิสระบางส่วนที่สามารถซึมผ่านเข้าไปจนถึงผิวของเหล็กเสริม โดยพบว่าเมื่อคลอไรด์อิสระเพิ่มขึ้นจะทำให้สภาพความเป็นค่า ณ จุดที่คลอไรด์เข้าถึงเหล็กเสริมนั้นลดลงไปด้วยและหลังจากนั้นอาจจะใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่ง (Propagation Period) เพื่อเพิ่มปริมาณคลอไรด์ให้มากขึ้นจนถึงจุดวิกฤตและหลังจากนั้นจะมีโอกาสเกิดสนิมได้ทันทีหากมีปริมาณออกซิเจนและความชื้นที่เพียงพอ

Neville (1995) ได้อธิบายกลไกการกัดกร่อนไว้ดังต่อไปนี้

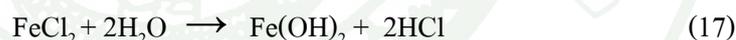
ปฏิกิริยาแอโนด (Anode Reaction) สามารถเขียนได้ดังนี้



ปฏิกิริยาแคโทด (Cathode Reaction) สามารถเขียนได้ดังนี้



เมื่อมีไอออนของคลอไรด์ ปฏิกิริยาจะเป็น ดังนี้



คลอไรด์ได้เปลี่ยนรูปไป โดยสนิมที่เกิดขึ้นไม่มีคลอไรด์เป็นส่วนประกอบเลย เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีต้องการการเชื่อมต่อระหว่างแอโนดและแคโทดโดยน้ำในโพรงและโดยเหล็กเสริมเอง ระบบโพรงซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกัดกร่อน ในความหมายทางไฟฟ้า คือ ความต้านทานของการเชื่อมต่อผ่านคอนกรีตซึ่งควบคุมการไหลของกระแส ความสามารถต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น ไอออนที่ประกอบกันของน้ำในโพรงและความต่อเนื่องของระบบโพรงซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

สิ่งที่เกิดขึ้นภายหลังการกัดกร่อนของเหล็กเสริมแบ่งเป็น 2 อย่าง ได้แก่ อย่างแรกเป็นผลผลิตที่ได้จากการกัดกร่อนมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิมหลายเท่า ทำให้คอนกรีตเกิดรอยแตกร้าว โดยปกติจะเกิดในแนวขนานกับเหล็กเสริม เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร่อนหรือหลุดเป็นแถบ ทำให้สารที่เป็น

อันตรายสามารถเข้าไปทำอันตรายต่อเหล็กเสริมได้ง่ายและมีอัตราการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นตามมา
อย่างที่สองเป็นกระบวนการกัดกร่อนที่อาจโน้มน้าวลดพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม ทำให้องค์อาคาร
นั้นรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยลง

การกัดกร่อนในเหล็กเสริมเป็นหนึ่งในความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริม
เหล็ก ซึ่งผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมในเหล็ก คือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมยังทำให้เกิด
การแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม เนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริม
จากการเกิดสนิมจนมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นจากเดิม จึงทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อของคอนกรีตในส่วนที่
หุ้มเหล็กเสริม คอนกรีตในบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อยจึงเกิดการแตกร้าวและหลุดร่อน (Spalling)
ออกมา ทำให้เหล็กเสริมมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนและความชื้นได้มากขึ้น จากนั้นกำลังรับแรง
ของโครงสร้างจะลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง โดยเฉพาะการต้านทานความล้า
(Fatigue Strength) และความสามารถในการเอนตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation Ability) ของโครงสร้าง
ก็ลดลงจนกระทั่งเกิดการวิบัติของโครงสร้าง

เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

1. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงอิเล็กตรอนสแกน ใช้ในการศึกษาลักษณะผิวหน้าของชิ้นตัวอย่าง หลักการคือใช้อิเล็กตรอนในการสร้างภาพ อิเล็กตรอนเกิดจากเส้นลวดโลหะถูกทำให้ร้อน ลำแสงอิเล็กตรอนจะไปตามแนวของคอลัมน์และผ่านเลนส์ซึ่งทำหน้าที่รับโฟกัสของลำแสงอิเล็กตรอนที่ตกลงบนชิ้นของตัวอย่าง การชนของอิเล็กตรอนแต่ละครั้งจะเกิดสัญญาณสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนหลายลักษณะ สัญญาณอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกวัดด้วยเครื่องตรวจวัดและแปลงสัญญาณส่งไปแสดงผลเกิดเป็นภาพขึ้น

สร้างภาพได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ โดยภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น เป็นเครื่องมือที่นำไปประยุกต์ใช้แพร่หลายทั่วไป ทั้งในด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี การแพทย์ อุตสาหกรรม นิติวิทยาศาสตร์ โบราณคดีและอื่น ๆ อีกหลายด้าน ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นอีกเครื่องมือที่นำเสนอภาพถ่ายที่ดูได้ด้วยสายตา (Visual Examination) ตั้งแต่ระดับความละเอียดเป็นมิลลิเมตร (mm) จนถึงระดับไมโครเมตร (μm) รวมทั้งสามารถอธิบายถึงสภาพทางกายภาพและเชิงกลที่ดีของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous)

2. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X - Ray Diffraction, XRD)

เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีตัว Detector เป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสมหรือโครงสร้างต่างกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มิต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณคร่าว ๆ ของปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึกและความเค้นของสารประกอบในสาร

ตัวอย่างได้อีกด้วย ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกนั้น ๆ แล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้มข้นที่มุมต่าง ๆ จะถูกนำมาพล็อตจนได้กราฟที่เรียกว่า Diffractogram ซึ่งแต่ละค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้ทราบข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษา โดยที่ค่าสูงสุดแต่ละตำแหน่งจะเป็นลักษณะเฉพาะของเฟสอะตอมต่าง ๆ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่มีอยู่ก็จะสามารถหาปริมาณสัมพัทธ์ของเฟสที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้

3. การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของโพรง (Pore Size and Pore Size Distribution) ด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมแพร่หลายมากที่สุดในการศึกษาลักษณะของโครงสร้างของโพรงภายในเนื้อวัสดุ เริ่มทดลองในช่วงแรกๆ เมื่อประมาณ 65 ปี มาแล้ว โดย Ritter และ Drake โดยช่วงแรกนิยมใช้ศึกษาปริมาตรโพรงในวัสดุประเภท เซรามิกส์ หิน ดินเหนียวและซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ง่ายและสะดวก โดยจะแสดงผลต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาตรและขนาดโพรงภายในรวมทั้งการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต (Pore Size Distribution) และปริมาณโพรงรวม (Total Porosity) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงที่เริ่มตรวจวัดได้ (Threshold Diameter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงตามทฤษฎี (The Theoretical Pore Diameter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงขนาดโตสุดที่มีความต่อเนื่องกัน (The Maximum Continuous Pore Diameter) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเฉลี่ย (The Mean Pore Diameter)

ผลการทดสอบโดยทั่วไปของเครื่องเอ็มไอพี จะแสดงด้วยการกระจายของขนาดโพรงภายในเนื้อคอนกรีตเทียบกับโพรงคอนกรีตขนาดต่าง ๆ (Comulative Pore Size Distribution Curve) โดยทั่วไปการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีตที่ได้จากการทดลองจะอยู่ในรูปของเส้นกราฟการสะสมการกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต

ธีรวัฒน์ และคณะ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบจากความละเอียดของเก้าลอยต่อกำลังรับแรงอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงในเพสต์ โดยนำเก้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ไม่ได้แยกขนาดมีอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 19.1 ไมโครเมตร และเก้าลอยที่ผ่านการแยกขนาดมีอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ

6.41 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.35 ผลการทดสอบพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยแยกขนาดให้กำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด การแทนที่และความละเอียดของถ่านหินมีผลกระทบต่อปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีของซีเมนต์เพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ไม่ได้แยกขนาดในอัตรา การแทนที่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น แต่ขนาดโพรงคาปิลลารีลดลง ขณะที่การแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่คัดแยกในเพสต์ ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีของเพสต์ลดลงเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยที่หยาบกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีลดลงเมื่อแทนที่เถ้าลอยที่ละเอียดลงในซีเมนต์เพสต์ทุกระดับการแทนที่

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

- 1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 - 2547
- 1.2 ถ้ำลออกจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง และ โรงไฟฟ้าบีแอลซีพี นิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด อ.เมืองระยอง จ.ระยอง
- 1.3 มวลรวมละเอียด เป็นทรายแม่น้ำในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
- 1.4 เหล็กกล้ากลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มม.
- 1.5 น้ำ เป็นน้ำประปา

2. อุปกรณ์

- 2.1 บีกเกอร์ ขนาด 250, 500, 1,000 และ 2,000 มล.
- 2.2 ขวดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 1,000 มล.
- 2.3 ขวดพลาสติกสำหรับใส่สารละลาย ขนาด 3,000 มล.
- 2.4 เข็อกพลาสติกสำหรับตวงสารละลาย ขนาด 1,000 และ 2,000 มล.
- 2.5 ชามสเตนเลส ขนาด 3,000 มล.
- 2.6 แท่งคนสาร ขนาด 30 ซม.

2.7 กรวยกรอง (Funnel)

2.8 ซ้อนตักสาร

2.9 เกรียงปาดหน้า

2.10 ภาชนะสำหรับแช่และบ่มตัวอย่าง

2.11 ถู่มือยาง

2.12 แวนตานิริภัย

2.13 แบบหล่อตัวอย่างพีวีซีรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27.50 มม. สูง 55 มม.

2.14 แบบหล่อตัวอย่างพีวีซีรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มม. สูง 125 มม.

3. เครื่องมือ

3.1 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ขนาด 1,500 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม

3.2 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ขนาด 5,000 กรัม ความละเอียด 0.1 กรัม

3.3 เครื่องวิเคราะห์ขนาดคละรวมละเอียด

3.4 เครื่องผสมจีโอโพลีเมอร์แบบ Bench Mounting Mixer ขนาด 10 ลิตร

3.5 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive Testing Machine)

3.6 ชุดทดสอบการไหลแผ่

3.7 เครื่อง X - ray Fluorescence (XRF)

3.8 เครื่อง X - ray Diffraction (XRD)

3.9 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

3.10 เครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

3.11 กล้องถ่ายรูป

4. สารเคมี

4.1 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98

4.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$) ประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide, Na_2O) ร้อยละ 10.16, ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) ร้อยละ 30.99 และน้ำ (H_2O) ร้อยละ 58.85 โดยมวล

4.3 สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate, AgNO_3) ความเข้มข้น 0.1 N

4.4 สารโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl)

วิธีการ

1. การเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี

1.1 แบบหล่อสำหรับเตรียมตัวอย่างทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์ ใช้ท่อพีวีซี ชั้นคุณภาพ 13.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มม. ตัดและกลึงผิวหน้าให้เรียบตั้งฉากกับแนวแกนของท่อ ยาว 125 มม. และผ่าข้างตลอดความยาวข้างหนึ่งเพื่อให้สะดวกต่อการถอดแบบ

1.2 แบบหล่อสำหรับเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด ใช้ท่อพีวีซี ชั้นคุณภาพ 13.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27.50 มม. ตัดและกลึงผิวหน้าให้เรียบตั้งฉากกับแนวแกนของท่อ ยาว 55 มม. และผ่าข้างตลอดความยาวข้างหนึ่งเพื่อให้สะดวกต่อการถอดแบบ

1.3 เตรียมเหล็กเสริม โดยนำเหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มม. ตัดและกลึงผิวหน้าให้เรียบตั้งฉากกับแนวแกนของเหล็กยาว 100 มม.

1.4 ถ้าวาลูจากทั้งสองแหล่ง ทดสอบองค์ประกอบทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM C 618

1.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ทดสอบองค์ประกอบทางเคมี ตามมาตรฐาน ASTM C 618

1.6 มวลรวมละเอียด ทดสอบความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐาน ASTM C 127 ทดสอบการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C 128 และทดสอบหน่วยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 29

1.7 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้มีปริมาณความเข้มข้น 6, 10 และ 14 โมลาร์ ไว้ล่วงหน้าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการผสม

1.8 เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) ให้มีปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 3

2. ปฏิภาคนส่วนผสมและการเตรียมจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

2.1 ปฏิภาคนส่วนผสมและการเตรียมจีโอโพลิเมอร์

จากอัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 เตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยผสมแก้าลอยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมต่ออีกจนส่วนผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำไปเทลงในแบบหล่อ ส่วนจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เตรียมโดยผสมแก้าลอยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เข้ากันแล้วเติมทรายผสมต่ออีก จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมต่อจนส่วนผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำไปเทลงในแบบหล่อ

2.2 ปฏิภาคนส่วนผสมและการเตรียมซีเมนต์มอร์ตาร์

วิธีการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 305 โดยในอัตราส่วน OPC - CM, OPC - CMC และ OPC - CMF จะใช้แก้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 0, ร้อยละ 30 (แก้าลอยชนิด C) และ ร้อยละ 30 (แก้าลอยชนิด F) โดยน้ำหนักตามลำดับ อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3 ใช้ปริมาณน้ำตามผลจากการทดสอบให้มีค่าการไหลแพร่ร้อยละ 110 ± 5 ตามมาตรฐาน ASTM C 230 ผสมให้เข้ากันดีแล้วนำไปเทลงในแบบหล่อ

หมายเหตุ ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีดังนี้

GC, GF, OPC - CM, OPC - CMC และ OPC - CMF หมายถึง จีโอโพลิเมอร์จากแก้าลอยชนิด C, จีโอโพลิเมอร์จากแก้าลอยชนิด F, ซีเมนต์มอร์ตาร์, ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมแก้าลอยชนิด C และซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมแก้าลอยชนิด F ตามลำดับ

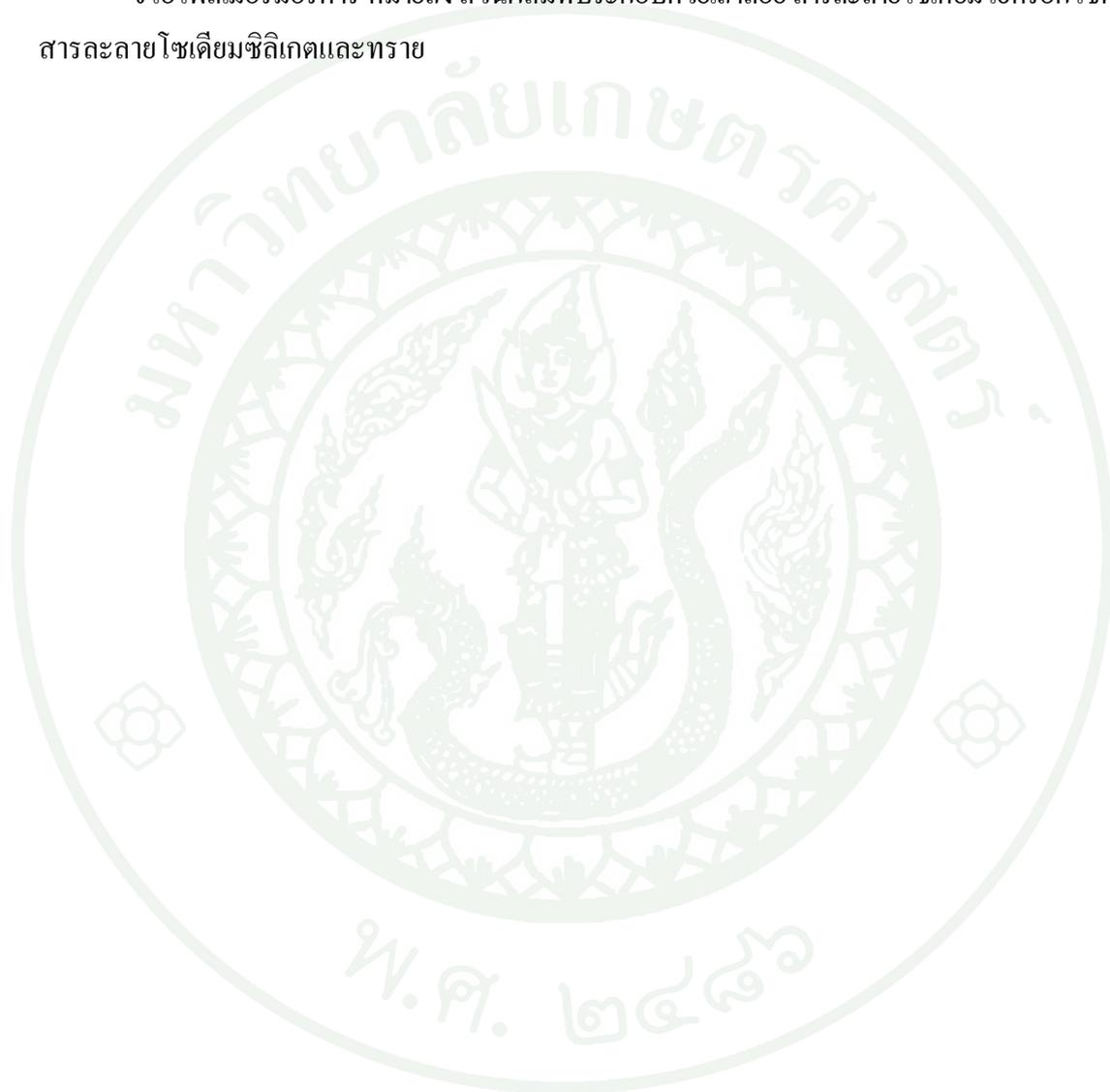
55, 65 หมายถึง อัตราส่วนสารละลายต่อแก้าลอยร้อยละ 55 และ 65 ตามลำดับ

6M, 10M, 14M หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6, 10 และ 14 โมลาร์ ตามลำดับ

0, 2, 4 หมายถึง อัตราส่วนแก้าลอยต่อทราย 1:0, 1:2 และ 1:4 ตามลำดับ

จีโอโพลิเมอร์เพสต์ หมายถึง ส่วนผสมที่ประกอบด้วยถ้ำลอย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซัลไฟด์

จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ หมายถึง ส่วนผสมที่ประกอบด้วยถ้ำลอย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซัลไฟด์และทราย



ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C

Mixture Symbol	Mix Proportion (%)									
	Liquid/Binder	Binder/Sand	NaOH		Na ₂ O.SiO ₂	Cement	Fly ash		Sand	Water
			Concentration (M)	Mass			Class C	Class F		
GC-55-6M-0	0.55	1:0	6	17.74	17.74	-	64.52	-	0.00	-
GC-55-6M-2	0.55	1:2	6	7.75	7.75	-	28.17	-	56.34	-
GC-55-6M-4	0.55	1:4	6	4.95	4.95	-	18.02	-	72.07	-
GC-55-10M-0	0.55	1:0	10	17.74	17.74	-	64.52	-	0.00	-
GC-55-10M-2	0.55	1:2	10	7.75	7.75	-	28.17	-	56.34	-
GC-55-10M-4	0.55	1:4	10	4.95	4.95	-	18.02	-	72.07	-
GC-55-14M-0	0.55	1:0	14	17.74	17.74	-	64.52	-	0.00	-
GC-55-14M-2	0.55	1:2	14	7.75	7.75	-	28.17	-	56.34	-
GC-55-14M-4	0.55	1:4	14	4.95	4.95	-	18.02	-	72.07	-
GC-65-6M-0	0.65	1:0	6	19.70	19.70	-	60.61	-	0.00	-
GC-65-6M-2	0.65	1:2	6	8.90	8.90	-	27.40	-	54.79	-
GC-65-6M-4	0.65	1:4	6	5.75	5.75	-	17.70	-	70.80	-
GC-65-10M-0	0.65	1:0	10	19.70	19.70	-	60.61	-	0.00	-
GC-65-10M-2	0.65	1:2	10	8.90	8.90	-	27.40	-	54.79	-
GC-65-10M-4	0.65	1:4	10	5.75	5.75	-	17.70	-	70.80	-
GC-65-14M-0	0.65	1:0	14	19.70	19.70	-	60.61	-	0.00	-
GC-65-14M-2	0.65	1:2	14	8.90	8.90	-	27.40	-	54.79	-
GC-65-14M-4	0.65	1:4	14	5.75	5.75	-	17.70	-	70.80	-

ตารางที่ 2 ปฏิภาคส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F

Mixture Symbol	Mix Proportion (%)									
	Liquid/Binder	Binder/Sand	NaOH		Na ₂ O.SiO ₂	Cement	Fly ash		Sand	Water
			Concentration (M)	Mass			Class C	Class F		
GF-55-6M-0	0.55	1:0	6	17.74	17.74	-	64.52	-	0.00	-
GF-55-6M-2	0.55	1:2	6	7.75	7.75	-	28.17	-	56.34	-
GF-55-6M-4	0.55	1:4	6	4.95	4.95	-	18.02	-	72.07	-
GF-55-10M-0	0.55	1:0	10	17.74	17.74	-	64.52	-	0.00	-
GF-55-10M-2	0.55	1:2	10	7.75	7.75	-	28.17	-	56.34	-
GF-55-10M-4	0.55	1:4	10	4.95	4.95	-	18.02	-	72.07	-
GF-55-14M-0	0.55	1:0	14	17.74	17.74	-	64.52	-	0.00	-
GF-55-14M-2	0.55	1:2	14	7.75	7.75	-	28.17	-	56.34	-
GF-55-14M-4	0.55	1:4	14	4.95	4.95	-	18.02	-	72.07	-
GF-65-6M-0	0.65	1:0	6	19.70	19.70	-	60.61	-	0.00	-
GF-65-6M-2	0.65	1:2	6	8.90	8.90	-	27.40	-	54.79	-
GF-65-6M-4	0.65	1:4	6	5.75	5.75	-	17.70	-	70.80	-
GF-65-10M-0	0.65	1:0	10	19.70	19.70	-	60.61	-	0.00	-
GF-65-10M-2	0.65	1:2	10	8.90	8.90	-	27.40	-	54.79	-
GF-65-10M-4	0.65	1:4	10	5.75	5.75	-	17.70	-	70.80	-
GF-65-14M-0	0.65	1:0	14	19.70	19.70	-	60.61	-	0.00	-
GF-65-14M-2	0.65	1:2	14	8.90	8.90	-	27.40	-	54.79	-
GF-65-14M-4	0.65	1:4	14	5.75	5.75	-	17.70	-	70.80	-

ตารางที่ 3 ปฏิภาคส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์

Mixture Symbol	Mix Proportion (%)									
	Liquid/Binder	Binder/Sand	NaOH		Na ₂ O.SiO ₂	Cement	Fly ash		Sand	Water
			Concentration (M)	Mass			Class C	Class F		
OPC-CM	-	1:2.75	-	-	-	22.99	-	-	63.22	13.79
OPC-CMC	-	1:2.75	-	-	-	16.09	6.90	-	63.22	13.79
OPC-CMF	-	1:2.75	-	-	-	16.09	-	6.90	63.22	13.79

3. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์และทดสอบ

3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

นำเหล็กเสริมมาทากาวที่ปลายข้างหนึ่งติดไว้บนแผ่นอะคริลิก แล้วนำแบบหล่อพีวีซีทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มม. ยาว 125 มม. มาวางครอบ จัดให้แนวเหล็กอยู่ตรงกลาง แล้วอุดรอยต่อภายนอกด้วยซิลิโคน เตรียมไว้อัตราส่วนผสมละ 5 ชุด ตามช่วงเวลาที่ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ จากนั้นเทจีโอโพลีเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ (เตรียมไว้ตามข้อ 2.1, 2.2) ลงในแบบหล่อโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรประมาณหนึ่งในสามของปริมาตรทั้งหมดของแบบหล่อ กระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง ปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติก (Vinyl sheet) เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องประมาณ 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบหล่อแล้วเก็บตัวอย่างในถุงพลาสติก เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องรอนำไปทดสอบต่อไป

3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด

นำแบบหล่อพีวีซีทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27.50 มม. ยาว 55 มม. ตั้งบนแผ่นอะคริลิกแล้วอุดรอยต่อภายนอกด้วยซิลิโคน เตรียมไว้อัตราส่วนผสมละ 3 ชุด จากนั้นเทจีโอโพลีเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ (เตรียมไว้ตามข้อ 2.1 และ 2.2) ลงในแบบหล่อกระทุ้งให้แน่นและปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องประมาณ 12 ชั่วโมง ทำการถอดแบบหล่อแล้วเก็บตัวอย่างในถุงพลาสติก เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องรอนำไปทดสอบต่อไป

