



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง คุณสมบัติทางวิศวกรรมของสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง

Engineering Properties of Geopolymer from High Calcium Fly Ash

นามผู้วิจัย นายปรเมศ กำแพงฤทธิรงค์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์ปริญญา จินดาประเสริฐ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทกุล, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง

Engineering Properties of Geopolymer from High Calcium Fly Ash

โดย

นายปรเมศ กำแพงฤทธิ์รงค์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปารเมศ กำแหงฤทธิ์รงค์ 2555: คุณสมบัติทางวิศวกรรมของสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D. 210 หน้า

สารจีโอโพลิเมอร์จัดเป็นนวัตกรรมทางวัสดุที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินา ภายในวัสดุประเภทอะลูมิโนซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นในสภาวะอุณหภูมิห้องปกติ สารจีโอโพลิเมอร์เป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างกว้างขวางในการทำวัสดุประสานได้ในทำนองเดียวกับปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เพราะสามารถประยุกต์ใช้วัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมเช่น เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้น อันเป็นกระบวนการผลิตที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าลอยประเภทแคลเซียมสูงผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 8 10 และ 12 โมลาร์ ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนไดออกไซด์ต่อโซเดียมออกไซด์(ซิลิเกตโมดูลัส) ภายในสารละลายต่างเท่ากับ 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00 1.10 1.20 1.30 และ 1.40 สำหรับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่างรวมเท่ากับ 60:40 65:35 และ 70:30 แล้วทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ รวมถึงการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค และอิทธิพลขององค์ประกอบที่มีต่อคุณสมบัติเมื่อแข็งตัวแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพร้อมอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เครื่องมือวิเคราะห์การดูดกลืนแสงอินฟราเรด และได้ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้าง

ผลโดยทั่วไปพบว่าความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซิลิเกต โมดูลัส และอัตราส่วนของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ในส่วนของกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน พบว่าได้ค่าสูงสุดมากกว่า 30 เมกะปาสกาล ในสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และพบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยซิลิเกต โมดูลัสที่ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ 0.90 0.80 และ 0.70 สำหรับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง 60:40 65:35 และ 70:30 ตามลำดับ

ภาพขยายของจีโอโพลิเมอร์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเผยให้เห็น โครงสร้างลักษณะอนุฐานที่เป็นเนื้อเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ธาตุพบว่าองค์ประกอบหลักได้แก่ ซิลิกา อะลูมินาและออกซิเจน ส่วนผลของการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้แสดงให้เห็นถึงเปลี่ยนแปลงจากเถ้าลอยอย่างชัดเจนอันเป็นผลมาจากชะละลายสารอะลูมิโนซิลิเกตและผลของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดแสดงพันธะหลักระหว่าง ซิลิกา ออกซิเจนและอะลูมินา อย่างชัดเจน รวมทั้งพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมนั้นมีศักยภาพในการประยุกต์เป็นวัสดุก่อสร้างประเภทมอร์ตาร์ได้เป็นอย่างดี

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Parames Kamhangrittirong 2012: Engineering Properties of Geopolymer from High Calcium Fly Ash. Doctor of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prasert Suwanvitaya, Ph.D. 210 pages.

Geopolymer is an innovative material resulting from the reaction of sodium hydroxide, sodium silicate and silica and alumina in aluminosilicate materials. It can be synthesized with high alkaline solution at room temperatures. Because of the low carbon dioxide production and because it involves the utilization of fly ash, essentially a waste material, geopolymer has been looked upon as an attractive alternative to the use of cement. In this study, different concentrations of sodium hydroxide solutions (8, 10 and 12 molars) were employed to activate high calcium fly ash. The mole ratios of silicon dioxide to sodium oxide (M_s) in alkali solutions were 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00, 1.10, 1.20, 1.30 and 1.40. The weight ratios of fly ash content to alkali solution (F/A) were 60:40, 65:35 and 70:30. Engineering properties of geopolymer pastes were studied. The composition, microstructure and influence on hardened properties were investigated by electron microscope with energy dispersive X-ray spectrometer, X-ray diffractometer and Fourier transform infrared spectrometer. Applications of suitable mixtures for construction materials were also studied.

Generally, increasing the molarity of sodium hydroxide solution and decreasing the mole ratio of silicon dioxide to sodium oxide in alkali solution decreased the workability of the geopolymer paste. Increasing fly ash proportion also resulted in the decrease of the workability. The maximum compressive strengths of geopolymer specimens above 30 MPa were reached after curing at room temperature for 28 days. The results indicated that increasing the fly ash to alkali activators ratio and molarity of sodium hydroxide solution significantly increased the compressive strength. The optimum M_s for highest compressive strength were 0.90 for F/A ratio 60:40, 0.80 for F/A ratio 65:35 and 0.70 for F/A ratio 70:30, respectively.

The SEM and TEM micrographs of geopolymer revealed a homogeneous amorphous structure. The EDX results confirmed that major elements of microstructure consisted of Si, Al and O. The XRD patterns of fly ash based geopolymer revealed non-crystalline structure. The dissolution of aluminosilicate in raw materials could be seen from the changes in the XRD patterns. The IR spectrums revealed major chemical bonding of Si-O-Al. The selected optimum mixture of geopolymer showed the potential for application, as mortar-like material.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ได้รับความกรุณาแนะนำแนวทางในการทำงานวิจัยจาก
รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ สุวรรณวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ศาสตราจารย์
ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ รองศาสตราจารย์ วชิรินทร์ วิทยกุล คณาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ
อาจารย์ ดร. ปิติวัฒน์ วัฒนชัย ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านจากหน่วยงานต่างๆ ได้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และ
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ ภาควิชาเคมี และภาควิชาสถิติ คณะ
วิทยาศาสตร์ กองยานพาหนะและอาคารสถานที่ สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งโตเกียว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ศูนย์เครื่องมือ
วิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความ
ช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณหน่วยงานต่างๆ ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับการวิจัย ได้แก่ สำนักงาน
คณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ศูนย์วิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น องค์การส่งเสริมวิชาการแห่งประเทศญี่ปุ่น และ
สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอสำนึกถึงพระคุณของบิดาและมารดาของข้าพเจ้าที่ได้ให้กำลังใจกับ
ข้าพเจ้าตลอดมา

ปารเมศ กำแหงฤทธิ์รงค์

กรกฎาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	51
อุปกรณ์	51
วิธีการ	57
ผลและวิจารณ์	66
สรุปและข้อเสนอแนะ	149
สรุป	149
ข้อเสนอแนะ	152
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	154
ภาคผนวก	173
ภาคผนวก ก รายละเอียดการทดสอบวัสดุ	174
ภาคผนวก ข รายละเอียดการคำนวณอัตราส่วนโดยโมลภายในส่วนผสม	179
ภาคผนวก ค รายละเอียดผลการทดลอง	192
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	210

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สรุปการค้นพบที่สำคัญด้านซิเมนต์ที่ใช้สารละลายต่างและวัสดุอีอีโพลิเมอร์	7
2 อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นหลักในอีอีโพลิเมอร์	8
3 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มอีอีโพลิเมอร์	13
4 สรุปที่มาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย	25
5 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยตาม ASTM C618-12	25
6 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยตาม มอก. 2135-2545	26
7 คุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าลอยตาม ASTM C618-12 และมอก. 2135-2545	27
8 อัตราส่วนโดยโมลภายในสารละลายโซเดียมซิลิเกตตาม มอก. 433-2539	28
9 ช่วงของคลื่นอินฟราเรดที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	46
10 ช่วงเลขคลื่นและพันธะหลักของวัสดุอีอีโพลิเมอร์	49
11 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย	52
12 กระจายขนาดและปริมาณของอนุภาคเถ้าลอย	52
13 สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	58
14 สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	58
15 สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	59
16 สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	59
17 สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	60
18 สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	60
19 สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	61
20 สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	61
21 สัดส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	62
22 การเปรียบเทียบสัดส่วนโดยโมลของส่วนผสมอีอีโพลิเมอร์จากเถ้าลอย แคลเซียมสูง	70
23 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย SEM/EDS และ TEM/EDS	124
24 ผลการเปรียบเทียบช่วงเลขคลื่นและพันธะหลัก	142
25 สรุปผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนการผสมวัสดุอีอีโพลิเมอร์	149

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการชะละลายของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60	180
ข2 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการชะละลายของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 65	181
ข3 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการชะละลายของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 70	182
ข4 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการผสมรวมของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60	183
ข5 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการผสมรวมของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 65	184
ข6 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการผสมรวมของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 70	185
ข7 อัตราส่วนออกไซด์หลักของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60	186
ข8 อัตราส่วนออกไซด์หลักของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 65	187
ข9 อัตราส่วนออกไซด์หลักของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 70	188
ข10 อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60	189
ข11 อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 65	190
ข12 อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 70	191
ค1 การไหลผ่าน เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	193
ค2 การไหลผ่าน เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	193
ค3 การไหลผ่าน เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	194
ค4 การไหลผ่าน เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	194
ค5 การไหลผ่าน เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	195
ค6 การไหลผ่าน เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	195
ค7 การไหลผ่าน เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	196

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค8 การไหลผ่าน เวลาของการก่อดั้วเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	196
ค9 การไหลผ่าน เวลาของการก่อดั้วเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	197
ค10 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	197
ค11 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	198
ค12 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	198
ค13 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	199
ค14 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	199
ค15 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	200
ค16 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	200
ค17 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	201
ค18 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	201
ค19 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	202
ค20 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	202

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค21 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	203
ค22 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	203
ค23 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	204
ค24 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	204
ค25 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	205
ค26 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	205
ค27 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	206
ค28 การหดตัวเมื่อแห้งของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60	206
ค29 การหดตัวเมื่อแห้งของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65	207
ค30 การหดตัวเมื่อแห้งของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70	207
ค31 ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	208
ค32 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	208
ค33 กำลังรับแรงดัดและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	209

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปฏิกิริยาของ Alkali-Activated Alumino-Silicate ตามข้อสรุปของ Purdon	5
2	การเกิดโพลิคอนเดนเซชัน	6
3	การเกิดโพลิคอนเดนเซชันของดินขาวกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	6
4	โครงสร้างเตตระฮีดรัลพื้นฐานของกลุ่มไฮดรอกไซด์	9
5	โครงสร้างโพลิไฮดรอกไซด์	9
6	โครงสร้างโพลิไฮดรอกไซด์-ไฮดรอกไซด์	10
7	โครงสร้างโพลิไฮดรอกไซด์-ไดไฮดรอกไซด์	11
8	โครงสร้างไฮดรอกไซด์ลิงค์	11
9	โครงสร้างโพลิไฮดรอกไซด์	12
10	โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์และโครงสร้างสารประกอบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง	12
11	การเกิด Tetravalent ของอะลูมินา	15
12	ขั้นตอนการชะละลาย	15
13	การเกิดกลุ่มไฮดรอกไซด์และไฮดรอกไซด์พื้นฐาน	15
14	การรวมตัวของกลุ่มไฮดรอกไซด์กับ OH ⁻	16
15	การทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโซเดียม	16
16	การควบแน่นเกิดขึ้นระหว่าง Si-ONa และอะลูมินาไฮดรอกไซด์	17
17	การรวมตัวของโซเดียมโพลิไฮดรอกไซด์	18
18	การรวมตัวของโซเดียมโพลิไฮดรอกไซด์-ไฮดรอกไซด์	18
19	การรวมตัวของโซเดียมโพลิไฮดรอกไซด์-ไดไฮดรอกไซด์	19
20	การเกิด Tetravalent ของอะลูมินาที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ	20
21	ขั้นตอนการชะละลายที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ	20
22	การเกิดกลุ่มไฮดรอกไซด์พื้นฐานที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ	21
23	การเกิดหน่วยพื้นฐานที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ	21
24	การเกิดพันธะของ Si-O(Ca ⁺⁺)	21
25	โครงสร้างของแคลเซียมโพลิออลูมิโนไฮดรอกไซด์	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	การกักเก็บแก๊สด้านหิน	23
27	หลักการของเครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์	24
28	ความสัมพันธ์ของปริมาณโซเดียมออกไซด์ต่อค่า pH	29
29	โครงสร้างของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีค่าอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ต่างกัน	29
30	ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์ที่มีแคลเซียมประกอบ	31
31	อิทธิพลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของแก๊สต่อการรับแรงอัด	33
32	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการชะละลายต่อปริมาณ Si และ Al ให้ออน	34
33	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและตัวอย่างภาพ	37
34	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและตัวอย่างภาพ	39
35	การกระจายพลังงานของตัวอย่างภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	40
36	อุปกรณ์ EDS และตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุ	41
37	หลักการคำนวณระยะทางของระนาบและเครื่อง XRD	42
38	ตัวอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแร่ควอร์ตซ์	43
39	รูปแบบโครงสร้างของผลึก	44
40	ตัวอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอโพลิเมอร์	45
41	รูปแบบการสั่นพื้นฐาน	47
42	แผนผังแสดงส่วนประกอบของเครื่อง FT-IR และตัวอย่างผล	48
43	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FT-IR	49
44	แนวความคิดในการวิจัย	50
45	แก้วล้อยที่ใช้ในการวิจัย	51
46	สารละลายต่างที่ใช้ในงานวิจัย	53
47	อุปกรณ์การวิจัยกลุ่มการผลิต	54
48	อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติขณะก่อนการแข็งตัว	54
49	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติเมื่อแข็งตัวแล้ว	55
50	อุปกรณ์ที่ใช้ในวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
51 การผสม การเก็บตัวอย่างและการทดสอบจีโอโพลิเมอร์	64
52 การทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และการหล่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	65
53 ส่วนผสมที่ไม่สามารถทดสอบได้	66
54 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ M_2O ต่อ SiO_2 กับส่วนผสมทั้งหมด	71
55 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ SiO_2 ต่อ Al_2O_3 กับส่วนผสมทั้งหมด	72
56 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ H_2O ต่อ M_2O กับส่วนผสมทั้งหมด	73
57 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ M_2O ต่อ Al_2O_3 กับส่วนผสมทั้งหมด	74
58 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ CaO ต่อ SiO_2 กับส่วนผสมทั้งหมด	75
59 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ H_2O ต่อ CaO กับส่วนผสมทั้งหมด	76
60 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ CaO ต่อ M_2O กับส่วนผสมทั้งหมด	77
61 การเปรียบเทียบร้อยละการไหลของจีโอโพลิเมอร์สด	81
62 ระยะก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์สด	85
63 ระยะก่อตัวเริ่มสิ้นสุดของจีโอโพลิเมอร์สด	87
64 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 7 วัน	91
65 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน	91
66 การเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน	94
67 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	95
68 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	96
69 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	96
70 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	98
71 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถาลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
72	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	99
73	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	100
74	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	101
75	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	101
76	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสด์ที่อายุ 1 วัน	104
77	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสด์ที่อายุ 3 วัน	104
78	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสด์ที่อายุ 7 วัน	105
79	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสด์ที่อายุ 28 วัน	105
80	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสด์ที่อายุ 60 วัน	106
81	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสด์ที่อายุ 90 วัน	106
82	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสด์ที่อายุ 180 วัน	107
83	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดรัดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	109
84	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดรัดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	109
85	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดรัดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	110
86	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดรัดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	111
87	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดรัดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
88	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	112
89	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์	114
90	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์	114
91	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์	115
92	การเปรียบเทียบหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 4 วัน	117
93	การเปรียบเทียบหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 7 วัน	117
94	การเปรียบเทียบหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 14 วัน	118
95	การเปรียบเทียบหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 21 วัน	118
96	การเปรียบเทียบหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน	119
97	การเปรียบเทียบหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 56 วัน	119
98	การเปรียบเทียบหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 91 วัน	120
99	ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย	122
100	ภาพถ่าย TEM ของเถ้าลอย	122
101	การเปรียบเทียบภาพถ่าย SEM กับ TEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	123
102	ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่างกัน	125
103	ภาพถ่าย TEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่างกัน	125
104	ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน	128
105	ภาพถ่าย TEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน	129

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
106 ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกตโมดูลัสต่างกัน	131
107 ภาพถ่าย TEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกตโมดูลัสต่างกัน	132
108 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเส้นลวดและจีโอโพลิเมอร์เพสต์	133
109 ภาพ TEM ผลึกของเหล็ก	134
110 ภาพ TEM ผลึกของแคลเซียม	134
111 การเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนเส้นลวดต่างกัน	135
112 การเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน	136
113 การเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนซิลิกาเกตโมดูลัสต่างกัน	137
114 FT-IR สเปกตรัมเส้นลวดเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์	138
115 FT-IR สเปกตรัมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนเส้นลวดต่างกัน	139
116 FT-IR สเปกตรัมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน	140
117 FT-IR สเปกตรัมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนซิลิกาเกตโมดูลัสต่างกัน	141
118 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	144
119 ภาพถ่าย SEM ของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	144
120 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	146
121 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	146
122 การเปรียบเทียบภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	147

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Al_2O_3	=	อะลูมินา
EDX	=	Energy Dispersive X-ray
FT-IR	=	Fourier Transform Infrared
H_2O	=	น้ำ
K_2O	=	โพแทสเซียมออกไซด์
Ms	=	ซิลิเกตโมดูลัส
M_2O	=	โซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์
Na_2O	=	โซเดียมออกไซด์
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
Na_2SiO_3	=	โซเดียมซิลิเกต
SEM	=	Scanning Electron Microscope
SiO_2	=	ซิลิกอนไดออกไซด์
TEM	=	Transmission Electron Microscope
XRD	=	X-Ray Diffraction

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง

Engineering Properties of Geopolymer from High Calcium Fly Ash

คำนำ

ประเทศไทยมีการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการเผาถ่านหินลิกไนต์จำนวนประมาณ 16 ล้านตันต่อปี (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [กฟผ.], 2550: 113, 2551: 99, 2552: 107, 2553: 90, 2554: 104) ก่อให้เกิดเถ้าลอย (Fly Ash) ในประเภทแคลเซียมสูงปริมาณมากถึงปีละ 3.2 ล้านตัน และในอดีตที่ผ่านมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2523 นักวิจัยทางด้านวัสดุก่อสร้างได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยนี้ เพื่อหาแนวทางในการนำเถ้าลอยมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ด้วยการใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) บางส่วนเนื่องจากองค์ประกอบของเถ้าลอยสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) ได้เป็นอย่างดี (ปริญญญา และชัย, 2548: 284-289) อันนำไปสู่การใช้ในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ในเวลาต่อมา เช่น การสร้างฐานรากขนาดใหญ่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โครงการเขื่อนคลองท่าด่าน เป็นต้น (ปริญญญา, 2548: 10) จากตัวอย่างที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าการใช้เถ้าลอยให้เกิดประโยชน์มีการพัฒนามากขึ้นตลอดมาเป็นลำดับ อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในส่วนผสมทั้งหมด

นอกจากนั้นพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ภายใต้อนุสัญญาสหประชาชาติที่ประกาศใช้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 ซึ่งมีสาระสำคัญกำหนดให้พันธกรณีของประเทศกำลังพัฒนาที่เป็นภาคีต้องให้ความร่วมมือในการแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเน้นหนักที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (อาซาฟห์ และเอกคณัย, 2548) โดยกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั่วโลกนั้นได้ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงปีละ 13,500 ล้านตันต่อปี หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ปล่อยออกมาทั้งหมด (The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2005: 45-49)

ปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้าและงานวิจัยได้มีการพัฒนาการกระตุ้นวัสดุปอซโซลานด้วยปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลายกลุ่มอัลลอยด์ ทำให้ได้สารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุ

ประสานของวัสดุ จากแนวทางข้างต้นจึงได้มีการนำวัสดุที่มีประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเช่น ดินขาวเผา หรือเถ้าลอยแคลเซียมต่ำมาใช้เป็นสารตั้งต้นของสารจีโอโพลิเมอร์ได้สำเร็จ และสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในองค์ประกอบที่เป็นวัสดุประสานหรือซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ได้ทั้งหมด อีกทั้งนำไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ได้ กล่าวได้ว่าเป็นการนำวัสดุเหลือจากกระบวนการผลิตมาใช้ได้อย่างเต็มศักยภาพ เพื่อพัฒนาวัสดุประสานที่ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วงานวิจัยสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยนั้นเป็นในรูปแบบของเถ้าลอยแคลเซียมต่ำเป็นหลักเท่านั้น

ด้วยปัจจัยต่างๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นและจากแนวโน้มของการพัฒนาประเทศในภาคธุรกิจการก่อสร้างที่ยังมีความต้องการใช้ปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ชัยวิทย์, 2548) ในขณะเดียวกันที่ประเทศไทยต้องให้ความสำคัญตามพันธกรณีของพิธีสารเกียวโตอีกประการหนึ่ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงขึ้นไปในประเทศอันจะสร้างองค์ความรู้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุก่อสร้างพร้อมกับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนต่อไป

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอัตราส่วนของปัจจัยพื้นฐานของสารตั้งต้นในการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์จากถั่ว
ลอย แคลเซียมสูง
2. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของสารจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลอยแคลเซียมสูง
3. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของสารจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลอยแคลเซียมสูง
4. พัฒนาแนวทางการใช้สารจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลอยแคลเซียมสูงในวัสดุก่อสร้าง

ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้ด้านวัสดุในงานอุตสาหกรรม
ก่อสร้าง โดยใช้หลักการพัฒนาจากวัสดุที่เหลือในระบบอุตสาหกรรม ซึ่งได้เลือกใช้ถั่วลอย
แคลเซียมสูงจากแหล่งแม่เมาะเป็นวัตถุดิบหลัก นำมาเพิ่มมูลค่าด้วยวิธีการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำ
ให้ได้แนวทางการสร้างนวัตกรรมวัสดุก่อสร้างด้วยการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์จากถั่วลอย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะทำให้ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารตั้งต้นที่เหมาะสมใน
การผลิตสารจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลอย ตลอดจนลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทาง
วิศวกรรม รวมถึงแนวทางในการประยุกต์ใช้สารจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลอย เพื่อเป็นทางเลือก
ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างได้อย่างเต็มศักยภาพ นำไปสู่การจด
สิทธิบัตรผลิตภัณฑ์ดังกล่าว รวมถึงเผยแพร่การนำไปใช้สู่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาชุมชน
โดยประโยชน์สูงสุดที่คาดว่าจะได้รับคือการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่
บรรยากาศ ได้มากกว่า 3 ล้านตันต่อปี อันเนื่องมาจากการทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ในวัสดุก่อสร้าง

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวถึงในส่วนนี้ได้แบ่งออกเป็นเนื้อหาออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ความรู้พื้นฐานของสารจีโอโพลิเมอร์ ข้อมูลของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และการพัฒนาแนวคิดของการวิจัย

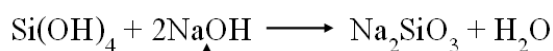
1. ความรู้พื้นฐานของสารจีโอโพลิเมอร์

ในส่วนของการพัฒนาการของสารจีโอโพลิเมอร์นั้น มีประเด็นหลักที่สำคัญที่ควรกล่าวถึง เพื่อให้เข้าใจถึงพื้นฐานของการวิจัยคือ พัฒนาการของวัสดุซีเมนต์ที่ใช้สารละลายต่าง ทฤษฎีหลักพื้นฐานของสารจีโอโพลิเมอร์ และปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ ดังมีสาระที่สรุปได้โดยสังเขปต่อไปนี้

1.1 พัฒนาการของสารจีโอโพลิเมอร์

ปฐมบทของการพัฒนาสารจีโอโพลิเมอร์นั้นกล่าวได้ว่า มีที่มาจากการพัฒนาวัสดุซีเมนต์ที่ผสมด้วยสารละลายต่าง โดยเริ่มจากการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาของ Purdon นักวิทยาศาสตร์ชาวเบลเยียมในปี พ.ศ. 2483 ที่ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุซีเมนต์ด้วยการผสมตะกั่วโลหะ (Metallurgical Slag) เข้ากับสารละลายต่าง ทำให้ได้วัสดุประสาน (Binders) ชนิดใหม่ที่สามารถแข็งตัวได้ในเวลารวดเร็ว (Philip and Charlie, 1985) ซึ่ง Purdon ได้สรุปขั้นตอนของปฏิกิริยาออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ขั้นตอนปลดปล่อย ซิลิกา (Silica) อะลูมินา (Alumina) และไลม์ (Lime) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) และขั้นตอนการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate) รวมถึงการเกิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขึ้นใหม่ (ภาพที่ 1)

1. Solution of Silicates



2. Precipitation of Calcium Silicate Hydrates



3. Solution of Aluminates



4. Precipitation of Calcium Aluminate Hydrates

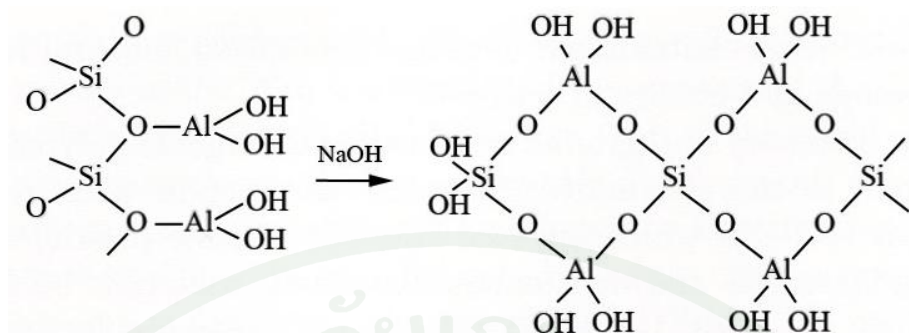


ภาพที่ 1 ปฏิกริยาหลักของ Alkali-Activated Alumino-Silicate ตามข้อสรุปของ Purdon

ที่มา: Philip and Charlie (1985)

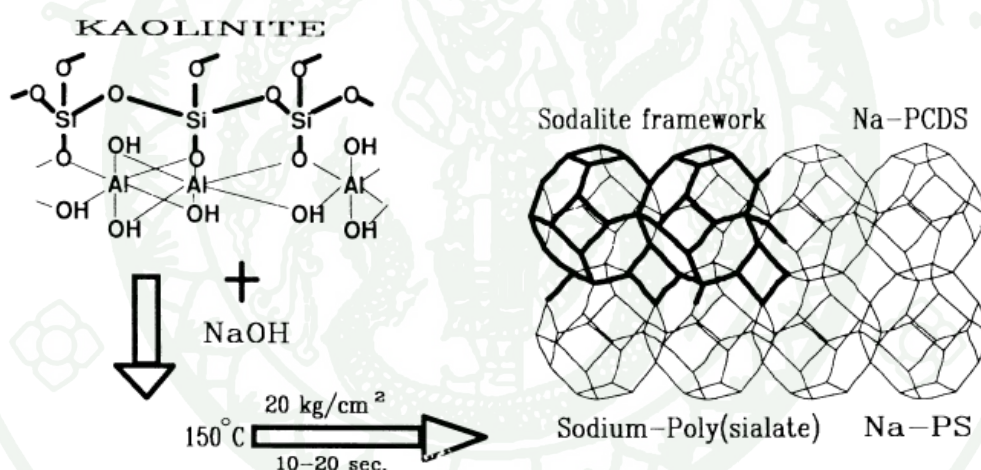
จากผลการค้นพบดังกล่าวได้นำไปสู่การพัฒนาวัสดุซีเมนต์จากตะกรันที่กระตุ้นด้วยสารละลายด่าง (Alkali-Activated Slag Cement) ในช่วงต้นของทศวรรษ 1950 ด้วยการผสมโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้ากับตะกรันที่ผ่านการบดแล้ว ซึ่งเป็นที่เผยแพร่ในอุตสาหกรรมก่อสร้างในขณะนั้น โดยใช้ชื่อว่า Trief Cements และ F-Cements เป็นต้น (Shi *et al.*, 2006: 1-2)

ใน พ.ศ. 2500 Victor Glukhovsky นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียได้ทำการ ศึกษาเพิ่มเติมได้ค้นพบวิธีการพัฒนาวัสดุประสาน ชนิดใหม่ที่เรียกว่าดินซิลิเกต (Soil Silicate) ด้วยการใส่วัสดุที่มีองค์ประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) เช่น ดินเหนียว มาผสมกับสารละลายด่าง เกิดการโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้นตามภาพที่ 2 ซึ่งจากการค้นพบนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในเวลาต่อมาคือ การค้นพบที่ห้องปฏิบัติการ CORDI ประเทศฝรั่งเศสใน พ.ศ. 2515 ด้วยการผสมดินขาวและควอร์ตซ์ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเรียกกระบวนการผลิตนี้ว่า SILIFACE Process (Davidovits, 2008: 4-6)



ภาพที่ 2 การเกิดโพลิคอนเดนเซชัน

ที่มา: Davidovits (2008: 6)



ภาพที่ 3 การเกิดโพลิคอนเดนเซชันของดินขาวกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ที่มา: Davidovits (1991)

การค้นคว้าวิจัยด้านวัสดุชนิดนี้มีความต่อเนื่องมาจนถึงช่วงเวลาที่สำคัญคือ ช่วง พ.ศ. 2519-2525 กล่าวคือ ใน พ.ศ. 2519 Davidovits ได้ทำการเผยแพร่ผลงานที่สำคัญต่อที่ประชุม สหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry, [IUPAC]) เรื่องการสังเคราะห์สารในลักษณะที่เป็นกลุ่มโพลิเมอร์ของ อะลูมิเนียมซิลิเกตหรือโซเดียมโพลิไซอะเลท ด้วยกระบวนการโพลิคอนเดนเซชันที่อุณหภูมิต่ำ โดยคำว่า โไซอะเลท (Sialate) เป็นคำย่อมาจาก ซิลิกอนออกโซอะลูมิเนต (Silicon-oxo-aluminate)

ต่อมาใน พ.ศ. 2522 ได้มีรับรองสิทธิบัตรงานค้นคว้าโครงสร้างโพลิเมอร์ดังกล่าว ดังกล่าวในประเทศฝรั่งเศสและได้ขยายผลไปสู่การรับรองสิทธิของสหรัฐอเมริกาในปี พ.ศ. 2525 เลขที่ 4,349,386 ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกัน เช่น Pyrament, Geopolycem และ Geopolymite เป็นต้น (Davidovits, 2008: 7-11)

ดังนั้นจากการตรวจเอกสารในส่วนนี้จึงสามารถสรุปความต่อเนื่องของพัฒนาการตามช่วงเวลาได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปการค้นพบที่สำคัญด้านวัสดุซิเมนต์ที่ใช้สารละลายต่างและวัสดุจีโอโพลิเมอร์

พ.ศ.	ชื่อนักวิจัย	ประเทศ	งานที่ค้นพบ
2483	Purdon	เบลเยียม	Clinker-Free Cements
2500	Glukhovsky	สหภาพโซเวียต	Soil-Silicate Concrete
2515	Davidovits	ฝรั่งเศส	Siliface Process
2519	Davidovits	ฝรั่งเศส	IUPAC Terminology
2522	Davidovits	ฝรั่งเศส	Geopolymer
2525	Davidovits	ฝรั่งเศส	Pyrament, Geopolycem & Geopolymite

ที่มา: Shi *et al.* (2006: 2); Davidovits (2008: 12)

1.2 ทฤษฎีหลักพื้นฐานของสารจีโอโพลิเมอร์

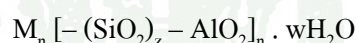
ตามที่ได้กล่าวมาแล้วจากหัวข้อ 1.1 เมื่อ พ.ศ. 2525 งานวิจัย Davidovits ได้รับการรับรองสิทธิทางปัญญาของสหรัฐอเมริกาในรูปแบบของสิทธิบัตรเลขที่ 4,349,386 และ 4,509,985 ซึ่งเป็นเรื่องของวิธีการผลิตโพลิไซเลต (Poly-sialate) ด้วยการให้ความร้อนกับส่วนผสมของสารตั้งต้นที่มีค่าอัตราส่วนโมลขององค์ประกอบออกไซด์ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม ผ่านกระบวนการโพลิคอนเดนเซชันกล่าวคือระยะเวลาและรูปแบบของการให้ความร้อนกับสารตั้งต้นจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และรูปแบบของการให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาและได้ผลผลิตเป็นวัสดุโพลิเมอร์ โดยในส่วนขององค์ประกอบออกไซด์ที่เหมาะสมได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นหลักในจีโอโพลิเมอร์

อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น	สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกาเลขที่	
	4,349,386	4,509,985
(Na ₂ O,K ₂ O)/SiO ₂	0.20-0.28	0.20-0.48
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.50-4.50	3.50-4.50
H ₂ O/(Na ₂ O,K ₂ O)	15.0-17.5	10.0-25.0
(Na ₂ O,K ₂ O)/Al ₂ O ₃	0.80-1.20	0.80-1.60

ที่มา: Davidovits (1982, 1984)

สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกาเลขที่ 4,349,386 ได้ระบุถึงหลักการและโครงสร้างของโพลิไซอะเลทที่ประกอบด้วยซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลในลักษณะของโพลิเมอร์ด้วยรูปแบบโครงสร้างทางเคมีอย่างง่ายคือ



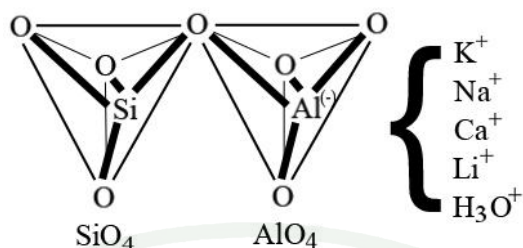
โดย M หมายถึง ธาตุแอลคาไลได้แก่ โซเดียม หรือโพแทสเซียม

Z หมายถึง จำนวนโมเลกุลของ SiO₂ เท่ากับ 1, 2, 3 หรือค่ามากกว่า 3 ขึ้นไป

n หมายถึง ปริมาณของการทำโมเลกุลลูกโซ่ (Degree of polycondensation)

w หมายถึง จำนวนโมเลกุลของน้ำโดยมีปริมาณสูงสุดกับ 7

คำว่าไซอะเลท (Sialate) เป็นคำย่อเพื่อการสื่อความหมายจากคำเต็มคือ Alkali silico-oxo-aluminate (Davidovits, 2008: 30) เมื่อโครงสร้างพื้นฐานมารวมกันอย่างต่อเนื่องทำให้ได้โพลิไซอะเลท ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ของกลุ่มไซอะเลทแบบสายโซ่ที่ประกอบด้วย Si⁴⁺ และ Al³⁺ ที่เกิดรูปร่างแบบ 4 แขนกับออกซิเจน เกิดเป็นโครงสร้างรูปพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน โดยลักษณะที่สำคัญคือ การใช้อะตอมของออกซิเจนร่วมกันเป็น ร่วมกับไอออนบวกของโพแทสเซียม โซเดียม แคลเซียม หรือ ลิเทียม เพื่อเป็นการดุลประจุให้ Al³⁺ ทำให้เกิดโครงสร้างพื้นฐานของไซอะเลทตามภาพที่ 4