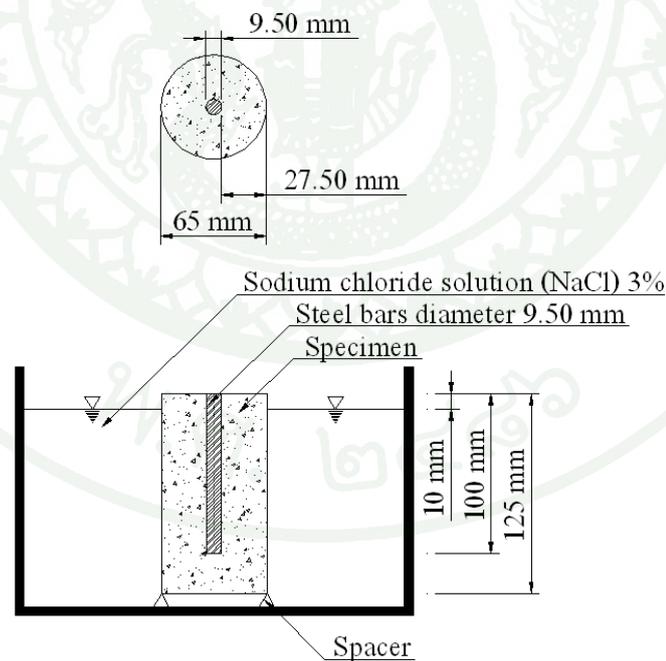
3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของโพรงของจีโอโพลีเมอร์

เก็บตัวอย่างของจีโอโพลีเมอร์เพศในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ได้ภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยเก็บตัวอย่างที่บริเวณกึ่งกลางของแท่งตัวอย่างประมาณตัวอย่างละ 2 กรัม ต่อการวิเคราะห์ แล้วเก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องรอนำไปทดสอบต่อไป

4. การวิเคราะห์และทดสอบ

4.1 ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ทุกอัตราส่วนผสมไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยตั้งด้านที่มีปลายเหล็กขึ้น ให้ส่วนบนของตัวอย่างโผล่พ้นจากสารละลาย 10 มม. ดังแสดงในภาพที่ 1 เมื่อครบอายุ 3, 10, 20, 40 และ 70 วัน ตามระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดตามแนวนอนให้แตกตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางออกเป็นสองส่วน แล้วฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทความเข้มข้น 0.1 N บนผิวด้านในของตัวอย่าง สารละลายซิลเวอร์ไนเตรทจะทำปฏิกิริยากับสารโซเดียมคลอไรด์แล้วเกิดเป็นแถบสีม่วงบริเวณขอบของผิวตัวอย่าง ทำให้ทราบระยะเวลาการซึมผ่านของคลอไรด์ของแต่ละตัวอย่างได้โดยการวัดระยะความลึกของขอบเขตสีที่แตกต่างกันที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา ระยะการซึมผ่านที่วัดได้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา โดยความลึกของการซึมผ่านจะส่งผลให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์เมื่อคลอไรด์ซึมถึงระดับผิวเหล็ก



ภาพที่ 1 ลักษณะของตัวอย่างและรูปแบบการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทดสอบกำลังรับแรงอัด เมื่ออายุครบ 28 วัน โดยนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงด้วยเวอร์เนียร์ นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยเครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive Testing Machine) ตามมาตรฐาน ASTM C109 จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุดและลักษณะการวิบัติ โดยผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเป็นค่าเฉลี่ยจากตัวอย่าง 3 ชิ้น

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์

โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค โดยก่อนการทดสอบต้องเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำโดยใช้เครื่องมือ Sputter Coater เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า

4.4 การหาค่าประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์

เป็นการหาค่าประกอบทางเคมีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้เทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของจีโอโพลิเมอร์

เป็นการหาค่าประกอบของธาตุต่าง ๆ จากโครงสร้างผลึกที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X - ray Diffraction, XRD)

4.6 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของโพรงของจีโอโพลิเมอร์ (Pore Size and Pore Size Distribution)

การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของโพรงสามารถทำได้ด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) โดยการอัดปรอทด้วยความดันเข้าไปในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อวัดขนาดและการกระจายตัวของโพรงในจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งขนาดของโพรงที่เครื่องมือวัดได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.007 - 168 ไมโครเมตร จึงสามารถวัดโพรงเจลและโพรงคาปิลลารีได้ ก่อนการทดสอบปริมาตรโพรงตัวอย่างจะต้องถูกทำให้แห้งด้วยการดูดอากาศและความชื้นด้วยหม้อดูดอากาศ (Desiccator) เป็นระยะเวลา 3 วัน ซึ่งภายในหม้อดูดอากาศนั้นจะบรรจุซิลิกาเจลสำหรับดูดความชื้น และผงปูนขาว (CaO) สำหรับดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหม้อดูดอากาศออกให้หมด



ผลและวิจารณ์

ผล

1. องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

จากตารางผนวกที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเทคนิค X - ray Fluorescence (XRF) พบว่าเถ้าลอยจากทั้งสองแหล่งมีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี มีผลรวมของซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3) และไอออนไดรอกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นร้อยละ 68.31 และ 89.80 ตามลำดับ และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 18.14 และ 3.52 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อยู่ในช่วงร้อยละ 50 - 70 และมี CaO มากกว่าร้อยละ 10 จึงจัดเป็นเถ้าลอยชนิด C ส่วนเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี มีผลรวมดังกล่าวมากกว่าร้อยละ 70 และมี CaO น้อยกว่าร้อยละ 10 จึงจัดเป็นเถ้าลอยชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C 618

2. การซึมผ่านของคลอไรด์

จากผลการทดสอบ การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ในส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ต้าร์ มีผลทำให้ซีเมนต์มอร์ต้าร์มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น โดยการใช้เถ้าลอยชนิด C แทนที่ซีเมนต์ทำให้ซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ได้มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์สูงกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยชนิด F โดยที่เวลา 70 วัน อัตราส่วนผสม OPC-CM, OPC-CMC และ OPC-CMF มีการซึมผ่านของคลอไรด์ 22.32, 12.54 และ 19.41 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2 - 7

ภาพที่ 2 - 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับระยะการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C จะแสดงในภาพที่ 2 - 4 และจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F ภาพที่ 5 - 7 พบว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C โดยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดให้ผลการวิจัยไปในแนวทางเดียวกันในทุกอัตราส่วนผสม คือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6, 10 และ 14 โมลาร์ ทำให้มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามลำดับ การใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อเถ้าลอยร้อยละ 55 และ 65 ทำให้มีความต้านทานการซึมผ่านของ

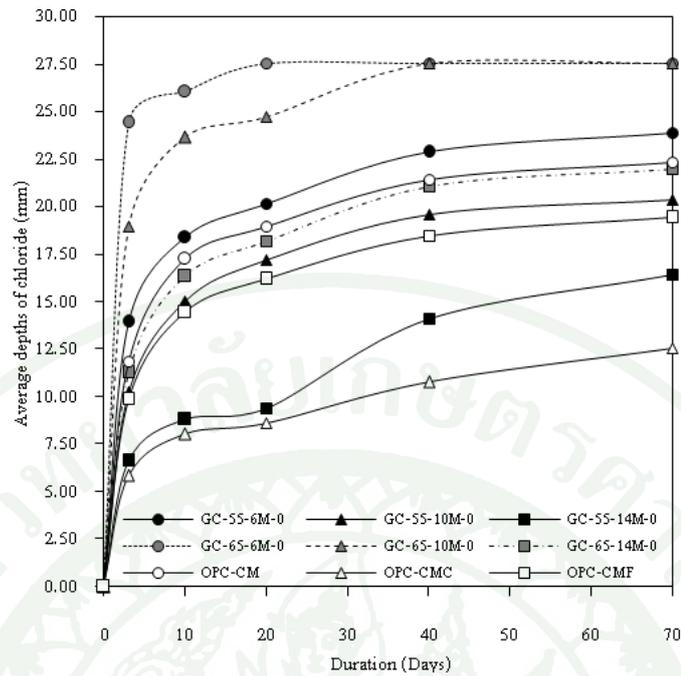
คลอไรด์ลดลง ตามลำดับ และการใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทราย 1:0, 1:2 และ 1:4 ทำให้มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง ตามลำดับ

จากภาพที่ 2 - 7 แสดงให้เห็นว่าในช่วง 10 วันแรก ทุกอัตราส่วนผสมโดยเฉพาะการใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทราย 1:4 จะมีอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ที่สูงมากและหลังจากนั้นอัตราการซึมผ่านจะลดลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อของจีโอโพลิเมอร์จะต้องอาศัยระบบโพรง (Pore System) เป็นช่องทาง โพรงเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันซึ่งมีการต่อเชื่อมและไม่ต่อเชื่อมกัน รวมทั้งการกระจายของโพรงด้วย อัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ในช่วงแรกสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการดูดซับหรือกลไกการดูดซึม (Capillary Adsorption) เมื่อคลอไรด์สัมผัสกับผิวที่แห้งของจีโอโพลิเมอร์จะถูกดูดซึมเข้าสู่ภายในโพรงของจีโอโพลิเมอร์โดยแรงตึงผิว (Capillary Action) การดูดซึมจะเกิดการเคลื่อนที่เมื่อเกิดความแตกต่างของความชื้น (Moisture Gradient) ขึ้น โดยจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีความชื้นมากไปยังจุดที่มีความชื้นน้อยกว่า โดยทั่วไปการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยกลไกการดูดซึมจะมีความลึกเพียงเล็กน้อยแต่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการซึมผ่านจะลดลงโดยจะเป็นไปตามกลไกการแพร่ (Diffusion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าในสภาวะไม่คงที่ (Non - Steady State) คือ ความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางกับเวลาอธิบายได้ด้วยกฎข้อที่ 2 ของการแพร่ หรือ Fick's Second Law ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนผสมที่มีการทำปฏิกิริยาสมบูรณ์และมีส่วนผสมของทรายน้อยจะลดขนาดและปริมาณโพรงภายในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ลง จีโอโพลิเมอร์ในอัตราส่วนผสมดังกล่าวจึงมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี โดยระยะการซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าเมื่อเทียบกับเวลา

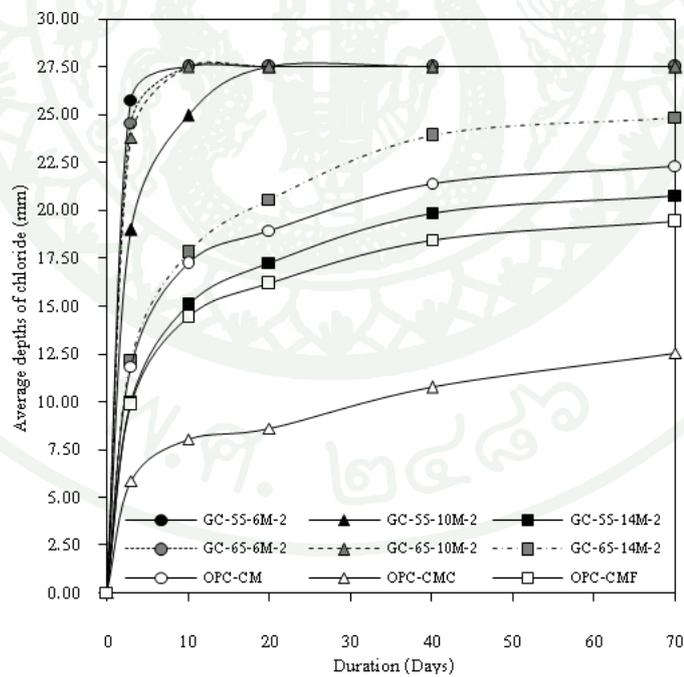
ที่เวลา 70 วัน จีโอโพลิเมอร์มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ในอัตราส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อเถ้าลอยร้อยละ 55 ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ และแยกความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์สูงสุดตามอัตราส่วนเถ้าลอยต่อทราย พบว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C มีความต้านทานสูงสุดในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0, GC-55-14M-2 และ GC-55-14M-4 โดยมีการซึมผ่านของคลอไรด์ 16.43, 20.76 และ 24.43 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2 - 4 และจากเถ้าลอยชนิด F มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์สูงสุดในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0, GF-55-14M-2 และ GF-55-14M-4 โดยมีการซึมผ่านของคลอไรด์ 11.55, 18.83 และ 22.66 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 5 - 7 เนื่องจากการใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อเถ้าลอยร้อยละ 55 ทำให้ส่วนผสมมีความเข้มข้นสารละลายต่างจึงทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization Reaction) กับเถ้าลอยได้สมบูรณ์ เมื่อแข็งตัวแล้วจึงไม่เหลือสารละลายต่างที่จะทำให้เกิด

โพรงภายในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ที่จะทำให้ง่ายต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ ส่วนการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของแก้วลอยได้ดี มีผลทำให้เกิดการชะละลาย (Dissolution) ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่ผิวของแก้วลอยได้มาก โดยเฉพาะแก้วลอยชนิด F ที่มีปริมาณของซิลิกาและอะลูมินาสูงกว่าแก้วลอยชนิด C สารที่ถูกชะออกมาเมื่อมาทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตก็จะกลายเป็นเจล (Gel) ทำให้เนื้อของจีโอโพลิเมอร์มีความทึบ จึงสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีและการผสมทรายในจีโอโพลิเมอร์ ความพรุนของทรายก็ทำให้เกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ง่ายขึ้น จากผลการทดสอบการผสมทรายเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง โดยเฉพาะการใช้อัตราส่วนแก้วลอยต่อทราย 1:4 ถือว่าไม่มีความต้านการซึมผ่านเลย

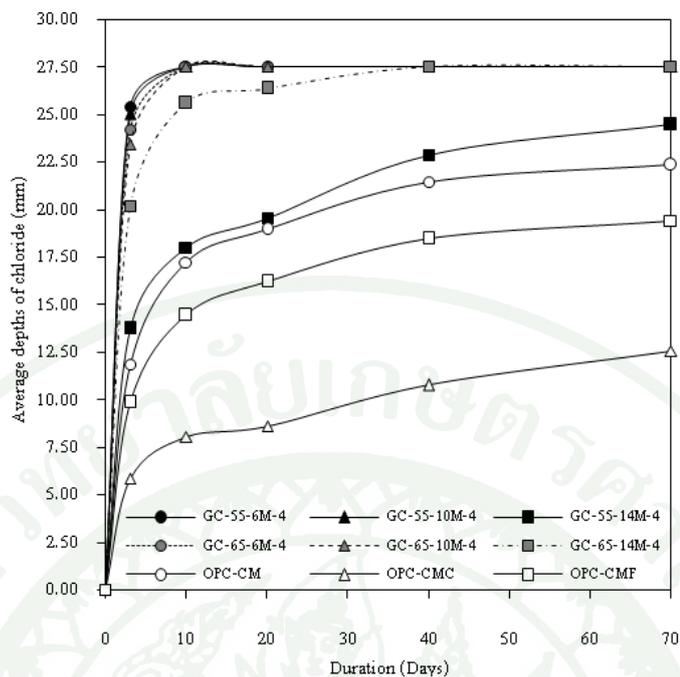
จากผลการทดสอบ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะมีการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ แต่ในอัตราส่วนผสมที่เป็นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนใหญ่จะมีความต้านทานการซึมผ่านได้ดีกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยเฉพาะอัตราส่วนในจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยชนิด C และชนิด F ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง



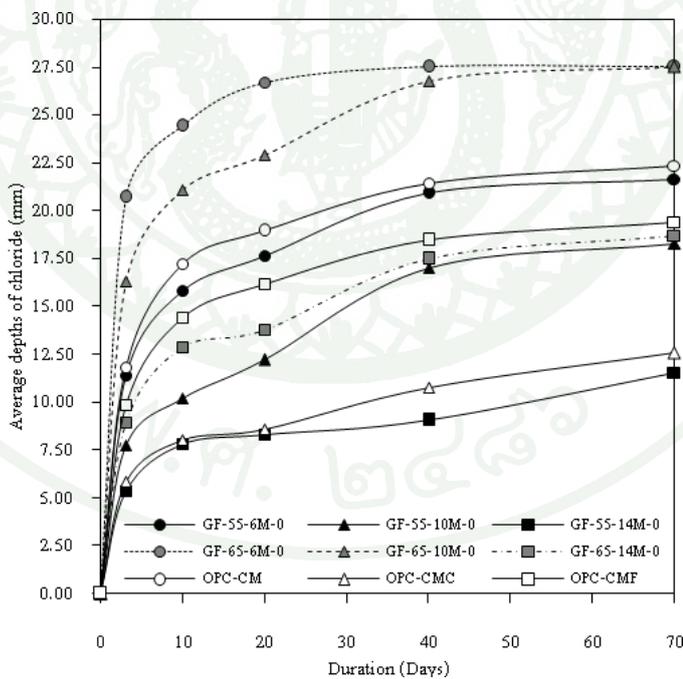
ภาพที่ 2 การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C



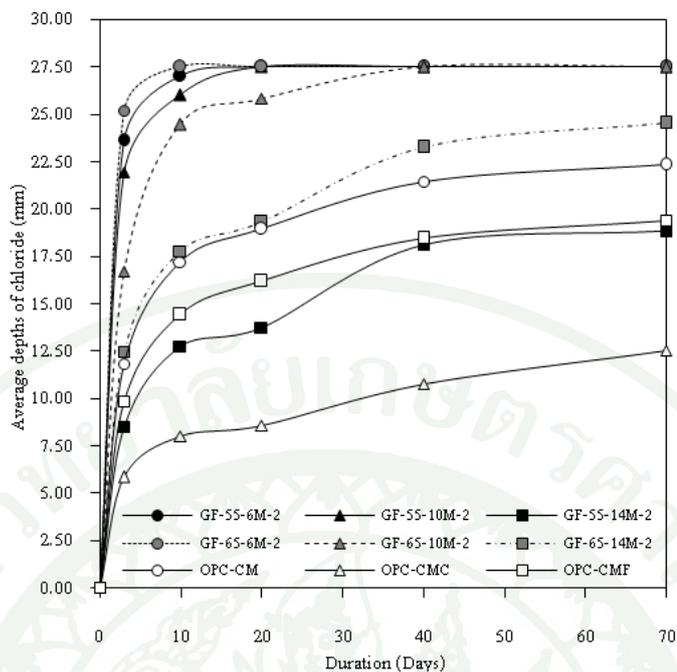
ภาพที่ 3 การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยชนิด C (อัตราส่วนถ้ำลอยต่อทรายเท่ากับ 1:2)



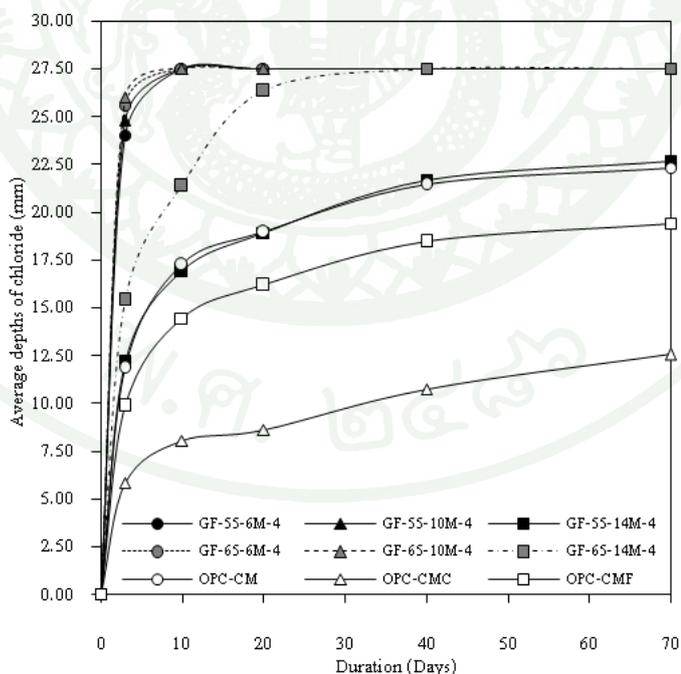
ภาพที่ 4 การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยชนิด C (อัตราส่วนถ้ำลอยต่อทรายเท่ากับ 1:4)



ภาพที่ 5 การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F



ภาพที่ 6 การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยชนิด F (อัตราส่วนถ้ำลอยต่อทรายเท่ากับ 1:2)



ภาพที่ 7 การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยชนิด F (อัตราส่วนถ้ำลอยต่อทรายเท่ากับ 1:4)

3. กำลังรับแรงอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ จีโอโพลิเมอร์เพสต์และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยชนิด C และเถ้าลอยชนิด F ที่อายุ 28 วัน โดยการบ่มตัวอย่างเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นในถุงพลาสติกและเก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิด C และซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชนิด F มีกำลังรับแรงอัด 266, 246 และ 230 กก./ซม.² ตามลำดับ ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก7 โดยซีเมนต์มอร์ตาร์จะมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจากน้ำกับซีเมนต์ในซีเมนต์มอร์ตาร์สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ได้สมบูรณ์ ในขณะที่ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ปริมาณเถ้าลอยที่ไปแทนที่ซีเมนต์มีผลทำให้น้ำไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซีเมนต์จนสมบูรณ์ก่อน หลังจากนั้นน้ำส่วนที่เหลือจึงจะไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) กับเถ้าลอย การพัฒนากำลังที่อายุ 28 วัน จึงช้ากว่าซีเมนต์มอร์ตาร์

จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C และเถ้าลอยชนิด F มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 555 และ 624 กก./ซม.² ในอัตราส่วนผสม GC-55-14-0 และ GF-55-14-0 ตามลำดับ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยชนิด C และเถ้าลอยชนิด F ที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทราย 1:2 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 350 และ 394 กก./ซม.² ในอัตราส่วนผสม GC-55-14-2 และ GF-55-14-2 ตามลำดับ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยชนิด C และเถ้าลอยชนิด F ที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทราย 1:4 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 219 และ 230 กก./ซม.² ในอัตราส่วนผสม GC-55-14-4 และ GF-55-14-4 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 8 - 13

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับผลของปัจจัยต่าง ๆ ในส่วนผสม โดยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน คือ จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C โดยปัจจัยที่ใช้ในการปรับอัตราส่วนผสมในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน คือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6, 10 และ 14 โมลาร์ มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามลำดับ การใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อเถ้าลอยร้อยละ 55 และ 65 มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ตามลำดับ และการใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทราย 1:0, 1:2 และ 1:4 มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ตามลำดับ โดยสามารถแยกพิจารณาตามปัจจัยต่าง ๆ ได้ดังนี้

3.1 อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอย

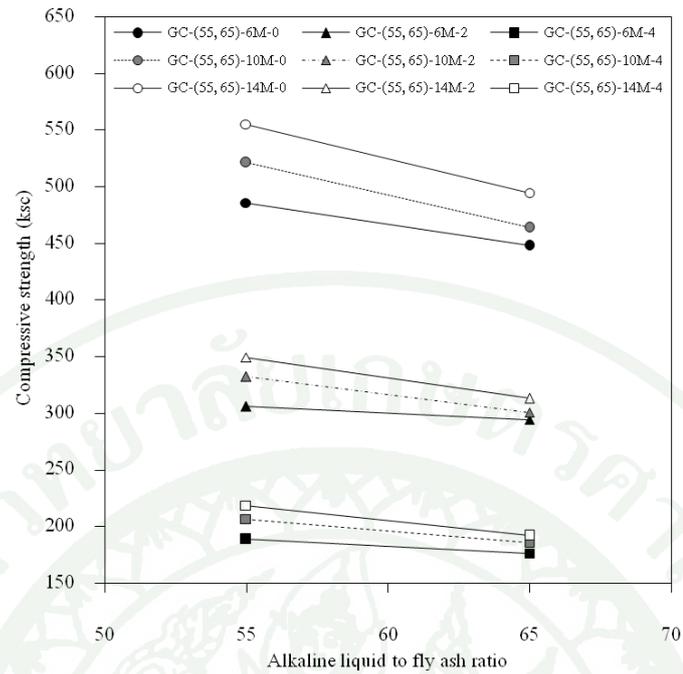
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังภาพที่ 8 และ 9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด โดยการใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อแก้วลอยร้อยละ 55 และ 65 มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ตามลำดับ การใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อแก้วลอยที่สูงขึ้นมีผลทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความเหลวขึ้น แต่หลังจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายต่างกับแก้วลอยแล้วทำให้เหลือสารละลายต่างที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ หลังจากแข็งตัวแล้วจึงเหลือเป็นโพรงภายในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งหากเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ก็จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