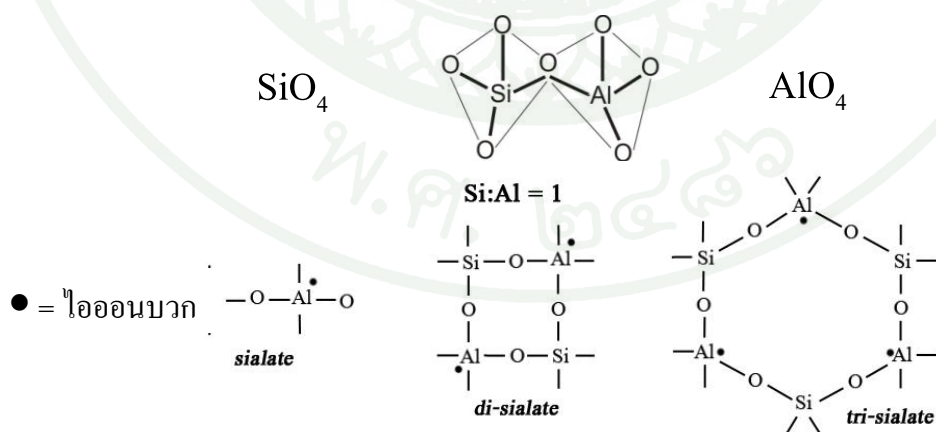
ภาพที่ 4 โครงสร้างเตตระฮีดรัลพื้นฐานของกลุ่มไซอะเลท

ที่มา: Davidovits (2008: 23)

จากโครงสร้างพื้นฐานตามภาพที่ 4 จึงถือเป็นหน่วยโมโนเมอร์ตั้งต้นของโครงสร้างไซอะเลทที่สำคัญ ซึ่ง Davidovits ได้จัดกลุ่มของโครงสร้างโพลิเมอร์ชนิดนี้ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ

1.2.1 กลุ่มโครงสร้างพื้นฐาน 4 แบบ

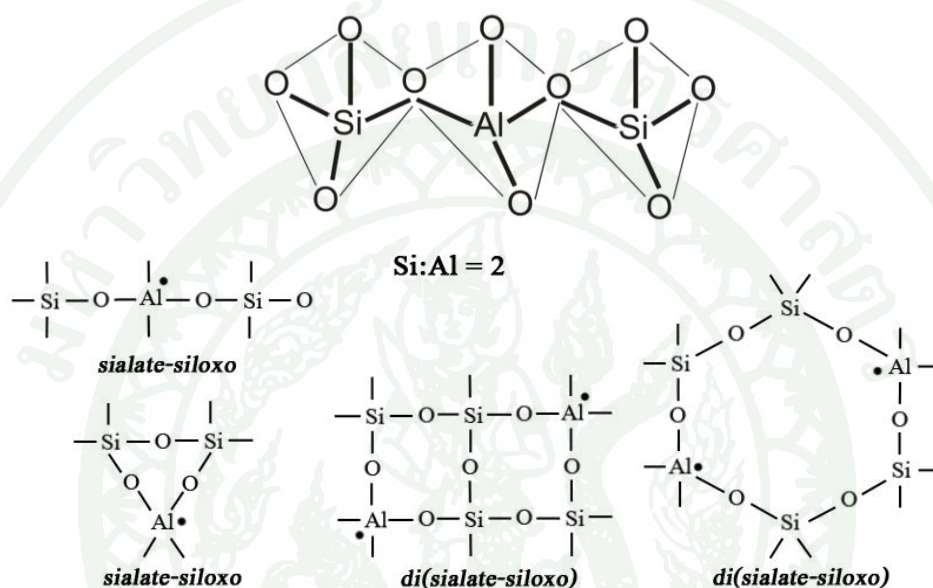
1.2.1.1 โพลิไซอะเลท (Poly-sialate: [PS]) เป็นโครงสร้างพื้นฐานจากไซอะเลทที่มีอัตราส่วนอะตอมของ Si ต่อ Al เท่ากับ 1:1 โดยสามารถจัดเรียงโครงสร้างย่อย 3 รูปแบบ คือ แบบเส้นไซอะเลท แบบสี่เหลี่ยมได-ไซอะเลท และแบบหกเหลี่ยมไตร-ไซอะเลท ตามภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้างโพลิไซอะเลท

ที่มา: Davidovits (2008: 30-31)

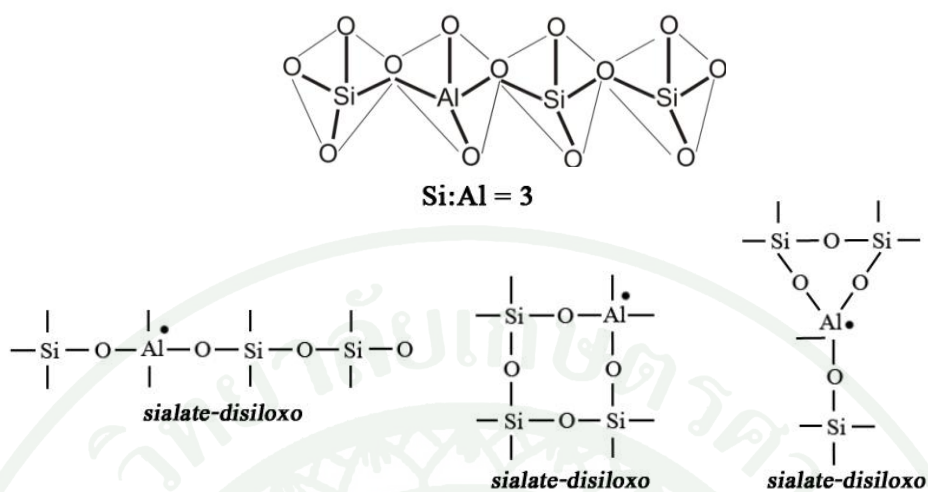
1.2.1.2 โพลีไซอะเลทไซลอกโซ (Poly-sialate-siloxo: [PSS]) เป็นโครงสร้างพื้นฐานจากไซอะเลทไซลอกโซ ที่มีอัตราส่วนอะตอมของ Si ต่อ Al เท่ากับ 2:1 โดยสามารถจัดเรียงโครงสร้างย่อยได้ 4 รูปแบบ คือแบบเส้นไซอะเลท-ไซลอกโซ แบบสามเหลี่ยมไซอะเลท-ไซลอกโซ แบบสี่เหลี่ยมไซอะเลท-ไซลอกโซ และแบบหกเหลี่ยมไซอะเลท-ไซลอกโซ ตามภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างโพลีไซอะเลท-ไซลอกโซ

ที่มา: Davidovits (2008: 30-31)

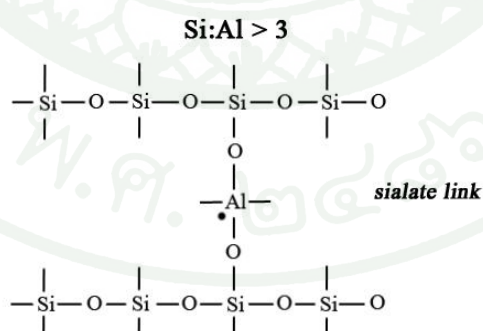
1.2.1.3 โพลีไซอะเลทไดไซลอกโซ (Poly-sialate-disiloxo: [PSDS]) เป็นโครงสร้างที่มีอัตราส่วน Si ต่อ Al เท่ากับ 2:1 โดยสามารถมีโครงสร้างย่อย 3 แบบ คือแบบเส้นไซอะเลท-ไดไซลอกโซ แบบสี่เหลี่ยมไซอะเลท-ไดไซลอกโซ และแบบสามเหลี่ยมร่วมกับเส้นตรงไซอะเลท-ไดไซลอกโซ ตามภาพที่ 7



ภาพที่ 7 โครงสร้างโพลีไซอะเลท-ไดไซลอกโซ

ที่มา: Davidovits (2008: 30-31)

1.2.1.4 โพลีไซอะเลทมัลติไซลอกโซ ลิงค์ (Poly-sialate-multisiloxo) มีลักษณะที่สำคัญคือ โครงสร้างที่ทำหน้าที่เป็น Sialate link ตามภาพที่ 8 เชื่อมโยงกับโครงสร้างของ Si-O-Si หรือโครงสร้างไซอะเลทแบบต่างๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนของ Si:Al ของโครงสร้างลักษณะนี้ มีค่ามากกว่า 3

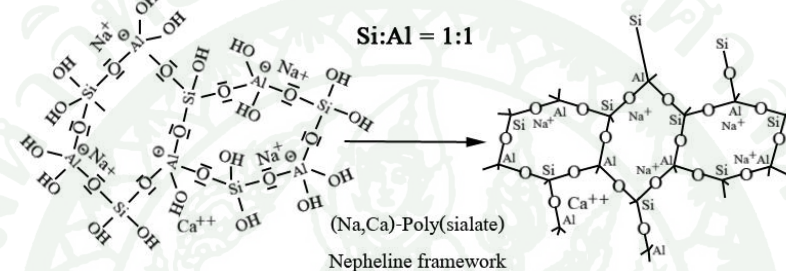


ภาพที่ 8 โครงสร้างไซอะเลทลิงค์

ที่มา: Davidovits (2008: 30-31)

1.2.2 กลุ่มโครงสร้างผสม จากโครงสร้างพื้นฐานย่อยตามภาพที่ 5-8 แล้ว ไอออนบวกจากธาตุหมู่ 2 ได้แก่ แคลเซียมไอออน สามารถเข้าร่วมในโครงสร้างได้ในรูปแบบของ Si:Al เท่ากับ 1 และ 3 ได้ตามภาพที่ 9 และ 10 ดังนี้

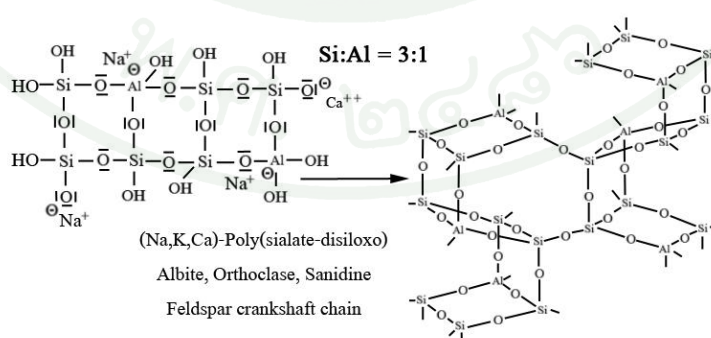
1.2.2.1 โพลีไซอะเลท(Na, Ca – [PS]) เป็นโครงสร้างที่มีอัตราส่วน Si ต่อ Al เท่ากับ 1:1 ตามภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โครงสร้างโพลีไซอะเลท

ที่มา: Davidovits (2008: 30-33)

1.2.2.2 โพลีไซอะเลทไดไซลอกโซ (Na, K, Ca - [PSDS]) เป็นโครงสร้างที่มีอัตราส่วน Si ต่อ Al เท่ากับ 3:1



ภาพที่ 10 โครงสร้างของสารจีโอโพลีเมอร์และโครงสร้างสารประกอบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

ที่มา: Davidovits (2008: 30-33)

จากโครงสร้างพื้นฐานและโครงสร้างผสมที่ได้ดังแสดงตามภาพที่ 5-10 นั้น ในส่วนที่ Davidovits ได้ระบุไว้ในสิทธิบัตรว่า โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยอัตราส่วนของโมเลกุลของน้ำไม่เกิน 7 แต่ถ้าโครงสร้างนั้นมีอัตราส่วนของโมเลกุลน้ำมากกว่า 7 ขึ้นไป โดยถึงแม้ว่าอัตราส่วนของ Si:Al นั้นอยู่ในช่วงของ 1-3 ก็ตาม โครงสร้างทางกายภาพจะมีความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งสามารถจัดได้ในกลุ่มสารซีโอไลต์ (Zeolite) ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มซีโอไลต์

ลำดับที่	ชื่อ	สูตรโครงสร้างทางเคมี	อัตราส่วนของ Si:Al
1	Gismondine	$\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_8] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	1.0:1
2	Scolecite	$\text{Ca}_8 [(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{24}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	1.5:1
3	Chabazite	$\text{Ca}_2 [(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_8] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	2.0:1
4	Faujasite	$(\text{Na}_2, \text{Ca}) [(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2.0:1
5	Levynite	$\text{Ca}_3 [(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	2.0:1
6	Wairekite	$\text{Ca}_8 [(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{32}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	2.0:1
7	Yugawaralite	$\text{Ca}_8 [(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{32}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	2.5:1
8	Stilbite	$\text{Na}_2\text{Ca}_4 [(\text{AlO}_2)_{10}(\text{SiO}_2)_{26}] \cdot 28\text{H}_2\text{O}$	2.6:1
9	Heulandite	$\text{Ca}_4 [(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{28}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	3.5:1

ที่มา: Davidovits (2008: 57)

กล่าวโดยสรุปแล้ว ทฤษฎีพื้นฐานของสารจีโอโพลิเมอร์ทำให้เข้าใจถึงรูปแบบโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถเป็นได้ตั้งแต่กึ่งผลึก (Semi-crystalline) และอสัณฐาน (Amorphous) โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์คืออัตราส่วนของโมเลกุลของน้ำที่สามารถทำให้โครงสร้างเป็นผลึก (Crystal) ของซีโอไลต์ได้ ด้วยเหตุนี้ถึงแม้ว่าอัตราส่วนของ Si:Al ตั้งต้นภายในโครงสร้างใกล้เคียงกันนั้น แต่คุณสมบัติทางวิศวกรรมนั้นมีความแตกต่างกันได้อย่างมาก (Palomo *et al.*, 1999) นอกจากนี้ยังรวมถึงโครงสร้างจุลภาคที่มีความเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด อันเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาขั้นก้าวหน้าต่อไป

1.3 กลไกของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของโพลิเมอร์นั้น โดยทั่วไปจะเรียกว่าปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งจากผลการศึกษาของ Davidovits (1989) ได้ระบุไว้ว่า สารจีโอโพลิเมอร์เป็นผลของปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation) และได้กำหนดชื่อของปฏิกิริยาดังกล่าวนี้นี้ว่า จีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) โดยในส่วนของกลไกของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน Davidovits (2008) ได้สรุปขั้นตอนการเกิดรูปแบบพื้นฐานของโพลิโซอะเลทแบบไฮโดรโซดาไลต์ (Hydrosodalite) เป็น 7 ขั้นตอนย่อยดังนี้

1.3.1 การชะละลายตาม 5 ขั้นตอนได้แก่

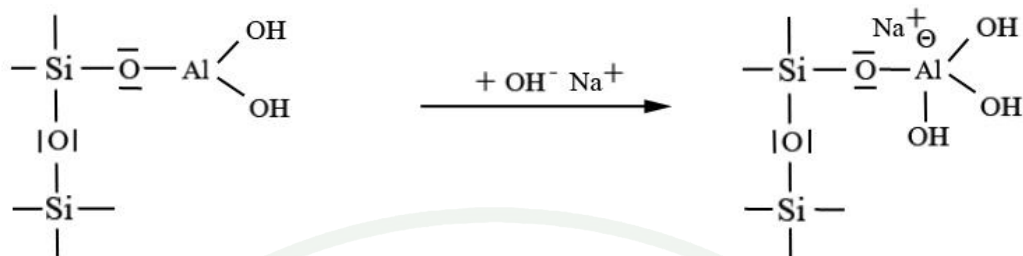
ขั้นตอนที่ 1 การเกิด Tetravalent ของอะลูมินาข้างกลุ่มโซอะเลท ตามภาพที่ 11

ขั้นตอนที่ 2 การชะละลายที่เริ่มจากซิลิกอนอะตอม ตามภาพที่ 12

ขั้นตอนที่ 3 การแทนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดกลุ่มซิลานอล (Silanol group- $[\text{Si-OH}]$) และซิลอกโซพื้นฐาน (Basic siloxo $[\text{Si-O}^-]$) ตามภาพที่ 13

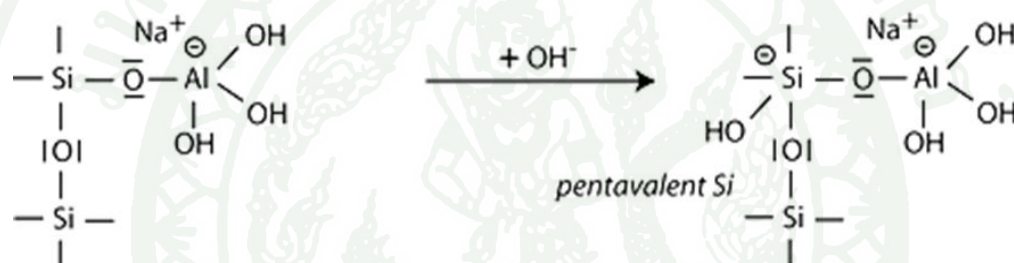
ขั้นตอนที่ 4 การรวมตัวของกลุ่มซิลานอลกับ OH^- ทำให้เกิดหน่วยหลักของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ตามภาพที่ 14

ขั้นตอนที่ 5 การทำปฏิกิริยากับไอออนบวกของโซเดียม ทำให้เกิดพันธะของ Si-ONa ตามภาพที่ 15



ภาพที่ 11 การเกิด Tetravalent ของอะลูมินา

ที่มา: Davidovits (2008: 137)



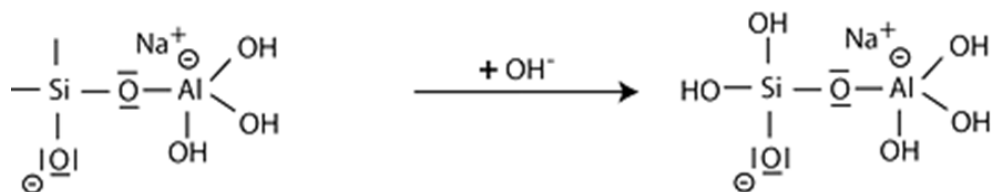
ภาพที่ 12 ขั้นตอนการชะละลาย

ที่มา: Davidovits (2008: 137)



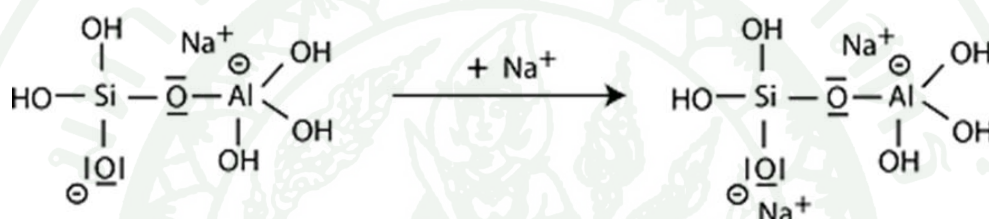
ภาพที่ 13 การเกิดกลุ่มไฮดรอกซิลและไฮดรอกซิฟลูออไรด์

ที่มา: Davidovits (2008: 138)



ภาพที่ 14 การรวมตัวของกลุ่มไฮดรอกซิลกับ OH^-

ที่มา: Davidovits (2008: 138)



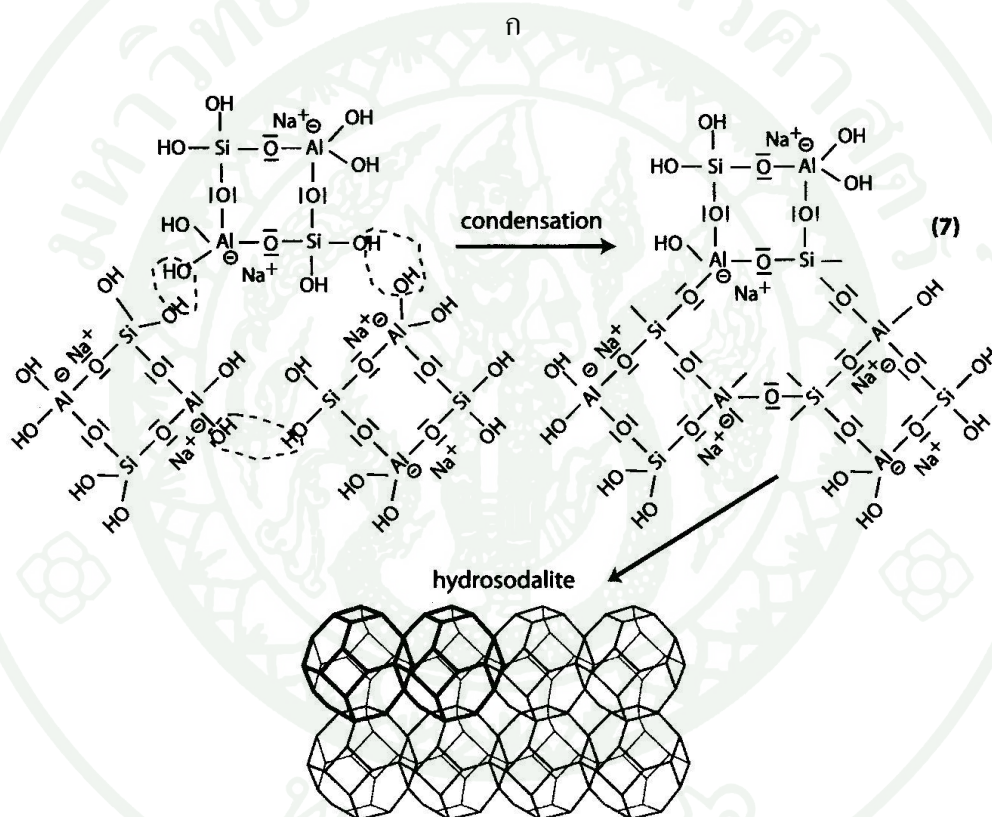
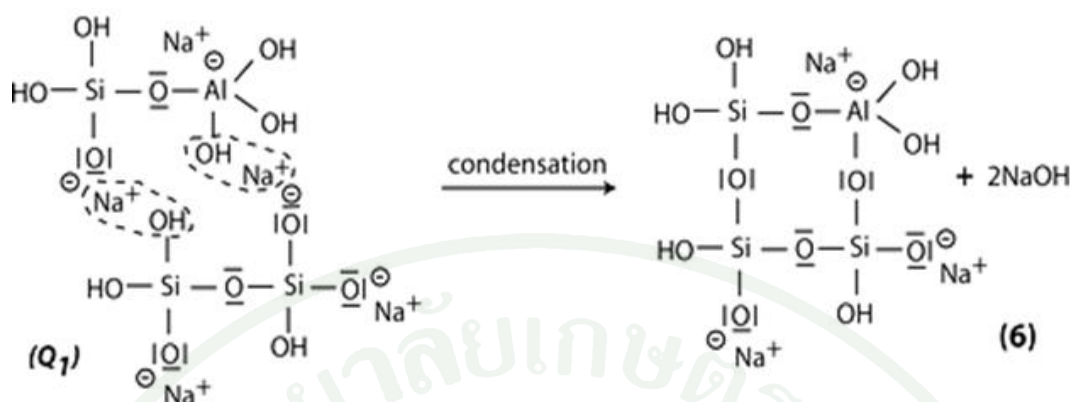
ภาพที่ 15 การทำปฏิกิริยากับไอออนบวกของโซเดียม

ที่มา: Davidovits (2008: 138)

1.3.2 ขั้นตอนการควบแน่น 2 ขั้นตอน

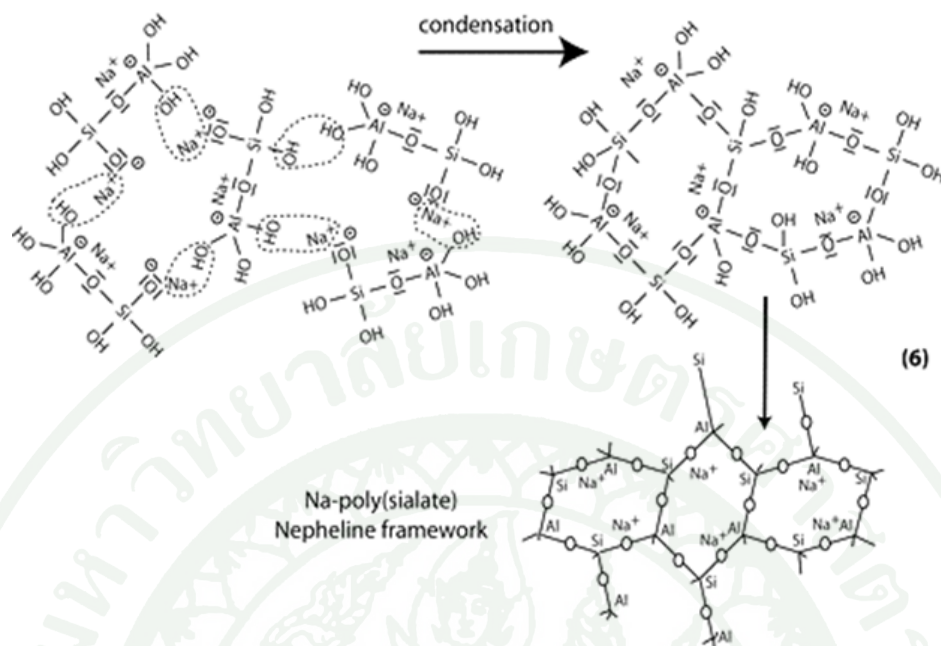
การควบแน่นเกิดขึ้นระหว่าง Si-ONa และอะลูมิเนียม ไฮดรอกซิล (Aluminum hydroxyl $[\text{OH-Al}]$) ตามภาพที่ 16 ก จากโครงสร้างนี้ก่อให้เกิดการควบแน่นแบบต่อเนื่องจนเป็นโครงสร้างไฮโดรโซดาไลต์ ตามภาพที่ 16 ข

การควบแน่นตามหลักการในภาพที่ 16 ซึ่งเป็นโครงสร้างของสารประกอบที่เกิดจากกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน สิ่งที่น่าสนใจของปฏิกิริยานี้ คือ ผลิตผลปลายทางสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เช่น โพลีไซอะเลท (PS) โพลีไซอะเลท-ไซลอกโซ (PSS) และโพลีไซอะเลท-ไดไซลอกโซ (PSDS) ตามภาพที่ 17 18 และ 19 ตามลำดับ



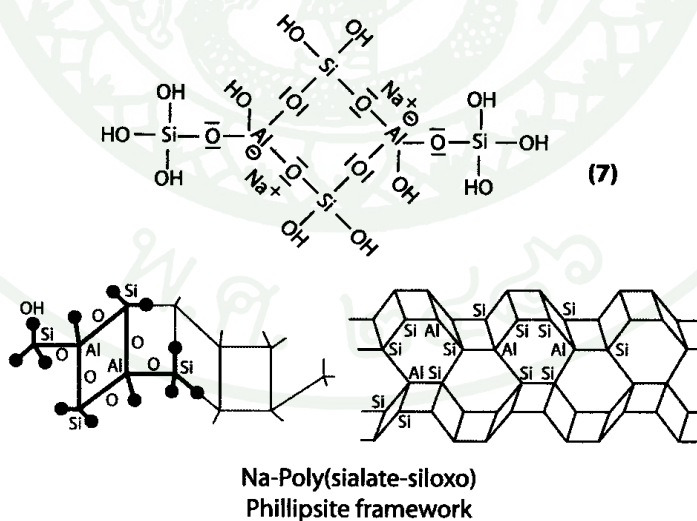
ภาพที่ 16 การควบแน่นเกิดขึ้นระหว่าง Si-ONa และอะลูมิเนียมไฮดรอกซิล

ที่มา: Davidovits (2008: 138-139)



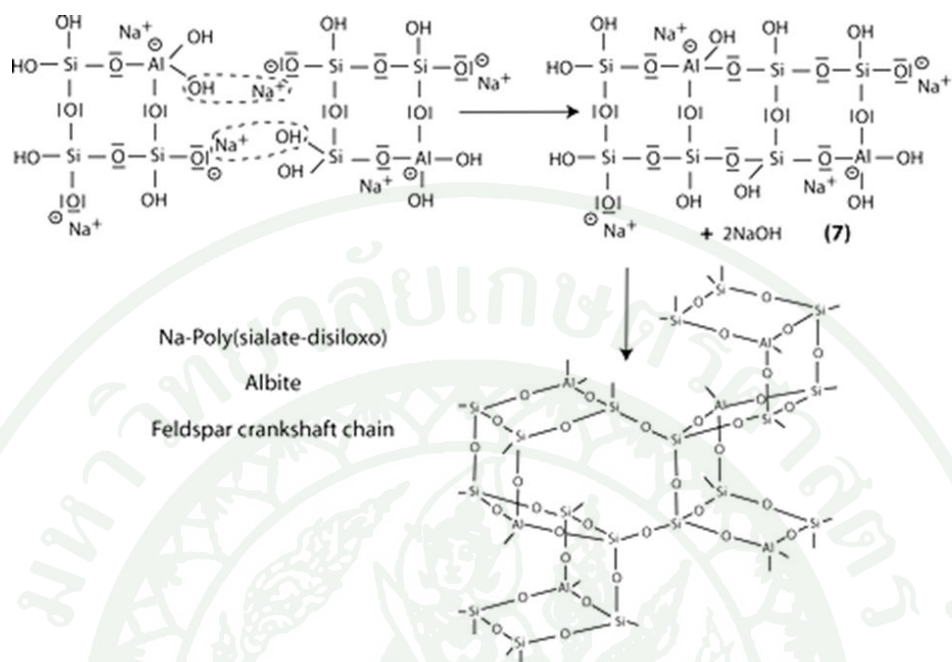
ภาพที่ 17 การรวมตัวของโซเดียมโพลิไซอะเลท

ที่มา: Davidovits (2008: 176)



ภาพที่ 18 การรวมตัวของโซเดียมโพลิไซอะเลท-ไซลอกโซ

ที่มา: Davidovits (2008: 179)



ภาพที่ 19 การรวมตัวของโซเดียมโพลิไซอะเลท-ไดไซลอกโซ

ที่มา: Davidovits (2008: 177)

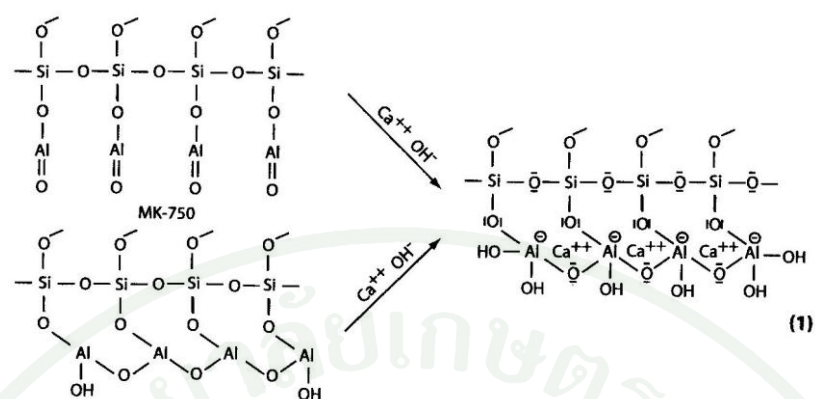
1.4 กลไกของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของสารประกอบแคลเซียม

กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของโพลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบจากแคลเซียม นั้น สามารถเกิดโดยอาศัยหลักการของการแทนที่โซเดียมไอออน ด้วยแคลเซียมไอออนซึ่งเป็นธาตุหมู่ที่ 2 ได้ ซึ่งจากผลการศึกษาของ Davidovits ได้ระบุไว้เพิ่มเติม เป็น 5 ขั้นตอนย่อยดังนี้ (Davidovits, 2011:204-206)

1.4.1 การชะละลายตาม 4 ขั้นตอนได้แก่

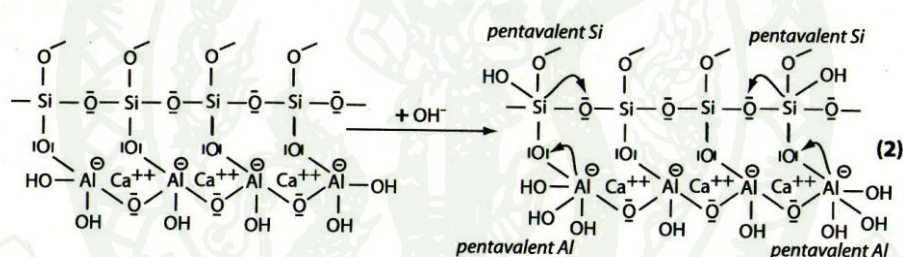
ขั้นตอนที่ 1 การเกิด Tetravalent ของอะลูมินาข้างกลุ่มไซอะเลท ตามภาพที่ 20

ขั้นตอนที่ 2 การชะละลายที่เริ่มจากซิลิกอนอะตอม ตามภาพที่ 21



ภาพที่ 20 การเกิด Tetravalent ของอะลูมินาที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ

ที่มา: Davidovits (2011: 204)



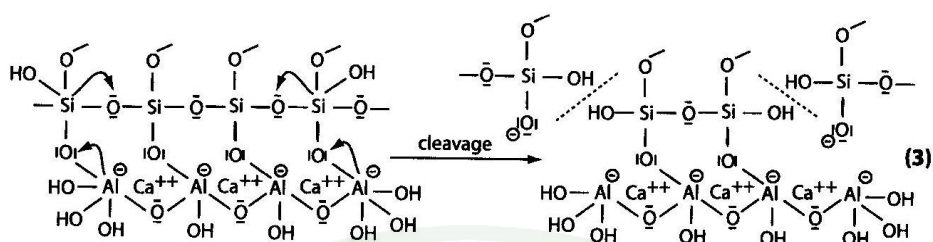
ภาพที่ 21 ขั้นตอนการชะละลายที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ

ที่มา: Davidovits (2011: 204)

ขั้นตอนที่ 3 การแทนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดกลุ่มไฮดรอกซิล (Silanol group- $[\text{Si}-\text{OH}]$) และไฮดรอกไซด์พื้นฐาน (Basic siloxo $[\text{Si}-\text{O}^-]$) ตามภาพที่ 22

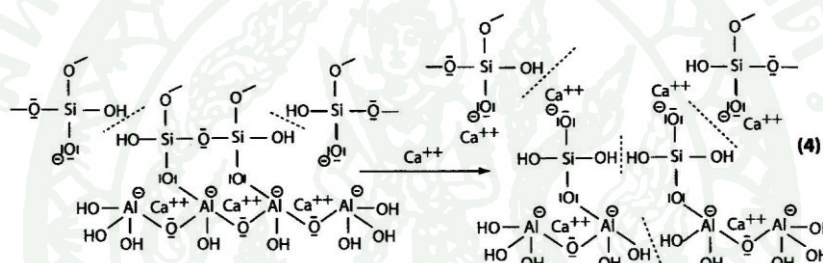
ขั้นตอนที่ 4 การรวมตัวของกลุ่มไฮดรอกซิลกับ OH^- ทำให้เกิดหน่วยหลักของจีโอโพลีเมอร์ไร้เซชัน ตามภาพที่ 23