3.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

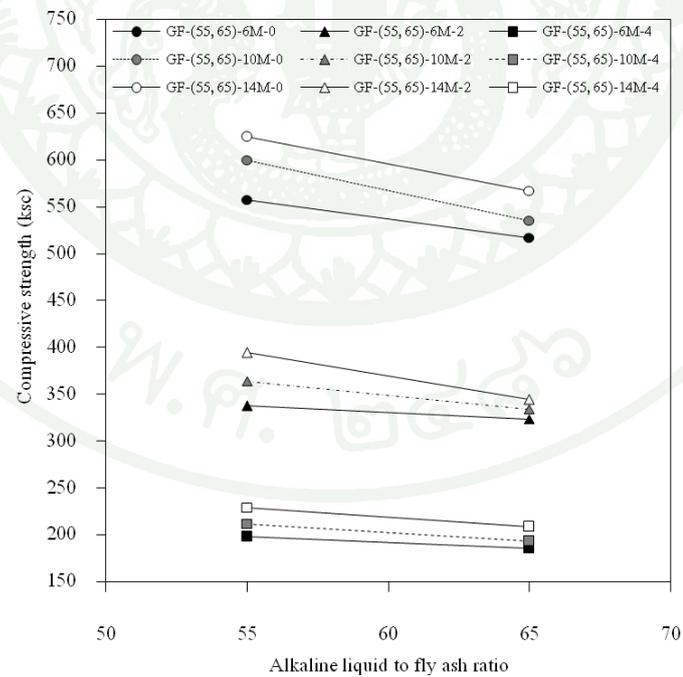
ภาพที่ 10 และ 11 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด โดยการใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง ๆ จะสามารถชะละลายซิลิกาและอะลูมินาจากแก้วลอยได้ดีกว่าความเข้มข้นต่ำปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ เมื่อผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตจึงกลายเป็นเจล ทำให้เนื้อของจีโอโพลิเมอร์มีความทึบสูง จึงมีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น โดยจากผลการทดสอบการใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6, 10 และ 14 โมลาร์ มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ตามลำดับ

3.3 อัตราส่วนแก้วลอยต่อทราย

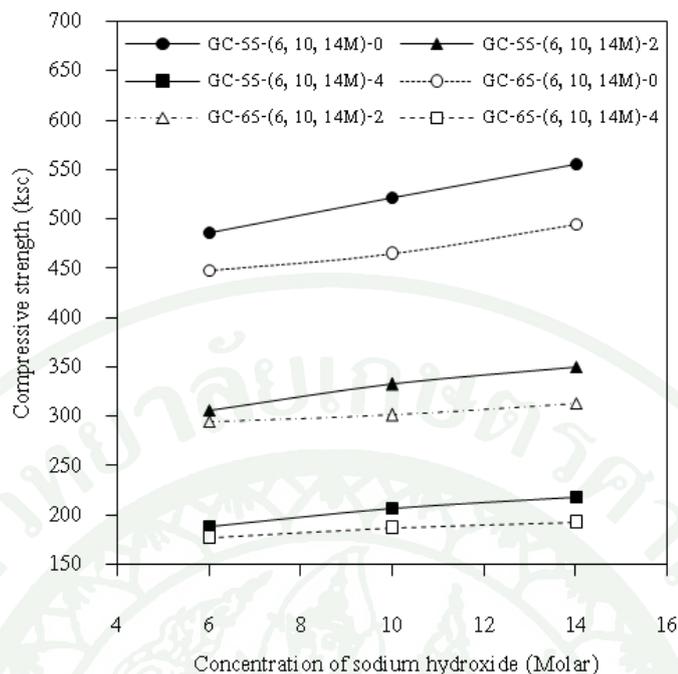
การผสมทรายในจีโอโพลิเมอร์ในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างผลึกของจีโอโพลิเมอร์ลดลงเนื่องจากการเพิ่มทรายในอัตราส่วนผสมทำให้จีโอโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นวัสดุเปราะและเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันมาก (Heterogeneous) ขึ้น รวมทั้งความพรุนในทรายทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีปริมาณโพรงสูงขึ้นกำลังรับแรงอัดจึงลดลง โดยจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทรายอัตราส่วนแก้วลอยต่อทราย 1:0, 1:2 และ 1:4 มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงตามลำดับ ดังผลของความสัมพันธ์ระหว่างผสมทรายในจีโอโพลิเมอร์ต่อกำลังรับแรงอัดในภาพที่ 12 และ 13



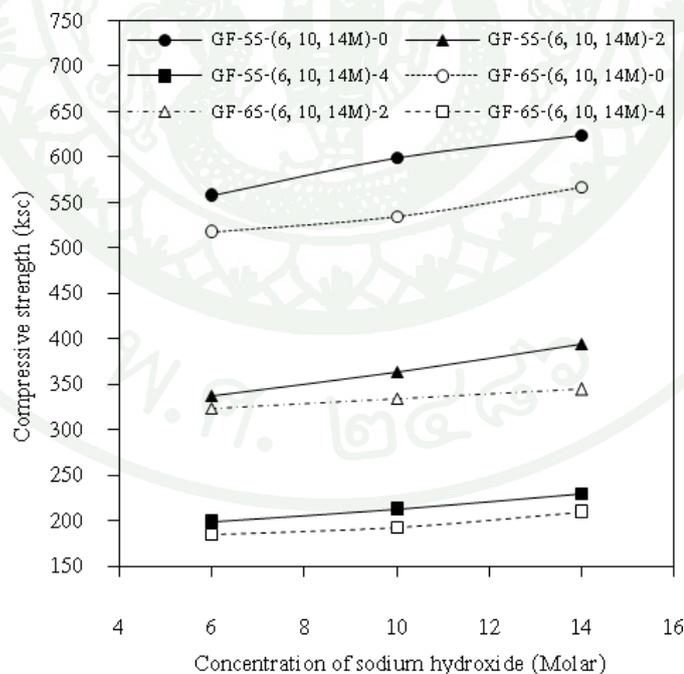
ภาพที่ 8 ผลของอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย ชนิด C



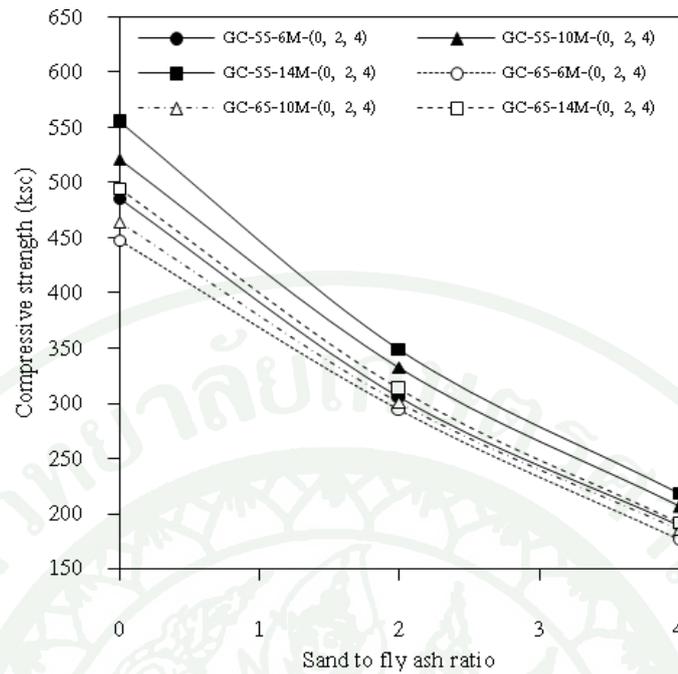
ภาพที่ 9 ผลของอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย ชนิด F



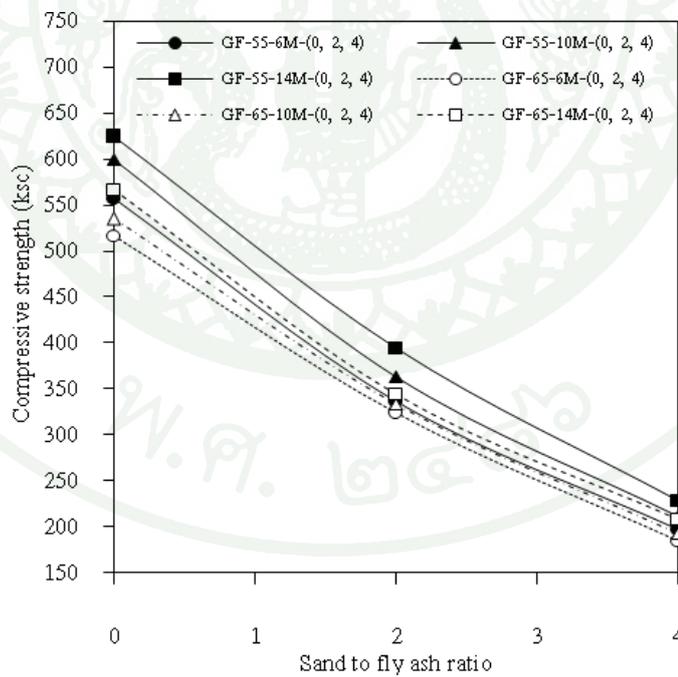
ภาพที่ 10 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ จากถ้ำลอยชนิด C



ภาพที่ 11 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ จากถ้ำลอยชนิด F



ภาพที่ 12 ผลของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อทรายต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C



ภาพที่ 13 ผลของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อทรายต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F

4. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ภาพที่ 14 - 21 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 และ 14 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อถ้ำลอยร้อยละ 55 ด้วยเทคนิค SEM โดยแต่ละอัตราส่วนผสมจะใช้กำลังขยาย 500 และ 1500 เท่า ภาพที่ 14 - 17 แสดงภาพถ่ายของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 และ GC-55-14M-0 ภาพที่ 18 - 21 แสดงภาพถ่ายของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 และ GF-55-14M-0

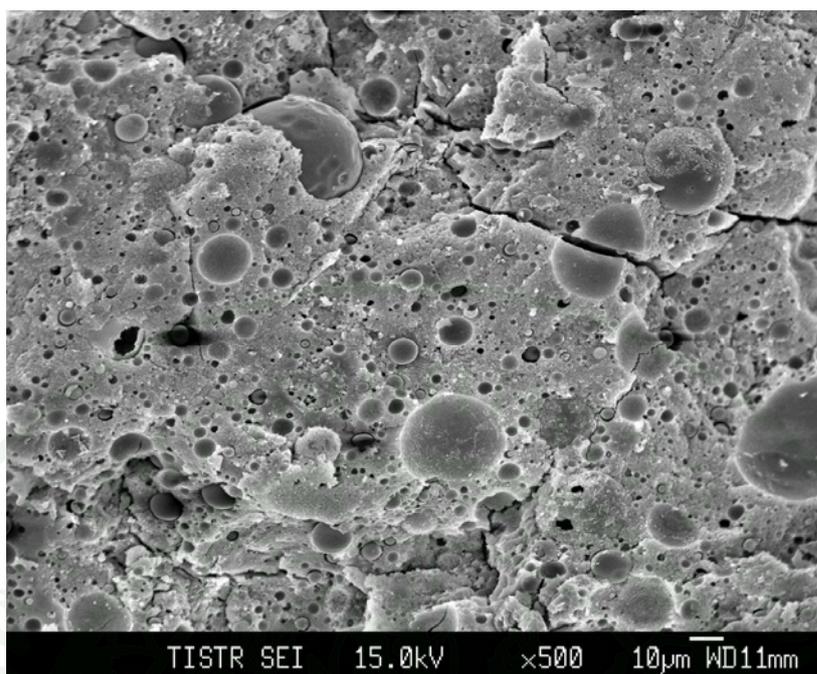
จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ เป็นส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 14 และ 15 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของถ้ำลอยทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่จะมีการชะละลายได้น้อยเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ โดยจะเหลืออนุภาคของถ้ำลอยที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก ส่วนการชะละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ ดังแสดงในภาพที่ 16 และ 17 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของถ้ำลอยมีการทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์มากขึ้นจนอยู่ในรูปของเจลยังคงเหลือเพียงอนุภาคของถ้ำลอยที่มีขนาดใหญ่เท่านั้นที่ยังเหลืออยู่

จากการเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งสองความเข้มข้น จะเห็นว่าที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ มีการทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์กว่าเนื่องจากมีสภาพความเป็นเจลที่สมบูรณ์กว่า โดยผิวของถ้ำลอยชนิด F ดังแสดงในภาพที่ 20 และ 21 มีความขรุขระและเนื้อมีส่วนความเป็นเจลมากกว่า เนื่องจากถ้ำลอยชนิด F มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาและอะลูมินามากกว่า จึงสามารถชะละลายได้ดีกว่าถ้ำลอยชนิด C อย่างไรก็ดีตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่สมบูรณ์เพราะยังพบว่ามีพื้นที่ผิวบางส่วนของถ้ำลอยยังคงเรียบเนื่องจากไม่มีการชะละลาย

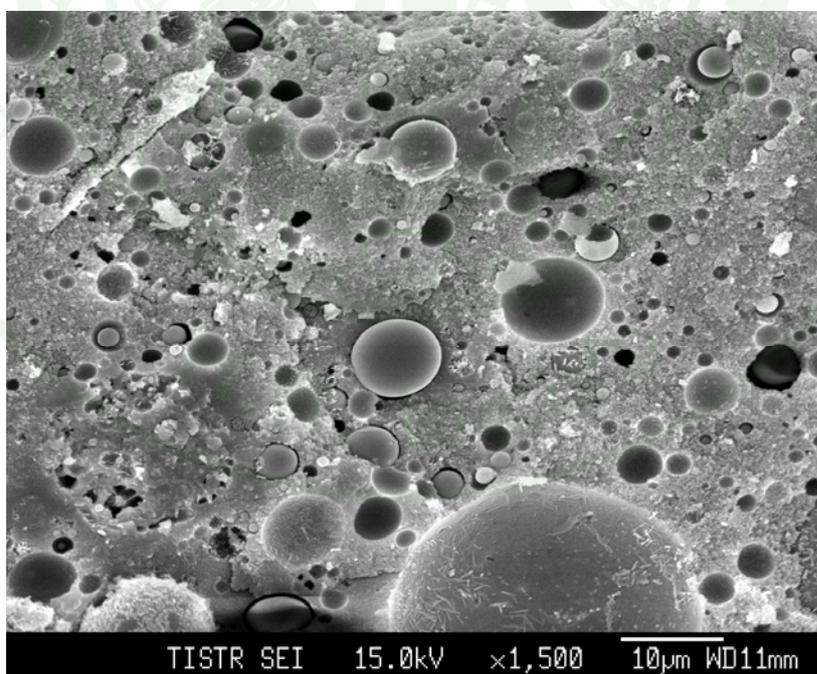
โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้งสองความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าอนุภาคถ้ำลอยในจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความขรุขระและเกิดสภาพเจลโดยรอบ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารจีโอโพลิเมอร์ โดยซิลิกาและอะลูมินาในถ้ำลอยจะถูกชะออกมาจากผิวของถ้ำลอยโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตเกิดเป็นเจลขึ้นจากการเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาจากทั้งสองความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะ

เห็นว่าที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ มีการทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์กว่าเนื่องจากมีสภาพความเป็นเจลที่สมบูรณ์กว่าและผิวของถ้ำลอยชนิด F มีความขรุขระและเนื้อ มีสภาพความเป็นเจลมากกว่า เนื่องจากถ้ำลอยชนิด F มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาและอะลูมินามากกว่าจึงสามารถชะละลายได้ดีกว่าถ้ำลอยชนิด C อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่สมบูรณ์เพราะยังพบว่ายังมีพื้นที่ผิวบางส่วน ของถ้ำลอยยังคงเรียบเนื่องจากไม่มีการชะละลาย

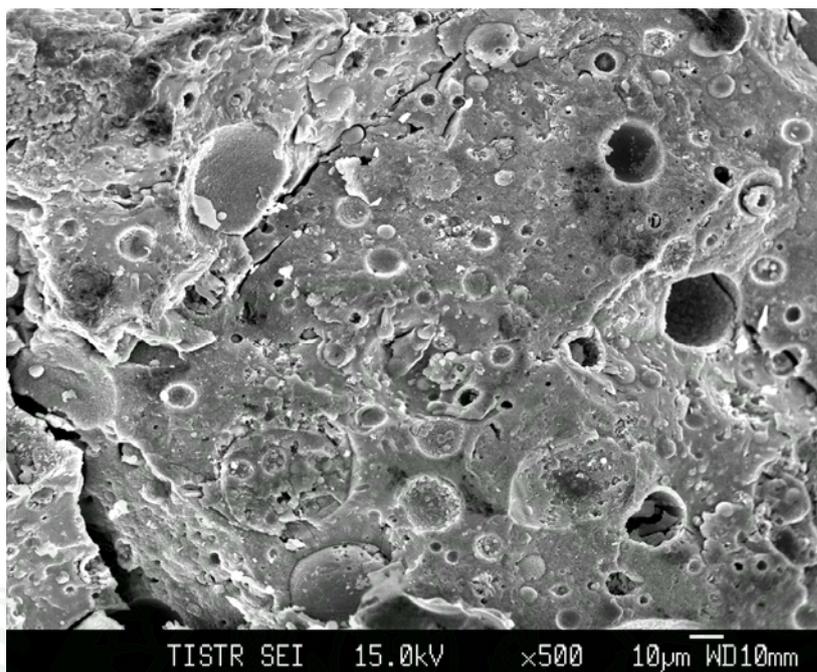
โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F มีการชะละลายได้ดีทั้งในอัตราส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 และ 14 โมลาร์ ดังแสดงในภาพที่ 15 - 21 โดยจะเห็นว่าอนุภาคของถ้ำลอยทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่จะมีการชะละลายได้เป็นจำนวนมากและจะตกผลึกให้เห็นเป็นโครงสร้างของเจลที่สมบูรณ์กว่าจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด C แต่อนุภาคของถ้ำลอยที่มีขนาดใหญ่ที่มีการชะละลายไม่หมดก็ยังคงเหลืออยู่เช่นกัน



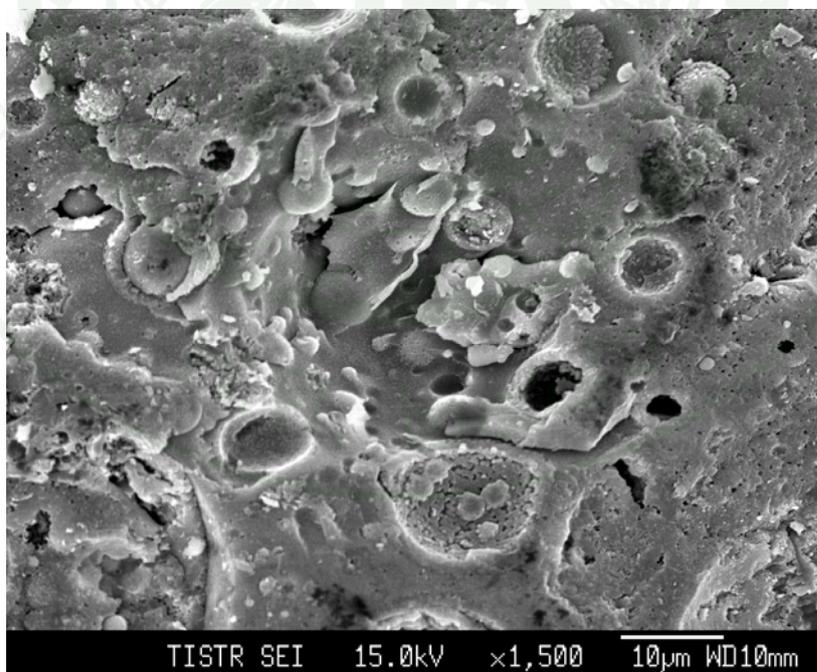
ภาพที่ 14 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 ที่กำลังขยาย 500 เท่า



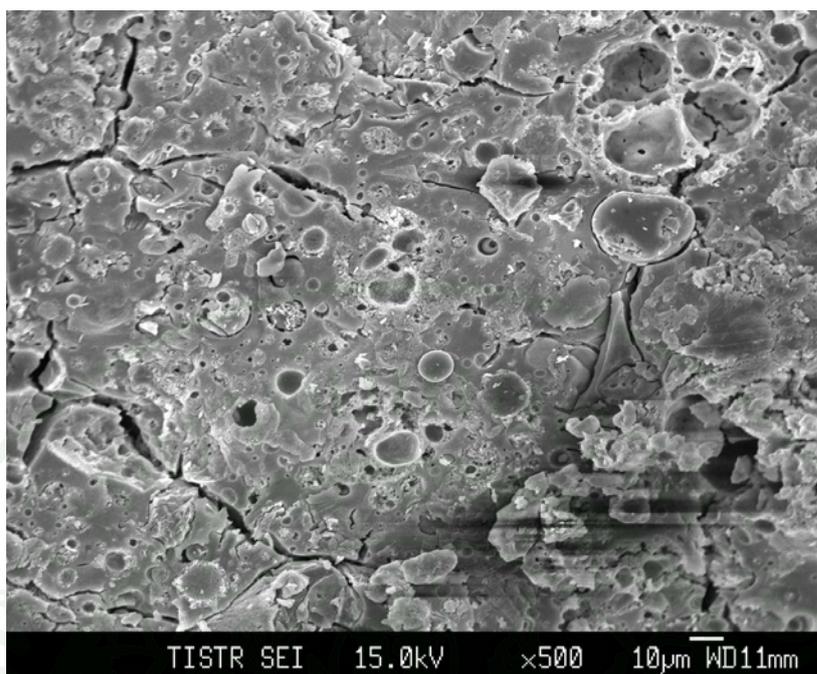
ภาพที่ 15 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



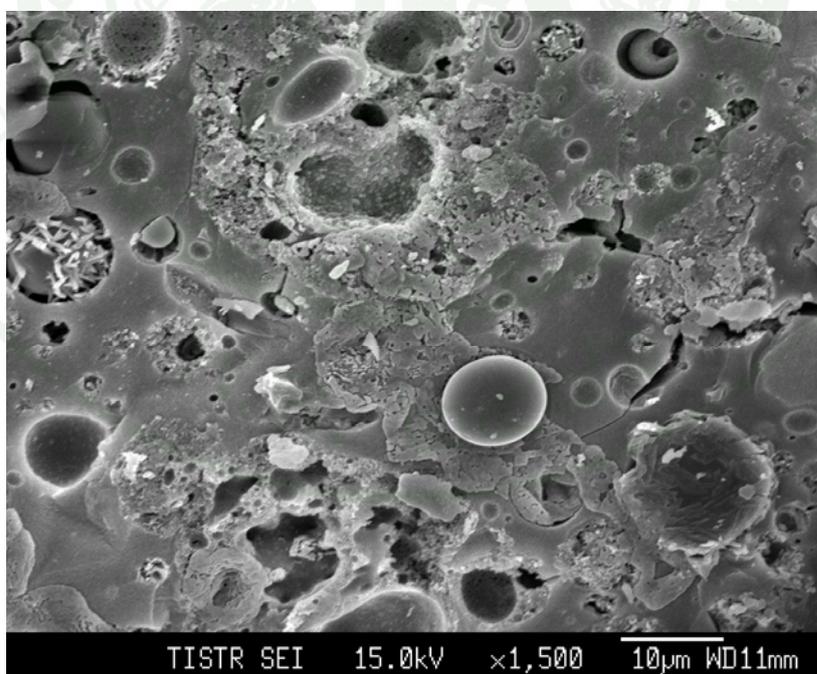
ภาพที่ 16 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 ที่กำลังขยาย 500 เท่า