ขั้นตอนที่ 5 การทำปฏิกิริยากับไอออนบวกของแคลเซียม ทำให้เกิดพันธะของ $\text{Si}-\text{O}(\text{Ca})$ ตามภาพที่ 24 ซึ่งจะเห็นบทบาทของแคลเซียมไอออนอย่างชัดเจน



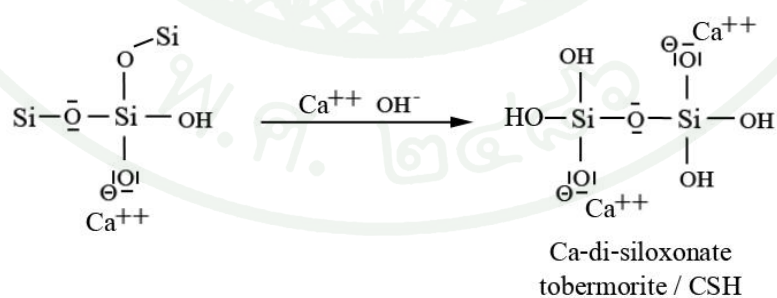
ภาพที่ 22 การเกิดกลุ่มไฮดรอกโซฟีนฐานที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ

ที่มา: Davidovits (2011: 204)



ภาพที่ 23 การเกิดหน่วยพื้นฐานที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ

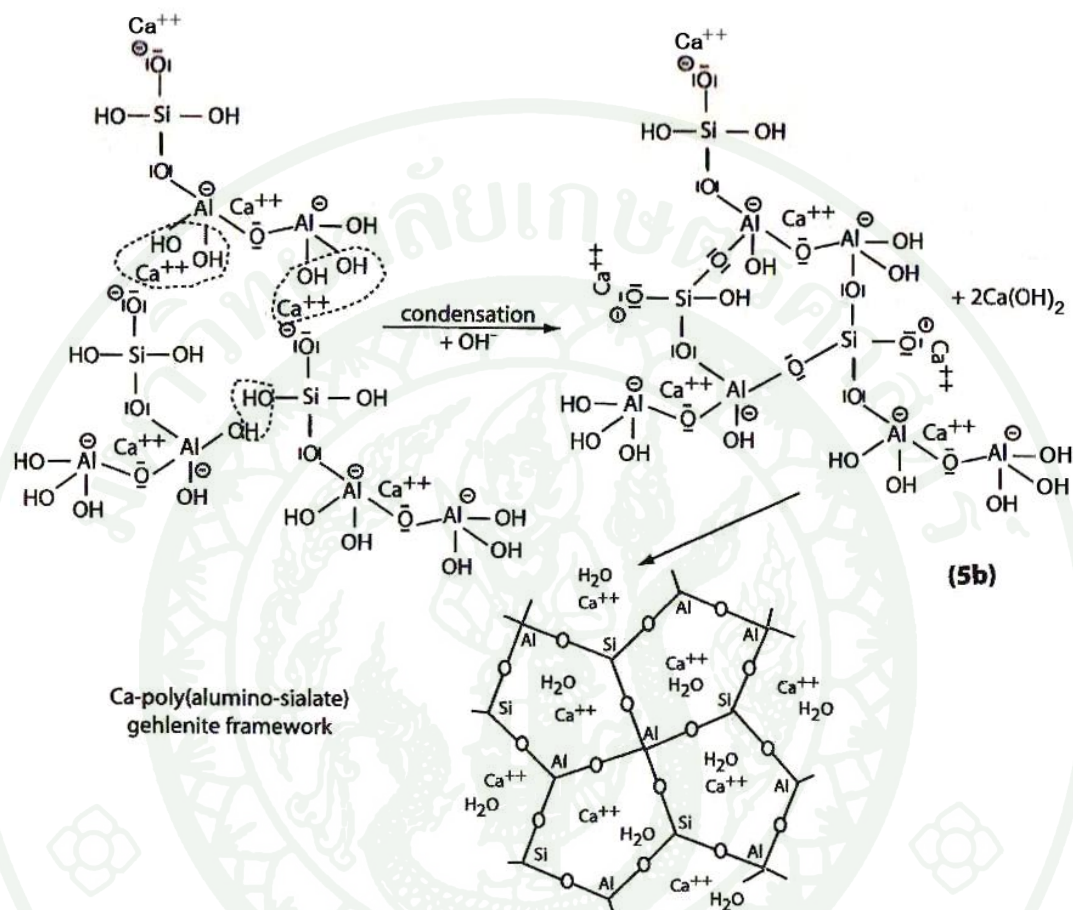
ที่มา: Davidovits (2011: 205)



ภาพที่ 24 การเกิดพันธะของ Si-O(Ca⁺⁺)

ที่มา: Davidovits (2011: 205)

1.4.2 ขั้นตอนของการควบแน่นตามภาพที่ 25



ภาพที่ 25 โครงสร้างของแคลเซียมโพลีออลูมิโนซิลิเกต

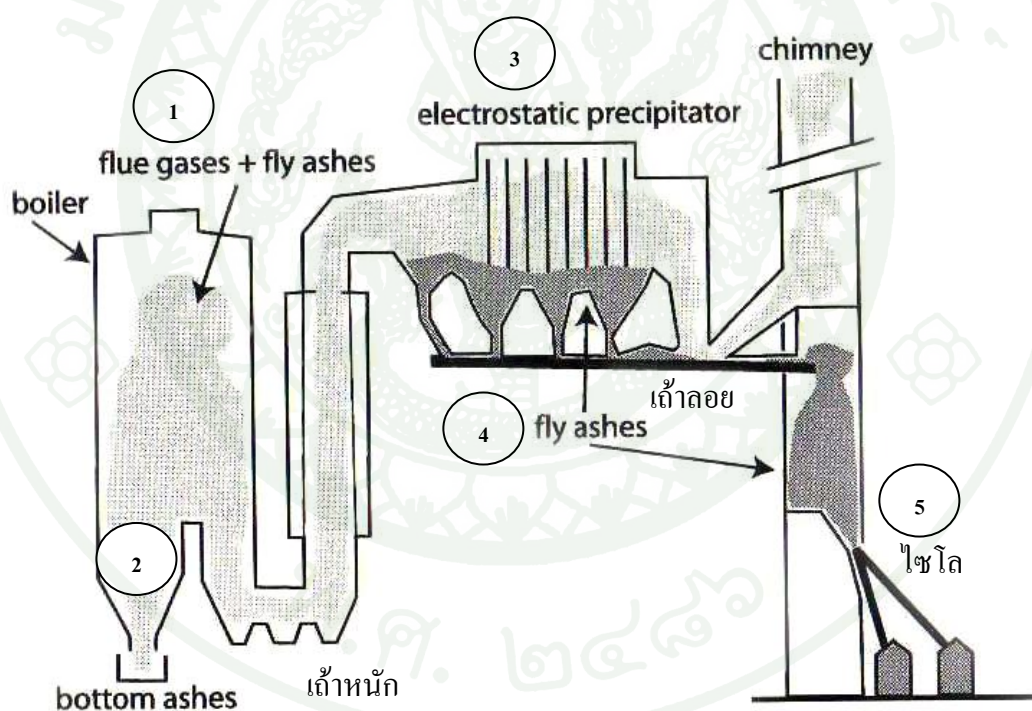
ที่มา: Davidovits (2011: 206)

จากความรู้พื้นฐานในส่วนนี้ทำให้สามารถกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลักได้ คือ วัสดุที่เป็นแหล่งของซิลิกาและอะลูมินาภายในประเทศ และสารละลายต่างที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้วัตถุดิบที่สามารถหาได้ในประเทศทั้งหมด ได้แก่ ถ้ำลอยประเภทแคลเซียมสูงร่วมกับสารละลายต่างที่มีองค์ประกอบของโซเดียมเป็นพื้นฐานคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งจะได้นำกล่าวถึงในส่วนต่อไป

2. ลักษณะพื้นฐานของวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

2.1 เถ้าลอย

เถ้าลอยที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นของการศึกษาครั้งนี้ จัดอยู่ในประเภทของเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินแหล่งแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยทั่วไปแล้วการเผาถ่านหินทำให้เกิดเถ้าถ่านหิน 2 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกคือเถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom ash) ที่มีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งเป็นส่วนที่ตกลงสู่ด้านล่างของเตาเผา และส่วนที่สองคือเถ้าลอย (Fly ash) เป็นส่วนที่ลอยขึ้นสู่ด้านบนพร้อมกับไอร้อนเนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคที่เล็ก จึงมีการใช้เครื่องดักจับแบบไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitator, ESP) เพื่อรวบรวมเถ้าลอยให้ลงสู่ส่วนเก็บด้านล่างต่อไป (ภาพที่ 26)

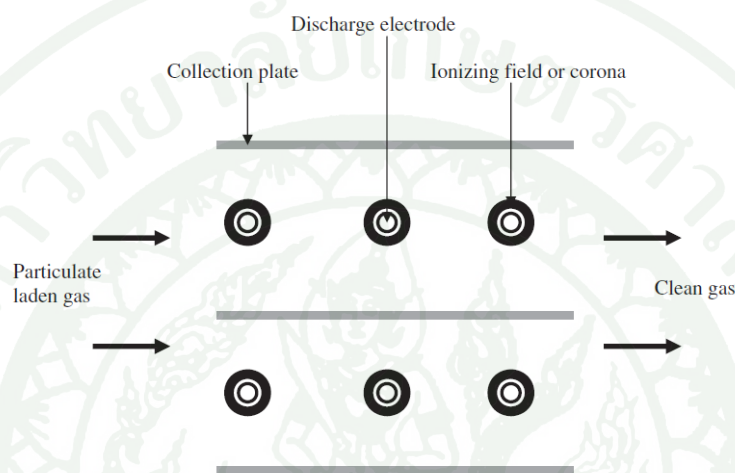


ภาพที่ 26 การกักเก็บเถ้าถ่านหิน

ที่มา: Davidovits (2008: 227)

หลักการที่สำคัญของเครื่อง ESP คือ การใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อดักจับอนุภาคขนาดเล็กหรือฝุ่นละอองที่อยู่ในไออากาศที่ออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยมีการให้ไฟฟ้าแรงสูง

กระแสตรงที่แกนลวดเหนี่ยวนำและแผ่นโลหะแกนกลาง เมื่ออากาศที่มีเถ้าลอยปะปนอยู่จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุลบและไปเกาะติดที่แผ่นโลหะแกนกลางประจุบวก (ภาพที่ 27) แล้วตกลงลงสู่ส่วนล่างของเครื่อง ESP แล้วทำการรวบรวมต่อเนื่องไปยังไซโลเก็บเถ้าลอยต่อไป (Shanthakumar *et al.*, 2008)



ภาพที่ 27 หลักการของเครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์

ที่มา: Shanthakumar *et al.* (2008)

โดยทั่วไปสัดส่วนของปริมาณเถ้าลอยมีอยู่ร้อยละ 70 - 90 จากปริมาณเถ้าทั้งหมด (ปริญญญาและชัย, 2547: 284; ปริญญญา, 2548:16) ซึ่งในส่วนคุณสมบัติและข้อกำหนดพื้นฐานของเถ้าลอยที่ควรกล่าวถึงคือ คุณสมบัติทางเคมีและลักษณะทางกายภาพดังต่อไปนี้

2.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอยแม่เมาะคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยที่มาขององค์ประกอบต่างๆ ตามที่ได้กล่าวถึงนั้น มาจากการแปรเปลี่ยนสภาพของแร่ธาตุภายในถ่านหินเมื่อได้รับความร้อน ตามที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปที่มาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

แร่ธาตุในถ่านหิน	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย
ดินเหนียว (Kaolinite)	มุลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)
ควอตซ์ (Quartz)	ควอตซ์ (Quartz, SiO_2 - ในรูปผลึกของคริสโตบาไลต์) และแก้ว
แคลไซต์ (Calcite)	เกิดการหลอมละลายบางส่วนเป็นแก้ว
ไพไรต์ (Pyrite)	แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO)
มาเคไซต์ (Marcasite)	และแอนไฮไดรต์ (Anhydrite, CaSO_4)
	เฮมาไทต์ (Fe_2O_3) และแมกเนไทต์ (FeO , Fe_2O_3)
	เหล็กออกไซด์ในส่วนที่เป็นแก้วบางส่วน

ที่มา: ปริญญา (2548:17-18)

ASTM International [ASTM] (2012) ได้กำหนดองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญไว้ในมาตรฐาน ASTM C618-12 โดยแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 3 ชนิดคือ N, F และ C ตามที่สรุปไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐานของ ASTM C618-12

ส่วนประกอบทางเคมี	Class N	Class F	Class C
ปริมาณของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันไม่น้อยกว่า	70.0	70.0	50.0
ปริมาณสูงสุดของ SiO_3 ไม่เกิน	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นไม่เกิน	3.0	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไม่เกิน	10.0	6.0	6.0

ที่มา: ASTM (2012)

จากตารางที่ 5 มีข้อแตกต่างที่ชัดเจนคือ ปริมาณของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของชนิด F และ N มีไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ชนิด C ได้กำหนดไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนของออกไซด์ดังกล่าวสามารถแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

สภาพแวดล้อมขณะเผาและชนิดของถ่านหิน ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้อธิบายเพิ่มเติมถึงที่มาของเถ้าลอยแต่ละชนิดกล่าวคือ เถ้าลอยชนิด F มีที่มาจากการเผาถ่านหินชนิด แอนทราไซต์ (Antracite) และ บิทูมินัส (Bituminous) เป็นหลัก ส่วนเถ้าลอยชนิด C นั้นมาจากการเผาถ่านหินชนิด ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) และ ลิกไนต์ (Lignite) นอกจากนั้นแล้วเถ้าลอยชนิด C มักจะมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าเถ้าลอยชนิด F จึงสามารถเรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูง (High calcium fly ash) (ปริญญา, 2548: 20; ASTM, 2012: 1)

สำหรับมาตรฐานของประเทศไทยที่ใช้อ้างอิงในเรื่องเถ้าลอย คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [มอก.] เลขที่ 2135-2545 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3124 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต โดยได้สรุปคุณสมบัติทางเคมีไว้ตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด (ร้อยละ)			
	ชั้น	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้น
	คุณภาพ 1	ชนิด ก	ชนิด ข	คุณภาพ 3
ปริมาณ SiO_2 ไม่น้อยกว่า	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณ CaO	-	น้อยกว่า 10.0	ไม่น้อยกว่า 10.0	-
ปริมาณ SO_3 ไม่เกิน	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น ไม่เกิน	3.0	3.0	2.0	3.0
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ไม่เกิน	6.0	6.0	6.0	12.0

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [สมอ.] (2545: 3)

จากข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 มาตรฐานหลักที่เกี่ยวข้องทั้งจากภายนอกและภายในประเทศ จึงกล่าวได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าลอยทุกรูปแบบมีสารประกอบของซิลิกา อลูมินาเป็นพื้นฐาน และรวมถึงแคลเซียมที่สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์ได้ตามทฤษฎีต่อไป

2.1.2 ลักษณะทางกายภาพ

โดยทั่วไปแล้วอนุภาคเถ้าถ่านหิน มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตรจนถึง 150 ไมโครเมตร (ปริญญและชัย, 2548:285-2286) ซึ่งมาตรฐานที่ใช้เป็นข้อกำหนดเพื่อควบคุมคุณภาพของเถ้าถ่านหินมีระบุไว้ในมาตรฐานต่างๆ เช่น ASTM-C618 สำหรับประเทศไทยนั้นใน มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ได้กำหนดไว้ใน มอก. 2135-2545 เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต

ตารางที่ 7 คุณลักษณะทางฟิสิกส์ของเถ้าลอยตาม ASTM C618-12 และ มอก. เลขที่ 2135-2545

ส่วนประกอบทางเคมี	ASTM C618-12			มอก. 2135-2545			
	Class			ชั้นคุณภาพ			
	N	F	C	1	2 ก	2 ข	3
ความละเอียด:							
ปริมาณที่ค้ำบนร่ง 45 ไมโครเมตร	34	34	34	10	50	55	65
โดยร่อนแบบเปียก ร้อยละ							
พื้นที่จำเพาะทดสอบด้วยเครื่องเบลน							
แอร์เพอร์มีเอบิลิตี (ชม ² /ก) ไม่น้อยกว่า	-	-	-	6,000	2,300	2,000	1,600
ดัชนีกำลัง:เมื่อเทียบกับ OPC Type 1							
ร้อยละไม่น้อยกว่า							
อายุ 7 วัน หรือ	75	75	75	85	70	70	60
อายุ 28 วัน หรือ	75	75	75	95	75	75	70
อายุ 91 วัน	-	-	-	100	85	85	75
ปริมาณน้ำที่ต้องการ:(เมื่อเทียบกับOPC							
Type 1) ร้อยละ ไม่เกิน	115	105	105	102	105	105	108
การคงตัว:							
การขยายหรือหดตัวโดยวิธีใช้หม้อนิ่ง	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
อัดไอ ร้อยละไม่เกิน							

ที่มา: สมอ. (2545: 4): ASTM (2012)

จากข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 มาตรฐานหลักที่เกี่ยวข้องทั้งจากภายนอกและภายในประเทศ จึงกล่าวได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าลอยทุกรูปแบบมีสารประกอบของซิลิกา อลูมินาเป็นพื้นฐาน และรวมถึงแคลเซียมที่สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ได้

2.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ซึ่งอัตราส่วนโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ตามมาตรฐาน ในตารางที่ 8

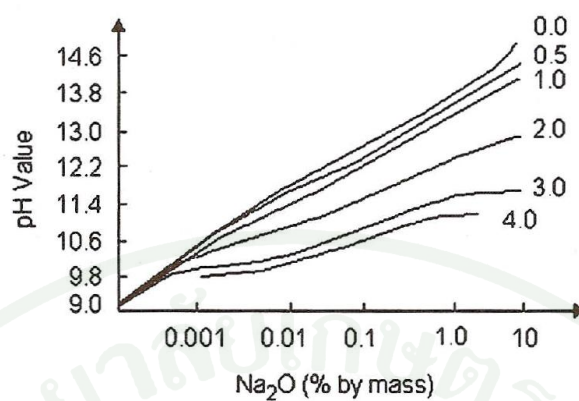
ตารางที่ 8 อัตราส่วนโดยโมลขององค์ประกอบหลักในสารละลายโซเดียมซิลิเกตตาม มอก. 433-2539

ประเภท	อัตราส่วนโดยโมลของ โซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์
ชนิดที่ 1	1:1.97 ถึง 1:2.17
ชนิดที่ 2	1:2.34 ถึง 1:2.58
ชนิดที่ 3	1:3.19 ถึง 1:3.59

ที่มา: สมอ. (2539: 5)

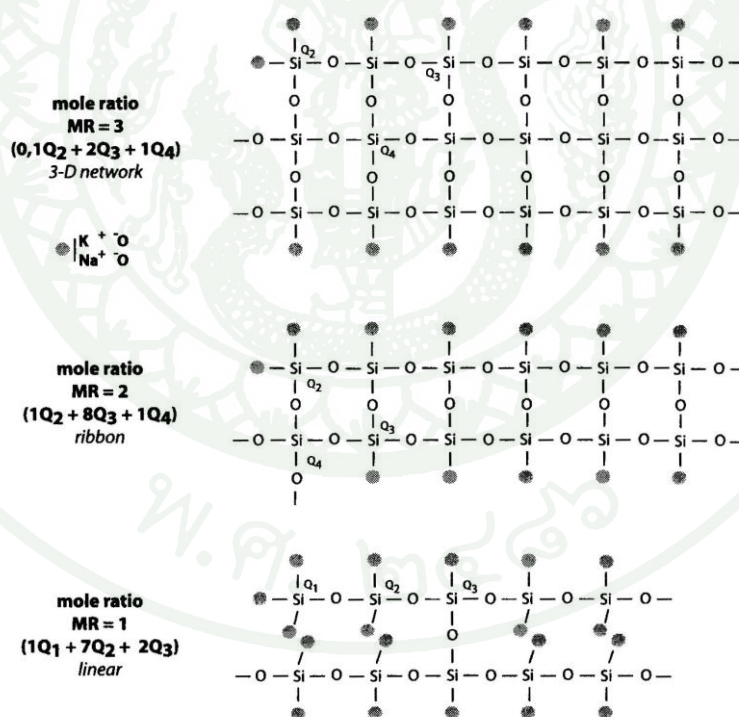
อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ จะเป็นตัวชี้วัดหลักถึงคุณสมบัติต่างๆ รวมถึงโครงสร้างของสารละลาย ซึ่งชื่อเรียกอัตราส่วนนี้ว่า ซิลิเกตโมดูลัส (Silicate modulus, Ms) โดยค่าความเป็นกรดค้างที่มีความสัมพันธ์ซิลิเกตโมดูลัสและปริมาณของโซเดียมออกไซด์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 28 (Shi *et al.*, 2006: 25)

ภาพที่ 29 Davidovits, (2011: 90) ได้สรุปให้โครงสร้างโดยรวมของสารละลายที่มีค่าอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ต่างกัน ซึ่งเห็นได้ว่าโครงสร้างที่มีค่าซิลิเกตโมดูลัสสูงจะมีการจับตัวแน่นกว่าสารละลายที่มีค่าซิลิเกตโมดูลัสต่ำ



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ของปริมาณโซเดียมออกไซด์ต่อค่า pH

ที่มา: Shi *et al.* (2006: 25)



ภาพที่ 29 โครงสร้างของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีค่าอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ต่างกัน

ที่มา: Davidovits (2011: 90)

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตและปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของสารจีโอโพลิเมอร์

กล่าวได้ว่าการศึกษานักวิจัยทั่วโลกเกี่ยวกับสารจีโอโพลิเมอร์มีการพัฒนามากกว่า 3 ทศวรรษ ซึ่งสามารถรวบรวมเป็นประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

3.1 บทบาทของสารละลายต่าง

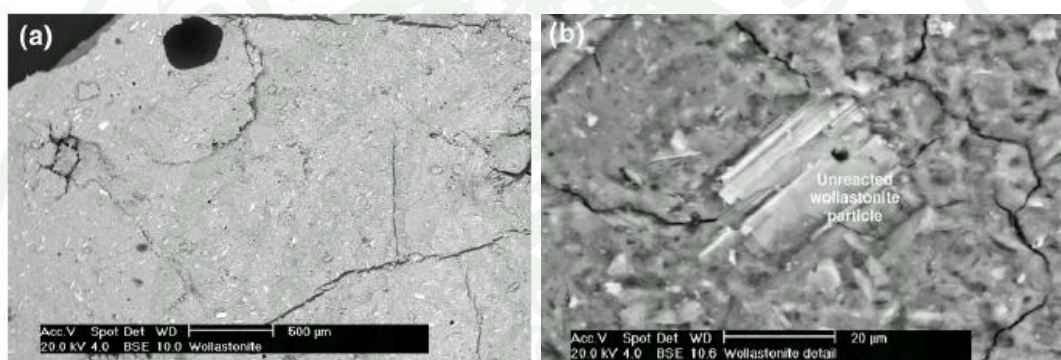
แม้ว่าในทางทฤษฎีของจีโอโพลิเมอร์นั้น ไอออนบวกของกลุ่มแอลคาไลทุกชนิด สามารถใช้ในการสังเคราะห์ แต่ทางปฏิบัติหรืองานวิจัยที่ผ่านมาเน้นมักนิยมใช้ โซเดียมและโพแทสเซียม (Jaarsveld *et al.*, 2002, 2003; Xu and Deventer, 2000, 2002) โดยปรับใช้ได้หลากหลายรูปแบบ (Xu and Deventer, 2000b) และสามารถใช้ร่วมกับไฮดรอกไซด์ของกลุ่มแอลคาไลอื่น ๆ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเร่งใช้ปฏิกิริยาได้ (Davidovits, 1991; Jimenez and Palomo, 2003) และจากการศึกษาของ Barbosa *et al.* (2000) พบว่าการผสมจีโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสมมาจากการใช้ปริมาณของสารละลายกลุ่มโซเดียมที่มีความเข้มข้นพอเหมาะ โดยส่งผลให้โครงสร้างแบบสี่หน้าของ Si และ Al มีความแข็งแรงมากขึ้น

นอกจากนั้นการศึกษาของ Jaarsveld (2003) ยังได้ระบุถึงผลของไอออนบวกที่มีต่อการควบคุมปฏิกิริยา geopolymerization ในช่วงก่อนการแข็งตัวและเมื่อแข็งตัวแล้ว ด้วยการที่อยู่ในรูปแบบของไอออนบวกที่เสริมโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยา geopolymerization ไอออนบวกนี้จะไปกระตุ้นวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตซึ่งส่งผลต่อการรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ (Duxson *et al.* 2006a, 2006b, 2006c) และสิ่งสำคัญในเรื่องของการละลายต่างคือ อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ ภายในสารละลายต่างส่งผลโดยตรงต่อการชะละลาย ซิลิกาและอะลูมินาโดยตรง (Lee and Van Deventer, 2002a, 2002b, 2003) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและลดปริมาณของสารจีโอโพลิเมอร์ด้วยเช่นกัน (Provis *et al.* 2009) รวมถึงส่วนผสมที่มีปริมาณซิลิกาสูงยังส่งผลในลักษณะเดียวกัน (Pair and Deventer, 2001, 2002a, 2002b; Deventer *et al.* 2007)

อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของซิลิเกตยังมีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์ ทำให้เกิดการเชื่อมพันธะกันระหว่าง อะลูมินา ออกซิเจน และซิลิกา (Cricado *et al.*, 2007a,

2007b) โดยความเข้มข้นของซิลิกาที่ได้จากสารละลายสูงพบว่าส่งผลต่อความพรุนของสารจีโอโพลิเมอร์และลดโครงสร้างของเนื้อวัสดุอีกด้วย (Duxson *et al.*, 2005a, 2005b, 2005c)

นอกจากธาตุหมู่ 1 อย่างโซเดียมและโพแทสเซียมแล้วยังได้มีการศึกษาผลของธาตุหมู่ 2 ด้วยเช่นคือ แคลเซียม โดยพบว่าสามารถเพิ่มกำลังของสารจีโอโพลิเมอร์ได้ ด้วยการจับตัวกันในรูปแบบของ Ca–Al–Si gel (Yip and Deventer, 2005, 2008a, 2008b) เนื่องจากแคลเซียมนี้มีความสามารถในการเชื่อมโครงสร้างโซลเจลด้วยเช่นกันตามภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์ที่มีแคลเซียมประกอบ

ที่มา: Yip and Deventer (2008a)

3.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรม

คุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ของสารจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งตัวมีอิทธิพลที่สำคัญจากโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมนั้น กล่าวคือปริมาณของซิลิกาและอะลูมินาในสารตั้งต้นมีส่วนสำคัญของพันธะภายใน (Duxson *et al.* 2007a, 2007b, 2007c, 2007d) และอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต ส่งผลต่อโครงสร้างภายใน กำลังรับแรงอัดและค่าการนำความร้อน อย่างมีนัยสำคัญ (Jimenez and Palomo, 2003, 2005a, 2005b) โดยคุณสมบัติเด่นของสารจีโอโพลิเมอร์คือ การพัฒนากำลังได้อย่างรวดเร็ว มีค่าความเป็นฉนวน สามารถคงสภาพได้ในสภาวะที่มีซัลเฟตหรือได้สูง รวมถึงใช้กักเก็บของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้ดี (Jimenez *et al.*, 2005, 2006a, 2006b, 2007, 2008a, 2008b)

การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในการสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับคินขาวเผา (Alonso and Palomo, 2001a, 2001b) โดยที่คุณสมบัติทางวิศวกรรมจะมีความแตกต่างกัน ด้วยเนื่องจากวัตถุดิบภายในสารตั้งต้นนั้น ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ต่อโซเดียมออกไซด์ในสารละลาย ปริมาณของเถ้าลอยต่อสารละลาย โดยจะส่งผลต่อโครงสร้างภายในอย่างมากว่าจะเป็นผลึกซีโอไลต์หรือรูปแบบอสัณฐาน (Criado *et al.*, 2008, 2009, 2010a, 2010b)

ส่วนความคงทนนั้นพบว่ามีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ต่ำ มีความคงทนต่อการกัดกร่อนของกรด จากการทดสอบสามารถทนต่อการกัดกร่อนของกรดอะซิติก 5 % โดยนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์ไปแช่ในกรดเป็นระยะเวลา 200 วัน ปรากฏว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จะลดลงในอัตราส่วนที่น้อยกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพสต์ รวมถึงมีความทนทานต่อการทำลายของสารซัลเฟต เมื่อนำจีโอโพลิเมอร์ไปแช่ในสารซัลเฟต จีโอโพลิเมอร์จะเกิดการสูญเสียไอออนของแอลคาไลซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดความสมดุลด้านประจุไฟฟ้าในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาหลูโซ การสูญเสียไอออนแอลคาไลดังกล่าวทำให้เกิดความเค้นและรอยแยก แต่การทำลายนี้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพสต์ (Gordon *et al.*, 2011a, 2011b)

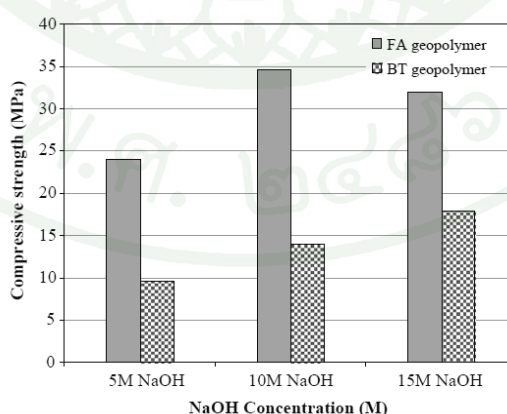
3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติ

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยนั้น สามารถเร่งได้อุณหภูมิและช่วงเวลาของการให้ความร้อนได้ตั้งแต่ 45-80 องศาเซลเซียส (Kovalchuk *et al.*, 2007, 2008; Sindhunata *et al.*, 2006, 2008) และองค์ประกอบที่สำคัญคือ อัตราส่วนโดยอะตอมของซิลิกาและอะลูมินา ที่อยู่ในโครงสร้างของเนื้อจีโอโพลิเมอร์นั้นซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะและช่วงการชะละลายที่แตกต่าง (Jimenez *et al.*, 2010, 2011) โดยอัตราส่วนที่ Duxson *et al.* (2005a, 2005b) ที่ได้ระบุไว้อยู่ในช่วง 1.90-2.50 และความเข้มข้นและค่าความเป็นกรด่างของสารละลายต่างมีผลต่อความสามารถในการชะละลายอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือ ควรมีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในช่วง 4-12 โมลาร์ (Xu and Deventer, 2000, 2002a) และการคั่นคว่ำ ของ Palomo *et al.* (1999, 2004, 2005) ได้เผยให้เห็นถึงผลของการกระตุ้นเถ้าลอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยการพัฒนาำลังความแข็งแรงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของปริมาณโซเดียมไอออนที่ใช้ ซึ่งได้ขยายผลไปสู่การใช้ Bottom ash ในการสังเคราะห์อีกด้วย (Qiao *et al.*, 2008)

3.4 การวิจัยภายในประเทศ

จากงานค้นคว้าวิจัยในต่างประเทศได้ส่งผลให้กลุ่มนักวิจัยในประเทศไทยได้ทำการวิจัยด้วยพื้นฐานของวัสดุที่มีอยู่ในประเทศ โดยบทความในวารสารวิชาการนานาชาติเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์ของเถ้าลอยแคลเซียมสูงนั้น เริ่มจากงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2007) ที่ได้ทดลองนำร่องศึกษาด้านกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สัดส่วนของสารละลายต่าง รวมถึงอุณหภูมิและช่วงเวลาของการบ่มล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกันกับงานของ Kamhangrittirong *et al.* (2006) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสาร โซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นจะมีผลต่อระยะเวลาก่อนตัวลดลง โดยกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

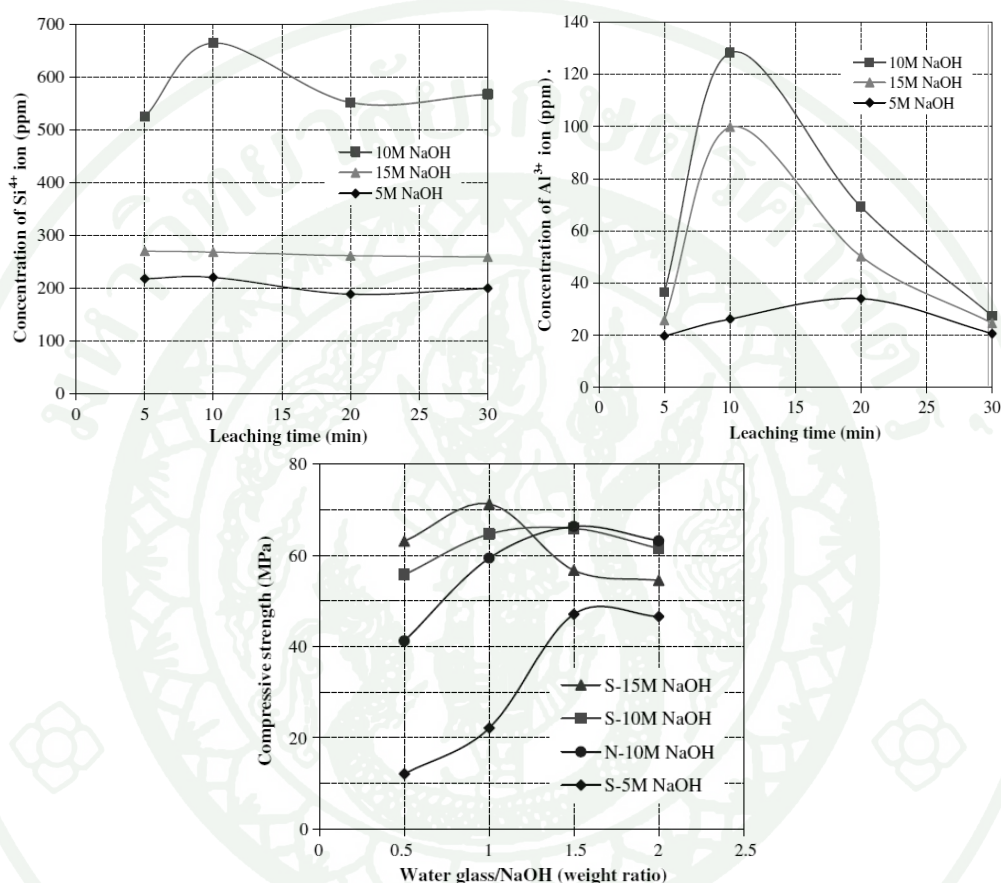
งานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการใช้เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ พบว่าสามารถสังเคราะห์ตัวอย่างขึ้นได้เหมือนกันแต่ผลของกำลังรับแรงอัดนั้นต่างกันถึง ร้อยละ 50-60 (ภาพที่ 31) ซึ่งกำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดอยู่ที่ส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ที่โดยในส่วนของเนื้อวัสดุภายในที่ได้จากภาพ SEM มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน



ภาพที่ 31 อิทธิพลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และชนิดของเถ้าต่อกำลังรับแรงอัด

ที่มา: Chindaprasirt *et al.* (2009)

Rattanasak and Chindaprasirt (2009) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสังเคราะห์อิโพลิเมอร์ พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ Si และ Al ไอออนที่ชะลายออกมาตามภาพที่ 32 และส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการชะละลายต่อปริมาณ Si และ Al ไอออน

ที่มา: Rattanasak and Chindaprasirt (2009)

จากภาพที่ได้แสดงข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษามากคือช่วงเวลาและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ควรใช้เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดด้วยการผสมแยกกันคือการเติม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนและงานวิจัยนี้ได้พบว่าปริมาณสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อการศึกษาสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดอย่างชัดเจน โดยอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวส่งผลในลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยที่ใช้เถ้าหนักเช่นกัน (Sathonsaowaphak *et al.*, 2009)

Wongpa *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาในรูปการประยุกต์ใช้ในรูปแบบของคอนกรีตด้วยจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงร่วมกับเถ้าแกลบ พบว่า สัดส่วนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่อมวลรวม และสัดส่วนของทรายต่อมวลรวมส่งผลต่อกำลังอย่างชัดเจน โดยเมื่อมีการทดแทนเถ้าลอยด้วยเถ้าแกลบพบว่ามีผลต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน ซึ่งทั้งนี้ทำให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้วัสดุภายในประเทศได้เป็นอย่างดี

Songpiriyakij *et al.* (2010) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลที่ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มาจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเถ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวล พบว่าปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) มีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างเห็นได้ชัด

ดังนั้นจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมาตามที่ได้อ้างอิงถึงแล้ว ทำให้สามารถกำหนดกรอบของตัวแปรสำหรับการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญต่อการพัฒนาวัสดุก่อสร้าง รวมถึงลักษณะโครงสร้างภายในระดับจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มาจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อไปดังนี้

สัดส่วนของปริมาณเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อสารละลายต่างโดยน้ำหนักเป็น 60:40 65:35 และ 70:30 โดยถ้าเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (Solid:Liquid, S/L) อยู่ในช่วง 1.50 1.85 และ 2.33 ในทางกลับกันถ้าเป็นค่าอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (Liquid:Solid, L/S) จะอยู่ในช่วง 0.67 0.54 และ 0.43 ตามลำดับทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการเทียบผลกับงานวิจัยอื่นๆ ได้

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโครโคไซด์ได้เลือกศึกษาขยายผลในช่วงความเข้มข้นที่ 8 10 และ 12 โมลาร์

สำหรับสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมโครโคไซด์ ได้กำหนดเป็นสัดส่วนโดยโมลของ SiO_2 ต่อ Na_2O ภายในสารละลายต่างรวม โดยเรียกสัดส่วนนี้ว่า ซิลิเกตโมดูลัสที่มีค่าตั้งแต่ 0.60 ถึง 1.40 เพิ่มขึ้นขั้นละ 0.10 ทั้งนี้ถ้าเปรียบเทียบกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมโครโคไซด์จะอยู่ในช่วง 0.49-2.27 ตามลำดับ

4. เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope, EM)

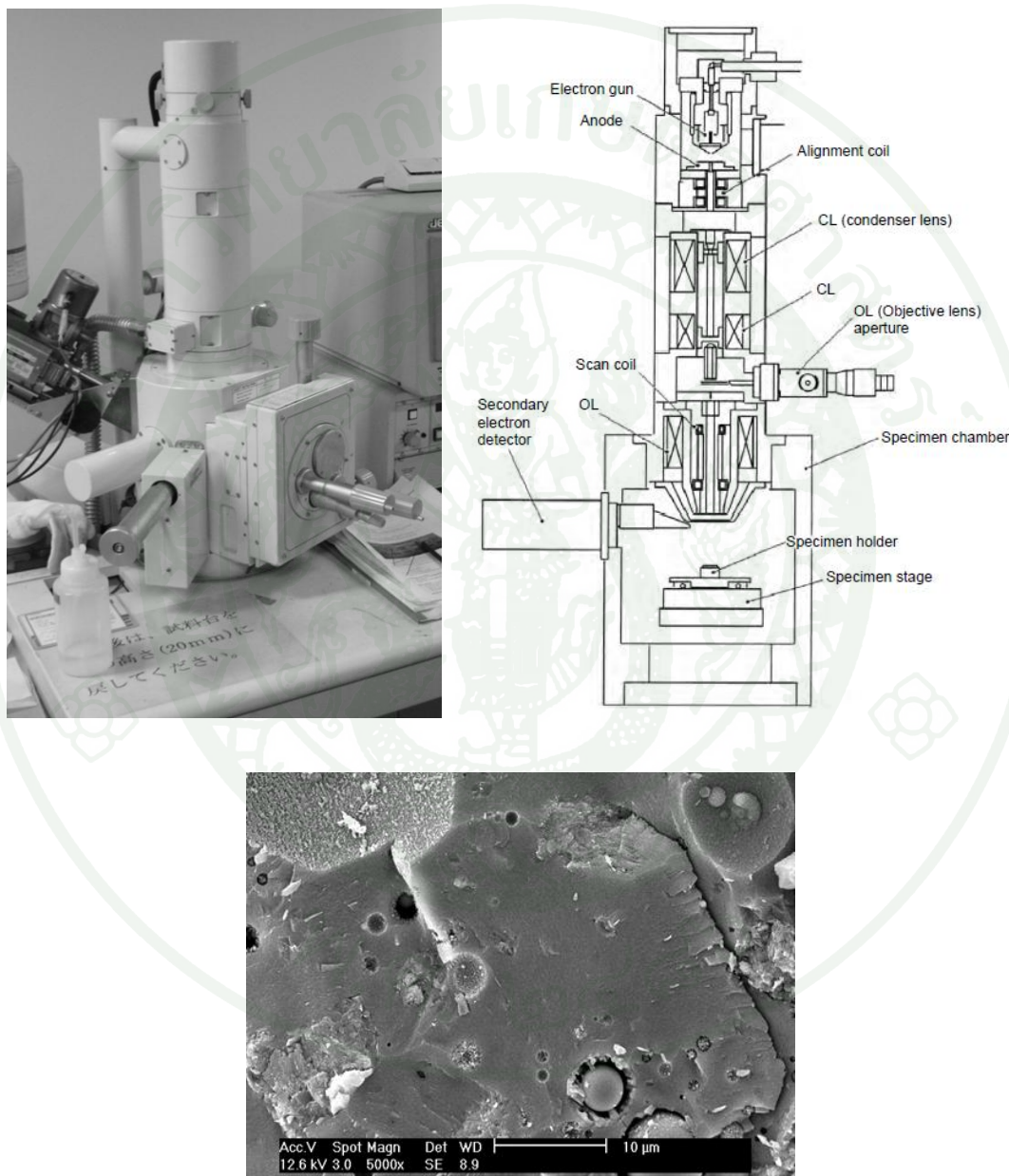
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการศึกษาด้านวัสดุในปัจจุบันเพื่อให้เข้าใจลักษณะภายในตัวอย่างด้วยกำลังขยายที่สูงกว่า กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์แบบ OM นั้นใช้คลื่นแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นคือมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์แบบ OM ไม่สามารถขยายวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมครอนได้ แต่ในส่วนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนั้น ใช้คุณสมบัติของคลื่นอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่ามาก จึงมีประสิทธิภาพในการให้รายละเอียดของวัตถุมากถึงระดับนาโนเมตร (บัญชา และ ศุภกาญจน์, 2544: 2-3) ทั้งนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

4.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายที่ต่ำกว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เนื่องจากหลักการสร้างภาพมีความแตกต่างกัน ซึ่งตามภาพที่ 33 ได้แสดงให้เห็นถึงกล้อง SEM และ การเตรียมตัวอย่างของกล้อง SEM สามารถใช้ตัวอย่างจากชิ้นงานได้โดยตรง และได้การสร้างภาพทำได้โดยการใช้การวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าจากตัวอย่าง

จากภาพโครงสร้างของ SEM ในส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) เช่นเดียวกันกับ TEM แต่จะมีความต่างศักย์น้อยกว่าคืออยู่ในช่วง 0-30 กิโลโวลต์ (kV) โดยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่นิยมใช้มี 4 แบบ ได้แก่ ลวดทังสเตน, ฟิลิก LaB₆, โคัลด์ฟิลด์อิมิชชัน, ซีอต์กีฟิลด์อิมิชชัน ทั้งนี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วใช้ตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป สำหรับเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงจึงมีชื่อเรียกเลนส์ชุดนี้ว่า (Condenser lens) และเลนส์ส่วนสุดท้ายนั้นทำหน้าที่ปรับระยะโฟกัสของลำอิเล็กตรอนให้ไปตก

กระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมาย จึงมีชื่อเรียกเลนส์ชุดนี้ว่า (Objective lens) โดยมีส่วนกราดภาพ (Scan coil) เป็นชุดควบคุมการกราด โดยทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น แล้วถูกแปลงเป็นสัญญาณสำหรับการสร้างภาพบนจอ (บัญชา และ ศุภกาญจน์, 2544: 4-6)



ภาพที่ 33 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและตัวอย่างภาพ

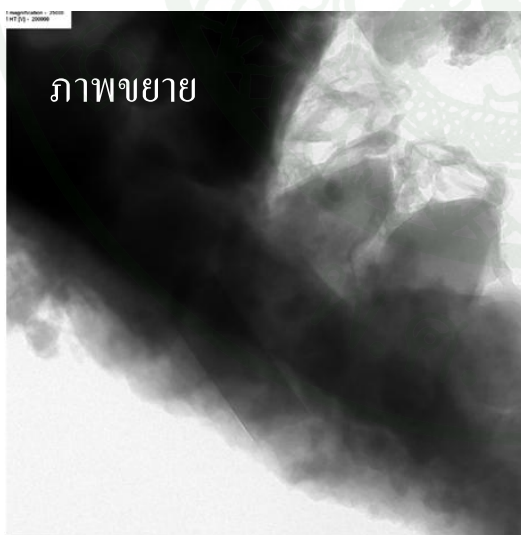
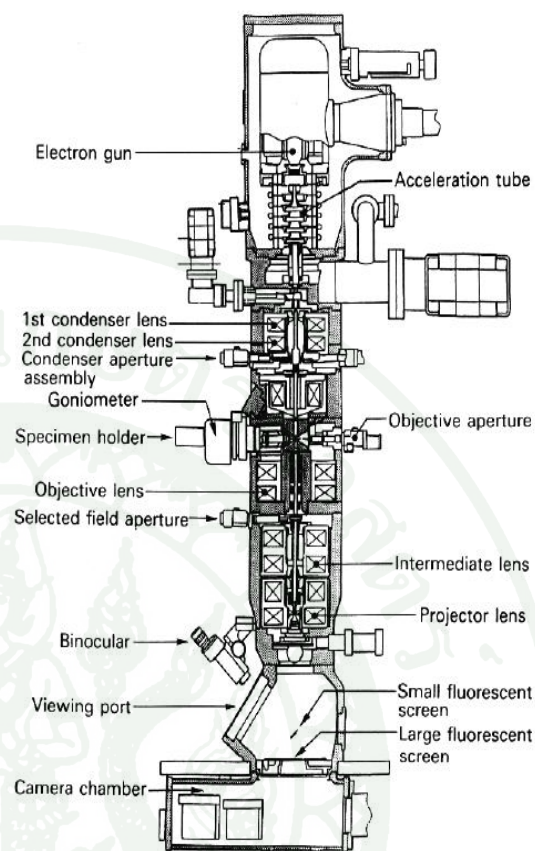
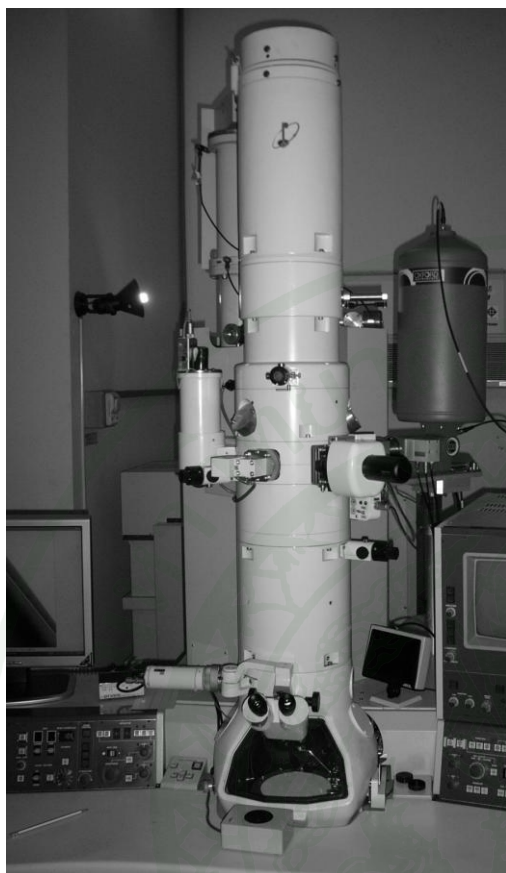
ที่มา: Zhou and Wang (2006: 10)

4.1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

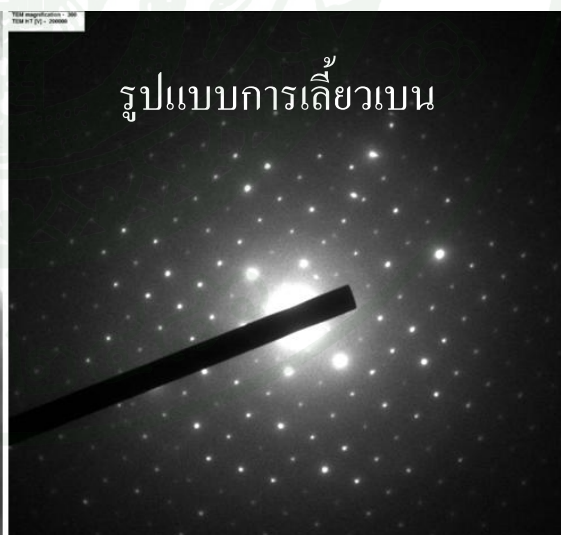
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง กล้อง TEM เหมาะสำหรับการวิเคราะห์รายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (ชัยชนา และ ยศ, 2549: 10-12)

ภาพที่ 34 ส่วนบนทั้งซ้ายและขวาแสดงภาพรวมถึงภาพตัดแสดงส่วนประกอบของลักษณะการทำงานโดยสังเขปภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ในลักษณะเดียวกันกับกล้อง SEM แต่ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนในกล้อง TEM สูงถึง 100 - 400 กิโลโวลต์ (kV) กล้อง TEM ทำงานโดยใช้เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) 2 อันปรับลำอิเล็กตรอนให้ขนานกับคอลัมน์ของกล้อง จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านชิ้นงานที่เตรียมให้บาง (<500 นาโนเมตร) และเกิดการเลี้ยวเบน ลำอิเล็กตรอนที่เลี้ยวเบนจะถูกโฟกัสรวมกันเป็นจุดดิฟแฟรกชัน (Diffraction spots) ที่ระนาบแบคโฟกัล (Back focal plane) โดยเลนส์วัตถุ (Objective lens) จากนั้นจะผ่านไปยังเลนส์แม่เหล็กอีก 3 ตัวเพื่อขยายและแสดงภาพลงบนจอของกล้อง TEM

ลักษณะภาพที่ได้จากเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 2 ชนิด คือ รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งให้รายละเอียดโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมในวัสดุ และ ภาพขยาย (Image) (ขนาด 10,000-1,000,000 เท่า) ซึ่งผู้ใช้กล้อง TEM สามารถแปลผลข้อมูลที่ได้จากภาพทั้ง 2 ชนิดนี้ อย่างกว้างขวาง เช่น หากชิ้นงานมีข้อบกพร่องจะสามารถสังเกตได้จากภาพขยายและรูปแบบการเลี้ยวเบนจะแสดงตำแหน่งและลักษณะการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานออกมาอย่างเด่นชัด การถ่ายภาพขยายโดยใช้เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านขึ้นอยู่กับกลไกสำคัญ 2 ชนิดคือ กลไกเฟสคอนทราสต์ที่มีกำลังแยกแยะสูง (High-resolution phase contrast mechanism) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่ต้องการแยกแยะรายละเอียดที่เล็กกว่า 1 นาโนเมตร และ กลไกแอมพลิจูดคอนทราสต์ (Amplitude contrast mechanisms) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่ต้องการแยกแยะรายละเอียดที่ใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร (ชัยชนา และ ยศ, 2549: 2)



ภาพขยาย

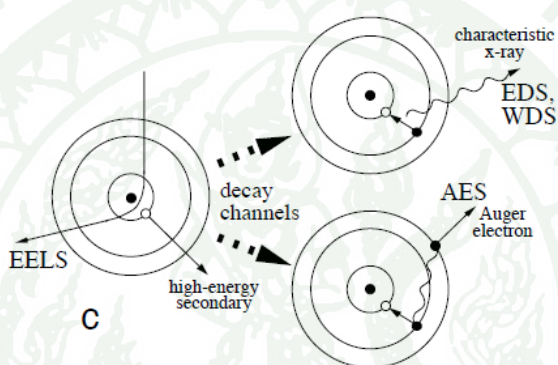


รูปแบบการเลี้ยวเบน

ภาพที่ 34 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและตัวอย่างภาพ

ที่มา: Fultz and James (2007: 60)

ดังนั้นข้อมูลภาพที่ได้ได้จาก TEM และ SEM จึงมีความสำคัญต่อการวิจัยด้านวัสดุศาสตร์มาก อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคของการวิเคราะห์อื่นร่วมด้วยเช่น เทคนิค Energy dispersive spectrometry, EDS และ Wavelength dispersive spectrometry, WDS เป็นต้น ซึ่งใช้หลักการของการกระจายพลังงานตามภาพที่ 37 (บัญชา และ ศุภกาญจน์, 2544: 3) โดยสรุปแล้ว ถ้าต้องการศึกษาลักษณะรูปร่างหรือพื้นผิวของวัสดุควรใช้ SEM แต่ถ้าต้องการศึกษารายละเอียดแบบส่องทะลุตัวอย่างในระดับกำลังขยายสูงถึงระดับนาโนเมตร การใช้ TEM สามารถเป็นทางเลือกที่เหมาะสมได้



ภาพที่ 35 การกระจายพลังงานของตัวอย่างภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

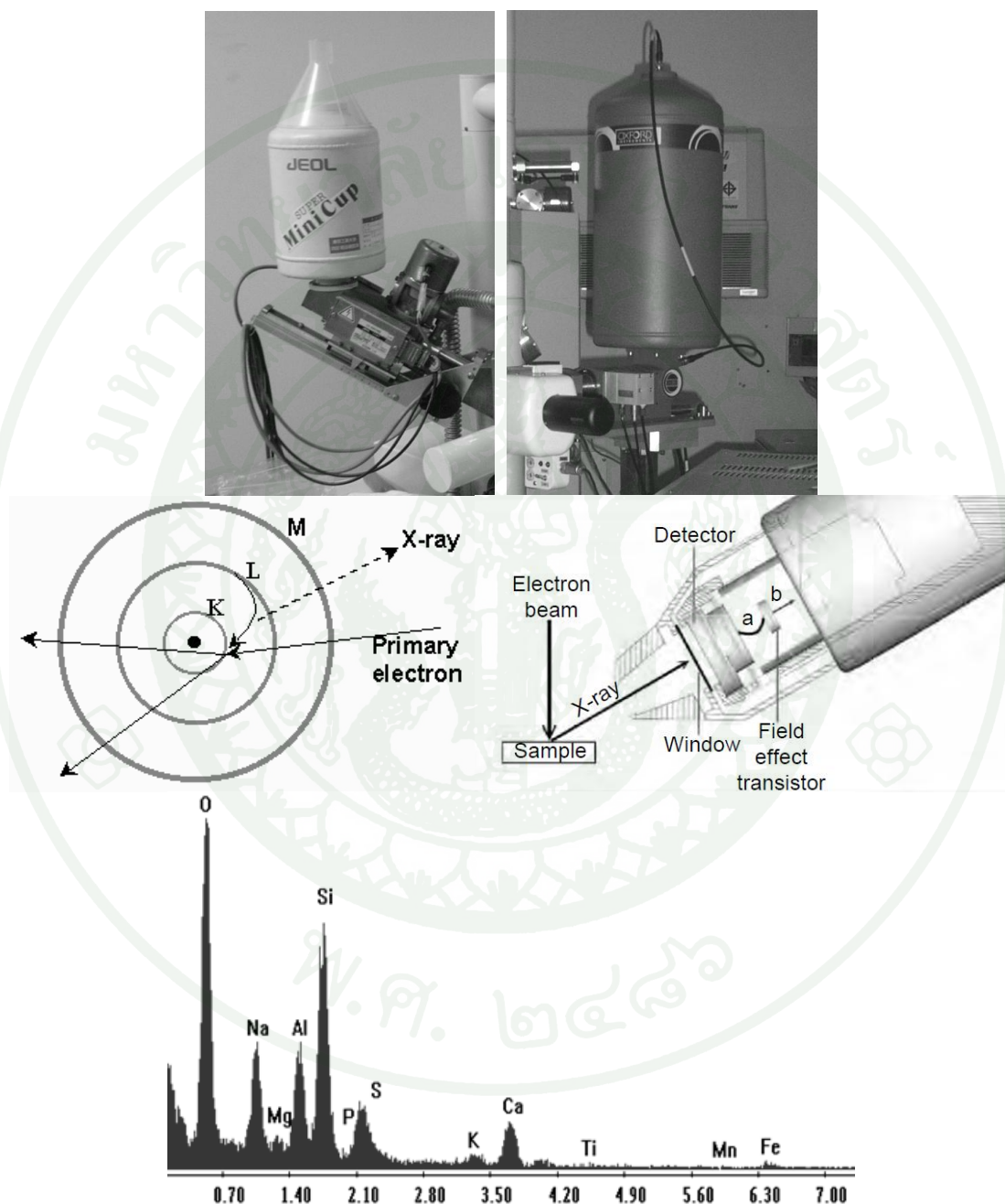
ที่มา: Fultz and James (2007: 14)

4.2 การกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray: EDX)

เทคนิคการวัดค่าการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ เป็นชื่อที่กันอีกชื่อหนึ่งของ EDS ทั้งนี้สามารถประยุกต์สำหรับการระบุชนิดและปริมาณของธาตุได้ ด้วยการใช้เครื่องตรวจวัด (Detector) ที่เป็นอุปกรณ์ประกอบเสริมเข้ากับกล้อง SEM หรือ TEM ตามภาพที่ 36 (ส่วนบน) ซึ่งภาพซ้ายแสดงอุปกรณ์ที่ติดกับกล้อง SEM และภาพขวาแสดงอุปกรณ์ที่ติดกับกล้อง TEM ตามลำดับ โดยจะสังเกตเห็นได้จากชุดเก็บไนโตรเจนเหลว สำหรับหล่อเย็นเครื่องตรวจวัดอย่างชัดเจน

เมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบวัตถุตัวอย่างจะทำให้เกิดภาวะไม่เสถียรภายในระดับอะตอม ดังนั้นจึงมีการปรับให้เสถียรด้วยอิเล็กตรอนจากชั้นถัดไป ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการปล่อยพลังงานรังสีเอกซ์ออกมา ตามภาพที่ 36 (ส่วนกลาง) ที่เป็นค่าเฉพาะของธาตุต่างๆ เข้าเครื่องตรวจวัดแล้ว

แสดงผลเป็นกราฟตามภาพที่ 36 (ส่วนล่าง) จากกราฟทำให้เข้าใจถึงธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ตัวอย่าง โดยเมื่อใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ปริมาณของธาตุ ทำให้ทราบปริมาณของธาตุได้เช่นกัน



ภาพที่ 36 อุปกรณ์ EDS และตัวอย่างผลการวิเคราะห์ธาตุ

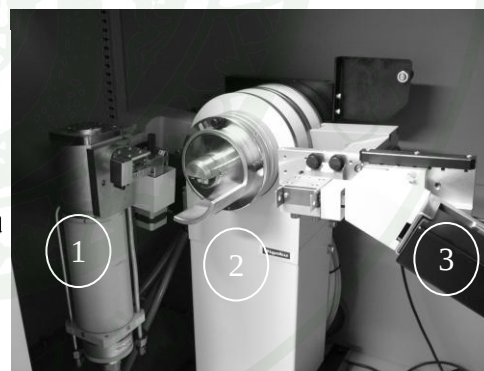
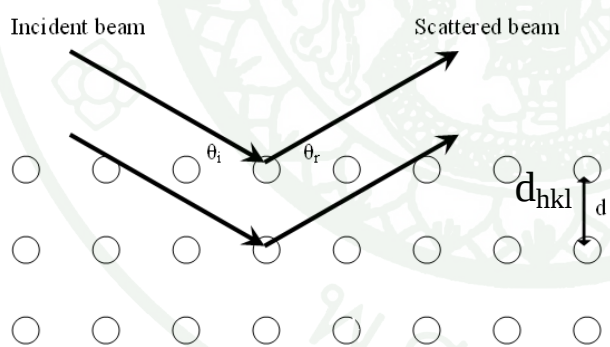
ที่มา: Zhou and Howe (2006: 60)

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) นั้นเป็นเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึก หลักการของ W. H. Bragg และ W.L. Bragg ที่ว่า ผลึกนั้นประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน โดยระยะห่างระหว่างระนาบนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

โดยที่ ค่า λ คือ ค่าความยาวคลื่น, ค่า n หมายถึง ลำดับของการสะท้อน มีค่าจำนวนเต็มคือ 1, 2 หรือ 3 ขึ้นไป, ค่า d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ hkl ผลึก และมุม θ หมายถึง มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์เมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา (ปัญญา, 2544: 25-26; สุธรรม, 2554: 26-27)



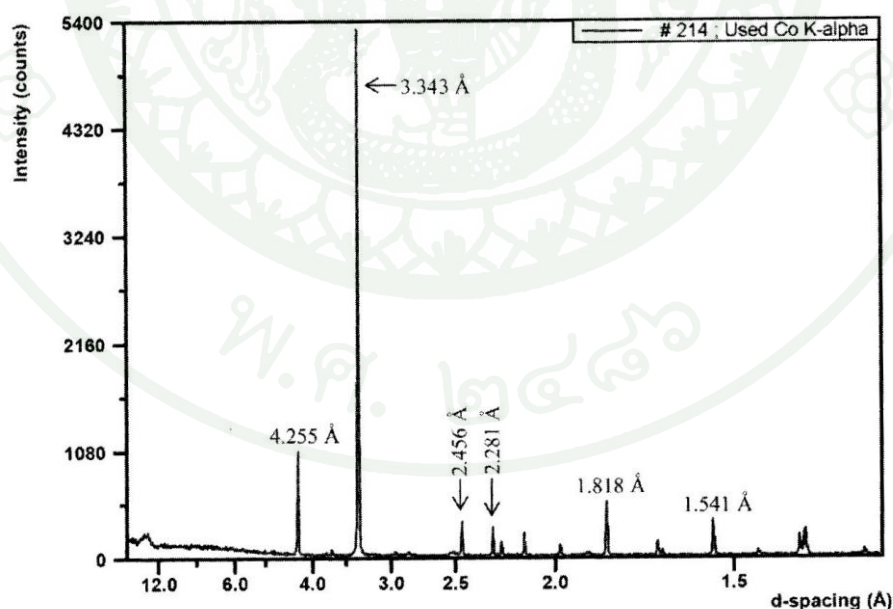
ภาพที่ 37 หลักการคำนวณระยะทางของระนาบและเครื่อง XRD

ที่มา: ปัญญา (2544: 25-26); สุธรรม (2554: 27)

จากภาพที่ 37 ได้แสดงตำแหน่งสำคัญภายในเครื่อง XRD ในการทำงานของเครื่อง XRD นั้น เริ่มต้นจากรังสีเอกซ์จะถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (ตำแหน่งที่ 1) ลงบนตัวอย่าง (ตำแหน่งที่ 2) แล้วรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์

(X-ray detector) โดยเคลื่อนที่ด้วยมุมตามที่กำหนดไว้ (ในทางปฏิบัติสำหรับตัวอย่างแบบผงทั่วไป ใช้ค่ามุม 10 - 80 องศา) เพื่อการเลี้ยวเบนสอดคล้องกัน แล้วบันทึกลงบนหน่วยประมวลผล และแสดงข้อมูลที่ได้รับในรูปของแผนภูมิ diffractogram ซึ่งประกอบด้วยจุดยอด (Peak) ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ดังแสดงตัวอย่างตามภาพที่ 38

ข้อมูลที่ได้หลังจากการเก็บข้อมูลจากเครื่องวัดการเลี้ยวเบนจะถูกนำเสนอในรูปแบบความเข้มของการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ ต่างๆ ซึ่งจะถูกรวบรวมและเขียนเป็นแผนภูมิระหว่างความเข้มของรังสีของการเลี้ยวเบนกับมุม 2θ ที่รังสีเลี้ยวเบนออกมา เรียกแผนภูมินี้ว่าแบบการเลี้ยวเบน (Powder X-ray Diffraction pattern) จุดยอดของกราฟตามภาพตัวอย่างนั้นคือลักษณะเฉพาะของผลึกที่เรียงตัวในระนาบต่างๆ จากคำนวณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการของ Bragg โดยทั่วไปต้องนำแบบการเลี้ยวเบนที่ทดลองได้เปรียบเทียบกับแบบการเลี้ยวเบนของสารต่างๆ ที่ได้รวบรวมไว้ในฐานข้อมูล JCPDS (The joint Committee on Powder Diffraction Standards) ซึ่ง Powder X-ray Diffraction pattern นี้มีประโยชน์ในการหาโครงสร้างของสารโดยเทียบกับแบบการเลี้ยวเบนที่เก็บไว้ใน JCPDS (ธงชัย และคณะ, 2553: 1-7)



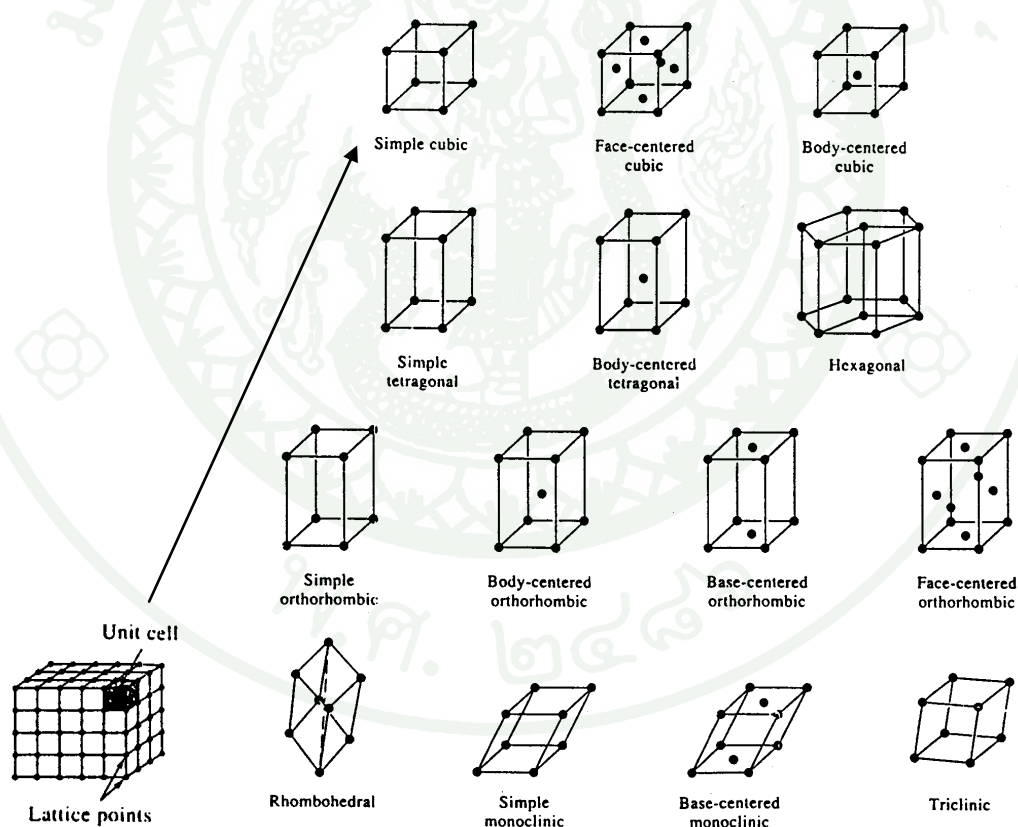
ภาพที่ 38 ตัวอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแร่ควอร์ตซ์

ที่มา: ธงชัยและคณะ (2553: 90)

โดยทั่วไปแล้ว การจำแนกชนิดของของแข็งสามารถทำได้หลายวิธี เช่นพิจารณาจากลักษณะของการจัดเรียงตัวของอนุภาคในโครงสร้างผลึก หรือจากแรงดึงดูดหรือพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคของของแข็งนั้น ซึ่งการจำแนกชนิดของของแข็งตามการจัดเรียงตัวของอนุภาคสามารถแบ่งของแข็งได้เป็น 2 แบบคือ (พินิติ และคณะ, 2551ก: 158-159)

4.3.1 ผลึกของแข็ง (Crystalline solids)

ผลึกเกิดจากการที่อะตอม ไอออน หรือ โมเลกุลมาเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ของแข็งมีรูปทรงเป็นเรขาคณิตในสามมิติเป็นแบบแน่นอน มีเหลี่ยมคมที่ชัดเจนและเห็นของเป็นเส้นตรง (พินิติ และคณะ, 2551ก: 158-159)



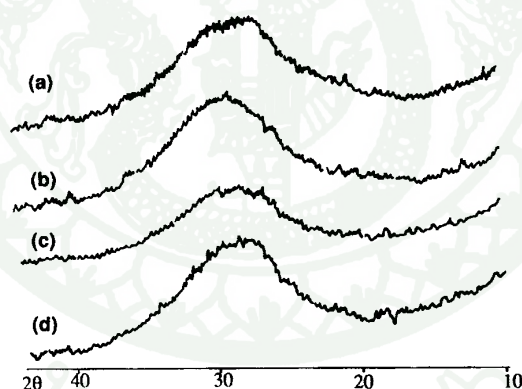
ภาพที่ 39 รูปแบบโครงสร้างของผลึก

ที่มา: เสาวรจน์ (2546: 58)

4.3.2 ของแข็งอสัณฐาน (Amorphous or noncrystalline solids)