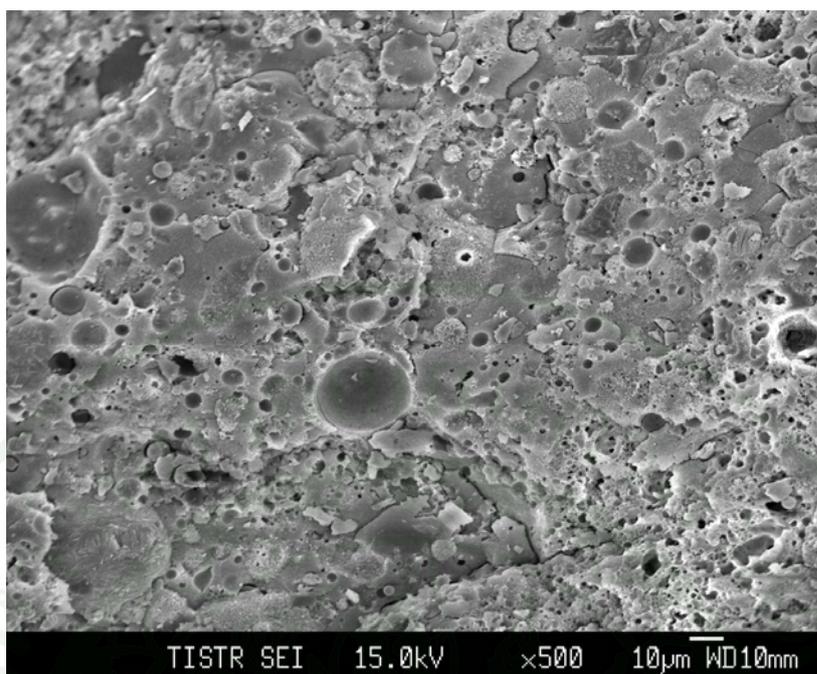
ภาพที่ 17 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



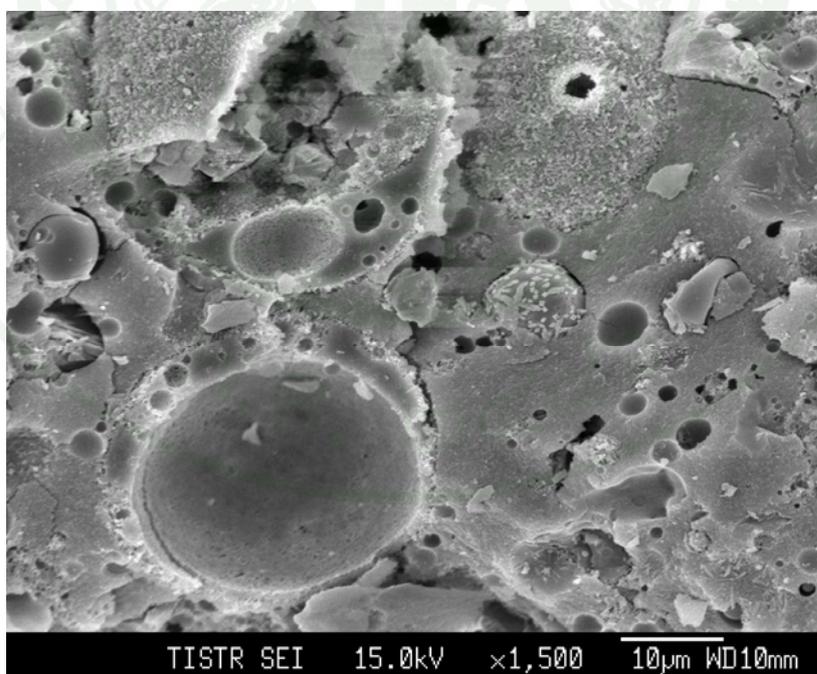
ภาพที่ 18 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของอีโพลีเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 ที่กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 19 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของอีโพลีเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



ภาพที่ 20 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของอีโพลีเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 ที่กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ 21 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของอีโพลีเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

5. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้เทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

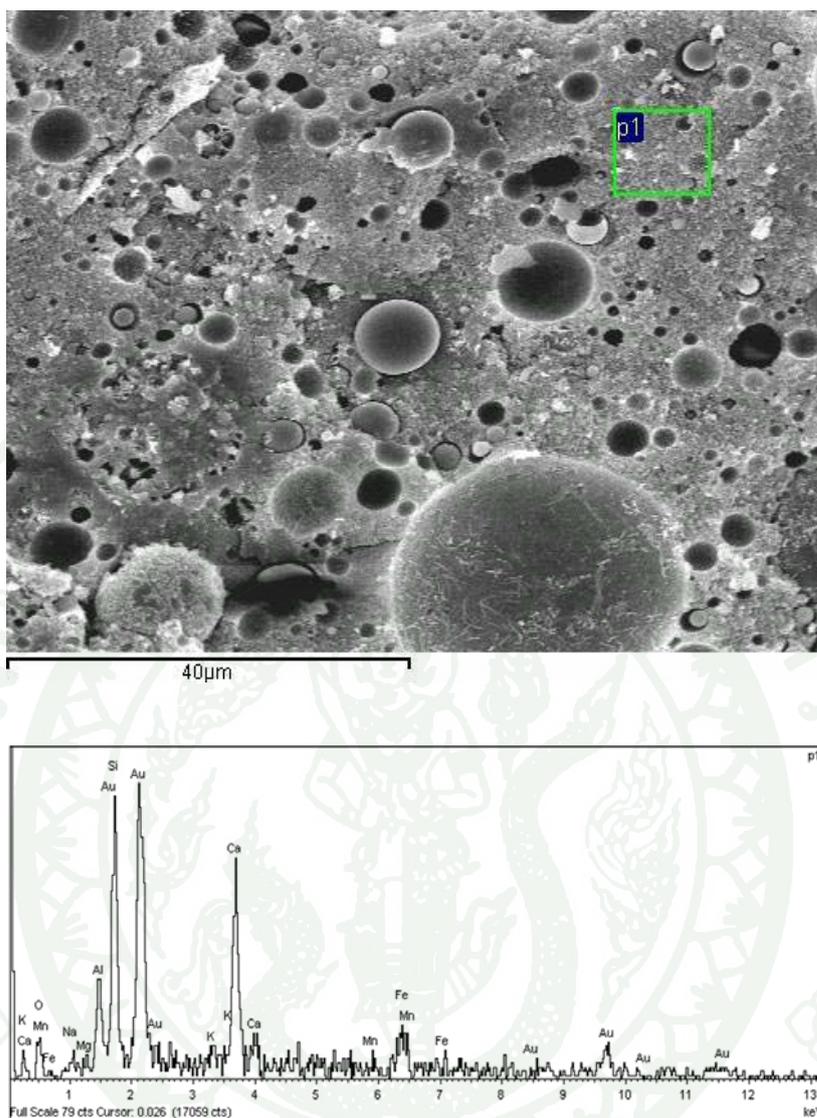
เทคนิค EDS เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ผิวของจีโอโพลิเมอร์ ให้เห็นถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน (Geopolymerisation mechanisms) โดยการใช้เทคนิค EDS ในการตรวจวัดความสามารถของซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการวัดค่าพื้นที่ผิว โดยค่าพื้นที่ผิวที่ได้เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความสามารถที่พื้นที่ผิวจะทำปฏิกิริยาในสารประกอบที่ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลว ภาพที่ 22 - 29 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของเถ้าลอยจำนวนมากได้ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยในขั้นต้นจะเป็นการชะละลายซิลิกาและอะลูมินาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าอนุภาคของเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่จะมีการชะละลายได้น้อยและเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ทันการ การชะละลายจะเกิดที่บริเวณผิวและจับตัวกันเป็นอนุกรมของโมเลกุลเล็ก ๆ ขึ้นต่อไปเป็นการทำปฏิกิริยาถูกโซที่โมเลกุลเล็ก ๆ เชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นและจะตกผลึกเป็นเจล ปฏิกิริยาจะขยายเพิ่มมากขึ้นเป็นเมตริกซ์ของจีโอโพลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นสูงทำให้เกิดกำลังรับแรงได้

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยเทคนิค EDS โดยเลือกพิจารณา 2 บริเวณ คือ Spectrum ในบริเวณที่มีสภาพการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ (P1) และ Spectrum ในบริเวณที่มีสภาพเป็นเจล (P2) พบว่าทั้งสองบริเวณประกอบด้วยออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) อะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมงกานีส (Mn) และเหล็ก (Fe) จากผลการวิเคราะห์จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณซิลิกาและอะลูมินามากกว่าเถ้าลอยชนิด C การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งสองความเข้มข้นกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C ให้ผลไปในแนวทางเดียวกันคือในบริเวณที่มีสภาพการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์พบปริมาณซิลิกามากกว่าบริเวณที่มีสภาพเป็นเจล แสดงว่ามีการชะละลายซิลิกาออกมาได้น้อย การทำปฏิกิริยาจึงไม่สมบูรณ์ ส่วนปริมาณของอะลูมินามีปริมาณใกล้เคียงกันทั้งสองบริเวณแสดงว่ามีการชะละลายออกมาได้น้อยเช่นกัน ส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F ทั้งสองบริเวณมีการชะละลายซิลิกาได้ดีในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ แต่ที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ การชะละลายซิลิกาทั้งสองบริเวณมีปริมาณใกล้เคียงกัน ในขณะที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งสองความเข้มข้นบริเวณที่มีสภาพเป็นเจลมีปริมาณอะลูมินาน้อยกว่าบริเวณที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์มาก การชะละลายอะลูมินาจากเถ้าลอยชนิด F จึงเกิดขึ้นน้อย

ผลของค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4 จีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด C ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ จะมีอัตราส่วนระหว่าง Na/Al และ Si/Al ประมาณ 0.12 และ 2.13 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ จะมีค่าประมาณ 0.88 และ 2.18 ตามลำดับ จะเห็นว่าอัตราส่วนไม่มีการลดลง ดังนั้นการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นไม่มีผลต่อการชะละลายอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) มากนัก ส่วนจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด F การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ จะมีอัตราส่วนระหว่าง Na/Al และ Si/Al ประมาณ 1.14 และ 1.92 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ จะมีค่าประมาณ 0.40 และ 1.61 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้น มีผลทำอัตราส่วนดังกล่าวลดลงถ้ำลอยชนิด F จึงมีการชะละลายอะลูมิเนียมไอออนได้ดีกว่าถ้ำลอยชนิด C

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยเทคนิค EDS

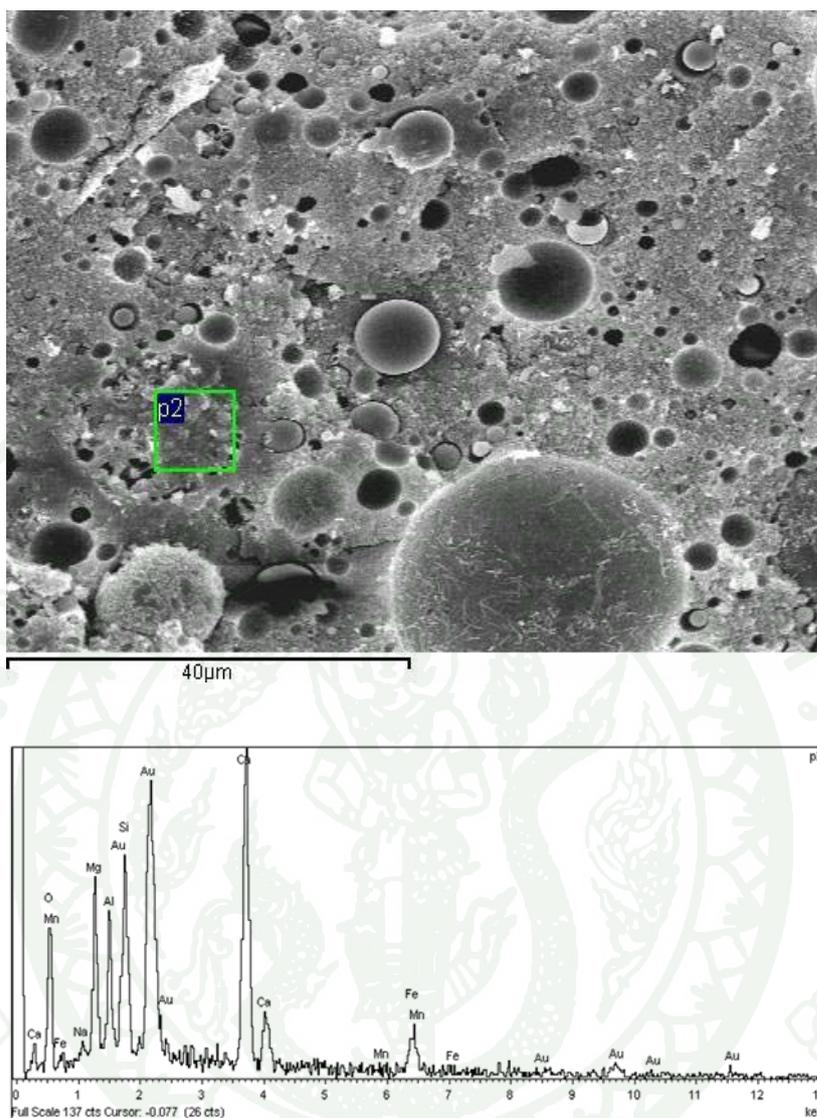
Mixture Symbol	Spectrum	Element Content (wt%)								
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
GC-55-6M-0	P1	38.10	0.99	0.42	5.20	17.40	1.61	20.10	2.32	13.80
	P2	36.90	0.54	9.50	7.26	9.19	-	26.40	0.55	9.67
	Average	37.50	0.77	4.96	6.23	13.30	1.61	23.25	1.44	11.74
GC-55-14M-0	P1	41.10	10.90	0.42	8.13	20.60	2.08	9.64	0.90	6.34
	P2	35.70	2.44	-	6.94	12.20	3.53	24.50	-	14.70
	Average	38.40	6.67	0.42	7.54	16.40	2.81	17.07	0.90	10.52
GF-55-6M-0	P1	42.70	18.60	-	17.90	16.60	0.14	2.26	-	1.88
	P2	45.70	8.59	-	6.02	29.30	0.88	8.08	-	1.59
	Average	44.20	13.60	-	11.96	22.95	0.51	5.17	-	1.74
GF-55-14M-0	P1	49.30	-	-	22.90	24.30	0.95	1.69	0.70	0.13
	P2	44.80	6.26	1.44	8.21	25.70	0.55	10.80	1.29	0.97
	Average	47.05	6.26	1.44	15.56	25.00	0.75	6.25	1.00	0.55



ภาพที่ 22 EDS ของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีจากถ้ำลอยชนิด C
ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 (Spectrum P1)

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีจากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS
ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 (Spectrum P1)

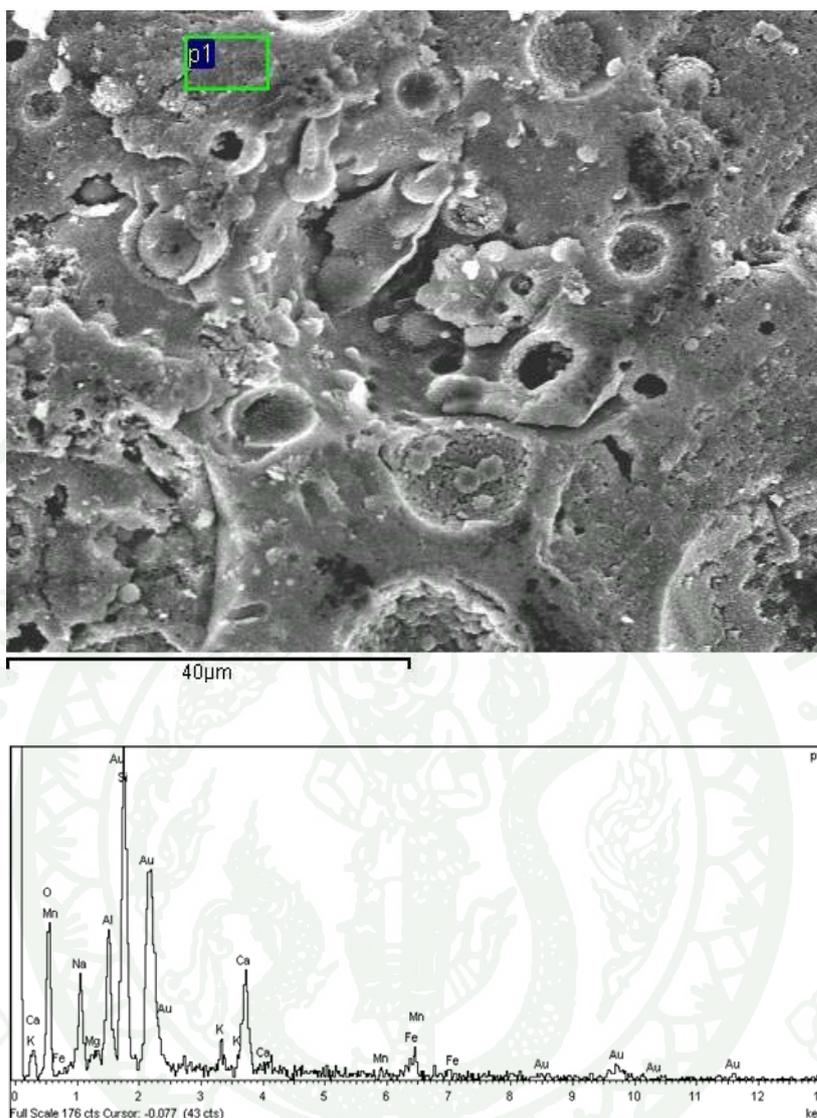
Mixture Symbol	Spectrum	Element Content (wt%)								
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
GC-55-6M-0	P1	38.10	0.99	0.42	5.20	17.40	1.61	20.10	2.32	13.80



ภาพที่ 23 EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C
ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 (Spectrum P2)

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS
ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 (Spectrum P2)

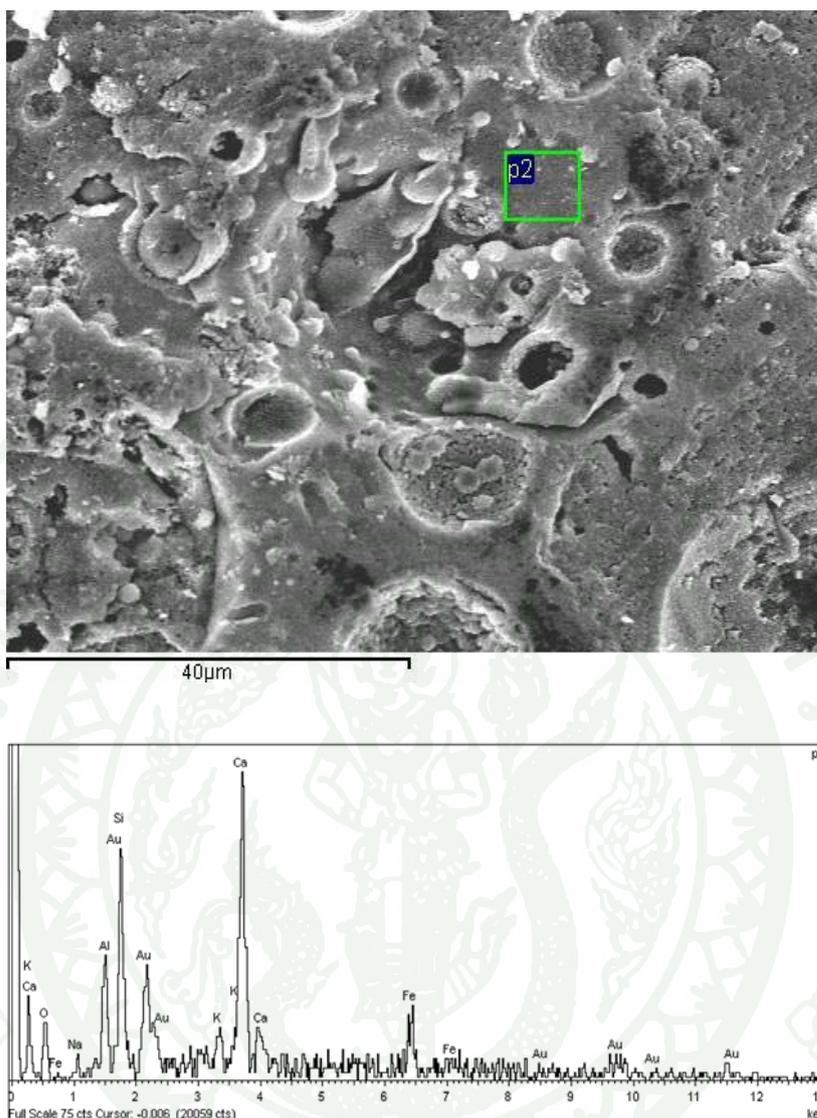
Mixture Symbol	Spectrum	Element Content (wt%)								
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
GC-55-6M-0	P2	36.90	0.54	9.50	7.26	9.19	-	26.40	0.55	9.67



ภาพที่ 24 EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C
ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 (Spectrum P1)

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS
ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 (Spectrum P1)

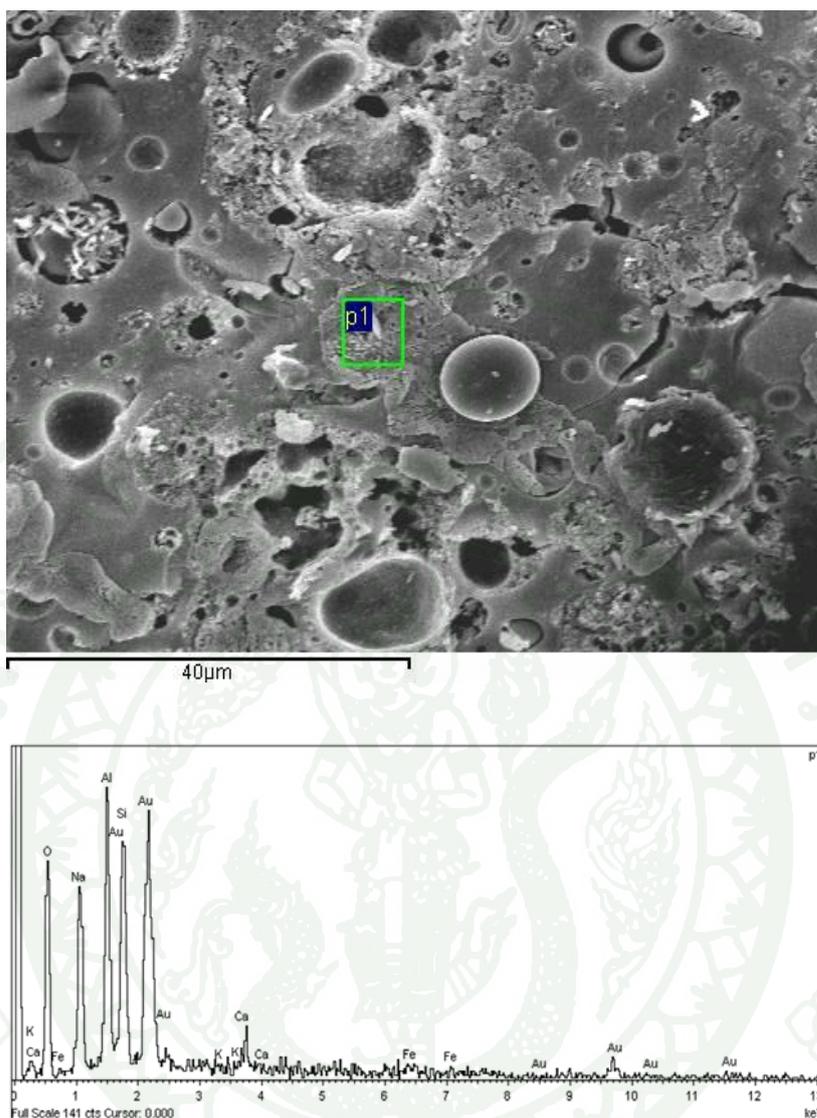
Mixture Symbol	Spectrum	Element Content (wt%)								
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
GC-55-14M-0	P1	41.10	10.90	0.42	8.13	20.60	2.08	9.64	0.90	6.34



ภาพที่ 25 EDS ของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่จากถ้ำลอยชนิด C
ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 (Spectrum P2)

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS
ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0 (Spectrum P2)