โดยทั่วไปแล้ว สารประเภทอสัณฐานนี้ไม่มีจุดหลอมเหลวที่แน่ชัด เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคไม่เป็นระเบียบ หรือเป็นระเบียบในช่วงสั้นๆ (Short range order) ซึ่งการที่สารเป็นสารอสัณฐานนั้นอาจเกิดเนื่องมาจากโครงสร้างของอนุภาคมีความซับซ้อนหรือมีความเกะกะทำให้อนุภาคของแข็งไม่สามารถเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ หรืออาจเกิดจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้อนุภาคของแข็งไม่มีเวลาเพียงพอที่จะมาจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ตัวอย่างของสารอสัณฐาน เช่น แก้ว องค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา (SiO_2) และอะตอมของสารเหล่านี้จะไม่มี การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ในทางกลับกันถ้าองค์ประกอบของซิลิกาเกิดจากการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบก็จะได้สารที่เป็นผลึกคือ ควอตซ์ (พินิตี และคณะ, 2551ก: 158-159)

Davidovits (1991) ได้ทำการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของจีโอโพลิเมอร์ตามภาพที่ 40 ซึ่งจะเห็นความเป็นอสัณฐานอย่างชัดเจน



ภาพที่ 40 ตัวอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอโพลิเมอร์

ที่มา: Davidovits (1991)

โดยสรุปแล้วเทคนิค XRD เป็นเทคนิคฉายรังสีเอกซ์โดยตรงลงบนตัวอย่างที่ต้องการทราบความเป็นผลึก ซึ่งมีความแตกต่างจาก เทคนิค EDS ที่เป็นการวิเคราะห์ธาตุจากรังสีเอกซ์จากการปลดปล่อยของตัวอย่างที่ได้รับผลจากลำอิเล็กตรอนภายใน SEM หรือ TEM ดังนั้นข้อมูลจากทั้ง 2 เทคนิค ถ้านำมาวิเคราะห์ร่วมกันจะเกิดให้ผลที่แม่นยำขึ้นได้

4.4 อินฟราเรด สเปกโทรสโคปี

อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเป็นเทคนิคที่ใช้หลักการของแสงอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของโมเลกุลของตัวอย่าง จากการเปลี่ยนแปลงของการสั่นหรือการหมุนของพันธะภายในโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ได้รับการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรด โดยการทำงานของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี นั้นใช้รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.78 – 1000 ไมโครเมตร หรือ ช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) ในช่วง $12,800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งช่วงเลขคลื่นสามารถคำนวณได้จาก $\text{ช่วงเลขคลื่น (cm}^{-1}) = 10^4 / \text{ความยาวคลื่น (}\mu\text{m)}$ โดยในช่วงของรังสีอินฟราเรดจะแบ่งเป็น 3 ช่วง ตามตารางที่ 9 ได้แก่

ตารางที่ 9 ช่วงของคลื่นอินฟราเรดที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ช่วงของอินฟราเรด	ช่วงความยาวคลื่น(μm)	ช่วงเลขคลื่น(cm^{-1})
อินฟราเรดย่านใกล้	0.78-2.50	12,800-4,000
อินฟราเรดย่านกลาง	2.50-50	4,000-200
อินฟราเรดย่านไกล	50-1,000	200-10

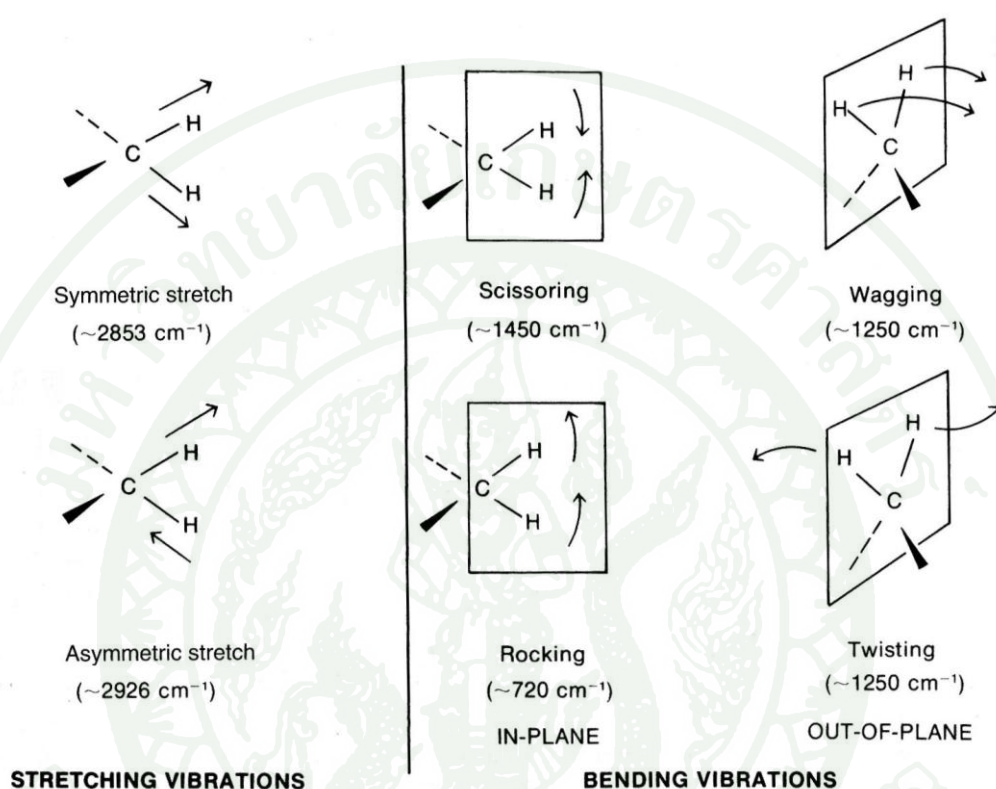
ที่มา: แม้น และคณะ (2552: 145); สุชาติพิย์ (2552: 193)

รูปแบบของการสั่นแบบพื้นฐานที่ควรทำความเข้าใจสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้ (แม้น และคณะ, 2552: 139-150; สุชาติพิย์, 2552:192-194)

-การสั่นแบบยืด (Stretching vibrations) เป็นการสั่นที่เกิดจากความยาวของพันธะระหว่างอะตอมในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงตามยาวในลักษณะยาวขึ้นหรือหดลง มีทั้งแบบสมมาตร (Symmetric vibration) และอสมมาตร (Asymmetric vibration) (ภาพที่ 41)

-การสั่นแบบงอ (Bending vibrations) หรือการสั่นแบบผิดรูปมุม (Angle deformations) เป็นการสั่นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างพันธะ ความยาวของพันธะระหว่างอะตอมในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงตามยาวในลักษณะยาวขึ้นหรือหดลง มีทั้งการงอประเภทในระนาบ (In plane bending) ซึ่งมีแบบกรรไกร (Scissoring) และแบบโคลง (Rocking) รวมถึงการ

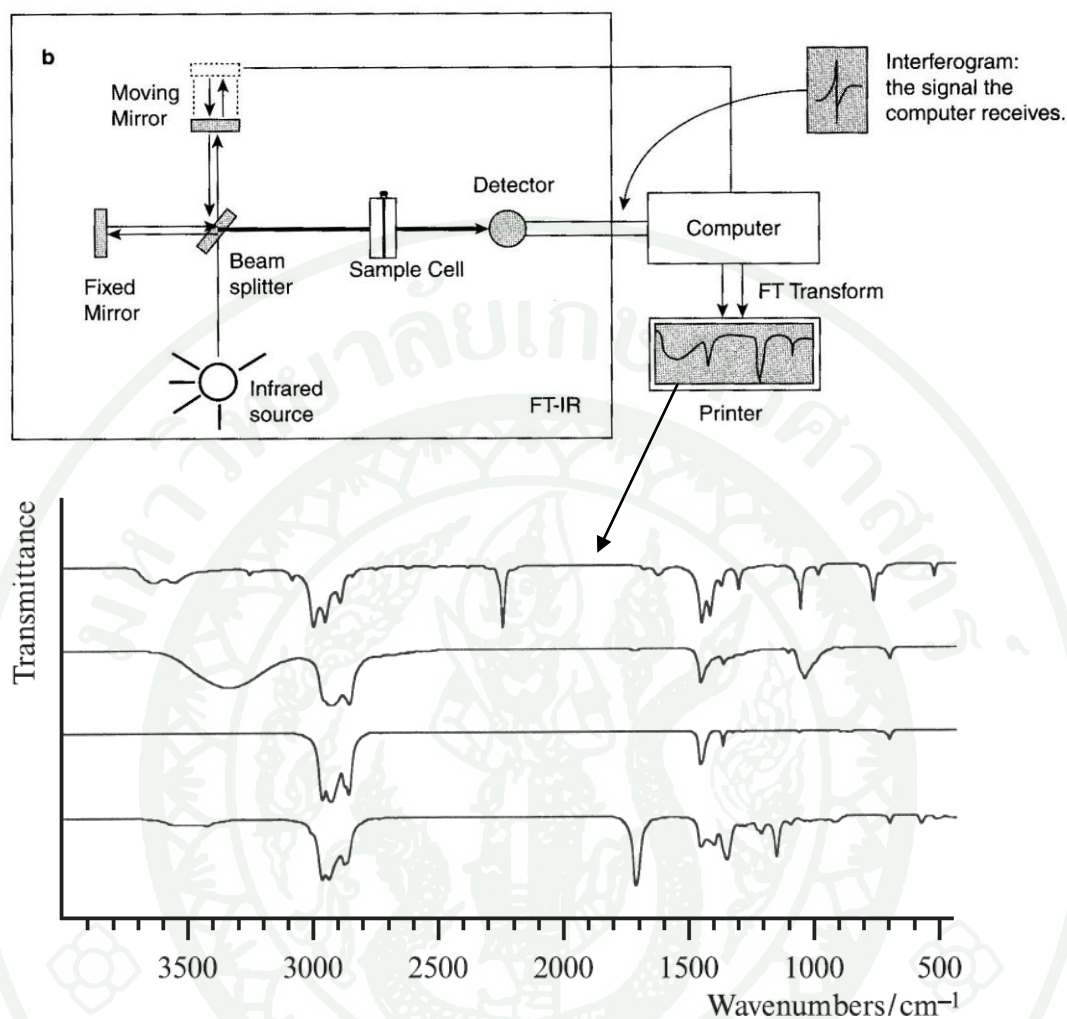
งอประเภทนอกระนาบ (Out of plane bending) ซึ่งมีแบบกระดิก (Wagging) และแบบบิด (Twisting) (ตามภาพที่ 41)



ภาพที่ 41 รูปแบบการสั่นพื้นฐาน

ที่มา: Pavia et al (2009: 18)

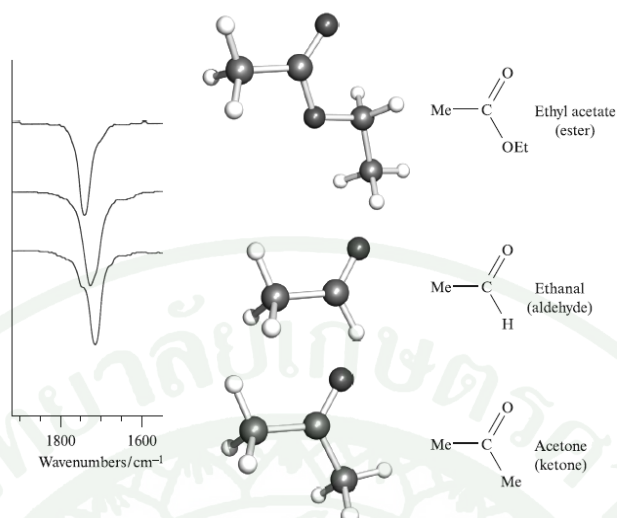
หลักการทำงานทำงานเริ่มจากรังสีอินฟราเรดออกแหล่งกำเนิดแสงไปยังกระจก 2 ส่วนได้แก่ กระจกที่ติดอยู่กับที่ (Fixed mirror) และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ (Moving mirror) ซึ่งวางตั้งฉากกัน ผ่านแผ่นแยกแสง (Beam splitter) ต่อมารังสีจะผ่านตัวอย่าง และเข้าไปในส่วนตรวจวัดซึ่งจะมีส่วนของอินเตอร์เฟอโรแกรม (Interferogram) แล้วแปลงผลด้วยฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม (Fourier transform) แปลงเป็นสัญญาณสเปกตรัม แล้วบันทึกคอมพิวเตอร์ (สมเดช, 2547: 22-23)



ภาพที่ 42 แผนผังแสดงส่วนประกอบของเครื่อง FT-IR และตัวอย่างผล

ที่มา: Pavia *et al.* (2009: 24)

ผลที่ได้จากเครื่อง FT-IR เรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัมซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (Wave number) หรือความถี่ของคลื่น (Frequency) กับ ค่าการส่องผ่านหรือดูดกลืนคลื่นอินฟราเรด โดยสิ่งควรพิจารณาจากกราฟดังกล่าวคือ การเบนออกของจุดยอดที่พันธะที่ต้องการทราบความเปลี่ยนแปลงจากตัวแปรของการทดลอง ตามภาพที่ 43 ซึ่งจะสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของพันธะจากโครงสร้างพื้นฐานเดิมอย่างชัดเจน สามารถนำไปสู่การแปลผลการวิจัยได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 43 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FT-IR

ที่มา: Housecroft and Constable (2006: 370-375)

สำหรับช่วงเลขคลื่นหลักของสารจีโอโพลิเมอร์ Davidovits (2008: 69) ได้ทำการรวบรวมไว้เพื่อการแปลผลที่สะดวกขึ้น ตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ช่วงเลขคลื่นและพันธะหลักของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

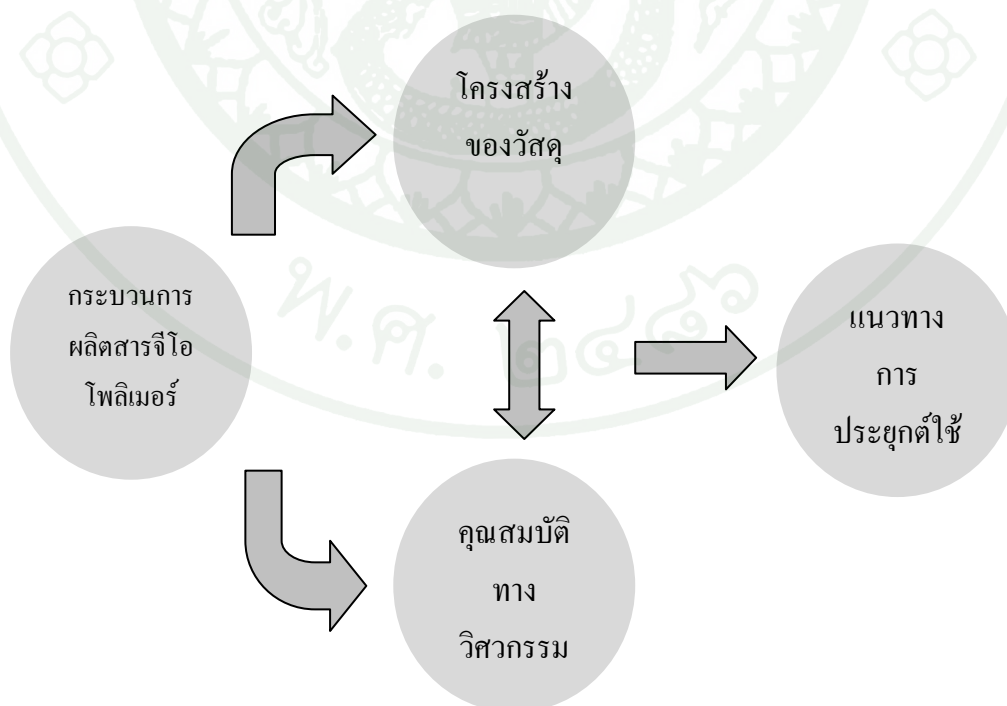
พันธะหลัก	ช่วงเลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น
Si-O	1,080-1,100	Symmetrical vibration
Si(Al)-O	993-1,008	Asymmetrical vibration
Al-OH	914	Stretching vibration
Si-OH	840	Bending vibration
Al-O	798	Stretching vibration
Si-O	694	Symmetrical stretching vibration
Si-O-Al	540	Bending vibration
Si-O	469	In plane bending vibration

ที่มา: Davidovits (2011: 69)

5. การพัฒนาแนวความคิดของการวิจัย

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่าเถ้าลอยมีศักยภาพสูงที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในพัฒนาด้านจีโอโพลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพดังนั้น จึงมีการส่งเสริมการใช้จีโอโพลิเมอร์แทนปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เพื่อลดการผลิตปูนซีเมนต์เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาภาวะเรือนกระจก

ด้วยลักษณะเด่นในการทำปฏิกิริยาทางเคมีของค้างต่อเถ้าลอย ทำให้ได้สารจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวประสานของวัสดุได้ ทำให้เกิดแนวทางที่สามารถใช้เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นของวัสดุประสาน จึงได้พัฒนาแนวคิดในการวิจัยจากโอกาสของประเทศที่มีเถ้าลอยเป็นปริมาณมากที่ยังรอการนำไปใช้อย่างเต็มศักยภาพ ผนวกกับหลักของการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์ นำไปสู่กรอบแนวคิดของการศึกษาสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะครั้งนี้ (ภาพที่ 44) ซึ่งได้แก่ ปัจจัยพื้นฐานที่มาจากอัตราส่วนของสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ปัจจัยที่มีผลต่อกลไกของการเร่งปฏิกิริยา และแนวทางการประยุกต์ใช้ สารจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 44 แนวความคิดในการวิจัย

อุปกรณ์และวิธีการ

ในหัวข้อนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย และส่วนที่ 2 เป็นส่วนของรายละเอียดวิธีการศึกษาวิจัยตามขั้นตอน รวมถึงสถานที่ของการทำงานวิจัยในครั้งนี้

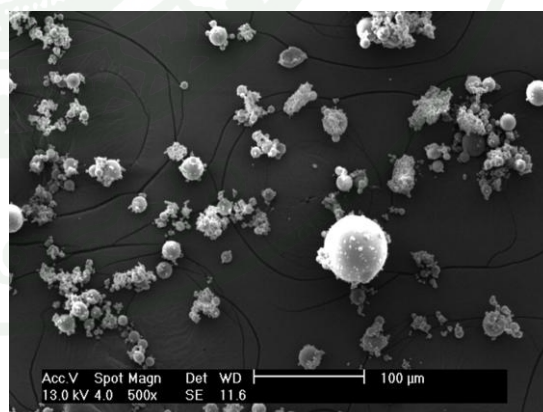
อุปกรณ์

1. วัสดุ

1.1 แก้วลอย จากแหล่งแม่เมาะที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัด ลำปาง (ภาพที่ 45) เมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าภายในแก้วลอยมีสารประกอบที่ ปริมาณมากกว่าร้อยละถึง 2 จำนวน 7 ชนิด โดยสารประกอบที่มีปริมาณสูงสุด 4 ลำดับ ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 35.3 อะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 21.5 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 18.7 และ เฟอร์ริก ออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 14.2 รวมปริมาณของสารประกอบทั้ง 4 เท่ากับร้อยละ 89.70 ดัง ได้แสดงไว้ในตารางที่ 11



ก. แก้วลอย



ข. ภาพถ่าย SEM ของแก้วลอย

ภาพที่ 45 แก้วลอยที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ซิลิกา	35.3
อะลูมินา	21.5
แคลเซียมออกไซด์	18.7
เฟอร์ริกออกไซด์	14.2
แมกนีเซียมออกไซด์	3.0
โซเดียมออกไซด์	2.5
โพแทสเซียมออกไซด์	2.0
อื่นๆ	2.4
น้ำหนักสูญเสียเนื่องจากการเผา	0.4
รวม	100

ส่วนการกระจายขนาดและปริมาณของอนุภาคเถ้าลอย พบว่าขนาดของอนุภาคกระจายตัวตลอดช่วง 0.80-160.0 ไมโครเมตร โดยอัตราส่วนการกระจายขนาดของเถ้าลอยในภาพรวมอยู่ในช่วง 2.20-90.0 ไมโครเมตร มีปริมาณรวมร้อยละ 73.30 ได้แสดงไว้ตามตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การกระจายขนาดและปริมาณของอนุภาคเถ้าลอย

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ปริมาณ (ร้อยละ)
< 0.80	9.58
0.80-2.20	6.01
2.20-8.00	15.43
8.00-17.00	14.13
17.00-40.00	22.94
40.00-90.00	20.80
90.00-160.00	9.81
>160.00	1.30
รวม	100.00

1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ประเภทอุตสาหกรรม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 150-2518 ชนิดแข็ง ชั้นคุณภาพที่ 1 (สมอ., 2534) ซึ่งมีสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบโดยน้ำหนักร้อยละ 98 ดังภาพที่ 46 ก

1.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการศึกษาครั้งนี้ ใช้โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 433-2539 (สมอ., 2539) ชนิดที่ 3 โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 1:3.17 ดังภาพที่ 46 ข



ก. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ข. สารละลายโซเดียมซิลิเกต

ภาพที่ 46 สารละลายที่ใช้ในงานวิจัย

1.4 ทรายที่ใช้ในการทำงานศึกษาวิจัยเป็นทรายน้ำจืด ตามมาตรฐานการก่อสร้างทั่วไป

2. อุปกรณ์

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการศึกษาวิจัยมี 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบคุณสมบัติก่อนการแข็งตัว อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบคุณสมบัติเมื่อแข็งตัวแล้ว และอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของสารจีโอโพลิเมอร์ ตามรายละเอียดดังนี้

2.1 อุปกรณ์ในการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์ ประกอบด้วย เครื่องผสม แบบหล่อตัวอย่าง อะคริลิก และเครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในภาพที่ 47 ก ถึง 47 ง ตามลำดับ



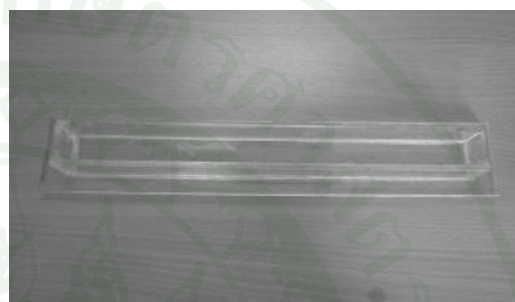
ก. เครื่องผสม



ข. เครื่องชั่งน้ำหนัก



ค.แบบหล่อตัวอย่างชนิดลูกบาศก์



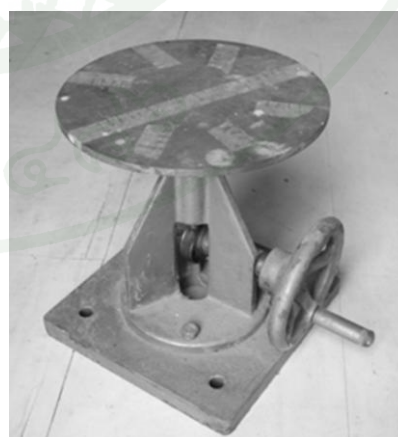
ง.แบบหล่อตัวอย่างชนิดแท่ง

ภาพที่ 47 อุปกรณ์การวิจัยกลุ่มการผลิต

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของสารจีโอโพลิเมอร์ขึ้นก่อนการแข็งตัว ประกอบด้วย เครื่องวัดอุณหภูมิ เครื่องวัดการก่อตัวแบบไวแคต และโต๊ะวัดอัตราการไหลแผ่ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 48 ก ถึง 48 ข ตามลำดับ



ก.อุปกรณ์ทดสอบการก่อตัวแบบไวแคต



ข.โต๊ะวัดการไหลแผ่

ภาพที่ 48 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติขึ้นก่อนการแข็งตัว

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของสารจีโอโพลิเมอร์เมื่อแข็งตัวแล้ว ประกอบด้วย เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ เครื่องทดสอบการนำความร้อน และเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว ดังแสดงไว้ในภาพที่ 49 ก ถึง 48 ง



ก. เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ



ข. ชุดควบคุมเครื่องทดสอบ



ค. เครื่องทดสอบการนำความร้อน



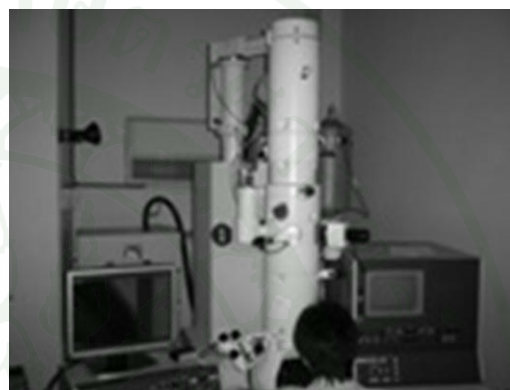
ง. เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว

ภาพที่ 49 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติเมื่อแข็งตัวแล้ว

2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของสารจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer) เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 50 ก ถึง 50 ง



ก.กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ข.กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



ค.เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์



ง.เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม สเปคโตรมิเตอร์

ภาพที่ 50 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

วิธีการ

การศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมของสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย มีวิธีการศึกษา เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ต่างๆ ของการวิจัยตามลำดับดังนี้

1. การศึกษาอัตราส่วนของปัจจัยพื้นฐานของสารตั้งต้นในการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

ได้มีการกำหนดตัวแปรหลักของการวิจัยให้ครอบคลุมองค์ประกอบหลักของการผสมสารจีโอโพลิเมอร์ได้แก่

1.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง ใช้ 3 อัตราส่วนคือ 60:40 65:35 และ 70:30 โดยใช้ตัวเลขกำกับ 2 หลักกำกับคือ 60 65 และ 70 ตามลำดับ

1.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ความเข้มข้น 3 ระดับคือ 8 10 และ 12 โมลาร์ โดยใช้ตัวเลขกำกับ 2 หลักกำกับคือ 08 10 และ 12 ตามลำดับ

1.3 อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนไดออกไซด์ต่อโซเดียมออกไซด์ในสารละลายต่าง (Silicate modulus: Ms) ใช้ 9 อัตราส่วนคือ 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00, 1.10, 1.20, 1.30 และ 1.40 โดยใช้อักษรย่อกำกับคือ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ

จากตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถนำมาสรุปเป็นชุดตัวอักษร 5 หลักสำหรับใช้ในการเรียกชื่อส่วนผสม ตัวอย่างเช่น 60-10-2 หมายถึง ส่วนผสมนี้มี เถ้าลอยเป็นส่วนผสมร้อยละ 60 รวมกับสารละลายต่างอีกร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เท่ากับ 10 โมลาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนไดออกไซด์ต่อโซเดียมออกไซด์ในสารละลายต่างเท่ากับ 0.70

ดังนั้นในการเตรียมสารจีโอโพลิเมอร์จากวัสดุหลักของงานวิจัย จึงมีส่วนผสมจาก 3 ตัวแปรหลัก จำนวนทั้งสิ้น 81 ส่วนผสม โดยอัตราส่วนออกไซด์ที่สำคัญภายในแต่ละส่วนผสมได้ใช้แนวทางของ Davidovits ที่ระบุในสิทธิบัตรสหรัฐอเมริกาที่ 4,349,386 และ 4,509,985 พนวกกับแนวทางที่ได้จากการศึกษาของ Chindaprasirt *et al.* (2007) ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 11 ถึงตารางที่ 19

ตารางที่ 13 สัดส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	ซิลิกาเกิดโมดูลัส (Ms) ในสารละลาย	น้ำหนักวัสดุผสมต่อ ส่วนผสมทั้งหมด 1,000 กรัม (กรัม)			อัตราส่วนของ NaOH ต่อ Na_2SiO_3 โดย น้ำหนัก
		FA	NaOH	Na_2SiO_3	
60-08-1	0.60	600.0	269.1	130.9	0.49
60-08-2	0.70	600.0	251.5	148.5	0.59
60-08-3	0.80	600.0	234.8	165.2	0.70
60-08-4	0.90	600.0	219.1	180.9	0.83
60-08-5	1.00	600.0	204.1	195.9	0.96
60-08-6	1.10	600.0	189.9	210.1	1.11
60-08-7	1.20	600.0	176.4	223.6	1.27
60-08-8	1.30	600.0	163.5	236.5	1.45
60-08-9	1.40	600.0	151.1	248.9	1.65

ตารางที่ 14 สัดส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	ซิลิกาเกิดโมดูลัส (Ms) ในสารละลาย	น้ำหนักวัสดุผสมต่อ ส่วนผสมทั้งหมด 1,000 กรัม (กรัม)			อัตราส่วนของ NaOH ต่อ Na_2SiO_3 โดย น้ำหนัก
		FA	NaOH	Na_2SiO_3	
60-10-1	0.60	600.0	252.9	147.1	0.58
60-10-2	0.70	600.0	234.4	165.6	0.71
60-10-3	0.80	600.0	217.2	182.8	0.84
60-10-4	0.90	600.0	201.3	198.7	0.99
60-10-5	1.00	600.0	186.2	213.8	1.15
60-10-6	1.10	600.0	172.2	227.8	1.32
60-10-7	1.20	600.0	159.0	241.0	1.52
60-10-8	1.30	600.0	146.5	253.5	1.73
60-10-9	1.40	600.0	134.7	265.3	1.97

ตารางที่ 15 สัดส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	ซีลีเกตโมดูลัส (Ms) ในสารละลาย	น้ำหนักวัสดุผสมต่อ ส่วนผสมทั้งหมด 1,000 กรัม (กรัม)			อัตราส่วนของ NaOH ต่อ Na_2SiO_3 โดย น้ำหนัก
		FA	NaOH	Na_2SiO_3	
60-12-1	0.60	600.0	239.6	160.4	0.67
60-12-2	0.70	600.0	220.7	179.3	0.81
60-12-3	0.80	600.0	203.3	196.7	0.97
60-12-4	0.90	600.0	187.3	212.7	1.14
60-12-5	1.00	600.0	172.3	227.7	1.32
60-12-6	1.10	600.0	158.6	241.4	1.52
60-12-7	1.20	600.0	145.8	254.2	1.74
60-12-8	1.30	600.0	133.8	266.2	1.99
60-12-9	1.40	600.0	122.5	277.5	2.27

ตารางที่ 16 สัดส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	ซีลีเกตโมดูลัส (Ms) ในสารละลาย	น้ำหนักวัสดุผสมต่อ ส่วนผสมทั้งหมด 1,000 กรัม (กรัม)			อัตราส่วนของ NaOH ต่อ Na_2SiO_3 โดย น้ำหนัก
		FA	NaOH	Na_2SiO_3	
65-08-1	0.60	650.0	235.5	114.5	0.49
65-08-2	0.70	650.0	220.0	130.0	0.59
65-08-3	0.80	650.0	205.5	144.5	0.70
65-08-4	0.90	650.0	191.8	158.2	0.83
65-08-5	1.00	650.0	178.6	171.4	0.96
65-08-6	1.10	650.0	166.2	183.8	1.11
65-08-7	1.20	650.0	154.4	195.6	1.27
65-08-8	1.30	650.0	143.1	206.9	1.45
65-08-9	1.40	650.0	132.2	217.8	1.65

ตารางที่ 17 สัดส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	ซีลีเกตโมดูลัส (Ms) ในสารละลาย	น้ำหนักวัสดุผสมต่อ ส่วนผสมทั้งหมด 1,000 กรัม (กรัม)			อัตราส่วนของ NaOH ต่อ Na_2SiO_3 โดย น้ำหนัก
		FA	NaOH	Na_2SiO_3	
65-10-1	0.60	650.0	221.3	128.7	0.58
65-10-2	0.70	650.0	205.1	144.9	0.71
65-10-3	0.80	650.0	190.1	159.9	0.84
65-10-4	0.90	650.0	176.1	173.9	0.99
65-10-5	1.00	650.0	162.9	187.1	1.15
65-10-6	1.10	650.0	150.7	199.3	1.32
65-10-7	1.20	650.0	139.1	210.9	1.52
65-10-8	1.30	650.0	128.2	221.8	1.73
65-10-9	1.40	650.0	117.9	232.1	1.97

ตารางที่ 18 สัดส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	ซีลีเกตโมดูลัส (Ms) ในสารละลาย	น้ำหนักวัสดุผสมต่อ ส่วนผสมทั้งหมด 1,000 กรัม (กรัม)			อัตราส่วนของ NaOH ต่อ Na_2SiO_3 โดย น้ำหนัก
		FA	NaOH	Na_2SiO_3	
65-12-1	0.60	650.0	209.7	140.3	0.67
65-12-2	0.70	650.0	193.1	156.9	0.81
65-12-3	0.80	650.0	177.9	172.1	0.97
65-12-4	0.90	650.0	163.9	186.1	1.14
65-12-5	1.00	650.0	150.8	199.2	1.32
65-12-6	1.10	650.0	138.8	211.2	1.52
65-12-7	1.20	650.0	127.6	222.4	1.74
65-12-8	1.30	650.0	117.1	232.9	1.99
65-12-9	1.40	650.0	107.2	242.8	2.27

ตารางที่ 19 สัดส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	ซิลิเกตโมดูลัส (Ms) ในสารละลาย	น้ำหนักวัสดุผสมต่อ ส่วนผสมทั้งหมด 1,000 กรัม (กรัม)			อัตราส่วนของ NaOH ต่อ Na_2SiO_3 โดย น้ำหนัก
		FA	NaOH	Na_2SiO_3	
70-08-1	0.60	700.0	201.8	98.2	0.49
70-08-2	0.70	700.0	188.6	111.4	0.59
70-08-3	0.80	700.0	176.1	123.9	0.70
70-08-4	0.90	700.0	164.4	135.6	0.83
70-08-5	1.00	700.0	153.1	146.9	0.96
70-08-6	1.10	700.0	142.4	157.6	1.11
70-08-7	1.20	700.0	132.3	167.7	1.27
70-08-8	1.30	700.0	122.6	177.4	1.45
70-08-9	1.40	700.0	113.3	186.7	1.65

ตารางที่ 20 สัดส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	ซิลิเกตโมดูลัส (Ms) ในสารละลาย	น้ำหนักวัสดุผสมต่อ ส่วนผสมทั้งหมด 1,000 กรัม (กรัม)			อัตราส่วนของ NaOH ต่อ Na_2SiO_3 โดย น้ำหนัก
		FA	NaOH	Na_2SiO_3	
70-10-1	0.60	700.0	189.7	110.3	0.58
70-10-2	0.70	700.0	175.8	124.2	0.71
70-10-3	0.80	700.0	162.9	137.1	0.84
70-10-4	0.90	700.0	151.0	149.0	0.99
70-10-5	1.00	700.0	139.6	160.4	1.15
70-10-6	1.10	700.0	129.1	170.9	1.32
70-10-7	1.20	700.0	119.2	180.8	1.52
70-10-8	1.30	700.0	109.9	190.1	1.73
70-10-9	1.40	700.0	101.0	199.0	1.97

ตารางที่ 21 สัดส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	ซิลิกาเกิดโมดูลัส (Ms) ในสารละลาย	น้ำหนักวัสดุผสมต่อ ส่วนผสมทั้งหมด 1,000 กรัม (กรัม)			อัตราส่วนของ NaOH ต่อ Na_2SiO_3 โดย น้ำหนัก
		FA	NaOH	Na_2SiO_3	
70-12-1	0.60	700.0	179.7	120.3	0.67
70-12-2	0.70	700.0	165.5	134.5	0.81
70-12-3	0.80	700.0	152.5	147.5	0.97
70-12-4	0.90	700.0	140.5	159.5	1.14
70-12-5	1.00	700.0	129.3	170.7	1.32
70-12-6	1.10	700.0	119.0	181.0	1.52
70-12-7	1.20	700.0	109.3	190.7	1.74
70-12-8	1.30	700.0	100.3	199.7	1.99
70-12-9	1.40	700.0	91.9	208.1	2.27

2. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของสารจีโอโพลิเมอร์จากถั่วลย

การผสมสารจีโอโพลิเมอร์ เริ่มต้นจากการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผสมกับถั่วลยเป็นเวลา 10 นาที (ภาพที่ 51 ค) จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิกาเกิด (Na₂SiO₃) จน ส่วนผสมเข้ากันได้ดี (ภาพที่ 51 ง) แล้วนำจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมแล้วแบ่งส่วนมาทดสอบหาค่าการ ไหลแผ่และระยะเวลาของการก่อตัว และนำส่วนที่เหลือใส่แบบหล่อรูปลูกบาศก์ขนาด 1.5x1.5x1.5 นิ้ว วิธีการทำให้แน่นโดยการกระทุ้ง เสร็จแล้วหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติก เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ แล้วนำเก็บในห้องเก็บตัวอย่าง โดยรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ภาพที่ 51 จ ถึง 51 ฉ)

สำหรับการศึกษาคุณสมบัติของส่วนผสมในขณะก่อนการแข็งตัวคือ การไหลแผ่ และ ระยะเวลาการก่อตัว รวมถึงคุณสมบัติเมื่อแข็งตัวแล้วได้แก่ ความหนาแน่น ร้อยละของการดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1, 3, 7, 28, 90 และ 180 วัน จากนั้นจึงคัดเลือกส่วนผสมออกมาเพื่อหล่อ ตัวอย่างชนิดแท่งเพื่อทำการวัดค่าการหดตัวเมื่อแห้ง จำนวน 27 ส่วนผสม เป็นเวลา 3 เดือน (13 สัปดาห์) (ภาพที่ 52 ก ถึง 52 ข)

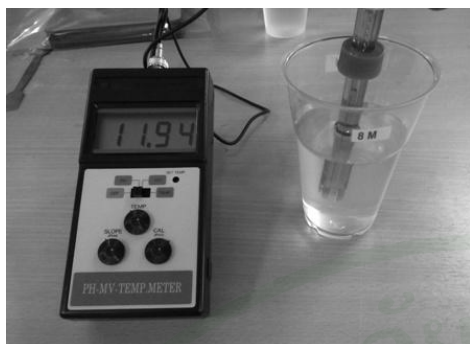
3. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

มีการใช้อุปกรณ์หลักทั้ง 4 ที่ได้กล่าวถึงแล้วในส่วนของอุปกรณ์ โดยขั้นตอนแรกของการศึกษาโครงสร้างจุลภาคคือ การส่วนของตัวอย่างที่ผ่านทดสอบกำลังรับแรงอัดตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลก่อน แล้วจึงนำตัวอย่างแบ่งออกให้มีขนาดอยู่ช่วง 5- 10 มิลลิเมตร เพื่อสะดวกในการทำงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการใช้กล้อง SEM นั้นมีการใช้รังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray: EDX) ช่วยในการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุภายในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ด้วย ตัวอย่างจากขั้นตอนที่ผ่านมาจะถูกบดให้เป็นผงแล้วผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 150 สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้ การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) การวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และ เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) ในต่อไป (ภาพที่ 52 ค ถึง 52 ง)

4. การพัฒนาแนวทางการใช้สารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยในวัสดุก่อสร้าง

ได้มีการนำองค์ความรู้ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 2 และ 3 มาศึกษาขยายผลเป็นวัสดุประสานในกลุ่มวัสดุก่อสร้างประเภทของมอร์ตาร์ โดยมีเกณฑ์คัดเลือกส่วนผสมที่เหมาะสม คือความสะดวกในการทำงานหรือขึ้นรูป และการพัฒนากำลังของวัสดุ จากนั้นจึงคัดเลือกส่วนผสมมาศึกษาอัตราส่วนของทรายที่เหมาะสมกับการใช้งาน 5 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก คือ 1:0.5 1:1.0 1:1.5 1:2 และ 1:2.5

จากส่วนผสมของมอร์ตาร์ดังกล่าวมีการนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุแผ่นสำเร็จรูปขนาด 20 x 20 เซนติเมตร แล้วทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุก่อสร้างประเภทแผ่น ได้แก่ กำลังรับแรงดัด และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แล้วเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของวัสดุที่มีการประยุกต์ใช้งานในลักษณะเดียวกัน (ภาพที่ 52 จ ถึง 52 ฉ)



ก.



ข.



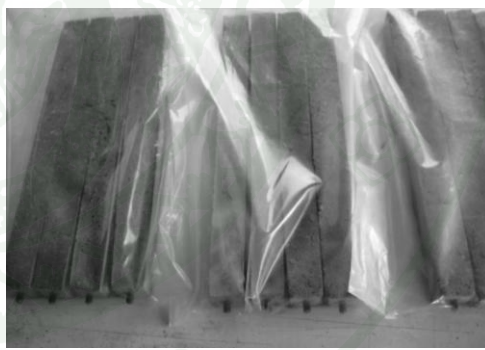
ค.



ง.



จ.



ฉ.



ช.



ซ.

ภาพที่ 51 การผสม การเก็บตัวอย่างและการทดสอบจีโอโพลิเมอร์



ก.



ข.



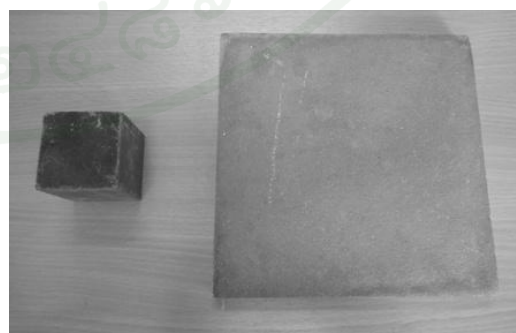
ค.



ง.



จ.



ฉ.

ภาพที่ 52 การทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์และการหล่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

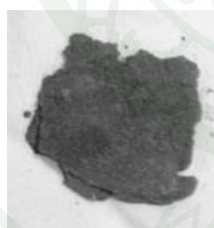
ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาวิจัยแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การศึกษาอัตราส่วนของปัจจัยของสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย ส่วนที่ 2 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ และส่วนที่ 4 แนวทางการประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้าง

1. การศึกษาอัตราส่วนของปัจจัยภายในสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง

การศึกษ้อัตราส่วนผสมจากตัวแปรหลักทั้ง 3 ส่วนคือ ปริมาณเถ้าลอย ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเกตโมดูลัสพบว่า ความสามารถในการทำงานของส่วนผสมที่มีเถ้าลอยหรือปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิกาเกตมาก รวมถึงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง ล้วนส่งผลให้มีความสามารถในการทำงานของส่วนผสมนั้นต่ำมากจนถึงไม่สามารถ เทเข้าแบบได้ (ภาพที่ 53 ก) และในทางตรงกันข้ามกันส่วนผสมที่มีเถ้าลอยน้อย หรือปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาก รวมถึงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ ทำให้ส่วนผสมเหลวขึ้นจนสามารถมีช่วงเวลาในการทำงานได้จนถึงเหลวมากจนกระทั่งใช้เวลาในการก่อตัวนานมากกว่า 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 53 ข)

ก.



ข.



ภาพที่ 53 ส่วนผสมที่ไม่สามารถทดสอบได้

การค้นพบดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาวิเคราะห์อัตราส่วนโดยโมลของสารประกอบออกไซด์หลักภายในของแต่ละอัตราส่วน เพื่อหาอัตราส่วนร่วมที่สามารถใช้เป็นหลักในการวิจัยเพื่อหาผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกันได้อย่างเป็นระบบ โดยอัตราส่วนโดยโมลของสารประกอบออกไซด์ที่กล่าวถึงเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบหลักในปฏิกิริยาและโครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์คือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) โดยพิจารณาพร้อมกับน้ำ (H_2O) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ภายในส่วนผสมด้วยกัน ดังต่อไปนี้

1.1 ส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60

ส่วนผสม 60-08-1 ถึง 60-12-9 (27 ส่วนผสม) มีรายละเอียดผลการวิเคราะห์อัตราส่วนโดยโมลภายในตามตารางผนวกที่ ข7 และ ข10 ซึ่งสามารถสรุปเรียงลำดับตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ดังนี้

1.1.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8 โมลาร์ จำนวน 9 ส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.26 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.34 อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.28 และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.72 อัตราส่วนของ H_2O/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 11.68 และค่าสูงสุดเท่ากับ 12.60 อัตราส่วนของ M_2O/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.96 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.11 โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ CaO ร่วมด้วยพบว่า อัตราส่วนของ CaO/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.43 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.48 อัตราส่วนของ CaO/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.43 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.65

1.1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10 โมลาร์ จำนวน 9 ส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.27 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.36 อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.34 และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.78 อัตราส่วนของ H_2O/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 10.23 และค่าสูงสุดเท่ากับ 11.68 อัตราส่วนของ M_2O/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 1.00 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.21 โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ CaO ร่วมด้วยพบว่า อัตราส่วนของ CaO/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.42 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.47 อัตราส่วนของ CaO/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.31 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.58

1.1.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 12 โมลาร์ จำนวน 9 ส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.27 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.38 อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.39 และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.83 อัตราส่วนของ H_2O/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 9.21 และค่าสูงสุดเท่ากับ 11.05 อัตราส่วนของ M_2O/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 1.03 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.29 โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ CaO ร่วมด้วยพบว่า อัตราส่วนของ CaO/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.41 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.47 อัตราส่วนของ CaO/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.22 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.53

1.2 ส่วนผสมที่ใช้หล่อลื่นร้อยละ 65

ส่วนผสม 65-08-1 ถึง 65-12-9 (27 ส่วนผสม) มีรายละเอียดผลการวิเคราะห์อัตราส่วนโดยโมลภายในตามตารางผนวกที่ ข8 และ ข11 ซึ่งสามารถสรุปเรียงลำดับตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ดังนี้

1.2.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8 โมลาร์ จำนวน 9 ส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.23 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.30 อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.18 และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.54 อัตราส่วนของ H_2O/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 10.99 และค่าสูงสุดเท่ากับ 11.74 อัตราส่วนของ M_2O/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.83 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.95 โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ CaO ร่วมด้วยพบว่า อัตราส่วนของ CaO/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.45 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนของ CaO/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.66 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.91

1.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10 โมลาร์ จำนวน 9 ส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.24 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.32 อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.23 และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.59 อัตราส่วนของ H_2O/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 9.67 และค่าสูงสุดเท่ากับ 10.92 อัตราส่วนของ M_2O/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.87 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.03 โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ CaO ร่วมด้วยพบว่า อัตราส่วนของ CaO/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.44 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.49 อัตราส่วนของ CaO/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.53 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.83

1.2.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 12 โมลาร์ จำนวน 9 ส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.25 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.34 อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.27 และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.63 อัตราส่วนของ H_2O/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 8.74 และค่าสูงสุดเท่ากับ 10.35 อัตราส่วนของ M_2O/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.89 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.1 โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ CaO ร่วมด้วยพบว่า อัตราส่วนของ CaO/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.44 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.48 อัตราส่วนของ CaO/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.44 และค่าสูงสุดเท่ากับ 1.77

1.3 ส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70

ส่วนผสม 70-08-1 ถึง 70-12-9 (27 ส่วนผสม) มีรายละเอียดผลการวิเคราะห์อัตราส่วนโดยโมลภายในตามตารางผนวกที่ ข9 และ ข12 ซึ่งสามารถสรุปเรียงลำดับตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ดังนี้

1.3.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 8 โมลาร์ จำนวน 9 ส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.21 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.26 อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.10 และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.39 อัตราส่วนของ H_2O/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 10.19 และค่าสูงสุดเท่ากับ 10.77 อัตราส่วนของ M_2O/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.72 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.82 โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ CaO ร่วมด้วยพบว่า อัตราส่วนของ CaO/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.47 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.51 อัตราส่วนของ CaO/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.93 และค่าสูงสุดเท่ากับ 2.20

1.3.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10 โมลาร์ จำนวน 9 ส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.22 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.28 อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.14 และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.42 อัตราส่วนของ H_2O/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 9.02 และค่าสูงสุดเท่ากับ 10.05 อัตราส่วนของ M_2O/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.75 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.88 โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ CaO ร่วมด้วยพบว่า อัตราส่วนของ CaO/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.46 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนของ CaO/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.79 และค่าสูงสุดเท่ากับ 2.11

1.3.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 12 โมลาร์ จำนวน 9 ส่วนผสม พบว่าอัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.22 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.29 อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.17 และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.45 อัตราส่วนของ H_2O/M_2O มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 8.19 และค่าสูงสุดเท่ากับ 9.55 อัตราส่วนของ M_2O/Al_2O_3 มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.77 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.94 โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ CaO ร่วมด้วยพบว่า อัตราส่วนของ CaO/SiO_2 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.46 และค่าสูงสุดเท่ากับ 0.50 อัตราส่วนของ CaO/M_2O มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 1.69 และค่าสูงสุดเท่ากับ 2.06

1.4 การศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมล

การเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลหลักนั้นได้สรุปไว้ในตารางที่ 22 โดยมีการเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนดังกล่าวกับสิทธิบัตรสหรัฐ เรื่องการผลิตซีโอไลต์ เลขที่ 3,264,059 และ 3,374,058 รวมถึงการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เลขที่ 4,349,386 และ 4,509,985 ในภาพรวมพบว่าอัตราส่วนหลักที่อยู่ในช่วงการผลิตซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์คือ อัตราส่วนของ M_2O/SiO_2 ซึ่งในอัตราส่วนหลักที่เหลืออีก 3 อัตราส่วนได้แก่ SiO_2/Al_2O_3 , H_2O/M_2O และ M_2O/Al_2O_3 นั้น พบว่าอยู่ในช่วงของการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพียงอย่างเดียว

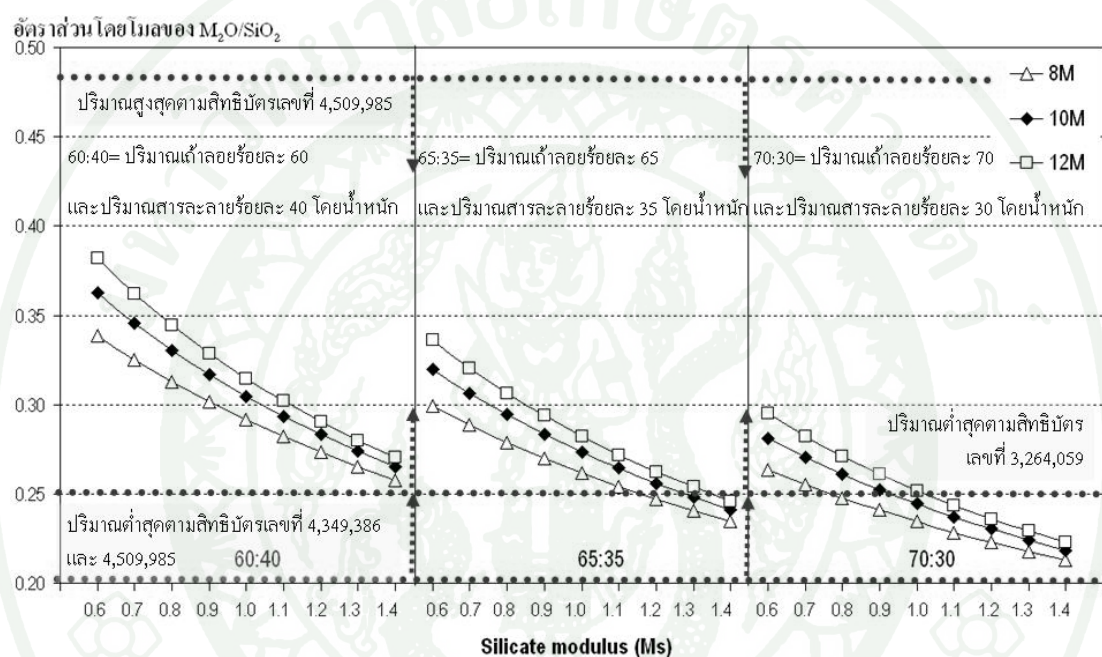
ตารางที่ 22 การเปรียบเทียบสัดส่วนโดยโมลของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง

ส่วนผสม	อัตราส่วนโดยโมลของสารประกอบออกไซด์หลักในส่วนผสม			
	M_2O^*/SiO_2	SiO_2/Al_2O_3	H_2O/M_2O^*	M_2O^*/Al_2O_3
60-08-1 ถึง 60-08-9	0.34-0.26	3.28-3.72	11.68-12.60	1.11-0.96
60-10-1 ถึง 60-10-9	0.36-0.27	3.34-3.78	10.23-11.68	1.21-1.00
60-12-1 ถึง 60-12-9	0.38-0.27	3.39-3.83	9.21-11.05	1.29-1.03
65-08-1 ถึง 65-08-9	0.30-0.23	3.18-3.54	10.99-11.74	0.95-0.83
65-10-1 ถึง 65-10-9	0.32-0.24	3.23-3.59	9.67-10.92	1.03-0.87
65-12-1 ถึง 65-12-9	0.34-0.25	3.27-3.63	8.74-10.35	1.10-0.89
70-08-1 ถึง 70-08-9	0.26-0.21	3.10-3.39	10.19-10.77	0.82-0.72
70-10-1 ถึง 70-10-9	0.28-0.22	3.14-3.42	9.02-10.05	0.88-0.75
70-12-1 ถึง 70-12-9	0.29-0.22	3.17-3.45	8.19-9.55	0.94-0.77
สิทธิบัตรสหรัฐเลขที่				
3,264,059	0.25-1.00	10.0-40.0	20.0-80.0	ไม่ระบุ
3,374,058	ไม่ระบุ	8.0-12.0	ไม่ระบุ	2.65-3.85
4,349,386	0.20-0.28	3.50-4.50	15.00-17.50	0.80-1.20
4,509,985	0.20-0.48	3.50-4.50	10.00-25.00	0.80-1.60

หมายเหตุ * M_2O หมายถึง โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) รวมกับโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)

1.4.1 อัตราส่วน M_2O/SiO_2

ผลการเปรียบเทียบในรายละเอียดของอัตราส่วน M_2O/SiO_2 ทั้ง 81 ส่วนผสมของการวิจัยในครั้งนี้ มีค่าอยู่ในช่วง 0.21-0.38 โดยค่าอัตราส่วน M_2O/SiO_2 เพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นและค่าซิลิเกตโมดูลัสลดลง ตามภาพที่ 54



ภาพที่ 54 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ M_2O ต่อ SiO_2 กับส่วนผสมทั้งหมด

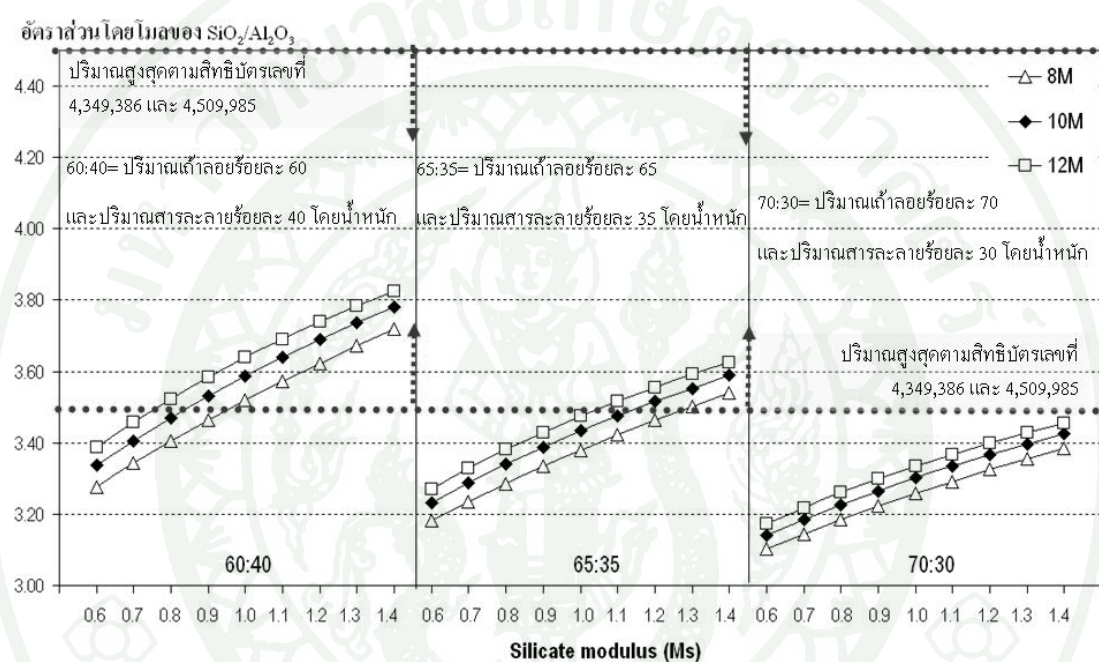
1.4.2 อัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3

ผลการเปรียบเทียบในรายละเอียดสำหรับอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3.10-3.83 และจากเปรียบเทียบตามภาพที่ 55 ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากต่ำไปสูง และค่าซิลิเกตโมดูลัสจากต่ำไปสูงเช่นเดียวกัน ซึ่งส่วนผสมที่มีค่าอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ต่ำกว่า 3.50 มี 54 ส่วนผสมได้แก่

1.4.2.1 ส่วนผสมที่ใช้ปริมาณแก้วร้อยละ 60 มี 9 ส่วนผสม คือ ส่วนผสมที่ 60-08-1 ถึง 60-08-4 ส่วนผสมที่ 60-10-1 ถึง 60-10-3 และส่วนผสมที่ 60-12-1 ถึง 60-12-2

1.4.2.2 ส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 65 มี 18 ส่วนผสม คือ ส่วนผสมที่ 65-08-1 ถึง 65-08-7 ส่วนผสมที่ 65-10-1 ถึง 65-10-6 และส่วนผสมที่ 65-12-1 ถึง 65-12-5

1.4.2.3 ส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 70 ทั้ง 27 ส่วนผสมมีค่าต่ำกว่า 3.50 ทั้งหมด



ภาพที่ 55 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ SiO_2 ต่อ Al_2O_3 กับส่วนผสมทั้งหมด

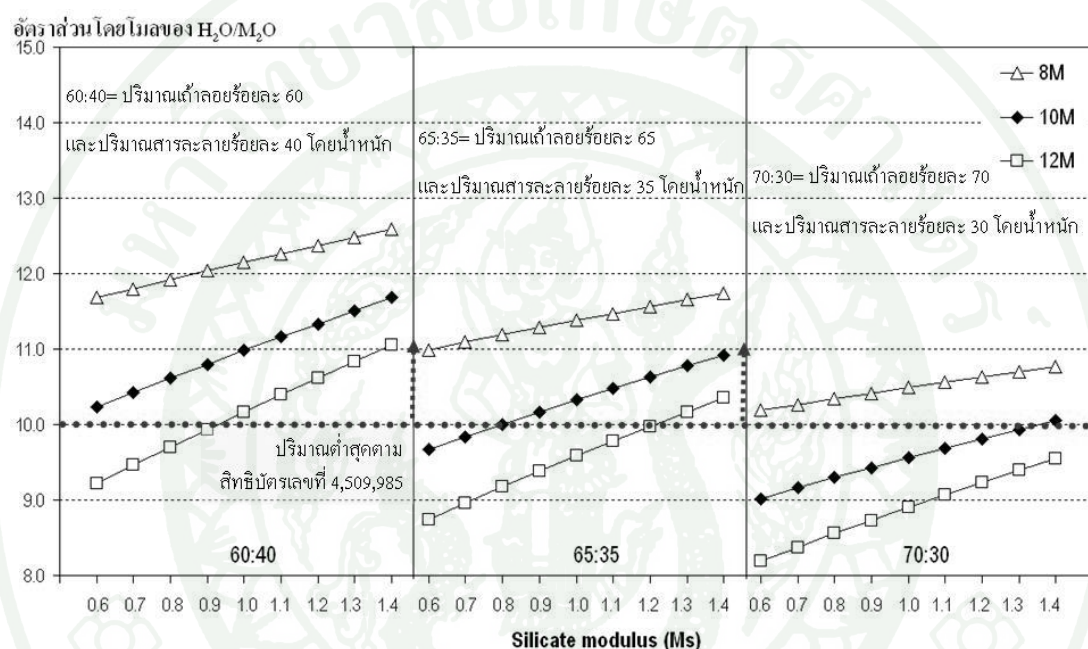
1.4.3 อัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$

ผลการเปรียบเทียบในรายละเอียดสำหรับอัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 8.19-12.60 และจากเปรียบเทียบตามภาพที่ 56 ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสูงไปต่ำ ซึ่งตรงกันข้ามกับอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ส่วนค่าซิลิเกตโมดูลัสมีทิศทางเดียวกันกับอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ คือจากต่ำไปสูง เช่นเดียวกัน ซึ่งส่วนผสมที่มีค่าอัตราส่วน $\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$ ต่ำกว่า 10.0 มี 29 ส่วนผสมได้แก่

1.4.3.1 ส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 60 มี 4 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่ 60-12-1 ถึง 60-12-4

1.4.3.2 ส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 65 มี 8 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่ 65-10-1 ถึง 65-10-2 และส่วนผสมที่ 65-12-1 ถึง 65-12-6

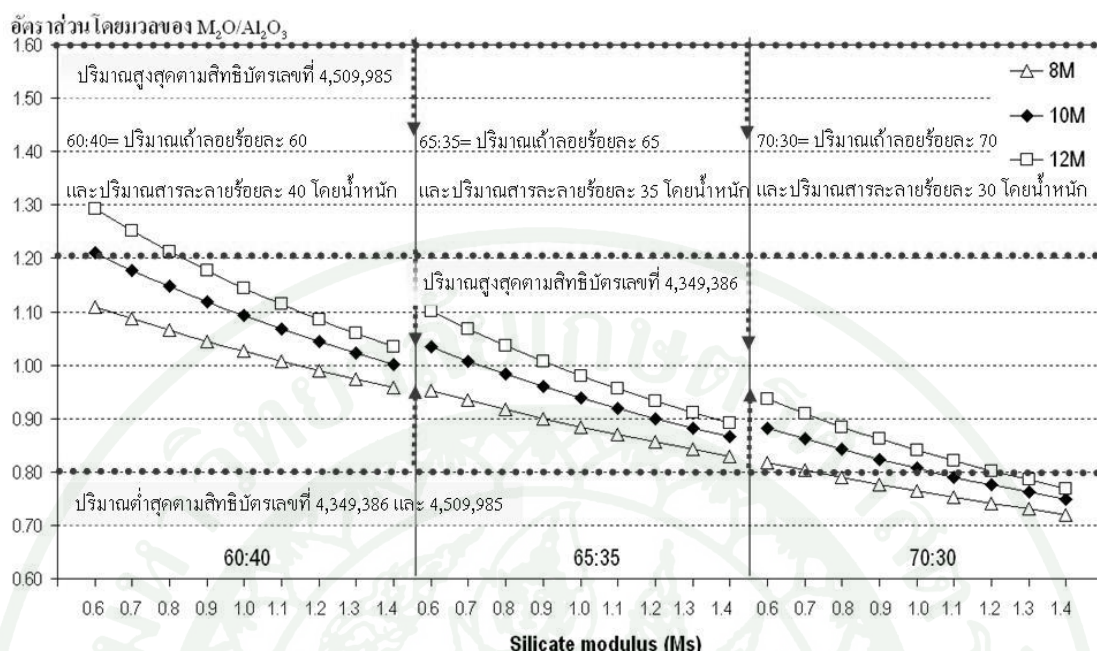
1.4.3.3 ส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 70 ทั้ง 17 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่ 70-10-1 ถึง 70-10-8 และส่วนผสมที่ 70-12-1 ถึง 70-12-9



ภาพที่ 56 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ H_2O ต่อ M_2O กับส่วนผสมทั้งหมด

1.4.4 อัตราส่วน M_2O/Al_2O_3

ผลการเปรียบเทียบในรายละเอียดของอัตราส่วน M_2O/Al_2O_3 มีค่าอยู่ในช่วง 0.72-1.29 โดยค่าอัตราส่วน M_2O/Al_2O_3 เพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันกับอัตราส่วน H_2O/M_2O กล่าวคือ เมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นและค่าซิลิกาโมดูลัสลดลง (ภาพที่ 57) โดยส่วนผสมที่มีค่าอัตราส่วน M_2O/Al_2O_3 ต่ำกว่า 0.80 มี 13 ส่วนผสม ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 70 เท่านั้นคือ ส่วนผสมที่ 70-08-1 ถึง 70-08-7 ส่วนผสมที่ 70-10-1 ถึง 70-10-4 และส่วนผสมที่ 70-12-1 ถึง 70-12-2

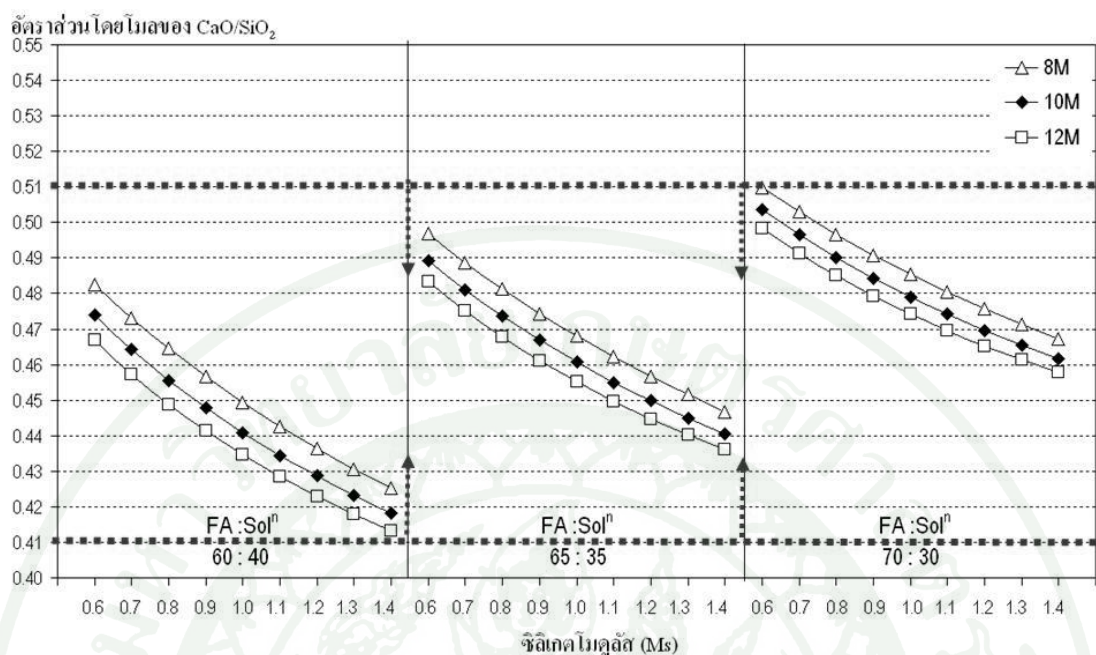


ภาพที่ 57 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ M_2O ต่อ Al_2O_3 กับส่วนผสมทั้งหมด

1.5 การเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียม

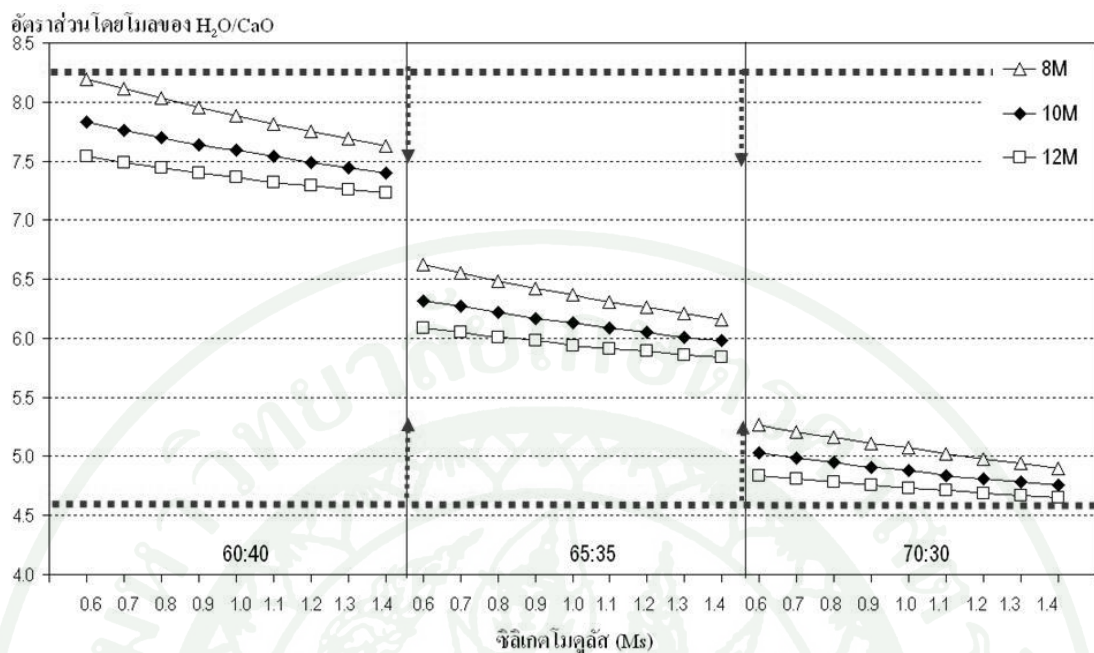
จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลหลักของการผลิตสารประกอบซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์ตามสิทธิบัตรทั้ง 4 ฉบับที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น มีที่มาจากวัตถุดิบหลักคือดินขาวเผา แต่การวิจัยนี้วัตถุดิบหลักของการวิจัยคือ เถ้าลอยแคลเซียมสูง จึงมีปริมาณแคลเซียมอยู่จำนวนหนึ่งซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาด้วยคุณลักษณะเดียวกันกับ โซเดียมไอออน และโพแทสเซียมไอออน

ดังนั้นจึงได้มีการเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมออกไซด์ โดยใช้ใช้แนวทางการเปรียบเทียบในอัตราส่วนที่แทนค่า M_2O ด้วย CaO ซึ่งจะได้อัตราส่วน CaO/SiO_2 และ H_2O/CaO ตามภาพที่ 58 และ 59 ทั้งนี้ไม่ได้เปรียบเทียบอัตราส่วนของ CaO/Al_2O_3 เนื่องจากเป็นค่าคงที่ภายในเถ้าลอยเท่านั้น