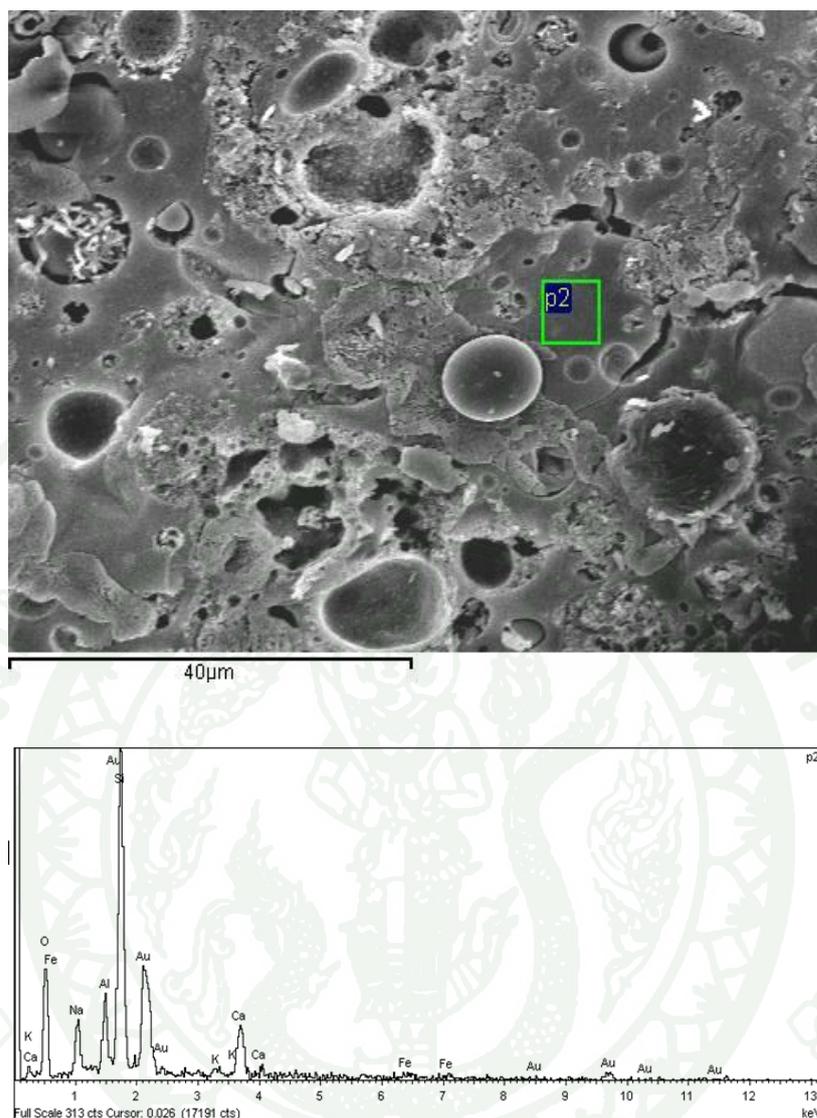
Mixture Symbol	Spectrum	Element Content (wt%)								
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
GC-55-14M-0	P2	35.70	2.44	-	6.94	12.20	3.53	24.50	-	14.70



ภาพที่ 26 EDS ของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้จากถ้ำลอยชนิด F
ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 (Spectrum P1)

ตารางที่ 9 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS
ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 (Spectrum P1)

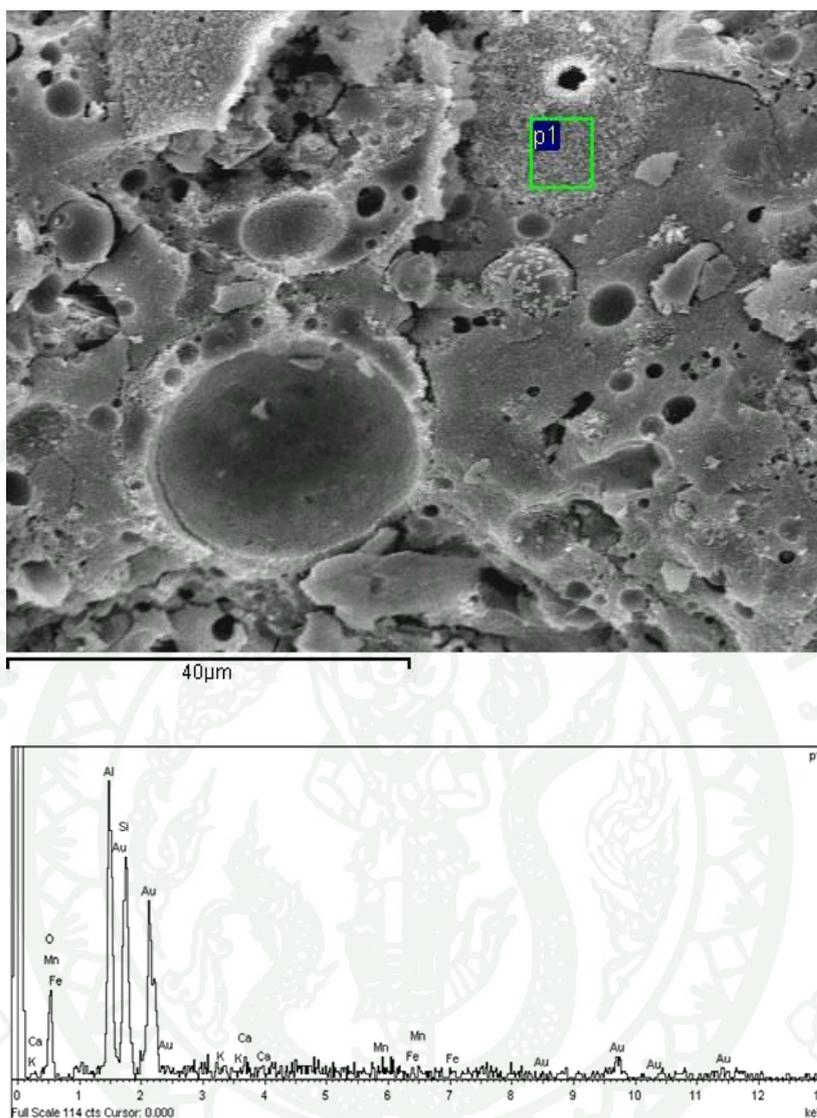
Mixture Symbol	Spectrum	Element Content (wt%)								
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
GF-55-6M-0	P1	42.70	18.60	-	17.90	16.60	0.14	2.26	-	1.88



ภาพที่ 27 EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F
ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 (Spectrum P2)

ตารางที่ 10 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS
ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0 (Spectrum P2)

Mixture Symbol	Spectrum	Element Content (wt%)								
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
GF-55-6M-0	P2	45.70	8.59	-	6.02	29.30	0.88	8.08	-	1.59



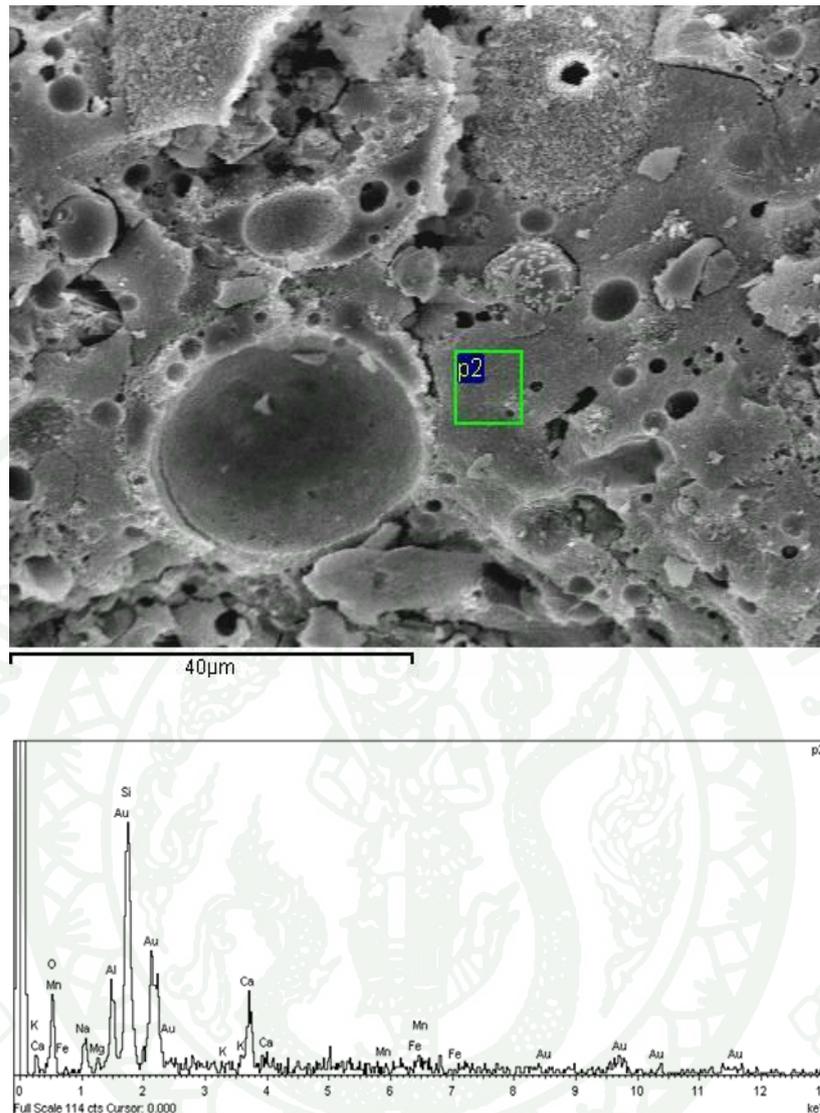
ภาพที่ 28 EDS ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F

ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 (Spectrum P1)

ตารางที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS

ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 (Spectrum P1)

Mixture Symbol	Spectrum	Element Content (wt%)								
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
GF-55-14M-0	P1	49.30	-	-	22.90	24.30	0.95	1.69	0.70	0.13



ภาพที่ 29 EDS ของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีจากถ้ำลอยชนิด F

ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 (Spectrum P2)

ตารางที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีจากถ้ำลอยชนิด C ด้วยเทคนิค EDS

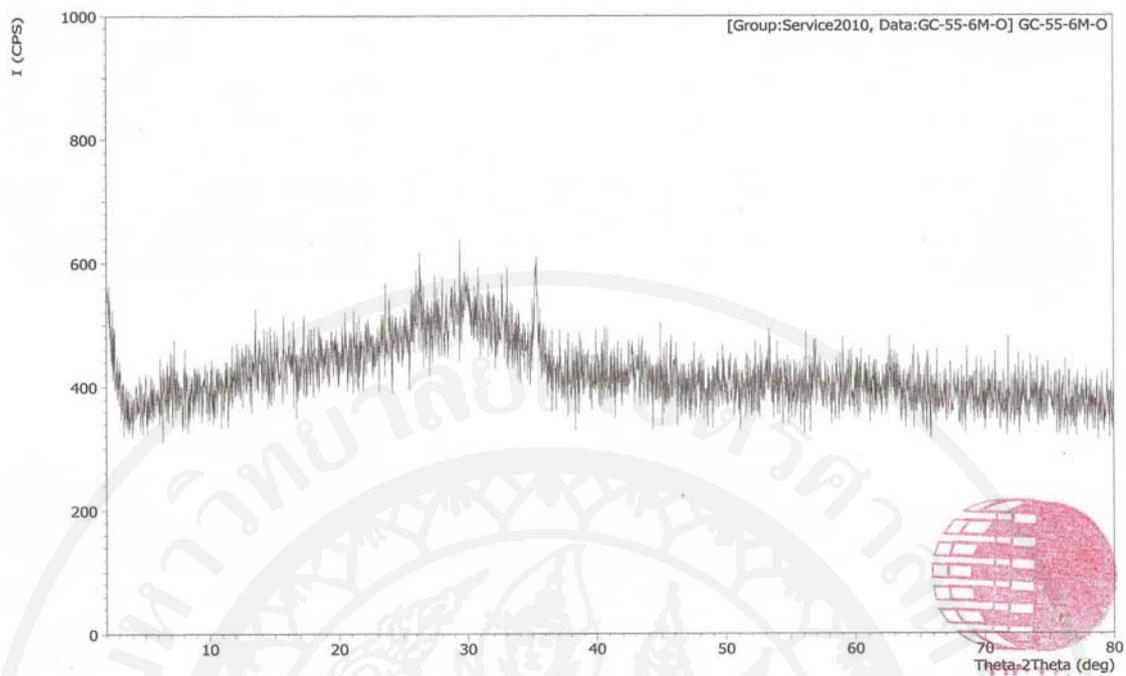
ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 (Spectrum P2)

Mixture Symbol	Spectrum	Element Content (wt%)								
		O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
GF-55-14M-0	P2	44.80	6.26	1.44	8.21	25.70	0.55	10.80	1.29	0.97

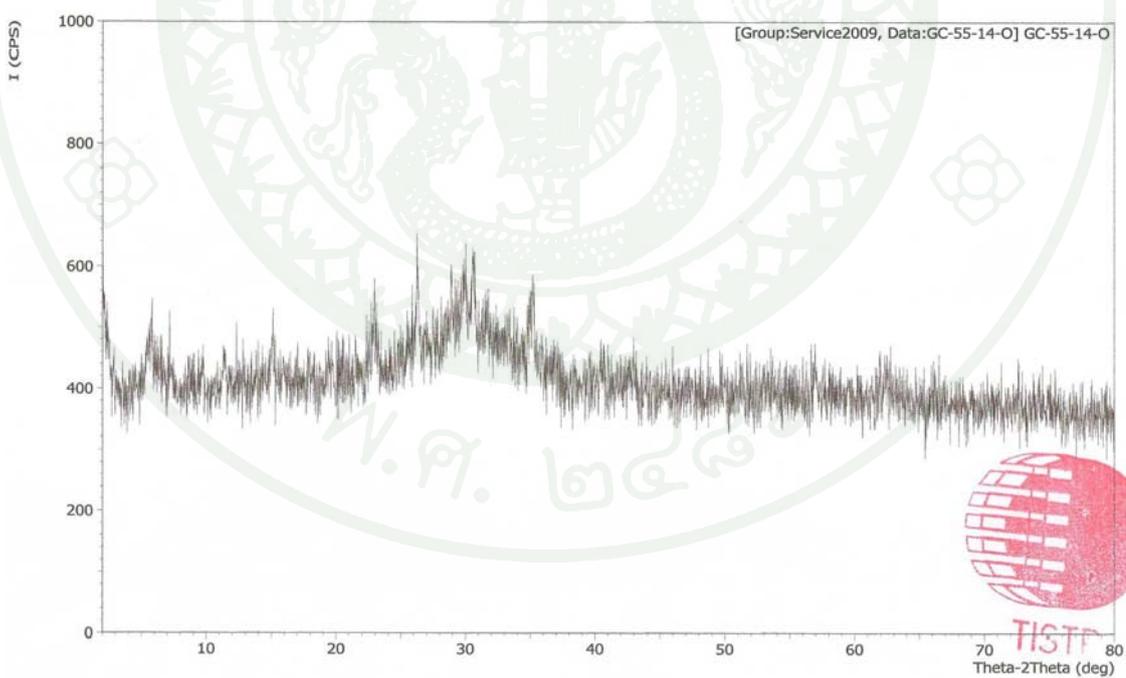
6. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystal Structure) โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X - Ray Diffraction, XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction, XRD) กับ จีโอโพลิเมอร์มีข้อจำกัดโดยธรรมชาติของจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous) อยู่มากกว่าความเป็นผลึก (Crystalline) ทำให้ไม่ทราบองค์ประกอบทางเคมีที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา แต่วิธีการดังกล่าวสามารถให้ข้อมูลของสภาพความเป็นผลึกของเถ้าลอยหรือสารตั้งต้นและสภาพผลึกภายหลังการทำปฏิกิริยาเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ทราบองค์ประกอบทางเคมีที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาหรือองค์ประกอบใหม่ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ภาพที่ 30 - 33 แสดงการวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซเรย์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0, GC-55-14M-0, GF-55-6M-0 และ GF-55-14M-0 ตามลำดับ โดยการหักเหของมุมปรากฏที่มุม 2-Theta จาก 2 - 80 องศา Step size 0.02 องศา และ Scan speed 0.60 sec/step

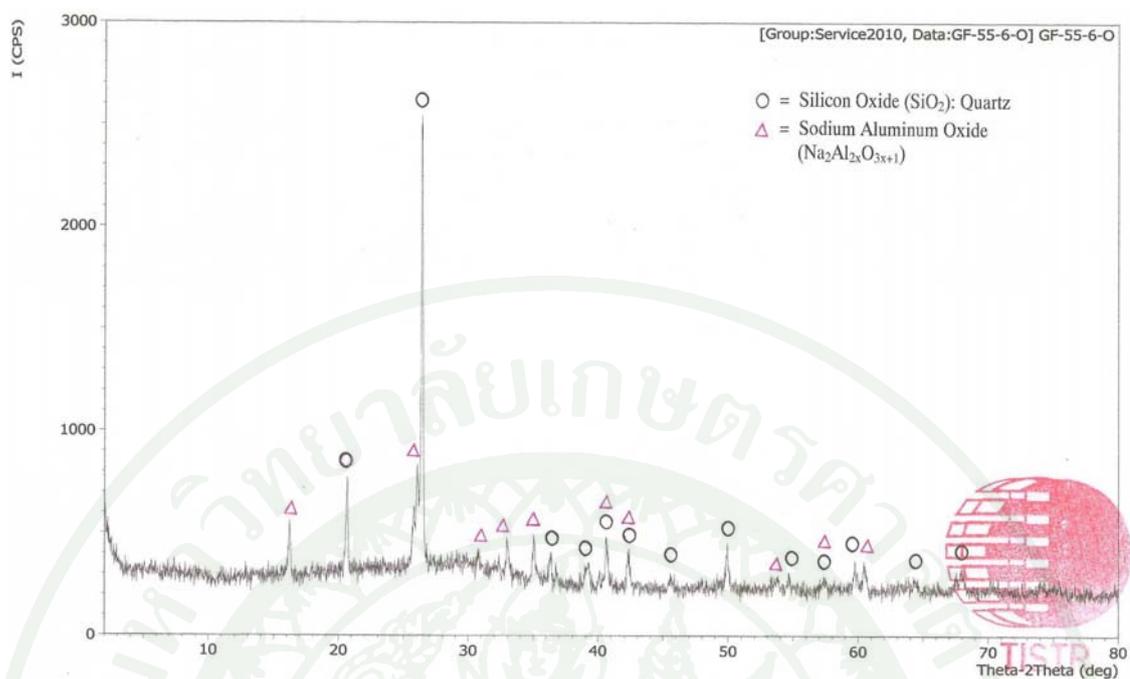
จากผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C ทั้งสองอัตราส่วนผสมมีความเป็นอสัณฐานอยู่มากกว่าความเป็นผลึกและมีความเป็นผลึกต่ำ (Low Crystallinity) โดยมีลักษณะเป็นจุดยอดพีค (Board Peak) ในช่วงระหว่าง 25 - 35 องศาแต่จึงไม่พบจุดยอด (Peak Intensity) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 30 - 31 จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F ทั้งสองอัตราส่วนผสมประกอบด้วยเฟสที่เป็นผลึก (Crystalline phase) และเฟสที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous phase) โดยเฟสที่เป็นผลึกประกอบด้วยซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) โซเดียม (Na) และออกซิเจน (O) ซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบซิลิกอนออกไซด์ (Sodium Oxide, SiO_2) และโซเดียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Sodium Aluminium Oxide, $\text{Na}_2\text{Al}_{2x}\text{O}_{3x+1}$) โดยทั้งสองอัตราส่วนมีจุดยอดของซิลิกอนออกไซด์อยู่ที่ประมาณ 26.50 องศา ดังแสดงในภาพที่ 32 - 33



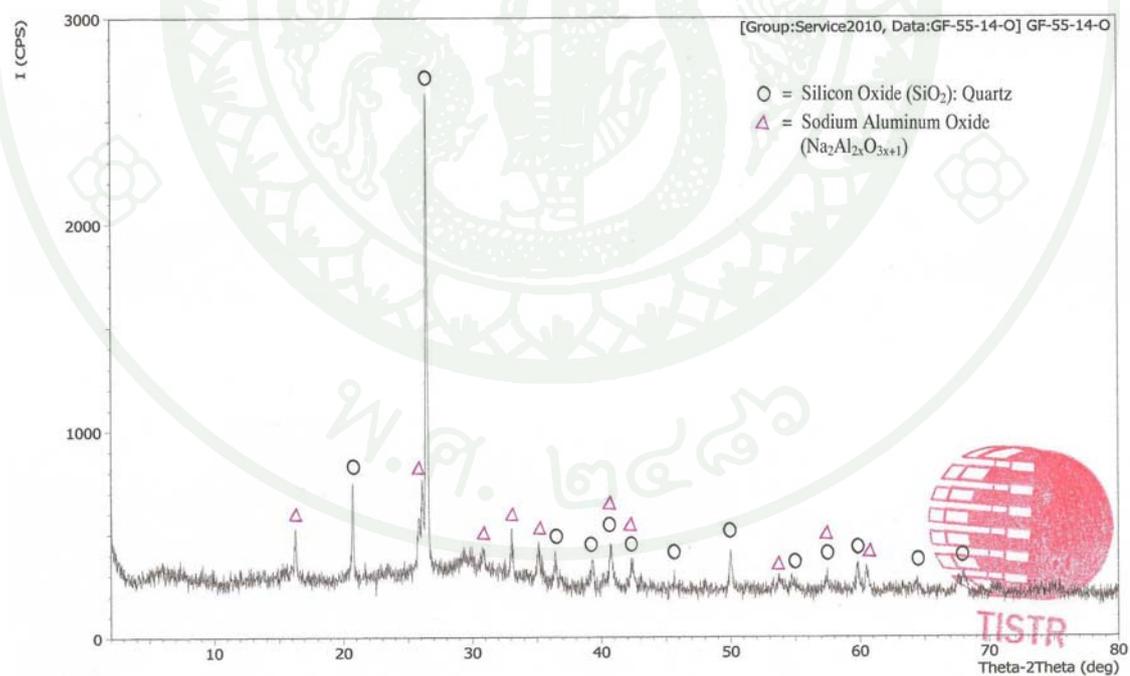
ภาพที่ 30 XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0



ภาพที่ 31 XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0



ภาพที่ 32 XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0



ภาพที่ 33 XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0

7. การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของโพรง (Pore Size and Pore Size Distribution) ด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

จากการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้ง 4 อัตราส่วนผสมด้วยวิธีเอ็มไอพี พบว่าปริมาตรโพรงของรวมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (Total Porosity) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของปริมาตรของพรอทที่ถูกอัดเข้าสู่ก้อนตัวอย่างตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ (Total Intruded Volume) ต่อปริมาตรของก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (Sample Bulk Volume) สามารถนำมาจำแนกเป็นโพรงประเภทต่าง ๆ ได้ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเรียงจากขนาดใหญ่ไปหาเล็กดังต่อไปนี้ คือ โพรงขนาดใหญ่เทียบได้กับโพรงอากาศ (Air Void or Entrapped Air) ที่เกิดในคอนกรีต หมายถึง โพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตร ขึ้นไป โพรงขนาดกลางเทียบได้กับโพรงคาปิลลารี (Capillary Pore) หมายถึง โพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.01 - 10 ไมโครเมตร และโพรงขนาดเล็กเทียบได้กับโพรงเจล (Gel Pore) หมายถึง โพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.01 ไมโครเมตร แต่ด้วยข้อจำกัดในการวิเคราะห์ของวิธีเอ็มไอพี เนื่องจากความดันของพรอทที่ใช้อัดเข้าไปในเนื้อวัสดุนั้นต้องมีค่าไม่เกินประมาณ 35,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทำให้โพรงขนาดเล็กที่สามารถวัดได้จึงมีขนาดประมาณ 0.007 ไมโครเมตร เท่านั้น ดังนั้นโพรงขนาดเล็กที่เกิดจากการวัดด้วยวิธีเอ็มไอพีนี้จึงเป็นโพรงที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.007 - 0.01 ไมโครเมตร โดยหลักการคำนวณหาค่าปริมาตรโพรงชนิดต่าง ๆ นั้น สามารถพิจารณาได้จากค่าความแตกต่างของปริมาตรของพรอทส่วนที่ถูกอัดเข้าสู่โพรงในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยความดัน ความดันที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะถูกใช้ในการแปลความหมายขนาดของโพรงในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงตามลำดับ โดยในช่วงเริ่มต้นความดันที่ใช้จะมีค่าเริ่มที่ศูนย์ถึงประมาณ 1.2 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ขนาดของโพรงที่วัดได้ในช่วงนี้จึงเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีขนาดประมาณ 140 - 200 ไมโครเมตร จนกระทั่งเมื่อเพิ่มความดันถึงค่าประมาณ 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าความดันระดับนี้จะสามารถตรวจพบโพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมโครเมตร และหลังจากนั้นเพิ่มความดันจนถึงค่าประมาณ 21,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะสามารถตรวจพบโพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01 ไมโครเมตรได้ การทราบปริมาตรของพรอทส่วนที่ถูกแทนที่เข้าสู่โพรงในช่วงนี้คือตั้งแต่ 20 - 21,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จึงสามารถทราบค่าปริมาตรโพรงขนาดปานกลางที่มีขนาด 0.01 - 10 ไมโครเมตรได้ และเมื่อเพิ่มความดันต่อไปอีกพบว่าโพรงที่ตรวจพบได้เป็นโพรงขนาดเล็กซึ่งต้องใช้ความดันพรอทในช่วง 21,000 - 35,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งค่าของโพรงขนาดเล็กที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.007 - 0.01 ไมโครเมตร และเนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องการใช้ความดันจึงไม่สามารถตรวจวัดโพรงขนาดเล็กบางส่วนได้ อย่างไรก็ตามในกรณีของคอนกรีตทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี

นั้นพบว่าปริมาณของโพรงขนาดเล็กในส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.007 ไมโครเมตร นั้นมีปริมาณน้อยมากและไม่ส่งผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์มากนักเมื่อเทียบกับโพรงขนาดปานกลาง ดังนั้นจึงไม่นำโพรงขนาดเล็กในส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.007 ไมโครเมตร มาประกอบการพิจารณา

ผลจากการวิเคราะห์ประเภทโพรงในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้ง 4 อัตราส่วนผสม พบว่าความสัมพันธ์ของปริมาณโพรงขนาดใหญ่ โพรงขนาดปานกลางและโพรงขนาดเล็กมีคุณลักษณะและแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ ทุกอัตราส่วนผสมประกอบด้วยโพรงขนาดปานกลางเป็นร้อยละ 80.17 - 94.28 ของปริมาณโพรงรวม พบโพรงขนาดเล็กและโพรงขนาดใหญ่มีปริมาณที่น้อยมาก โดยโพรงขนาดเล็กมีปริมาณร้อยละ 4.38 - 16.48 ของปริมาณโพรงรวม และโพรงขนาดใหญ่มีปริมาณร้อยละ 1.34 - 3.35 ของปริมาณโพรงรวม ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ปริมาณสัดส่วนของโพรงประเภทต่าง ๆ ในจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Mixture Symbol	Pore (%)			
	Largr Pore	Medium Pore	Small Pore	Total Porosity
GC-55-6M-0	0.61	42.83	1.99	45.43
	1.34	94.28	4.38	100.00
GC-55-14M-0	0.78	20.27	3.18	24.23
	3.22	83.66	13.12	100.00
GF-55-6M-0	0.72	32.17	3.12	36.01
	2.00	89.34	8.66	100.00
GF-55-14M-0	0.74	17.69	3.64	22.07
	3.35	80.17	16.48	100.00

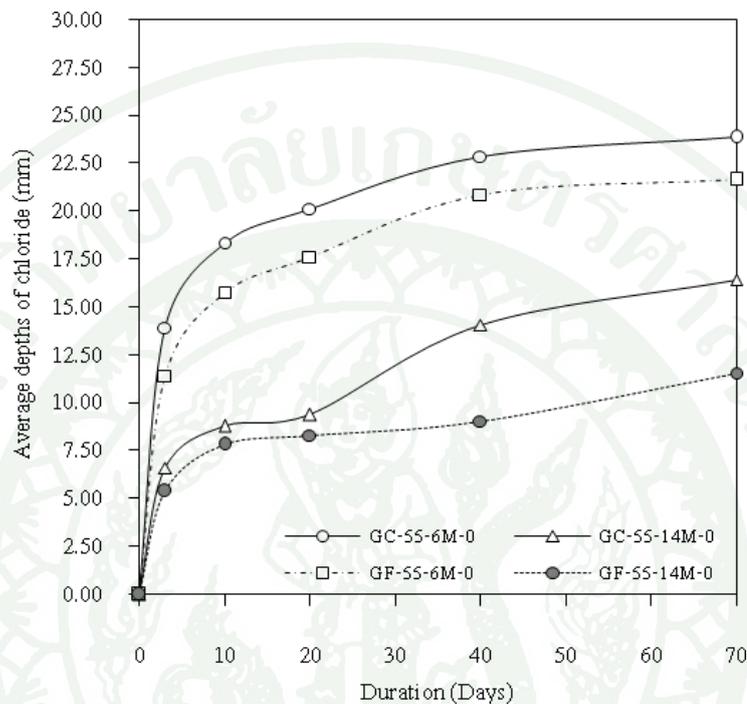
ลักษณะของโพรงขนาดต่าง ๆ สามารถอธิบายที่มาได้จากการศึกษาพฤติกรรมการเกิดโพรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีต โดยโพรงขนาดใหญ่เป็นโพรงที่ไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนผสม โดยมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับโพรงประเภทอื่น ๆ และจำนวนร้อยละของโพรงขนาดใหญ่ไม่สามารถอธิบายได้จากปัจจัยต่าง ๆ ในอัตราส่วนผสม ดังนั้นโพรงขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจึงน่าจะมี

สาเหตุมาจากปัจจัยต่าง ๆ ระหว่างการผสมและกระบวนการเทลงในแบบหล่อ เช่น ระยะเวลาการผสม การเข้ากันของส่วนผสม การกระตุ้น การเขย่าแบบ เป็นต้น และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณของโพรงขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวมีความเหนียวข้นมากกว่า ทำให้การกระตุ้นและการเขย่าแบบให้เนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แน่นตัว จึงทำได้ยากขึ้น ส่วนโพรงขนาดปานกลางและโพรงขนาดเล็กเป็นโพรงที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนผสม โดยโพรงขนาดปานกลางจะเป็นโพรงที่มีสัดส่วนมากที่สุดและเป็นโพรงที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ ในขณะที่โพรงขนาดเล็กเป็นโพรงที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยมาก และเกิดขึ้นในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ไม่มากนัก

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 13 จะพบโพรงขนาดปานกลางในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C มากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ มีผลทำให้โพรงขนาดปานกลางลดลงซึ่งจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดให้ผลเป็นไปในแนวทางเดียวกัน ในขณะที่จะพบโพรงขนาดเล็กในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F มากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณของโพรงขนาดเล็กเพิ่มขึ้นในขณะที่โพรงขนาดปานกลางลดลง เนื่องจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูง จะสามารถชะละลายสารซิลิกาและอะลูมินาในถ้ำลอยออกมาได้มาก แล้วทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตเกิดเป็นขนาดเล็กขึ้น การชะละลายออกมาได้มากทำให้เจลที่เกิดขึ้นไปอุดโพรงและช่องว่างต่าง ๆ รวมทั้งการชะละลายผิวของถ้ำลอยทำให้โพรงภายในถ้ำลอยลดลง จากการเปรียบเทียบปริมาณโพรงขนาดเล็กที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจากทั้งสองความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเห็นว่าที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ และการใช้ถ้ำลอยชนิด F มีการทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์กว่าเนื่องจากเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีสภาพความเป็นเจลมากกว่าจึงมีปริมาณโพรงขนาดเล็กที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในภาพที่ 14 - 21

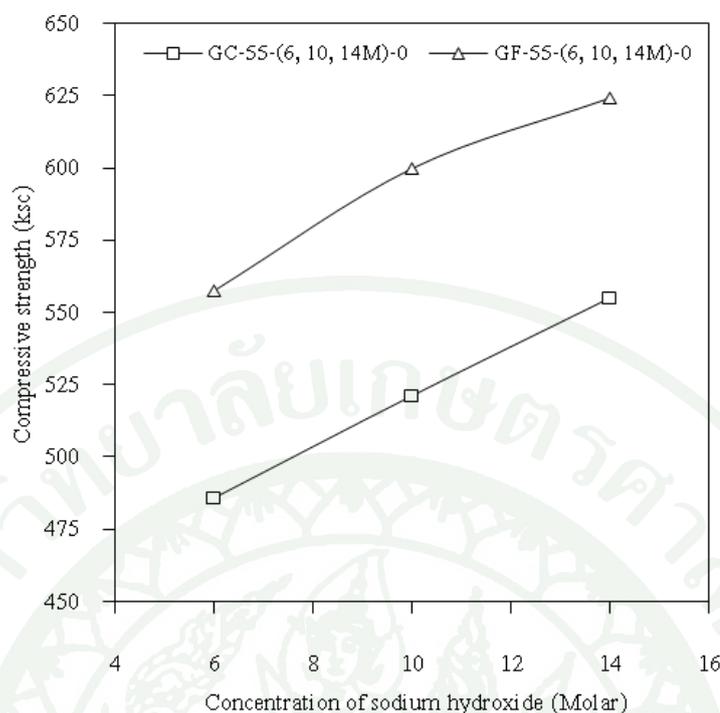
จากภาพที่ 34 แสดงให้เห็นระยะการซึมผ่านของคลอไรด์ ซึ่งพบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีผลทำให้การต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณโพรงขนาดปานกลางในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ดังแสดงในตารางที่ 13 โดยอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณโพรงขนาดปานกลางมากจะมีผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์สูงขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อของจีโอโพลิเมอร์จะต้องอาศัยระบบ

โพรง (Pore System) เป็นช่องทาง โดยโพรงขนาดปานกลางนั้นส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการซึมผ่านได้ (Permeability) และมีอิทธิพลอย่างมากต่อความทนทานของจีโอโพลิเมอร์ (Durability) อีกทั้งยังเป็นโพรงที่มีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับโพรงประเภทอื่น ๆ



ภาพที่ 34 การซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์เพศจากถ้ำลอยชนิด C และชนิด F

ภาพที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกำลังรับแรงอัด โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงมีผลทำให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ในการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของโพรงจึงพบปริมาณโพรงขนาดปานกลางลดลง ในขณะที่เดียวกันก็พบปริมาณโพรงขนาดเล็กเพิ่มขึ้นแต่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดน้อยมากเมื่อเทียบกับโพรงขนาดปานกลาง ในขณะที่โพรงอากาศซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงอัดมากที่สุด แต่เนื่องจากพบในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่ส่งผลต่อการกำลังรับแรงอัด ปริมาณโพรงขนาดปานกลางซึ่งที่ปริมาณมากที่สุดในแต่ละอัตราส่วนผสมส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด โดยปริมาณโพรงที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงและปริมาณโพรงในจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด F มีปริมาณที่น้อยกว่าจึงทำให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่า



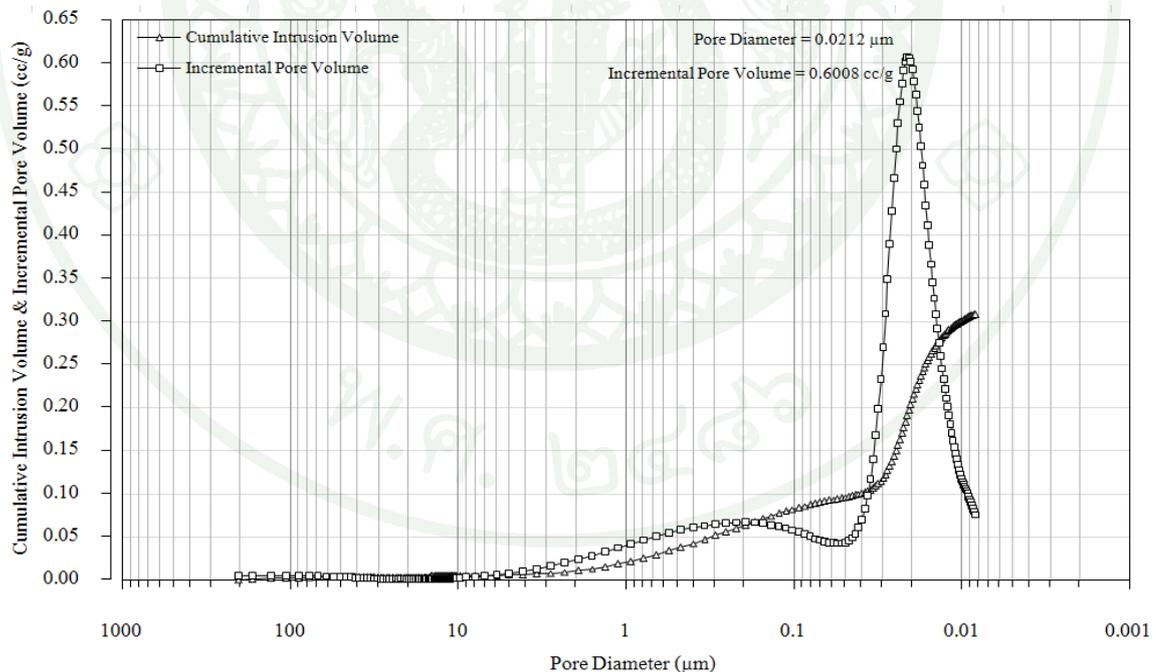
ภาพที่ 35 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C และชนิด F

ตารางที่ 14 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดโพรง (Pore Diameter) ที่มีการกระจายตัวสูงสุด ของโพรงรวม (Total Porosity) และการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง (Incremental Pore Volume) พบว่าขนาดโพรงที่กระจายตัวในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดมีขนาดตั้งแต่ 0.0072 - 0.2310 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นประเภทโพรงขนาดเล็ก โดยโพรงดังกล่าวมีผลน้อยมากต่อกำลังรับแรงอัดและการซึมผ่านของคลอไรด์ จากตัวอย่างอัตราส่วนผสมที่ทำการวิเคราะห์มีการเปลี่ยนระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของเถ้าลอย โดยจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นมีผลทำให้ขนาด ปริมาตรรวมและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในทั้งสองอัตราส่วนผสมลดลงโดยผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 36 - 41 ส่วนผลการทดสอบของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F ก็เป็นไปในแนวทางเดียวกัน แต่จะมีการลดลงของค่าต่าง ๆ มากกว่าการใช้เถ้าลอยชนิด C ยกเว้นอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นกลับทำให้โพรงมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณโพรงรวมก็มีปริมาณที่ลดลงและมีการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงที่น้อยมากคือ 0.0730 มล./ก. ดังแสดงในภาพที่ 37 ผลการทดสอบทั้ง 4 อัตราส่วนผสมมีความสอดคล้องกับการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์และกำลังรับแรงอัด โดยการที่ขนาดโพรงที่มีการกระจายตัวสูงสุด ปริมาตรโพรงรวมและการเพิ่มขึ้น

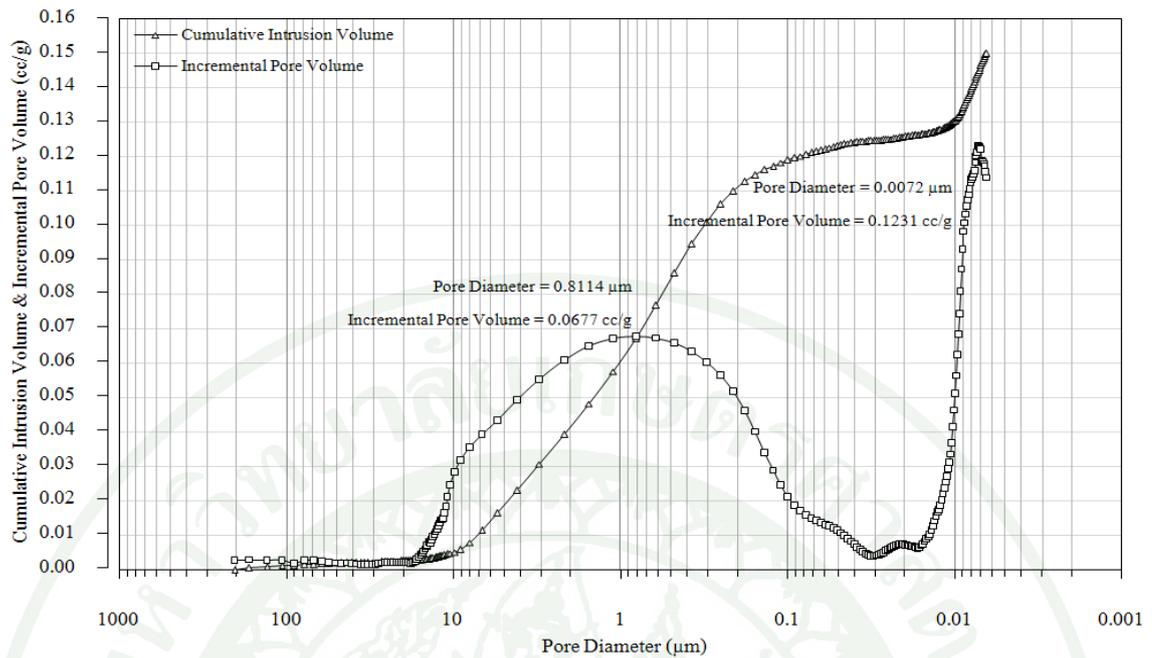
ของปริมาณโพรงลดลงจะมีผลทำให้มีการซึมผ่านที่ยากขึ้นและกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ผลการทดสอบยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายของโครงสร้างจุลภาค โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้มีการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันได้สมบูรณ์ โดยเกิดการชะละลายซิลิกาและอะลูมินาในถ้ำลอยชนิด F ได้มากกว่าถ้ำลอยชนิด C เนื้อของจีโอโพลิเมอร์จึงมีสภาพความเป็นเจลที่มากกว่า ค่าต่าง ๆ ของโพรงจึงลดลง

ตารางที่ 14 ขนาดและการกระจายตัวของโพรงในจีโอโพลิเมอร์เพสต์

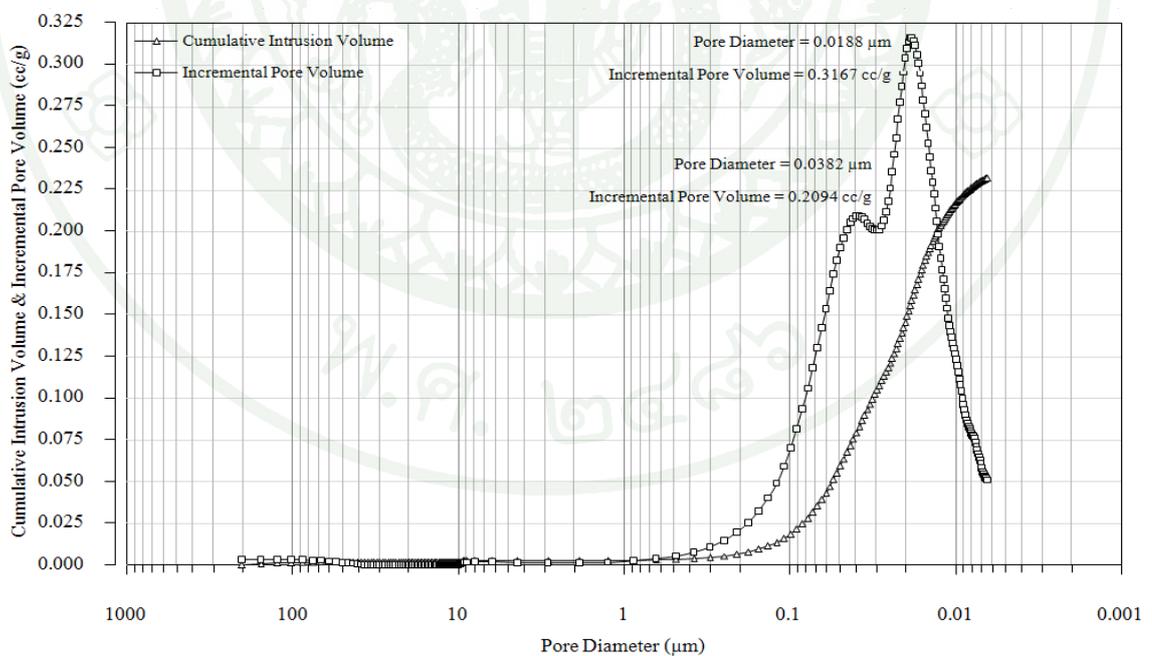
Mixture Symbol	Pore Diameter (μm)	Total Porosity (%)	Incremental Pore Volume (cc/g)
GC-55-6M-0	0.0212	45.43	0.6008
GC-55-14M-0	0.0072	24.23	0.1231
GF-55-6M-0	0.0188	36.01	0.3167
GF-55-14M-0	0.2310	22.07	0.0730



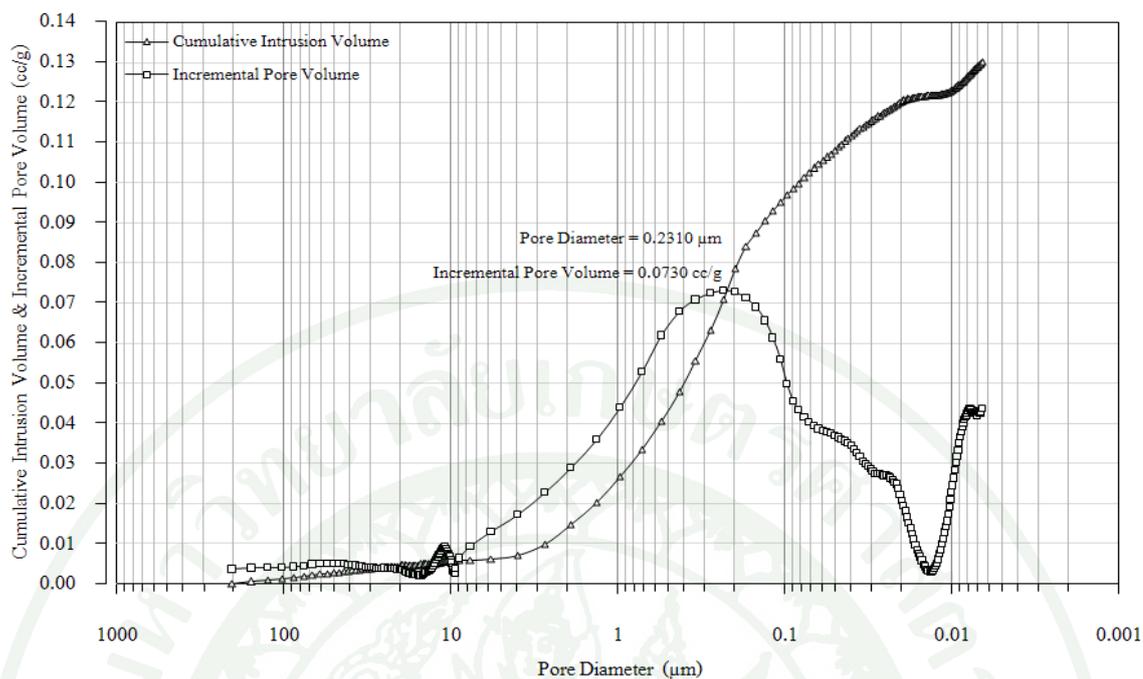
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาณโพรงและการกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0