ภาพที่ 58 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ CaO ต่อ SiO_2 กับส่วนผสมทั้งหมด

ภาพที่ 58 แสดงผลการเปรียบเทียบในรายละเอียดของอัตราส่วน CaO/SiO_2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.41-0.51 โดยค่าอัตราส่วน CaO/SiO_2 เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และค่าซิลิเกตโมดูลัสลดลง เมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 มีค่าอยู่ในช่วง 0.41-0.48 ส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 มีค่าอยู่ในช่วง 0.44-0.50 และส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 มีค่าอยู่ในช่วง 0.46-0.51 ตามลำดับ ซึ่งเป็นที่สังเกตอย่างเห็นได้ชัดว่าช่วงความเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยลงเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น



ภาพที่ 59 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของ H_2O ต่อ CaO กับส่วนผสมทั้งหมด

ภาพที่ 59 แสดงผลการเปรียบเทียบในรายละเอียดของอัตราส่วน H_2O/CaO มีค่าอยู่ในช่วง 4.65-8.19 โดยค่าอัตราส่วน H_2O/CaO เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอย ค่าความความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลงและค่าซิลิกาโมดูลัสลดลง เมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 มีค่าอยู่ในช่วง 7.23-8.19 ส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 มีค่าอยู่ในช่วง 5.84-6.62 และส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 มีค่าอยู่ในช่วง 4.65-5.27 ซึ่งเป็นที่สังเกตอย่างเห็นได้ชัดว่าช่วงความเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยลงเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นเช่นเดียวกันกับอัตราส่วนของ CaO/SiO_2

นอกจากนั้นอัตราส่วนที่ได้เปรียบเทียบกับค่า M_2O ด้วย CaO ทั้ง 2 อัตราส่วนแล้ว พบว่ายังมีอัตราส่วนที่ควรกล่าวถึงคือ อัตราส่วนระหว่าง CaO ต่อ M_2O ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของการสังเคราะห์ฮีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง โดยได้แสดงการเปรียบเทียบไว้ในภาพที่ 60

2. คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การทดสอบคุณสมบัติขณะก่อนการแข็งตัวและหลังการแข็งตัวของวัสดุประสานประเภทต่างๆ เป็นคุณสมบัติหลักที่จำแนกการใช้งานตามระยะเวลาของการประยุกต์ใช้ โดยผลของการทดสอบในด้านของสารตั้งต้นและผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้แสดงไว้เป็น 2 ส่วน ได้แก่คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สดและคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

2.1 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สด

ผลการศึกษาค้นสมบัติในด้านร้อยละการไหลแผ่และเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สดได้แสดงไว้ในตารางที่ ก1-ก9 โดยพบว่าในแต่ละช่วงของการใช้เถ้าลอยและอัตราส่วนของสารละลายส่งผลต่อคุณสมบัติของการไหลแผ่และการก่อตัวอย่างชัดเจนและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีในรายละเอียดของสมบัติที่ได้ในแต่ละช่วงของเถ้าลอยดังนี้

2.1.1 การไหลแผ่

2.1.1.1 การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 60

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าการค่าการไหลแผ่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 170 ตั้งแต่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.80 ลงมา (ส่วนผสมที่ 60-08-1, 2 และ 3) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 160 คือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 60-08-9)

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 10 โมลาร์ พบว่าการค่าการไหลแผ่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 170 เช่นกัน ตั้งแต่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.80 ลงมา (ส่วนผสมที่ 60-10-1, 2 และ 3) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 150 คือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 60-10-9)

สำหรับส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ พบว่าการค่าการไหลแผ่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 170 ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.80 ลงมา (ส่วนผสมที่ 60-12-1, 2 และ 3) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 160 คือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 60-12-9)

เกตโมดูลัสเท่ากับ 0.60 ลงมา (ส่วนผสมที่ 60-12-1) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 145 คือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 60-12-9)

2.1.1.2 การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 65

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าการค่าการไหลแผ่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 170 ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 65-08-1) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 112.8 คือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 65-08-9)

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 10 โมลาร์ พบว่าการค่าการไหลแผ่สูงสุดเริ่มลดลงจากกรณีที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ คือเท่ากับร้อยละ 160 ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 65-10-1) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 110.9 คือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 65-10-9)

สำหรับส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ พบว่าการค่าการไหลแผ่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 160 ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 65-12-1) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 100.4 คือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 65-12-9)

2.1.1.3 การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 70

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าการค่าการไหลแผ่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 155 ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 70-08-1) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าแตกต่างกันได้ชัดโดย มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 79.2 ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 70-08-9)

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 10 โมลาร์ พบว่าการค่าการไหลแผ่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 150 ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิเกตโม

คูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 70-10-1) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 69.5 คือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 70-10-9)

สำหรับส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ พบว่าการค่าการไหลแผ่สูงสุดเท่ากับร้อยละ 148 ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 70-12-1) ส่วนค่าไหลแผ่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 65.0 คือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 70-12-9)

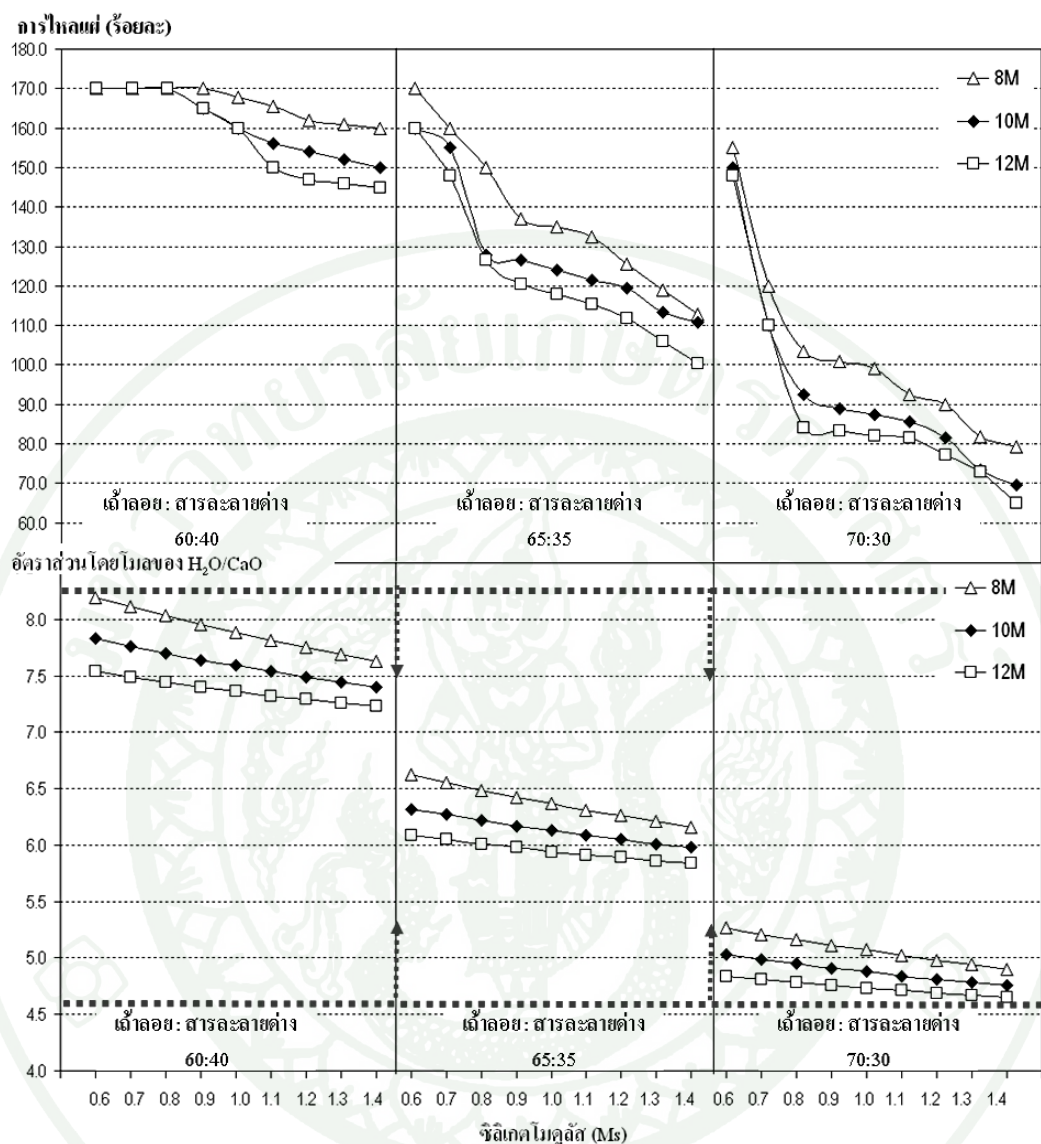
2.1.2 ผลกระทบจากองค์ประกอบหลักที่มีต่อการไหลแผ่

ภาพที่ 61 ได้แสดงการเปรียบเทียบถึงปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ ปริมาณเถ้าลอย ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซิลิเกตโมดูลัส และได้ดังนี้

2.1.2.1 ผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยที่มีต่อการไหลแผ่ พบว่าปริมาณของเถ้าลอยมีผลกระทบต่อการไหลแผ่ โดยการไหลแผ่จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 70 เนื่องมาจากปริมาณของอนุภาคเถ้าลอยที่มีจำนวนมากนั้นก่อให้เกิดสารตั้งต้นทั้ง Si และ Al มาก อันส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจิโอโพลีเมอร์เซชันโดยตรง (Davidovits, 2008: 10-34) รวมถึงปริมาณของแคลเซียมที่สูงขึ้นตามสัดส่วนของเถ้าลอยอีกด้วย

2.1.2.2 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการไหลแผ่ พบว่า ความความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลกระทบต่อการไหลแผ่ โดยการไหลแผ่จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ลดลงจาก 12 โมลาร์เป็น 8 โมลาร์ ทั้งนี้สอดคล้องไปตามสัดส่วนของน้ำที่อยู่ในส่วนผสม

2.1.2.3 ผลกระทบของซิลิเกตโมดูลัสที่มีต่อการไหลแผ่พบว่าซิลิเกตโมดูลัสมีผลกระทบต่อการไหลแผ่ โดยการไหลแผ่จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อซิลิเกตโมดูลัสเพิ่มมากขึ้นจาก 0.60 เป็น 1.40 ทั้งนี้สอดคล้องไปตามสัดส่วนของ Si อยู่ในโซเดียมซิลิเกต



ภาพที่ 61 การเปรียบเทียบร้อยละการไหลผ่านของอีโพอキシพอลิเมอร์สด

ภาพที่ 61 เป็นการนำผลของการวิเคราะห์ตามหัวข้อที่ 1.5 มาเทียบเข้าด้วยกันพบว่าอิทธิพลของ อัตราส่วนระหว่างน้ำกับแคลเซียมออกไซด์นั้น ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของการไหลผ่านอย่างชัดเจน ดังนั้นการพิจารณานำส่วนผสมไปใช้จึงต้องคำนึงถึงช่วงเวลาของการใช้งานให้ชัดเจนก่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าลอยปริมาณสูงที่มีช่วงการไหลผ่านมากมายนัก

2.1.3 การก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุด

2.1.3.1 การก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ถ้ำลอยร้อยละ 60

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายสูงสุดเท่ากับ 810 นาที่ และ 1,800 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 60-08-1) ส่วนค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 65 นาที่ และ 100 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 60-08-9)

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 10 โมลาร์ พบว่าค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายสูงสุดเท่ากับ 750 นาที่ และ 1,440 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 60-10-1) ส่วนค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 60 นาที่ และ 97 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 60-10-9)

สำหรับส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ พบว่าค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายสูงสุดเท่ากับ 660 นาที่ และ 840 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 60-12-1) ส่วนค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 55 นาที่ และ 90 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 60-12-9)

2.1.3.2 การก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ถ้ำลอยร้อยละ 65

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายสูงสุดเท่ากับ 540 นาที่ และ 720 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 65-08-1) ส่วนค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 45 นาที่ และ 85 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 65-08-9)

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 10 โมลาร์ พบว่าค่าการการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายสูงสุดเท่ากับ 480 นาที่ และ 600 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกิดโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 65-10-1) ส่วนค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 35 นาที่ และ 80 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาเกิดโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 65-10-9)

สำหรับส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ พบว่าค่าการการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายสูงสุดเท่ากับ 450 นาที่ และ 540 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกิดโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 65-12-1) ส่วนค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 30 นาที่ และ 70 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาเกิดโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 65-12-9)

2.1.3.3 การก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ใช้ถ้ำลอยร้อยละ 70

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าค่าการการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายสูงสุดเท่ากับ 360 นาที่ และ 420 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกิดโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 70-08-1) ส่วนค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 22.5 นาที่ และ 45 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาเกิดโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 70-08-9)

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 10 โมลาร์ พบว่าค่าการการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายสูงสุดเท่ากับ 300 นาที่ และ 360 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกิดโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 70-10-1) ส่วนค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 20 นาที่ และ 40 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาเกิดโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 70-10-9)

สำหรับส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 12 โมลาร์ พบว่าค่าการการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายสูงสุดเท่ากับ 240 นาที่ และ 300 นาที่ ตามลำดับ ที่ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกิดโมดูลัสเท่ากับ 0.60 (ส่วนผสมที่ 70-12-1)

ส่วนค่าการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายต่ำสุด เท่ากับ 15 นาที และ 30 นาที ตามลำดับ ที่ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสเท่ากับ 1.40 (ส่วนผสมที่ 70-12-9)

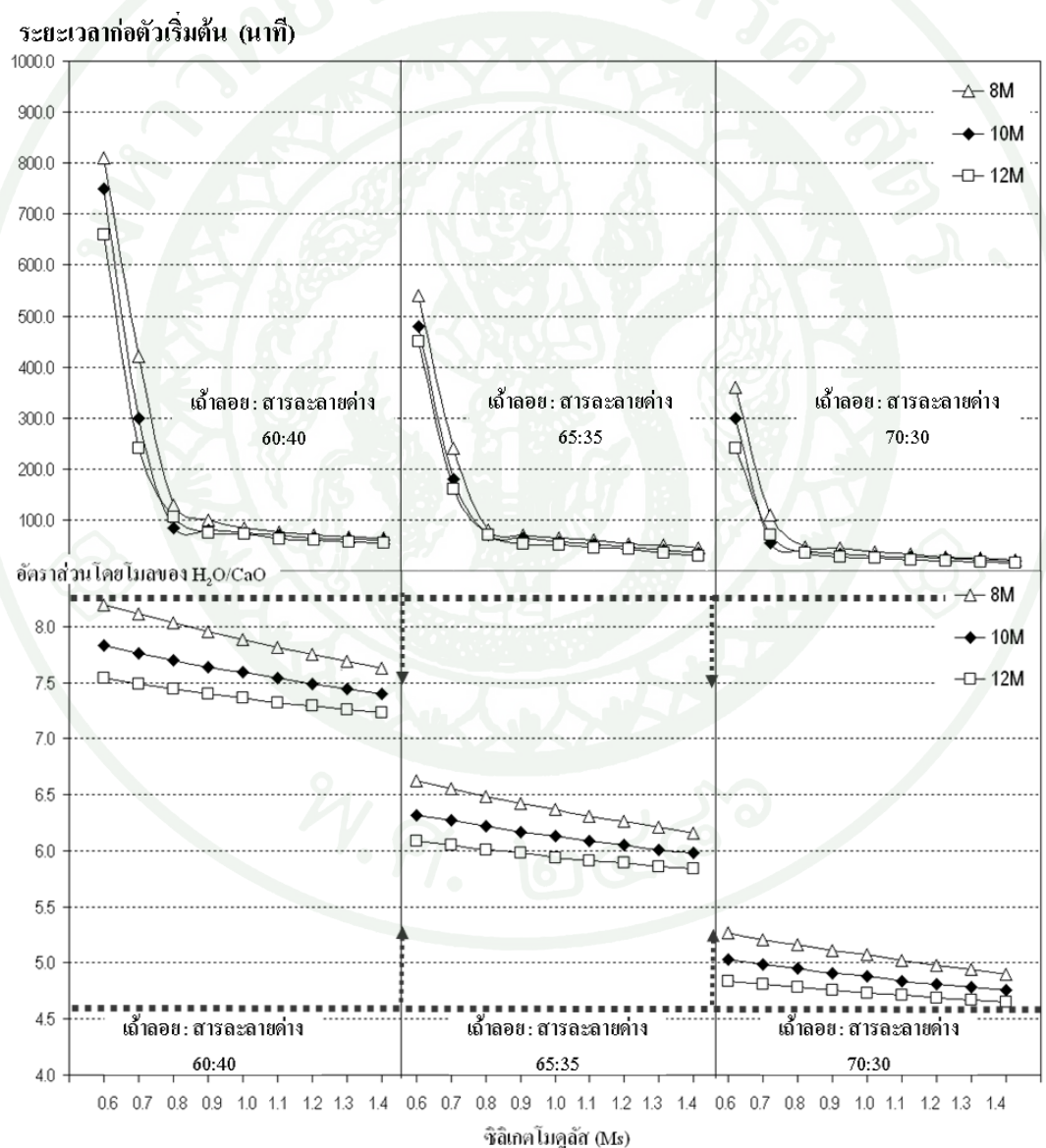
2.1.4 ผลของปัจจัยส่วนผสมที่มีต่อการก่อตัว

ภาพที่ 62 และ 63 ได้แสดงการเปรียบเทียบถึงปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ ปริมาณ เถ้าลอย ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซิลิกาโมดูลัส และได้ดังนี้

2.1.4.1 ผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยที่มีต่อการก่อตัว พบว่าปริมาณของเถ้าลอย มีผลกระทบต่อ การก่อตัว โดยการก่อตัวจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 70 ซึ่งผลกระทบในลักษณะนี้สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลกระทบที่มีต่อการไหลแผ่ ซึ่งเมื่อปริมาณของสารตั้งต้นสำหรับการทำปฏิกิริยามีมากขึ้น จะส่งผลถึงอัตรา การเกิดปฏิกิริยาแล้วส่งผลต่อการก่อตัวในที่สุด และเป็นที่น่าสังเกตอีกด้วยว่าปริมาณแคลเซียม สามารถเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำปฏิกิริยากับน้ำที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลเมอเรชัน (Davidovits, 2008: 120-156) ทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นได้

นอกจากปฏิกิริยาไฮโดรไลเมอเรชันของซิลิกาและอะลูมินาจาก ขั้นตอนการชะละลายแล้ว ยังมีปรากฏการณ์ของการเกิดปฏิกิริยาคู่ขนานระหว่างแคลเซียมกับน้ำ หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ภายในส่วนผสม (Chindaprasirt, 2012) ทำให้เกิดการเร่งก่อตัวมากขึ้นซึ่ง สังเกตได้จากส่วนผสมที่มีทั้งเถ้าลอยปริมาณมากพร้อมกับโซเดียมซิลิเกตสูงพร้อมกันจะมีค่าการก่อ ตัวที่รวดเร็วและในห้วงสภาพการไหลในที่สุด นอกจากนั้นแล้วยังสังเกตได้จากสภาพหลังจาก การเติมโซเดียมซิลิเกตในขั้นตอนสุดท้ายของการผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอีกด้วย และถ้า ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตสูงมากขึ้นจึงนำไปสู่สภาพที่แข็งตัวเร็วมากจนไม่สามารถทำงานได้ทัน (ภาพที่ 53 ข) ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณเถ้าลอยมีน้อยและซิลิเกตต่ำส่งผลให้เกิดการก่อตัวช้าลง และเพิ่มค่าการไหลแผ่มากขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Yang *et. al.* (2007) ที่ศึกษา เปรียบเทียบการใช้ตะกั่วเตาหลอมโดยมีแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของ Na_2O และ CaO ในรูปแบบ ของมอร์ตาร์พบว่าส่งผลต่อเวลาการก่อตัวมากจนถึงขั้นขั้นที่ทำงานไม่ได้เช่นกัน

2.1.4.2 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการก่อตัวพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลกระทบต่อการก่อตัว โดยการก่อตัวจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 8 โมลาร์เป็น 12 โมลาร์ ทั้งนี้สอดคล้องไปตามสัดส่วนของปริมาณน้ำที่อยู่ในส่วนผสมรวมถึงความสามารถในการชะละลายของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นกว่ายังส่งผลให้มีปริมาณของ Si และ Al สูงขึ้นเช่นกัน (Chindapasirt, 2009; Rattanasak *et al.*, 2011)



ภาพที่ 62 ระยะก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์สด

2.1.4.3 ผลกระทบของซิลิเกตโมดูลัสที่มีต่อการก่อตัวของซิลิเกตโมดูลัสมีผลกระทบต่อการก่อตัว โดยการก่อตัวจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อซิลิเกตโมดูลัสเพิ่มมากขึ้นจาก 0.60 เป็น 1.4 ทั้งนี้สอดคล้องไปตามสัดส่วนของปริมาณซิลิเกตที่อยู่ในส่วนผสม โดยเป็นที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งว่าโครงสร้างของสารละลายต่างก็ค่าซิลิเกตโมดูลัสนั้นก็สะท้อนถึงคุณสมบัติของความสามารถในการทำงานได้เช่นกันกล่าวคือ เมื่อส่วนผสมที่ใช้ส่วนผสมของสารละลายที่มีค่าซิลิเกตโมดูลัส ที่ต่ำกว่า 0.80 โครงสร้างของสารละลายมีสภาพแยกตัวอิสระมากขึ้น (Davidovits, 2011:12) หมายความว่าสภาพของส่วนผสมต้องใช้พลังงานในการก่อตัวมากกว่า

ดังนั้นถ้าส่วนผสมที่มีแคลเซียมน้อย (ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60) รวมถึงมีการใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตน้อยจึงส่งต่อคุณสมบัติด้านนี้ได้ชัดเจน ดังนั้นสารละลายที่มีค่าซิลิเกตโมดูลัสน้อย (ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มาก) จึงส่งผลการก่อตัวที่ช้าและในเวลา มากกว่า 12 ชั่วโมงขึ้นไป (ภาพที่ 53 ก) รวมถึงส่งผลให้ส่วนผสมมีการแยกชั้นได้และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang (2003) ที่พบว่าช่วงเวลาของการก่อตัวนั้นสัมพันธ์กับปริมาณของ SiO_2 อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบกับงานศึกษาของ Diaz *et al.* (2010) ที่ได้ศึกษาผลของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและต่ำ พบว่ากลุ่มเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีช่วงเวลาการก่อตัวเร็วกว่ากลุ่มเถ้าลอยแคลเซียมต่ำอย่างเด่นชัด กล่าวคือกลุ่มเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีเวลาก่อตัวอยู่ในช่วง 1.5-25 นาที ส่วนกลุ่มเถ้าลอยแคลเซียมต่ำมีเวลาก่อตัวอยู่ในช่วง 180-300 นาที ซึ่งผลจากการวิจัยนี้จึงสนับสนุนผลของแคลเซียมที่มีต่อความสามารถในการทำงานของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยแคลเซียมสูง

2.2 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแข็งตัวแล้ว

ผลการศึกษาค้นสมบัติในด้านความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด รวมถึงการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค10-ค30 โดยพบว่าในแต่ละช่วงของการใช้เถาวัลย์ต่างๆ รวมถึงอัตราส่วนของสารละลาย ส่งผลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแข็งตัวแล้ว โดยมีในรายละเอียดของคุณสมบัติที่ได้ในแต่ละช่วงของเถาวัลย์ดังนี้

2.2.1 ความหนาแน่น

ผลของการวิจัยด้านความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้ง 81 ส่วนผสม โดยทั่วไป พบว่าอยู่ในช่วง 1,674-1,914 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน และเมื่ออายุของตัวอย่างครบ 28 วัน มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,642-1,888 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยสามารถจำแนกตามส่วนผสมที่ใช้เถาวัลย์ปริมาณต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.1.1 ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถาวัลย์ร้อยละ 60

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าความหนาแน่นเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,688-1,762 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,668-1,719 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค10

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่าความหนาแน่นเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,759-1,808 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,690-1,747 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค11

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่าความหนาแน่นเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,674-1,757 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,642-1,730 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค12

2.2.1.2 ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าความหนาแน่นเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,789-1,829 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,710-1,793 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค13

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่าความหนาแน่นเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,781-1,842 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,711-1,778 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค14

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่าความหนาแน่นเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,801-1,875 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,714-1,804 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค15

2.2.1.3 ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าความหนาแน่นเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,700-1,825 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,681-1,784 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค16

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่าความหนาแน่นเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,802-1,885 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,747-1,834 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค17

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่าความหนาแน่นเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 1,758-1,914 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,708-1,888 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค18

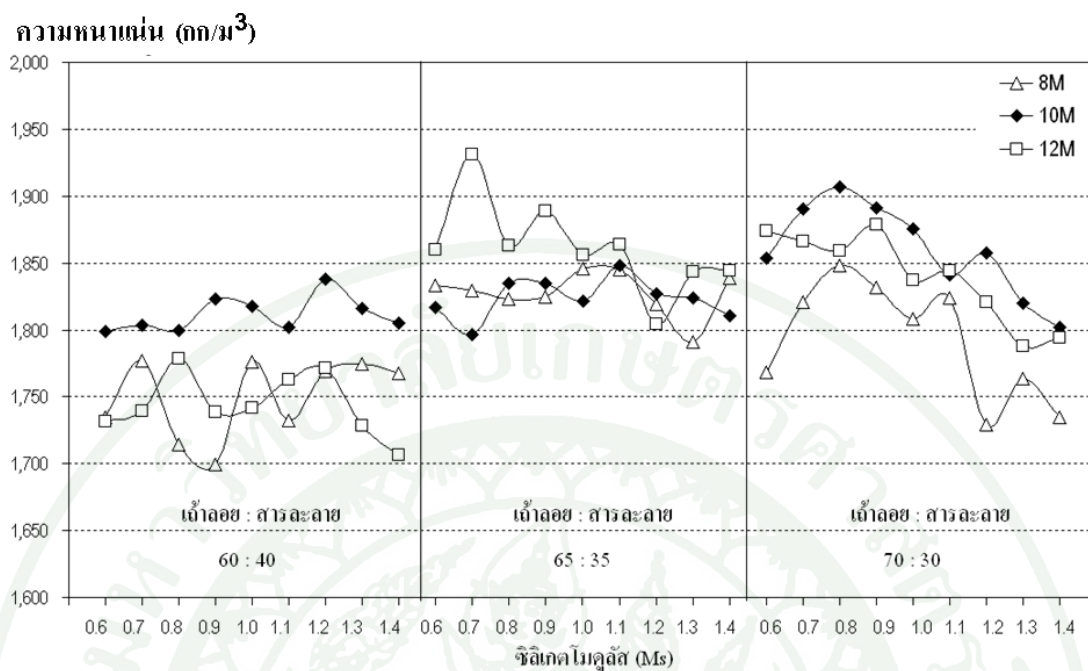
2.2.2 อิทธิพลของปัจจัยส่วนผสมที่มีต่อความหนาแน่น

ภาพที่ 64 และ 65 ได้แสดงการเปรียบเทียบถึงปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ ปริมาณเถ้าลอย ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเกตโมดูลัส ได้ดังนี้

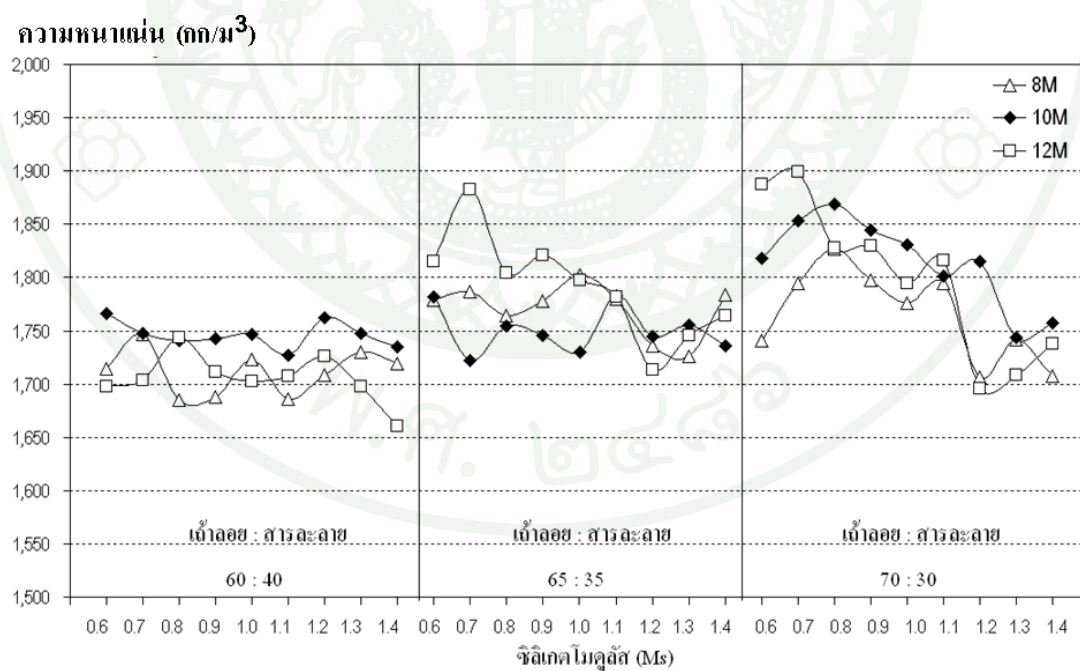
2.2.2.1 ผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยที่มีต่อความหนาแน่น พบว่าปริมาณของเถ้าลอยมีส่งผลต่อความหนาแน่น กล่าวคือเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 70 ความหนาแน่นมีแนวโน้มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 5-6 ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณของอนุภาคเถ้าลอยที่ถือเป็นของแข็งความหนาแน่นมากที่สุดภายในส่วนผสม โดยความหนาแน่นนี้มีทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Swanepoel *et al.*, (2002) ที่ได้รายงานผลไว้ในช่วง 1,600-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรรวมถึงได้ระบุว่าค่าความหนาแน่นลดลงเมื่อตัวอย่างอายุที่ 28 วันเช่นเดียวกัน อันเนื่องมาจากการระเหยของน้ำภายในจีโอโพลิเมอร์พาสต์ตามหลักการของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน (Davidovits, 2008: 138)

2.2.2.2 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาแน่นพบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้ความเข้มข้นที่ 8 โมลาร์ ส่วนความเข้มข้นที่ 10 และ 12 โมลาร์นั้นไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญ

2.2.2.3 ผลกระทบของซิลิกาเกตโมดูลัสที่มีต่อความหนาแน่นพบว่าซิลิกาเกตโมดูลัสไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน



ภาพที่ 64 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 7 วัน



ภาพที่ 65 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

2.2.3 การดูดซึมน้ำ

ผลของการวิจัยด้านการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้ง 81 ส่วนผสมโดยทั่วไป พบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.23 – 4.83 เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน ซึ่งสามารถจำแนกตามส่วนผสมที่ใช้เกล็ดลอยปริมาณต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.3.1 การดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เกล็ดลอยร้อยละ 60

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าร้อยละของการดูดซึมน้ำเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 2.80 - 4.80 ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค10

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่าร้อยละของการดูดซึมน้ำเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 2.82 - 4.08 ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค11

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่าร้อยละของการดูดซึมน้ำเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 2.23 - 4.74 ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค12

2.2.3.2 การดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เกล็ดลอยร้อยละ 65

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าร้อยละของการดูดซึมน้ำเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 3.20 – 3.80 ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค13

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่าร้อยละของการดูดซึมน้ำเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 3.28 - 4.18 ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค14

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่า ร้อยละของการดูดซึมน้ำเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 3.10 - 4.60 ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค15

2.2.3.3 การดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่า ร้อยละของการดูดซึมน้ำเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 3.98 – 4.83 ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค16

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่า ร้อยละของการดูดซึมน้ำเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 3.10 – 3.91 ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค17

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่า ร้อยละของการดูดซึมน้ำเมื่อตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 2.75 – 3.65 ตามรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค18

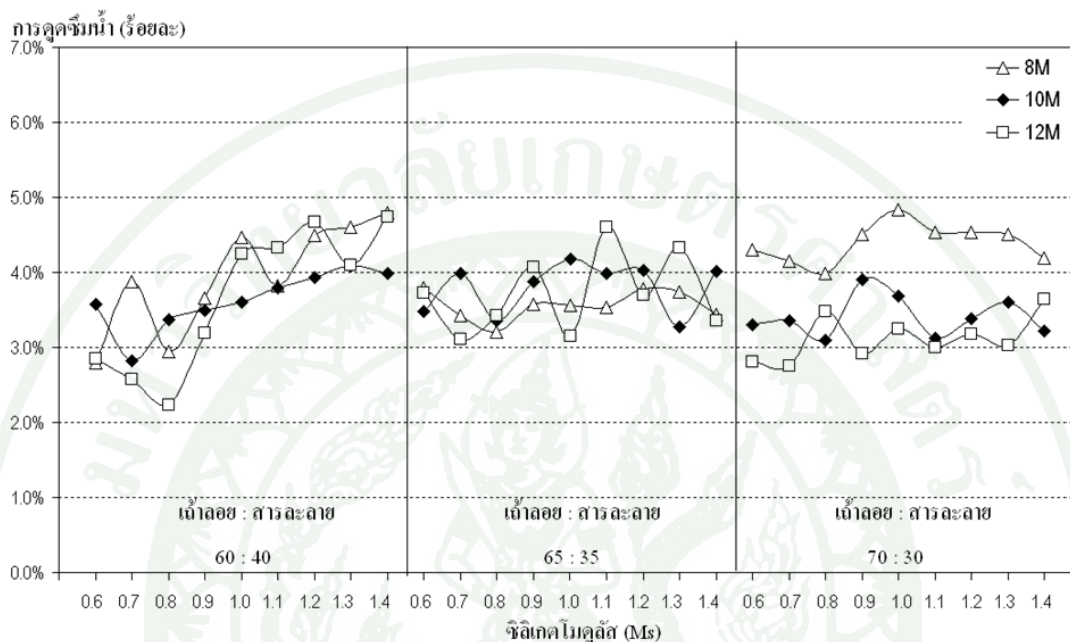
2.2.4 อิทธิพลของปัจจัยส่วนผสมที่มีต่อการดูดซึมน้ำ

ภาพที่ 66 ได้แสดงการเปรียบเทียบถึงปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ ปริมาณเถ้าลอย ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเกตโมดูลัส ได้ดังนี้

2.2.4.1 ผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยที่มีต่อการดูดซึมน้ำ พบว่าปริมาณของเถ้าลอยมีส่งต่อความสามารถดูดซึมน้ำในช่วงร้อยละ 60 เท่านั้น โดยในส่วนที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 65 และ 70 นั้น ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

2.2.4.2 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการดูดซึมน้ำพบว่าไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญ