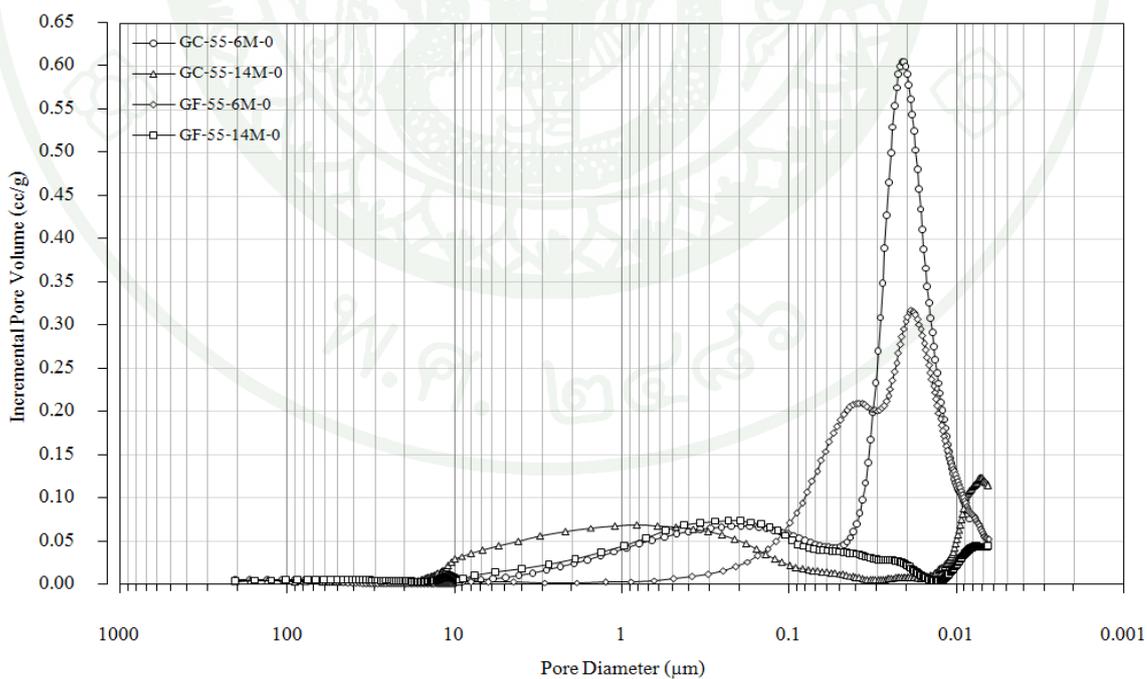
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงและการกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถาลอยชนิด C ในอัตราส่วนผสม GC-55-14M-0



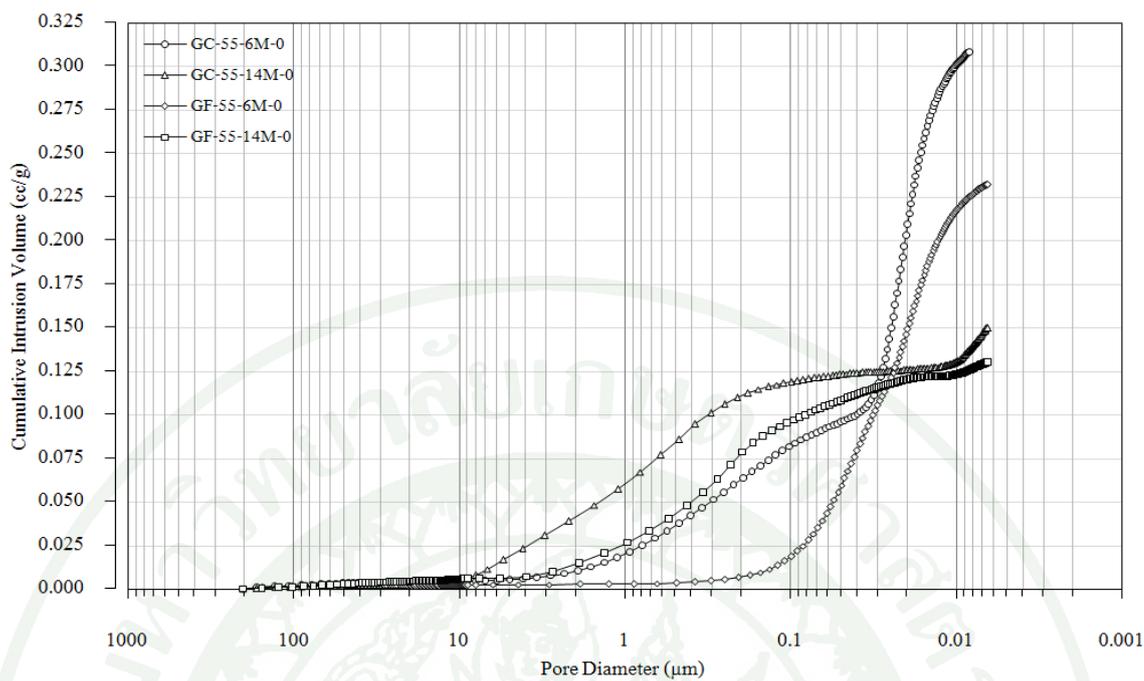
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงและการกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถาลอยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-6M-0



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงและการกระจายของโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถั่วลยชนิด F ในอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0



ภาพที่ 40 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง



ภาพที่ 41 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการกระจายของโพรง

วิจารณ์

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์

1.1 กำลังรับแรงอัด

ปัจจัยที่มีผลกำลังรับแรงอัดประกอบด้วย

1.1.1 อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย

การใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยสูงขึ้น มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารละลายต่างมากขึ้นและลดปริมาณเถ้าลอยลง ส่วนผสมจะมีความเหลว ทำให้เหลือสารละลายที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาไม่หมดจึงเกิดโพรงขนาดเล็กในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sathonsaowaphak *et al.* (2009) โดยได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดของเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) กัดขนาด โดยใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย 0.325 - 0.709 พบว่าที่อัตราส่วน 0.325 ให้กำลังรับแรงอัดที่ต่ำมาก เนื่องจากการใช้อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยที่ต่ำมาก อัตราส่วนผสมจะมีความแห้งทำให้ส่วนผสมเข้ากันไม่ดี การทำปฏิกิริยาจึงไม่สมบูรณ์ รวมทั้งขั้นตอนการเทลงแบบก็ยากต่อการทำให้อัดตัวแน่นจึงมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงและในอัตราส่วนตั้งแต่ 0.429 - 0.709 จะให้กำลังรับแรงอัดลดลงจาก 52 - 42 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ รวมทั้ง Hardjito *et al.* (2008) ได้ศึกษาอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นจนให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อัตราส่วน 0.40 จากนั้นอัตราส่วนที่สูงกว่านี้เป็นการเพิ่มสารละลายต่างให้อัตราส่วนผสมทำให้ส่วนผสมมีความเหลว กำลังรับแรงอัดจึงลดลง

1.1.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจะสามารถชะละลายซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยได้ดีกว่าความเข้มข้นต่ำ ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้สมบูรณ์และเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตจึงกลายเป็นเจล ทำให้เนื้อของจีโอโพลิเมอร์มีความทึบแน่นจึงมีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น จากการศึกษาของ Sathonsaowaphak *et al.* (2009) ซึ่งได้ทำการศึกษาผล

ของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของถ้ำก้นเตา (Bottom Ash) คัดขนาด พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จีโอโพลิเมอร์จะมีความหนืด ทำให้การไหลแผ่ลดลงและกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะสามารถชะละลายซิลิกา และอะลูมินาที่ผิวของถ้ำลอยออกมาได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปจะมีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูง ซึ่งมีความสำคัญในปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสำคัญในการสมดุลประจุในโครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino - silicate) (Chindaprasirt *et al.*, 2009) และ Rattanasak and Chindaprasirt (2009) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอย โดยการหาปริมาณพื้นที่สูงสุดของสารประกอบซิลิกาด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT - IR) จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์ พบว่าการใช้ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ให้พื้นที่สูงสุดของสารประกอบซิลิกาที่ดีที่สุด

1.2 การทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน

การทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันสามารถศึกษาได้โดยการทดสอบด้วยเทคนิค SEM เพื่อดูสภาพพื้นผิวการทำปฏิกิริยาและทดสอบด้วยเทคนิค EDS เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา ดังนี้

1.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การทำปฏิกิริยาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปจะมีการทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์กว่าโดยพิจารณาจากมีสภาพความเป็นเงาที่สมบูรณ์ของภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคและผิวของถ้ำลอยชนิด F มีความขรุขระและเนื้อมีสภาพความเป็นเงามากกว่าเนื่องจากถ้ำลอยชนิด F มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาและอะลูมินามากกว่าจึงสามารถชะละลายได้ดีกว่าถ้ำลอยชนิด C แต่ยังพบว่ายังมีพื้นที่ผิวบางส่วนของถ้ำลอยยังคงเรียบเนื่องจากไม่มีการชะละลายและอนุภาคของถ้ำลอยที่มีขนาดใหญ่ที่มีการชะละลายไม่หมดก็ยังคงเหลืออยู่ จากงานวิจัยด้านการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของปริญา และคณะ (2548) ซึ่งได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยและดินขาวเผาด้วยเทคนิค SEM พบว่าเงาที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันจากปฏิกิริยาของถ้ำลอยล้วนจะหนาแน่นกว่าที่ผสมด้วยดินขาวเผา ซึ่งถูกชะละลายซิลิกาและอะลูมินาเพื่อ

ทำปฏิกิริยาถูกโซได้ดีกว่าและอนุภาคของดินขาวซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งไวต่อการทำปฏิกิริยามากกว่าอนุภาคที่เป็นผลึก (Crystalline) ซึ่งมีความเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาดังที่พบในดินขาวซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 800 องศาเซลเซียส จึงส่งผลต่อปริมาณโพรงที่เพิ่มขึ้นและกำลังรับแรงอัดลดลง Rattanasak and Chindaprasit (2009) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ โดยการเปรียบเทียบลักษณะ โครงสร้างของพื้นผิวถ้ำล่อยก่อนการทำปฏิกิริยากับจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำล่อยหลังจากการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์ พบว่าอนุภาคของถ้ำล่อยมีลักษณะผิวที่เรียบและเป็นเม็ดกลม ขณะที่สารประกอบจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะผิวที่ขรุขระและเกิดเป็นเจลกระจัดกระจายขึ้น โดยความเข้มข้น 15 โมลาร์ ให้ผิวถ้ำล่อยที่ขรุขระและมีสภาพเป็นเจลมากกว่า

1.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยใช้เทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์อัตราการทำปฏิกิริยาโดยเลือกพิจารณาบริเวณที่จะหาองค์ประกอบทางเคมีจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีระหว่างอัตราส่วนระหว่าง Na/Al และ Si/Al ที่หาได้จากผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ภายหลังจากที่ส่วนผสมทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์โซเซชันแล้ว โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งสองความเข้มข้นกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำล่อยชนิด C พบว่าบริเวณที่มีสภาพการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์พบปริมาณซิลิกามากกว่าบริเวณที่มีสภาพเป็นเจล แสดงว่ามีการชะละลายซิลิกาออกมาได้น้อยส่วนปริมาณของอะลูมินามีปริมาณใกล้เคียงกันทั้งสองบริเวณแสดงว่ามีการชะละลายออกมาได้น้อยเช่นกัน การทำปฏิกิริยาจึงไม่สมบูรณ์ตามอัตราส่วนระหว่าง Na/Al และ Si/Al ที่ไม่มีการลดลง ดังนั้นการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นจึงไม่มีผลต่อการชะละลายอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) มากนัก ส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำล่อยชนิด F ทั้งสองบริเวณมีการชะละลายซิลิกาได้ดีในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ แต่ที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ การชะละลายซิลิกาทั้งสองบริเวณมีปริมาณใกล้เคียงกัน

ถ้ำล่อยชนิด F จึงมีการชะละลายอะลูมิเนียมไอออนได้ดีกว่าถ้ำล่อยชนิด C โดยพิจารณาได้จากการลดลงของอัตราส่วนระหว่าง Na/Al และ Si/Al ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sathonsaowaphak *et al.* (2009) ซึ่งได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำกันเตา

โดยใช้เทคนิค EDS แล้วเลือกพิจารณาในบริเวณที่มีสภาพเป็นเจลและบริเวณที่มีผิวขรุขระ พบว่าบริเวณที่เป็นเจลให้ผลของอัตราส่วนดังกล่าวลดลง แสดงให้เห็นว่าเนื้อจีโอโพลิเมอร์บริเวณดังกล่าวมีการทำปฏิกิริยาสมบูรณ์และเกิดความต่อเนื่องกันเป็นเจล รวมทั้งสามารถรับกำลังได้ดี (Devidovits, 1991) การบ่มด้วยความร้อนสามารถเพิ่มการทำปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ได้เช่นกัน โดย Bakharev ได้ศึกษาผลจากการบ่มด้วยความร้อนของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด F บ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 75 และ 95 องศาเซลเซียส จากการใช้เทคนิค EDS พบว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ขึ้น โดยพิจารณาจากค่าการลดลงของอัตราส่วนระหว่าง Na/Al และ Si/Al

1.3 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของโพรง

จากผลการทดสอบพบโพรงขนาดปานกลางในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C มากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลทำให้โพรงขนาดปานกลางลดลงซึ่งผลของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยทั้งสองชนิดเป็นไปในแนวทางเดียวกัน รวมทั้งพบโพรงขนาดเล็กในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด F มากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยชนิด C และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณของโพรงขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ในขณะที่โพรงขนาดปานกลางลดลงเนื่องจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง สารซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าลอยจะถูกชะออกมาจากผิวของเถ้าลอยได้ดีแล้วทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเกิดเป็นเจลขึ้นจากการเปรียบเทียบปริมาณโพรงขนาดเล็กที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจากทั้งสองความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเห็นว่าอัตราส่วนที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ และใช้เถ้าลอยชนิด F มีการทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์กว่าเนื่องจากเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีสภาพความเป็นเจลมากกว่าจึงมีปริมาณโพรงขนาดเล็กที่มากกว่า จากงานวิจัยด้านนี้พบว่าปริญา และคณะ (2548) ได้ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของโพรงของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผาโดยใช้เครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) พบว่าการกระจายขนาดและปริมาตรโพรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์และมอร์ตาร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยล้วน เปรียบเทียบกับที่ผสมด้วยดินขาวเผาร้อยละ 25 ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส ผลการทดลองมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยเพสต์จะมีปริมาตรโพรงที่สูงกว่ามอร์ตาร์ จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยล้วนจะมีปริมาตรโพรงรวมที่ต่ำกว่าผสมดินขาวเผา ในส่วนผสมที่ผสมดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่ามีปริมาตรของโพรงเจลและโพรงคาปิลลารีขนาดเล็กที่สูงกว่าดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันที่มีการเชื่อมต่อ

โมเลกุลเล็ก ๆ ให้เป็น โมเลกุลลูกโซ่ที่ใหญ่ขึ้นและตกผลึกเป็นเจลในปริมาณมาก รวมทั้งพบว่าปริมาตรโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่และโพรงอากาศที่ค่อนข้างจะน้อยกว่าจึงส่งผลให้เกิดกำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 400 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณโพรงขนาดปานกลางมากจะมีผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์สูงขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อของจีโอโพลิเมอร์จะต้องอาศัยระบบโพรง (Pore System) เป็นช่องทาง โดยโพรงคาปิลลารีนั้นส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการซึมผ่านได้ Sabine (2008) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของโพรงและการแพร่กระจายของคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35, 0.45 และ 0.60 และใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 45, 80 และ 105 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หาขนาดและการกระจายตัวของโพรง โดยใช้เครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณโพรงในตัวอย่างโดยพบโพรงคาปิลลารีเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนเพิ่มความต่อเนื่องโครงข่ายของระบบโพรงและทำให้การแพร่กระจายของคลอไรด์เพิ่มขึ้นด้วย รวมทั้งสมพงษ์ (2549) ได้ศึกษาผลของปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงภายในเนื้อคอนกรีตต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยการทดสอบจะใช้คอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ แถ่ลอยและแถ่กลบร่วมกับซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40, 0.50 และ 0.60 ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตที่ผสมแถ่ลอยและแถ่กลบร่วมกับซีเมนต์ มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์สูงกว่าวัสดุประสานที่ใช้ซีเมนต์ล้วนหรือใช้วัสดุปอซโซลานเพียงเพียงชนิดเดียวร่วมกับซีเมนต์ ซึ่งจากการทดสอบปริมาณโพรงโดยวิธีเอ็มไอพีจะเห็นว่าปริมาณโพรงคาปิลลารีลดลง รวมทั้งทำให้โพรงเกิดความไม่ต่อเนื่องและมีปริมาตรลดลง และ Sinsiri (2005) ได้ศึกษาของกระทบของความละเอียดของแถ่ลอยต่อกำลังรับแรงอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์ จากการทดสอบโดยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) พบว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์ที่ผสมแถ่ลอยทุกอัตราส่วนการแทนที่มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์และมีค่าสูงขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากช่องว่างที่สูงขึ้นระหว่างอนุภาคของแถ่ลอยและรูพรุนในอนุภาคบางส่วนของของแถ่ลอยเอง เมื่อมีการแทนที่ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตรทั้งหมดของโพรงสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มความละเอียดของแถ่ลอยพบว่าซีเมนต์เพสต์ผสมแถ่ลอยที่มีขนาดเล็กทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดลดลงเมื่อเทียบกับแถ่ลอยที่หยาบกว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวประการแรก คือ อนุภาคของแถ่ลอยที่มีขนาดเล็กและกลมช่วยอุดช่องว่างของโพรงได้ดีทำให้โครงสร้างของโพรงแน่นขึ้น ประการที่สอง คือ อนุภาคของแถ่ลอยที่มีขนาดเล็กเมื่อผสมในซีเมนต์เพสต์ทำให้อนุภาคของซีเมนต์สามารถกระจายตัวในซีเมนต์เพสต์ได้ดีและสามารถสัมผัสกับน้ำได้อย่างทั่วถึง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีและประการที่สามเป็นผลเนื่องจาก

ถ้าล้อยที่มีความละเอียดทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้ดีเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาตร โพรงในซีเมนต์เพสต์ลดลง

2. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรชัน ขนาดและการกระจายตัวของโพรงที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อของจีโอโพลิเมอร์จะต้องอาศัยระบบโพรง (Pore System) เป็นช่องทาง โพรงเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันซึ่งมีการต่อเชื่อมและไม่ต่อเชื่อมกัน รวมถึงการกระจายตัวของโพรงด้วย อัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ในช่วงแรกสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการดูดซับหรือกลไกการดูดซึม (Capillary Adsorption) เมื่อคลอไรด์สัมผัสกับผิวที่แห้งของจีโอโพลิเมอร์จะถูกดูดซึมเข้าสู่ภายในโพรงของจีโอโพลิเมอร์โดยแรงตึงผิว (Capillary Action) การดูดซึมจะเกิดการเคลื่อนที่เมื่อเกิดความแตกต่างของความชื้น (Moisture Gradient) ขึ้น โดยจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีความชื้นมากไปยังจุดที่มีความชื้นน้อยกว่า โดยทั่วไปการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยกลไกการดูดซึมจะมีความลึกเพียงเล็กน้อยแต่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการซึมผ่านจะลดลงโดยจะเป็นไปตามกลไกการแพร่ (Diffusion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าในสภาวะไม่คงที่ (Non - Steady State) คือ ความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางกับเวลา อธิบายได้ด้วยกฎข้อที่ 2 ของการแพร่ หรือ Fick's Second Law ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนผสมที่มีการทำปฏิกิริยาสมบูรณ์และมีส่วนผสมของทรายน้อยจะลดขนาดและปริมาณโพรงภายในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ลง จีโอโพลิเมอร์ในอัตราส่วนผสมดังกล่าวจึงมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี โดยระยะการซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าเมื่อเทียบกับเวลา

โพรงขนาดใหญ่เป็นโพรงที่ไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนผสม โดยมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับโพรงประเภทอื่น ๆ โดยมีสาเหตุมาจากปัจจัยต่าง ๆ ระหว่างการผสมและกระบวนการเทลงในแบบหล่อและการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณของโพรงขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวมีความเหนียวข้นมากกว่า ทำให้การกระทุ้งและการเขย่าแบบให้เนื้อของจีโอโพลิเพสต์แน่นตัวจึงทำได้ยากขึ้น ส่วนโพรงขนาดปานกลางและโพรงขนาดเล็กเป็นโพรงที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนผสมและการทำปฏิกิริยา การใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อถ้าล้อยต่ำทำให้ส่วนผสมมีความชื้น สารละลายต่างจึงทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรชัน (Polymerization Reaction) กับถ้าล้อยได้สมบูรณ์ เมื่อแข็งตัวแล้วจึงไม่เหลือสารละลายต่างที่จะทำให้เกิดโพรงภายในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ทำให้ยากต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ ส่วนการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมีผลทำให้ปริมาณของโพรงขนาดเล็กเพิ่มขึ้นในขณะที่

โพรงขนาดปานกลางลดลง ดังแสดงในภาพที่ 36 - 41 เนื่องจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงสามารถทำปฏิกิริยากับอนุภาคของแก้วลอยได้ดี มีผลทำให้เกิดการชะละลาย (Dissolution) ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่ผิวของแก้วลอยได้มาก โดยเฉพาะแก้วลอยชนิด F ที่มีปริมาณของซิลิกาและอะลูมินาสูงกว่าแก้วลอยชนิด C สารที่ถูกชะออกมาเมื่อมาทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตก็จะกลายเป็นเจล (Gel) ทำให้เนื้อของจีโอโพลิเมอร์มีความทึบจึงสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 34 จากการเปรียบเทียบปริมาณโพรงขนาดเล็ก การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจะมีการทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์กว่าเนื่องจากเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีสภาพความเป็นเจลมากกว่าจึงมีปริมาณโพรงขนาดเล็กที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ที่มีความเรียบเป็นเจลมากขึ้น ดังภาพที่ 14 - 21 ซึ่งแสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์และการลดลงของอัตราส่วนระหว่าง Na/Al และ Si/Al จากการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์หลังจากการทำปฏิกิริยาแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 22 - 29 และการผสมทรายในจีโอโพลิเมอร์ ความพรุนของทรายก็ทำให้เกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ง่ายขึ้นจากการทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์พบว่าโพรงขนาดปานกลางจะเป็นโพรงที่มีสัดส่วนมากที่สุดและเป็นโพรงที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ ในขณะที่โพรงขนาดเล็กเป็นโพรงที่มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยมากและเกิดขึ้นในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ไม่มากนัก การที่มีปริมาณโพรงขนาดปานกลางมากจะมีผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์สูงขึ้น ดังแสดงระยะการซึมผ่านของคลอไรด์ในภาพที่ 34 และขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงและการกระจายของโพรงในภาพที่ 36 - 41 โดยจะพบว่าอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากที่สุด จะเห็นว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีการกระจายของโพรงอยู่ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 - 0.01 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นโพรงขนาดปานกลางแต่มีปริมาณการเพิ่มขึ้นของโพรงที่ต่ำมากและอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 ซึ่งมีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยที่สุด จะพบว่าช่วงแรกมีการกระจายของโพรงอยู่ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 - 0.1 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นโพรงขนาดปานกลางแต่ปริมาณการเพิ่มขึ้นของโพรงที่ต่ำมากและพบว่ามีโพรงอยู่ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 - 0.01 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นโพรงขนาดปานกลางเช่นเดียวกัน มีการกระจายตัวต่ำแต่มีในปริมาณที่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีโพรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 - 0.01 ไมโครเมตร มีการกระจายของขนาดโพรงต่ำและมีปริมาณของโพรงสูงมาก มีผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์ง่ายขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนผสมที่มีการกระจายขนาดของโพรงอยู่ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 - 0.01 ไมโครเมตร แต่มีการกระจายของขนาดโพรงสูงแต่มีปริมาณต่ำมาก มีผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์ยากขึ้น

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อโครงสร้างโพรง เนื่องจากการที่มีโพรง ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความพรุนจึงมีความหนาแน่นของปริมาตรและความแน่นที่ลดลง โดยการเกิดโพรงมีสาเหตุมาจากการอัตราส่วนสารละลายต่างต่อแก้วลอย หากใช้ในอัตราส่วนที่ต่ำเกินไป

จะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีสภาพแข็งเกินไป ส่วนผสมจึงเข้ากันได้ไม่ดีส่งผลถึงการทำปฏิกิริยาที่ไม่ทั่วถึง ความแห้งหรือความเหนียวเกินไปทำให้การเทลงแบบหล่อและการอัดแน่นทำได้ยากจึงทำให้เกิดความพรุน โดยโพรงที่เกิดจากสาเหตุนี้จะเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัด ส่วนการใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อถ้ำลอยสูงเกินไปจะมีปริมาณสารละลายต่างมากเกินไปส่วนผสมจะมีความเหลว หลังจากการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์แล้วจะเหลือสารละลายต่างส่วนเกินซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบด้วย เมื่อแข็งตัวแล้วของเหลวเหล่านี้ก็จะกลายเป็นโพรงขนาดปานกลางและโพรงขนาดเล็กในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ โดยโพรงขนาดใหญ่และโพรงขนาดปานกลางมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด โดยการที่มีโพรงขนาดใหญ่และเป็นจำนวนมากทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง การผสมทรายในจีโอโพลิเมอร์ในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างผลึกของจีโอโพลิเมอร์ลดลงเนื่องจากการเพิ่มทรายในอัตราส่วนผสมทำให้จีโอโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นวัสดุเปราะและเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันมาก (Heterogeneous) ขึ้น รวมทั้งความพรุนในทรายทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีปริมาณโพรงสูงขึ้นกำลังรับแรงอัดจึงลดลง ดังแสดงกำลังรับแรงอัดในภาพที่ 35 และขนาดโพรง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงและการกระจายของโพรงในภาพที่ 36 - 41 จะพบว่าอัตราส่วนผสม GF-55-14M-0 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 624 กก./ซม.² จะเห็นว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีการกระจายขนาดของโพรงอยู่ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 - 0.01 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นโพรงขนาดปานกลางแต่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพรงต่ำมากและมีการกระจายของขนาดโพรงสูง มีผลให้กำลังรับแรงอัดสูง ส่วนอัตราส่วนผสม GC-55-6M-0 ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดต่ำสุด เท่ากับ 486 กก./ซม.² จะพบว่าช่วงแรกมีการกระจายของโพรงอยู่ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 - 0.1 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นโพรงขนาดปานกลางแต่ปริมาณการเพิ่มขึ้นของโพรงที่ต่ำมากแต่มีการกระจายของขนาดโพรงสูงและพบว่ามีกระจายของโพรงอยู่ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 - 0.01 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นโพรงขนาดปานกลางเช่นเดียวกัน แต่มีการกระจายตัวของขนาดโพรงต่ำและมีปริมาณที่สูงมาก มีผลให้กำลังรับแรงอัดต่ำ แสดงให้เห็นว่าการที่มีโพรงขนาดเล็กมากและมีปริมาณสูงมากแต่มีการกระจายตัวของขนาดต่ำ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดต่ำ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย

จากตัวอย่างแก้วลอยที่นำมาใช้ในการทดสอบ พบว่าแก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจัดเป็นแก้วลอยชนิด C ส่วนแก้วลอยจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพีจัดเป็นแก้วลอยชนิด F และแก้วลอยจากทั้งสองแหล่งมีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก

2. การซึมผ่านของคลอไรด์

2.1 จีไอโพลิเมอร์เพสต์และจีไอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วลอยชนิด F มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าแก้วลอยชนิด C

2.2 การใช้แก้วลอยแทนที่ซีเมนต์ในส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ มีผลทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากขึ้น โดยการแทนที่ด้วยแก้วลอยชนิด C มีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าการแทนที่ด้วยแก้วลอยชนิด F

2.3 การใช้อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยที่สูงขึ้น มีผลทำให้จีไอโพลิเมอร์จากแก้วลอยทั้งสองชนิดมีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง

2.4 การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลทำให้จีไอโพลิเมอร์จากแก้วลอยทั้งสองชนิดมีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้น

2.5 การใช้อัตราส่วนแก้วลอยต่อทรายที่สูงขึ้น มีผลทำให้จีไอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วลอยทั้งสองชนิดมีความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง

3. กำลังรับแรงอัด

3.1 ที่อายุ 28 วัน จีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด F มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด C ในทุกอัตราส่วนผสม

3.2 การใช้อัตราส่วนผสมสารละลายต่อถ้ำลอยที่สูงขึ้น มีผลทำให้จีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดมีกำลังรับแรงอัดลดลง

3.3 การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีผลทำให้จีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

3.4 การใช้อัตราส่วนผสมถ้ำลอยต่อทรายที่สูงขึ้น มีผลทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยทั้งสองชนิดมีกำลังรับแรงอัดลดลง

4. การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง ทำให้เกิดการชะละลายซิลิกาและอะลูมินาจากถ้ำลอยในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด F ได้สมบูรณ์กว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอยชนิด C เนื่องจากภาพโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่าผิวของอนุภาคของถ้ำลอยมีความขรุขระและผิวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผลึกมีสภาพเป็นเจลมากกว่า

5. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยใช้เทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) จีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด C ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ไม่มีผลต่อการชะละลายอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ส่วนจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด F ความเข้มข้นที่สูงขึ้น มีผลต่อการชะละลายอะลูมิเนียมไอออนได้ดีกว่าจึงมีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์กว่า

6. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

โครงสร้างผลึกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถาลอยชนิด C มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) และมีความเป็นผลึกต่ำ (Low Crystallinity) ส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถาลอยชนิด F ประกอบด้วยเฟสที่เป็นอสัณฐานและเฟสที่เป็นผลึก (Crystalline phase) โดยอยู่ในรูปสารประกอบซิลิกอนออกไซด์ (Sodium Oxide, SiO_2) และโซเดียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Sodium Aluminium Oxide, $\text{Na}_2\text{Al}_{2x}\text{O}_{3x+1}$)

7. การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของโพรง

โพรงขนาดปานกลางซึ่งเทียบได้กับโพรงคาปิลลารีในคอนกรีตมีส่วนมากที่สุดในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถาลอยทั้งสองชนิด โดยพบในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถาลอยชนิด C มากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถาลอยชนิด F การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นมีผลทำให้โพรงขนาดปานกลางลดลงและการที่มีโพรงขนาดเล็ก มีการกระจายตัวของขนาดน้อยและมีเป็นจำนวนมาก มีผลให้ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำ ในขณะที่การมีโพรงขนาดใหญ่ขึ้น มีการกระจายตัวมากแต่มีปริมาณน้อย จะความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์สูงกว่า

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของโพรงของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยค้ำขนาด ซึ่งมีผลต่อความคงทนของจีโอโพลิเมอร์
2. ควรทำการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของโพรงของจีโอโพลิเมอร์จากวัสดุปอชโซลานอื่น ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุที่ดีที่สุด
3. ควรทำการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของโพรงของจีโอโพลิเมอร์จากวัสดุปอชโซลานอื่น ๆ เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดและความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีความสัมพันธ์กัน
4. ควรทำการศึกษาในด้านการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอยเพื่อการใช้งานในเชิงพาณิชย์และนำไปใช้งานด้านวิศวกรรมโครงสร้างมากขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากถ้ำลอยอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชัยชาญ โชติถนอม, บพิช บุปไพโชติ และปริญญา จินดาประเสริฐ. 2549. การศึกษาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยคัดขนาด. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 29 (2): 203 - 214.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์. 2551. การศึกษากำลังอัดและความทนทานของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. 2548. ผลกระทบของความละเอียดของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 28 (1): 117 - 128.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2549. เถ้าลอยในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 3. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน. ขอนแก่น.

_____. และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2551. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

_____. และอินทรชัย หอวิจิตร. 2528. การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอยแม่เมาะ. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท, ขอนแก่น.

_____. และอุกฤษฏ์ โชศิริ. 2548. กำลังการรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ, น. MAT 14 - MAT 48. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10. ชลบุรี.

ประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช. 2545. ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแม่เมาะซึ่งมีระยะหุ้มต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วินิต ช่อวิเชียร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ.

วิเชียร ชาลี, มณเฑียร ภิรมวณิช และประสิทธิ์ อุตส่าห์พานิช. 2550. ผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์และการกักความร้อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่ใน สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 30 (1): 153 - 166.

ศราวุฒิ ยอดมณี. 2551. การศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุวิมล ตัจจวานิชย์. 2551. (ว่าที่) คอนกรีตกับ (ว่าที่) นายช่าง. สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

สำเร็จ รักซ้อน. 2549. การบ่อนชั้นและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ผสมวัสดุปอซโซลาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สมพงษ์ ธีรานพ. 2549. ผลของปริมาณและความต่อเนื่องของโพรงภายในเนื้อคอนกรีตต่อการซึมผ่าน ของคลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่ง ประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2547. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. 2551. การศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สกว., กรุงเทพฯ.

Ababneh, A, F. Benboudjema and Y. Xi. 2003. Chloride Penetration in Nonsaturated Concrete. **Journal of Material in Civil Engineering of ASCE.** 15 (2): 183 - 191.

ASTM, C. 305. 2001. Standard Practical for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Paste and Mortar of Plastic Consistency. **Annual book of ASTM Standards**, Vol. 04.01.

Bakker, R.F.M. 1988. **Corrosion of Steel in Concrete.** Chapman and Hall, New York.

- Boddy A., R. D. Hooton and K.A. Gruber. 2001. Long-term Testing of Chloride Penetration Resistance of Concrete Containing High-reactivity metakaolin. **Cement and Concrete Research**. 31(5): 759 - 765.
- Care, S. 2007. Effect of Temperature on Porosity and on Chloride Diffusion in Cement Pastes. **Construction and Building Material**. In press.
- Chindaprasirt, P., T. Chareerat and S. Homwuttiwong. 2000. **The use of Mae-Moe Fly Ash to Reduce Chloride Penetration in Marine Concrete Structure**. Role of Asia in the World, Mie University Press, pp.
- _____, _____, and V. Sirivivatnanon. 2007. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, 29: 224 - 229.
- Hardjito, D., S.E. Wallah, D.M.J. Sumajouw and B.V. Rangan. 2004. On the Development of Fly Ash - Based Geopolymer Concrete. **ACI Master Journal** 101(6): 467 - 672.
- Neville, A. 1995. Chloride Attack of Reinforced Concrete. **Material and Structures** 28: 63 - 70.
- _____. 2003. **Properties of Concrete**. 4th and final edition. John Winley and Sons, Harlow.
- Palomo, A., M.W. Grutzeck and M.T. Blanco. 1999. Alkaly - Activated Fly Ash A Cement for the Future. **Cement and Concrete Research**. 29(8): 1323 - 1329.
- Soloka, I. 1993. Diffusion of Chloride Ions in hardened Cement Pastes. **Cement and Concrete Research**, 11(3): 395 - 406.
- Swanepoel, J.C. and C.A. Strydom. 2002. Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material. **Applied Geochemistry** 17 (8): 1143 - 1148.

Van, Jaarsveld JCS, Van Deventer JSJ and G.C. Lukey. 2002. The Effect of Composite and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite - Based Geopolymer. **Chemistry Engineering Journal** 89 (1 - 3): 63 - 73.

Wallah, S.E. and B.V. Rangan. 2006. Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties. **Research Report GC2**. Faculty of Engineering Curtin University of Technology, Perth, Australia.

Wangwichit, K. 1997. **Comparative Study on Mortar Containing Fly Ash from Southeast Asia and Japan in Relation to Strength and Durability**. M.S. Thesis, Tokyo Institute of Technology, Tokyo.





ตารางผนวกที่ ก1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเถ้าลอย

Component	Composition (mass %)		
	Ordinary portland cement Type 1	Source of fly ash	
		Mae Moh	BLCP
SiO ₂	20.87	35.38	50.40
Al ₂ O ₃	4.78	18.52	27.17
Fe ₂ O ₃	3.53	14.41	12.23
CaO	64.97	18.14	3.52
MgO	0.96	2.98	1.36
K ₂ O	0.45	3.72	0.73
Na ₂ O	0.34	2.79	0.25
TiO ₂	0.37	0.62	3.24
P ₂ O ₅	0.06	0.21	0.42
MnO	-	-	0.03
SO ₃	2.71	2.47	0.12
LOI	0.96	0.76	0.53

ตารางผนวกที่ ก2 ระยะการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยชนิด C

Mixture Symbol	Average Depths of Chloride (mm)				
	3 Days	10 Days	20 Days	40 Days	70 Days
GC-55-6M-0	13.93	18.36	20.13	22.85	21.86
GC-55-6M-2	25.80	27.50	27.50	27.50	27.50
GC-55-6M-4	25.40	27.50	27.50	27.50	27.50
GC-55-10M-0	10.20	15.02	17.18	19.56	18.26
GC-55-10M-2	18.98	24.96	27.50	27.50	27.50
GC-55-10M-4	25.00	27.50	27.50	27.50	27.50
GC-55-14M-0	6.60	8.78	9.39	14.08	16.43
GC-55-14M-2	10.01	15.04	17.24	19.85	20.76
GC-55-14M-4	13.71	17.99	19.54	22.88	24.43
GC-65-6M-0	24.40	26.00	27.50	27.50	27.50
GC-65-6M-2	24.60	27.50	27.50	27.50	27.50
GC-65-6M-4	24.20	27.50	27.50	27.50	27.50
GC-65-10M-0	18.94	23.61	24.73	27.50	27.50
GC-65-10M-2	23.80	27.50	27.50	27.50	27.50
GC-65-10M-4	23.40	27.50	27.50	27.50	27.50
GC-65-14M-0	11.23	16.31	18.16	21.04	18.67
GC-65-14M-2	12.19	17.80	20.58	23.91	22.26
GC-65-14M-4	20.18	25.56	26.34	27.50	27.50

ตารางผนวกที่ ก3 ระยะการซึมผ่านของคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยชนิด F

Mixture Symbol	Average Depths of Chloride (mm)				
	3 Days	10 Days	20 Days	40 Days	70 Days
GF-55-6M-0	11.40	15.80	17.63	20.89	21.65
GF-55-6M-2	23.60	26.99	27.50	27.50	27.50
GF-55-6M-4	24.00	27.50	27.50	27.50	27.50
GF-55-10M-0	7.74	10.21	12.19	17.01	18.27
GF-55-10M-2	21.92	26.02	27.50	27.50	27.50
GF-55-10M-4	24.80	27.50	27.50	27.50	27.50
GF-55-14M-0	5.38	7.82	8.32	9.04	11.55
GF-55-14M-2	8.53	12.73	13.76	18.10	18.83
GF-55-14M-4	12.13	16.88	18.90	21.65	22.66
GF-65-6M-0	20.69	24.40	26.66	27.50	27.50
GF-65-6M-2	25.20	27.50	27.50	27.50	27.50
GF-65-6M-4	25.60	27.50	27.50	27.50	27.50
GF-65-10M-0	16.28	21.08	22.91	26.77	27.50
GF-65-10M-2	16.73	24.46	25.82	27.50	27.50
GF-65-10M-4	26.00	27.50	27.50	27.50	27.50
GF-65-14M-0	8.94	12.87	13.78	17.47	18.67
GF-65-14M-2	12.48	17.75	19.29	23.24	24.53
GF-65-14M-4	15.38	21.36	26.34	27.50	27.50

ตารางผนวกที่ ก4 ระยะการซึมผ่านของคลอไรด์ของซีเมนต์มอร์ตาร์

Mixture Symbol	Average Depths of Chloride (mm)				
	3 Days	10 Days	20 Days	40 Days	70 Days
OPC-CM	11.83	17.22	18.95	21.42	22.32
OPC-CMC	5.84	8.02	8.59	10.75	12.54
OPC-CMF	9.84	14.42	16.18	18.44	19.41

ตารางผนวกที่ ก5 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิด C ที่อายุ 28 วัน

Mixture Symbol	Compressive Strength at 28 days (ksc)			
	Specimens No. 1	Specimens No. 2	Specimens No. 3	Average
GC-55-6M-0	455.01	513.88	489.11	486.00
GC-55-6M-2	324.10	283.92	309.88	305.97
GC-55-6M-4	200.28	175.58	190.22	188.69
GC-55-10M-0	488.32	516.61	559.29	521.40
GC-55-10M-2	313.18	328.40	355.32	332.30
GC-55-10M-4	212.68	223.05	184.48	206.74
GC-55-14M-0	528.46	588.18	548.46	555.03
GC-55-14M-2	323.61	337.58	387.43	349.54
GC-55-14M-4	206.33	218.03	231.40	218.59
GC-65-6M-0	446.11	473.96	424.09	448.05
GC-65-6M-2	315.91	278.45	288.91	294.42
GC-65-6M-4	192.36	170.13	166.72	176.40
GC-65-10M-0	498.16	434.37	459.58	464.04
GC-65-10M-2	278.61	304.48	319.37	300.82
GC-65-10M-4	184.78	175.30	198.08	186.05
GC-65-14M-0	524.75	465.46	493.88	494.70
GC-65-14M-2	330.20	297.04	311.66	312.97
GC-65-14M-4	208.77	178.70	188.48	191.98

ตารางผนวกที่ ก6 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอยชนิด F ที่อายุ 28 วัน

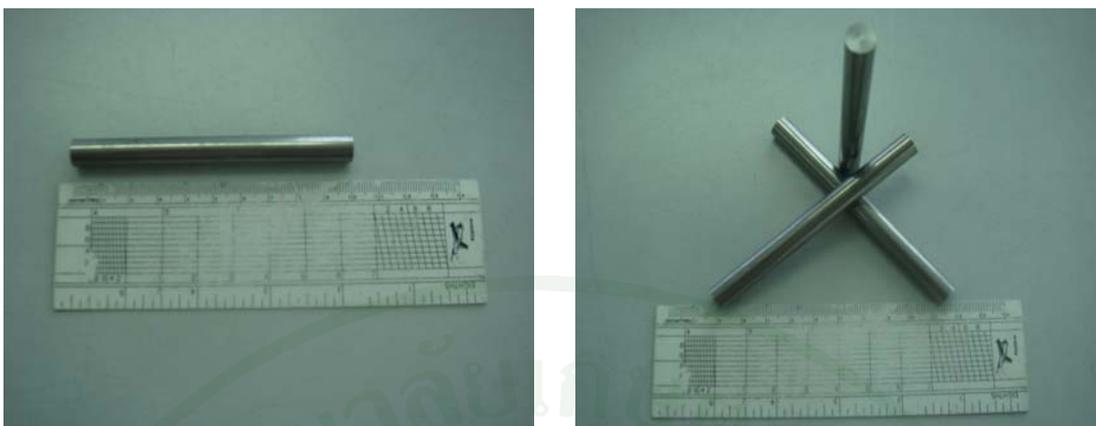
Mixture Symbol	Compressive Strength at 28 days (ksc)			
	Specimens No. 1	Specimens No. 2	Specimens No. 3	Average
GF-55-6M-0	602.47	518.03	552.17	557.56
GF-55-6M-2	314.08	355.06	343.49	337.54
GF-55-6M-4	213.64	187.56	193.26	198.15
GF-55-10M-0	570.61	603.42	625.44	599.82
GF-55-10M-2	368.11	374.83	349.15	364.03
GF-55-10M-4	195.66	216.24	225.14	212.35
GF-55-14M-0	638.59	605.09	629.06	624.24
GF-55-14M-2	402.70	411.82	368.94	394.49
GF-55-14M-4	242.24	228.18	218.20	229.54
GF-65-6M-0	484.61	508.88	557.91	517.13
GF-65-6M-2	307.45	323.89	340.68	324.01
GF-65-6M-4	202.62	172.10	182.14	185.62
GF-65-10M-0	587.25	492.90	525.52	535.22
GF-65-10M-2	356.98	324.03	321.84	334.28
GF-65-10M-4	205.07	191.58	183.03	193.23
GF-65-14M-0	572.04	601.91	526.79	566.91
GF-65-14M-2	348.23	323.96	361.09	344.43
GF-65-14M-4	194.38	219.86	212.19	208.81

ตารางผนวกที่ ก7 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่อายุ 28 วัน

Mixture Symbol	Compressive Strength at 28 days (ksc)			
	Specimens No. 1	Specimens No. 2	Specimens No. 3	Average
OPC-CM	268.66	276.55	252.64	265.95
OPC-CMC	251.76	226.55	260.34	246.22
OPC-CMF	239.36	231.16	218.30	229.61



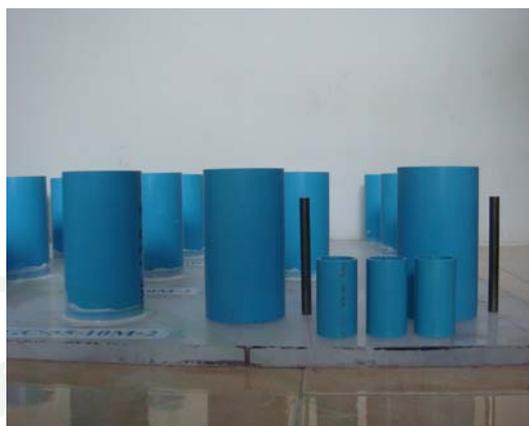
ภาคผนวก ข
ภาพวัสดุ อุปกรณ์และกระบวนการทดลอง



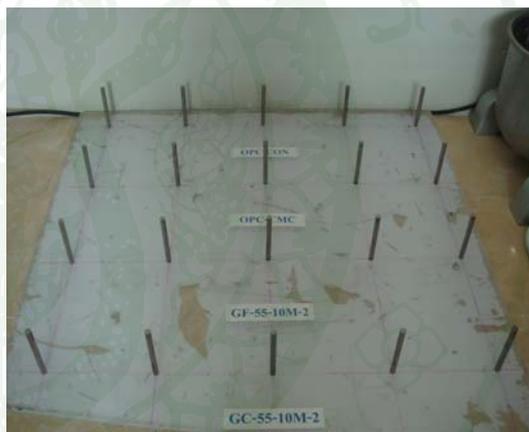
ภาพผนวกที่ ข1 เหล็กกลึงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.50 มม. ยาว 100 มม.



ภาพผนวกที่ ข2 แบบหล่อพีวีซีสำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มม. ยาว 125 มม.



ภาพผนวกที่ ข3 แบบหล่อพีวีซีสำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27.50 มม. ยาว 55 มม.



ภาพผนวกที่ ข4 การติดตั้งเหล็ก



ภาพผนวกที่ ข5 การติดตั้งแบบหล่อพีวีซี



ภาพผนวกที่ ข6 เถ้าลอยชนิด C และเถ้าลอยชนิด F



ภาพผนวกที่ ข7 การเตรียมส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์



ภาพผนวกที่ ข8 การเตรียมส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



ภาพผนวกที่ ข9 การเตรียมส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์



ภาพผนวกที่ ข10 การเตรียมส่วนผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย



ภาพผนวกที่ ข11 เครื่องผสมแบบ Bench Mounting Mixer ขนาด 10 ลิตร



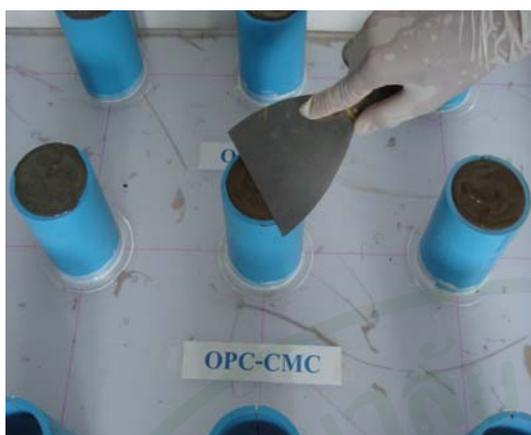
ภาพผนวกที่ ข12 การผสมจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์



ภาพผนวกที่ ข13 การเทจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์ลงในแบบหล่อพีวีซี



ภาพผนวกที่ ข14 การกระทุ้งจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์



ภาพผนวกที่ ข15 การปาดหน้าจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์



ภาพผนวกที่ ข16 การถอดแบบจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ต้าร์



ภาพผนวกที่ ข17 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์หลังจากถอดแบบ



ภาพผนวกที่ ข18 การบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์



ภาพผนวกที่ ข19 การแช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3



ภาพผนวกที่ ข20 การกดตัวอย่างเพื่อผ่าซีกหลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์



ภาพผนวกที่ ข21 การฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทความเข้มข้น 0.1 N
บนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์



ภาพผนวกที่ ข22 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	นายภูมิภัทร์ สามหมอ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 8 พฤศจิกายน 2523
สถานที่เกิด	อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กลุ่มงานวิชาการโยธาธิการ สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดพิษณุโลก ศาลากลางจังหวัดพิษณุโลก ถนนวังจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000