2.2.4.3 ผลกระทบของซิลิเกตโมดูลัสที่มีต่อการดูดซึมน้ำพบว่าซิลิเกตโมดูลัสไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน



ภาพที่ 66 การเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน

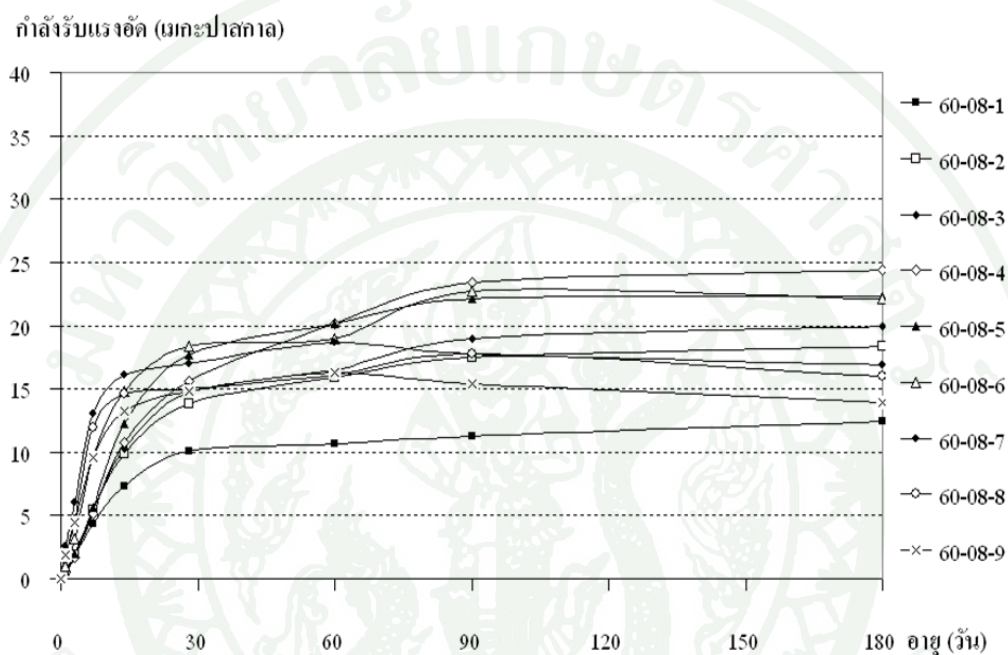
2.2.5 กำลังรับแรงอัด

ผลการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้ง 81 ส่วนผสมโดยทั่วไป พบว่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 4.4 – 28.0 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน ในขณะที่เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 10.1 – 39.1 เมกะปาสกาล และตัวอย่างมีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดอย่างต่อเนื่องจนครบอายุ 180 วัน โดยมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 12.4 – 49.7 เมกะปาสกาล โดยสามารถจำแนกตามส่วนผสมที่ใช้เกล็ดลอยปริมาณต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.5.1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เกล็ดลอยร้อยละ 60

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 1 วัน อยู่ในช่วง 0.5 – 2.6 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างอายุ 3 วันอยู่ในช่วง 1.7 – 6.0 เมกะปาสกาล จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วันอยู่ในช่วง 4.4 – 13.0 เมกะปาสกาล

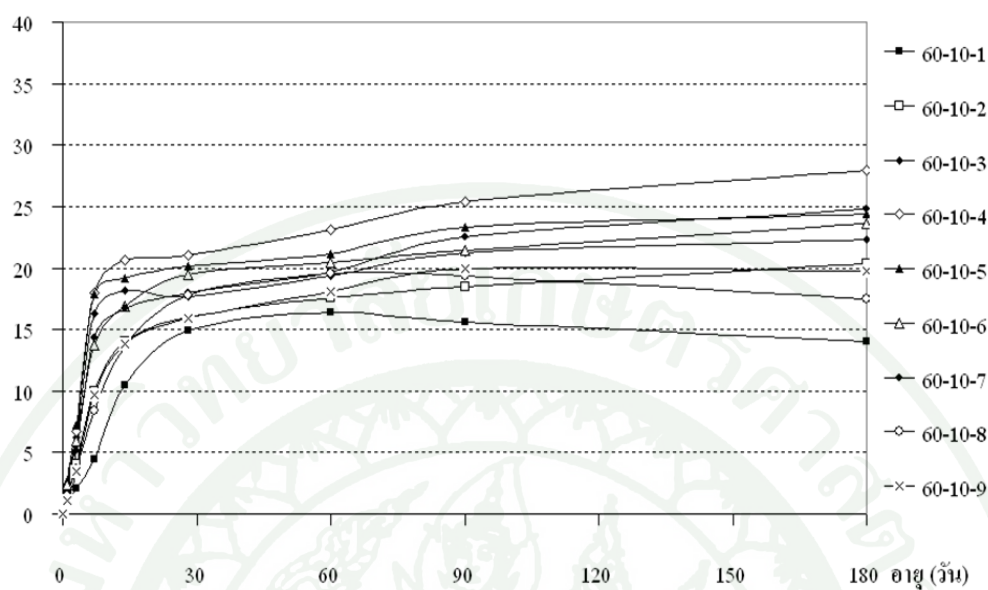
กาล และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 10.1 – 18.4, 10.6 – 20.1, 11.3 – 23.4 และ 12.4 – 24.4 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค19 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 67



ภาพที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

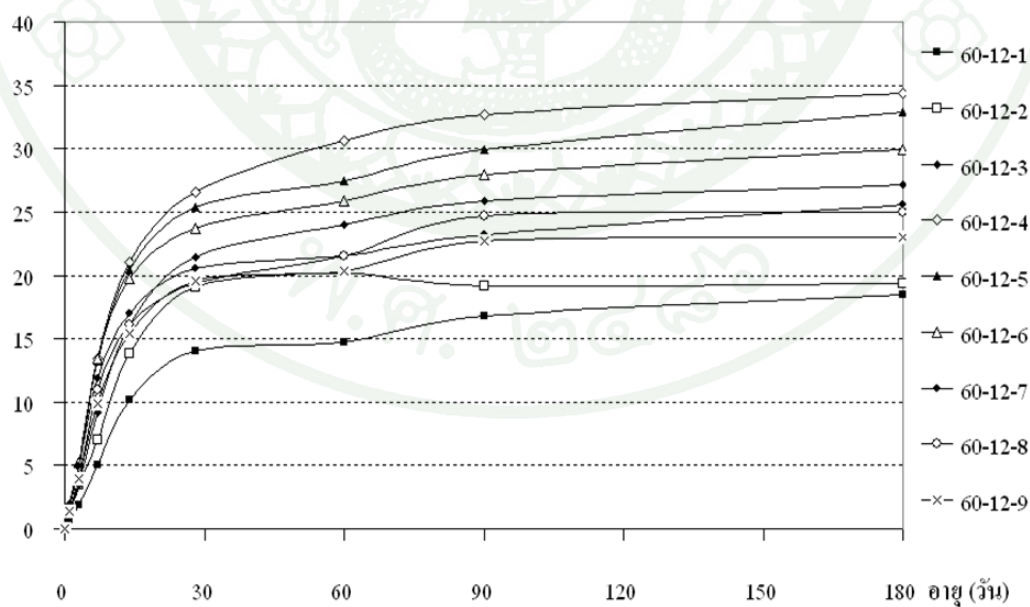
ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 1 วัน อยู่ในช่วง 0.9 – 2.6 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างอายุ 3 วันอยู่ในช่วง 2.0 – 7.2 เมกะปาสกาล จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วันอยู่ในช่วง 4.4 – 18.0 เมกะปาสกาล และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 14.9 – 21.0, 16.4 – 23.1, 15.6 – 25.4 และ 14.0 – 28.0 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค20 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 68

กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)



ภาพที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)



ภาพที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

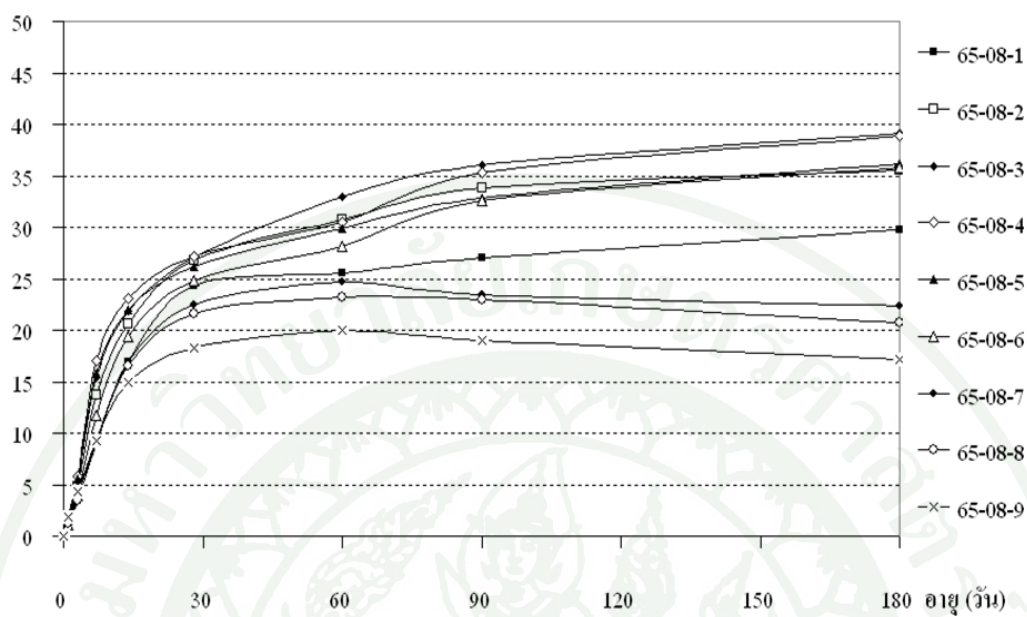
ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 1 วัน อยู่ในช่วง 0.7 – 1.9 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างอายุ 3 วันอยู่ในช่วง 1.9 – 5.3 เมกะปาสกาล จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วันอยู่ในช่วง 5.0 – 13.4 เมกะปาสกาล และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 14.0 – 26.6, 14.7 – 30.6, 16.8 – 32.7 และ 18.4 – 34.4 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค21 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 69

2.2.5.2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 1 วัน อยู่ในช่วง 1.2 – 1.9 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างอายุ 3 วันอยู่ในช่วง 3.5 – 5.8 เมกะปาสกาล จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วันอยู่ในช่วง 9.0 – 17.1 เมกะปาสกาล และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 18.2 – 27.2, 20.0 – 33.0, 19.0 – 36.0 และ 17.1 – 39.1 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค22 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 70

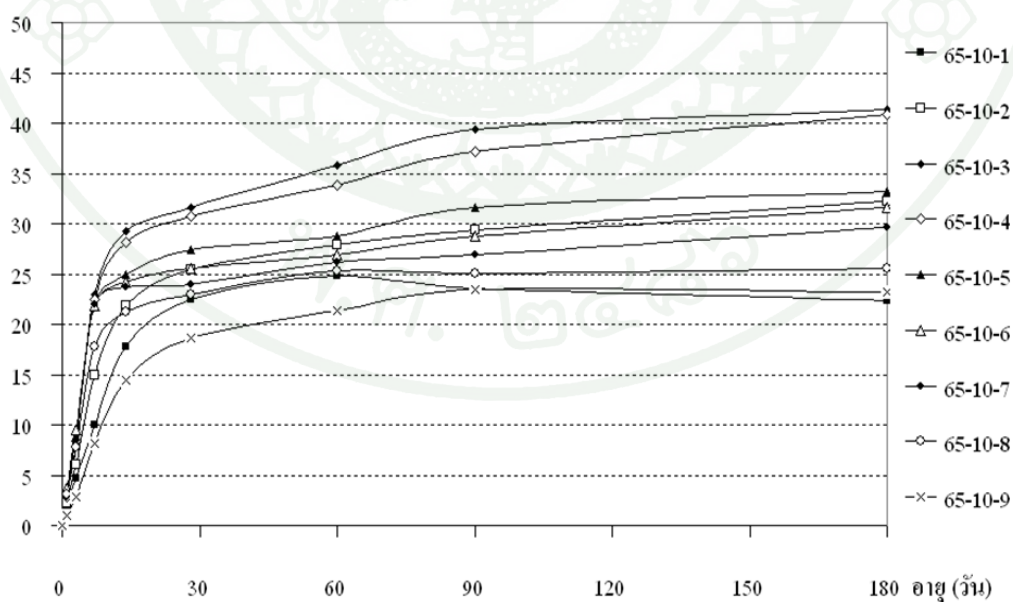
ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 1 วัน อยู่ในช่วง 0.9 – 3.8 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างอายุ 3 วันอยู่ในช่วง 2.9 – 9.5 เมกะปาสกาล จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วันอยู่ในช่วง 8.1 – 23.0 เมกะปาสกาล และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 18.7 – 31.6, 21.3 – 35.8, 23.4 – 39.4 และ 22.4 – 41.4 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค23 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 71

กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)



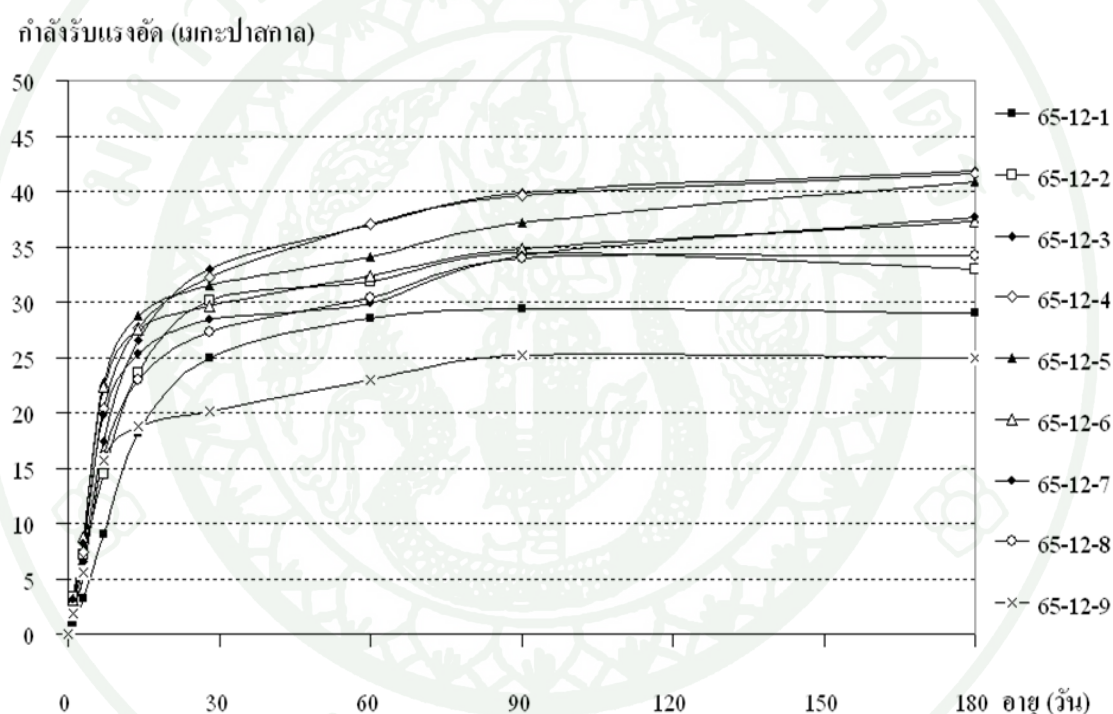
ภาพที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)



ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 1 วัน อยู่ในช่วง 1.0 – 3.3 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างอายุ 3 วันอยู่ในช่วง 3.2 – 8.9 เมกะปาสกาล จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วันอยู่ในช่วง 9.0 – 22.7 เมกะปาสกาล และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 20.1 – 33.0, 22.9 – 37.1, 25.2 – 39.9 และ 25.0 – 41.9 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค24 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 72

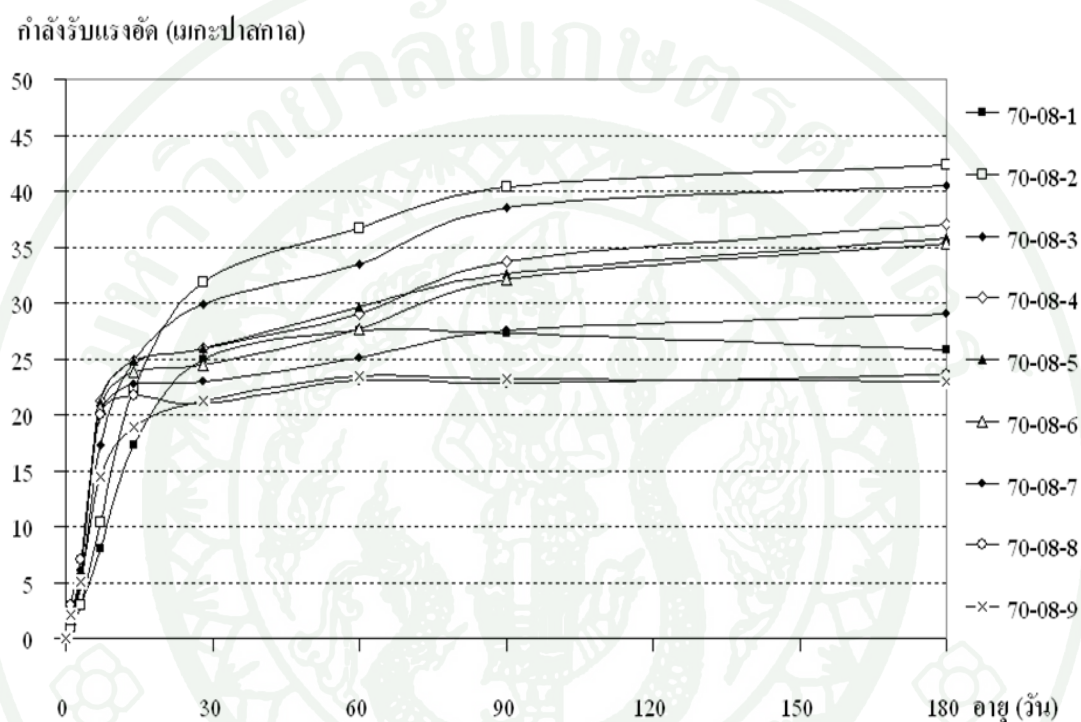


ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

2.2.5.3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 1 วัน อยู่ในช่วง 1.0 – 3.0 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างอายุ 3 วันอยู่ในช่วง 2.8 – 7.0 เมกะปาสกาล จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วันอยู่ในช่วง 8.0 – 21.2 เมกะปาสกาล

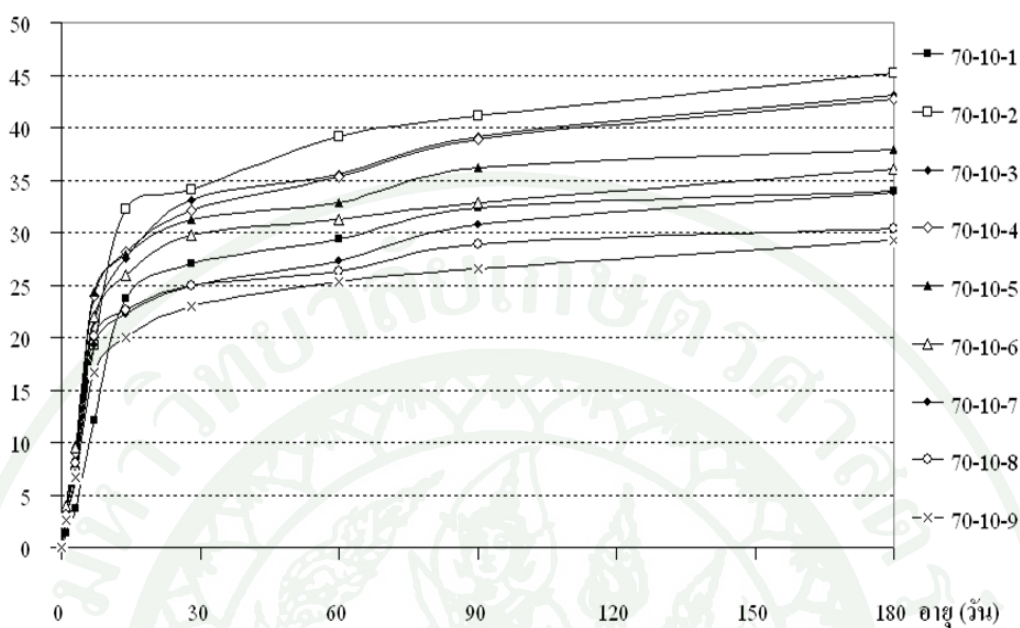
กาล และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 21.0 – 31.9, 23.1 – 36.7, 22.9 – 40.3 และ 22.9 – 42.3 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค25 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 73



ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

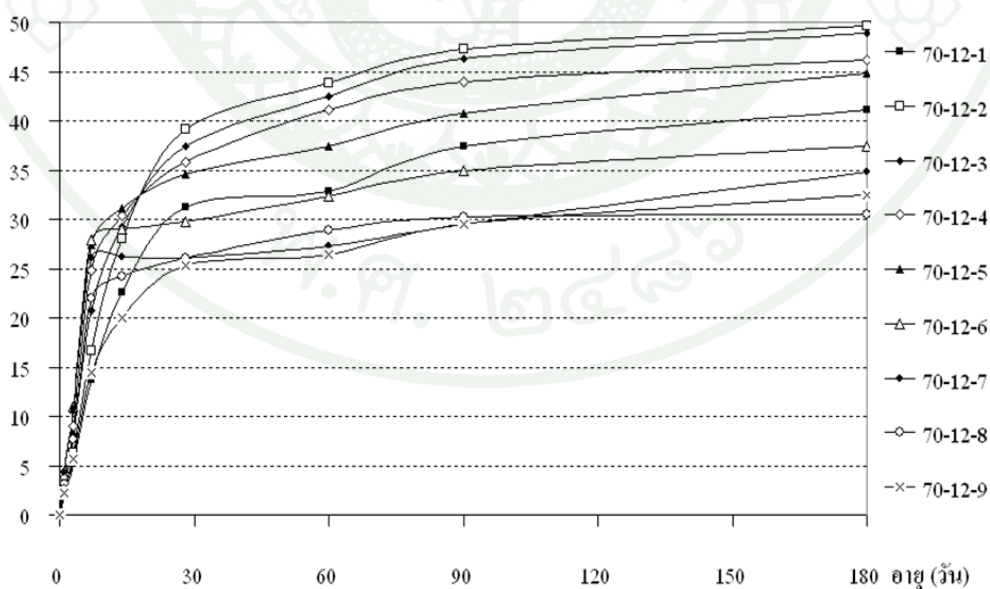
ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 1 วัน อยู่ในช่วง 1.4 – 4.0 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างอายุ 3 วันอยู่ในช่วง 3.7 – 9.8 เมกะปาสกาล จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วันอยู่ในช่วง 12.1 – 24.3 เมกะปาสกาล และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 23.0 – 34.0, 25.3 – 39.1, 26.6 – 41.1 และ 29.2 – 45.2 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค26 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 74

กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)



ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)



ภาพที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 1 วัน อยู่ในช่วง 1.9 – 4.3 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างอายุ 3 วัน อยู่ในช่วง 5.2 – 10.9 เมกะปาสกาล จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 13.7 – 28.0 เมกะปาสกาล และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษา พบว่า กำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 25.4 – 39.1, 26.4 – 43.8, 29.5 – 47.3 และ 30.5 – 49.7 เมกะปาสกาล เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค27 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 75

2.2.6 ผลของปัจจัยส่วนผสมที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

ภาพที่ 76-82 แสดงการเปรียบเทียบถึงปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ ปริมาณเถ้าลอย ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาโมดูลัส โดยเรียงตามลำดับอายุของตัวอย่าง ได้แก่ อายุ 1, 3, 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน จากภาพชุดดังกล่าวสามารถวิเคราะห์แนวโน้มของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดได้ดังนี้

2.2.6.1 ผลของปริมาณเถ้าลอยที่มีต่อกำลังรับแรงอัด พบว่าเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน โดยเริ่มจากในส่วน of ตัวอย่างที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 70 และลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่ใช้ ทั้งนี้อธิบายได้ว่าโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ต้องประกอบด้วยทั้ง Si และ Al ซึ่งในส่วน of Al นั้นมาจากเถ้าลอยโดยตรงทั้งนี้สอดคล้องกับหลักการของจีโอโพลิเมอร์และงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt *et al.*, 2007,2009; Rattanasak and Chindaprasirt, 2009)

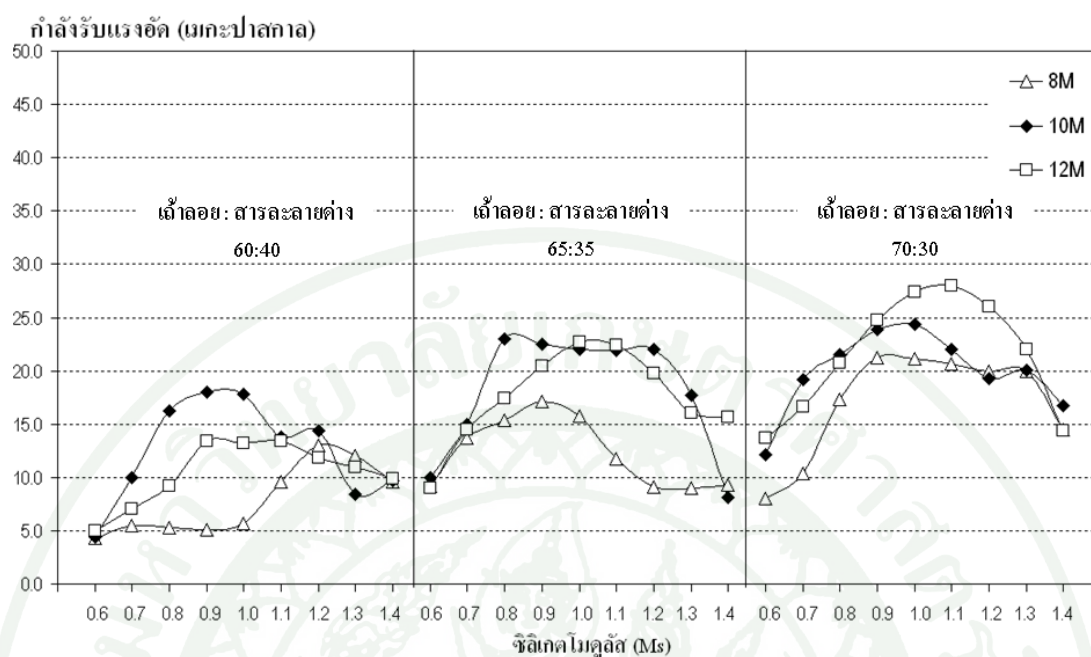
นอกจากนั้นแล้วเมื่อพิจารณาพร้อมกับผลที่วิเคราะห์ในหัวข้อ 1.5 เรื่อง สัดส่วนโดยโมลของแคลเซียม ได้แก่ สัดส่วนของ CaO/SiO_2 และ $\text{CaO/M}_2\text{O}$ ซึ่งทั้ง 2 สัดส่วนนี้เพิ่มขึ้นโดยตรงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่ม โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดสัมพันธ์กับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของทั้ง 2 สัดส่วนอย่างชัดเจน (ภาพที่ 80) ความสัมพันธ์ที่ได้พบในครั้งนี้สนับสนุนถึงหลักการของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถเข้าเสริมในโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ได้ และยังสามารถเกิดเป็นปฏิกิริยาคู่ขนานกับองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ภายในกลายเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้ (Davidovits, 2008: 50-56) ทั้งนี้ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังสอดคล้องกับทิศทางของงานวิจัยที่มีการใช้สารประกอบที่มีแคลเซียมผสมลงในเถ้าลอยแคลเซียมต่ำแล้วพบว่า กำลังรับ

แรงอัดสามารถพัฒนาได้อย่างต่อเนื่อง (Diaz *et al.*, 2010; Winnefeld *et al.*, 2010) นอกจากนั้นแล้ว จากผลขององค์ประกอบภายในของเถ้าลอยทำให้เข้าใจพฤติกรรมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีการผสมเถ้าลอยร่วมกับเถ้าประเภทอื่นๆ เช่นเถ้าแกลบ หรือเถ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวล ได้เป็นอย่างดี (Detphan and Chindaprasirt, 2009; Songpiriyakij *et al.*, 2010) และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ ที่สังเคราะห์ในสภาวะอุณหภูมิปกติเหมือนกัน (โดยไม่บ่มร้อน) พบว่ากำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ยสามารถเทียบลักษณะของความสัมพันธ์กับปริมาณเถ้าลอยได้เช่นกัน (Jaarsveld *et al.*, 2003; Jimenez *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2008)

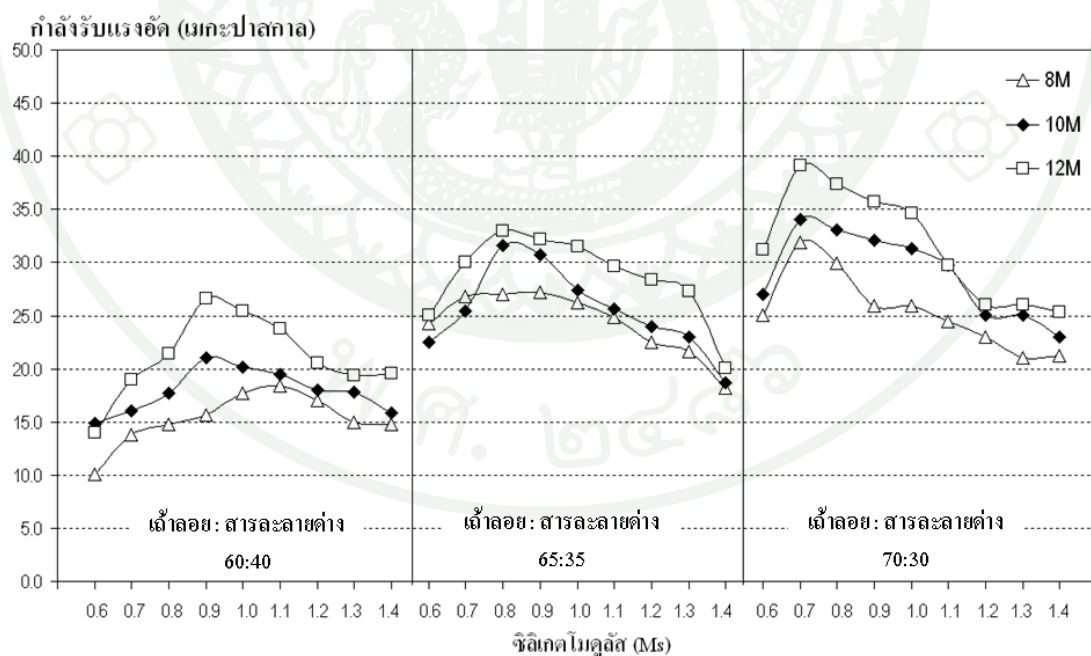
2.2.6.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด จากการเปรียบเทียบภาพชุดที่ 76-82 พบว่าเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12 โมลาร์จะให้กำลังรับแรงอัดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างภายในชุดเดียวกัน (ดังตัวอย่างตามภาพที่ 81) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากหลักการของปริมาณ Na_2O ที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับหลักการของจีโอโพลิเมอร์และเสริมข้อมูลร่วมกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009)

2.2.6.3 ผลของซิลิกาโมดูลัสที่มีต่อกำลังรับแรงอัดจากการเปรียบเทียบภาพชุดที่ 76-82 พบว่าเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน ในลักษณะที่แตกต่างกับ 2 ตัวแปรที่ผ่านมา โดยเป็นในลักษณะของจุดยอดของกราฟ และเห็นลักษณะอย่างเด่นชัดเมื่อเวลาผ่านไปครบ 180 วัน (ดังตัวอย่างตามภาพที่ 82) ทั้งนี้จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวสอดคล้องกับ การค้นพบของ (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009) ซึ่งเป็นส่วนเสริมที่ทำให้เห็นจุดสมดุลที่ให้ค่ากำลังสูงสุดในแต่ละช่วงของการใช้เถ้าลอยปริมาณต่างๆ กัน

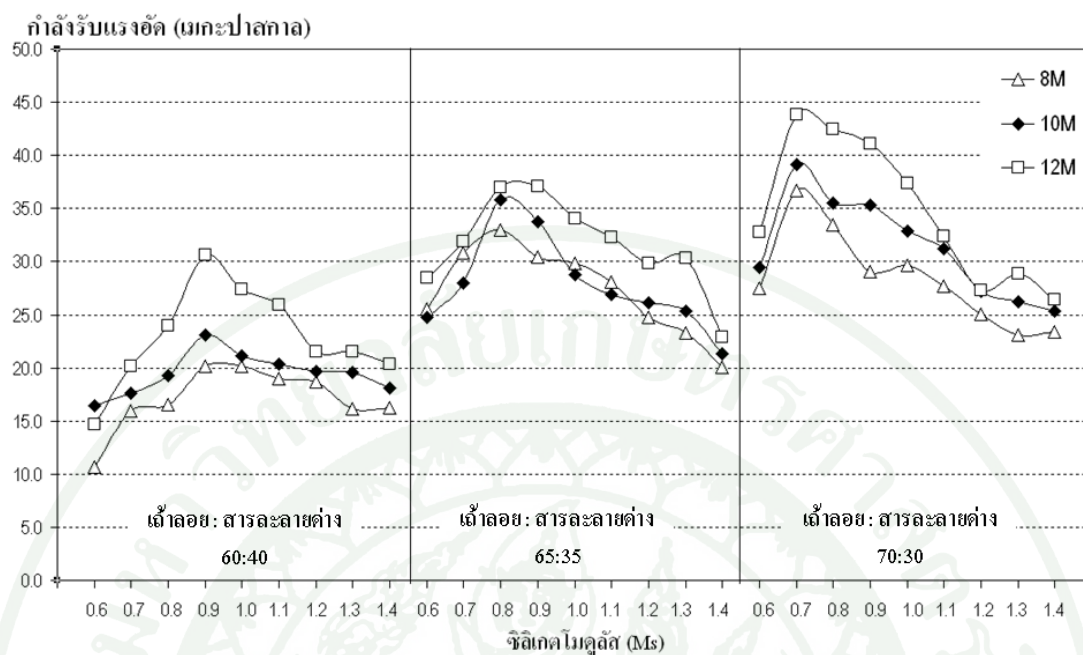
นอกจากนั้นพฤติกรรมในลักษณะนี้ได้ครอบคลุมถึงจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าก้นเตาแคลเซียมสูง (Chindaprasirt *et al.*, 2009; Sata *et al.*, 2012; Sathonsalowaphak *et al.*, 2009) และจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยเถ้าลอยแคลเซียมต่ำเช่นกัน (Bakharev, 2005; Hajimohammadi *et al.*, 2010, 2011; Miranda *et al.*, 2005; Temuujin *et al.*, 2009)



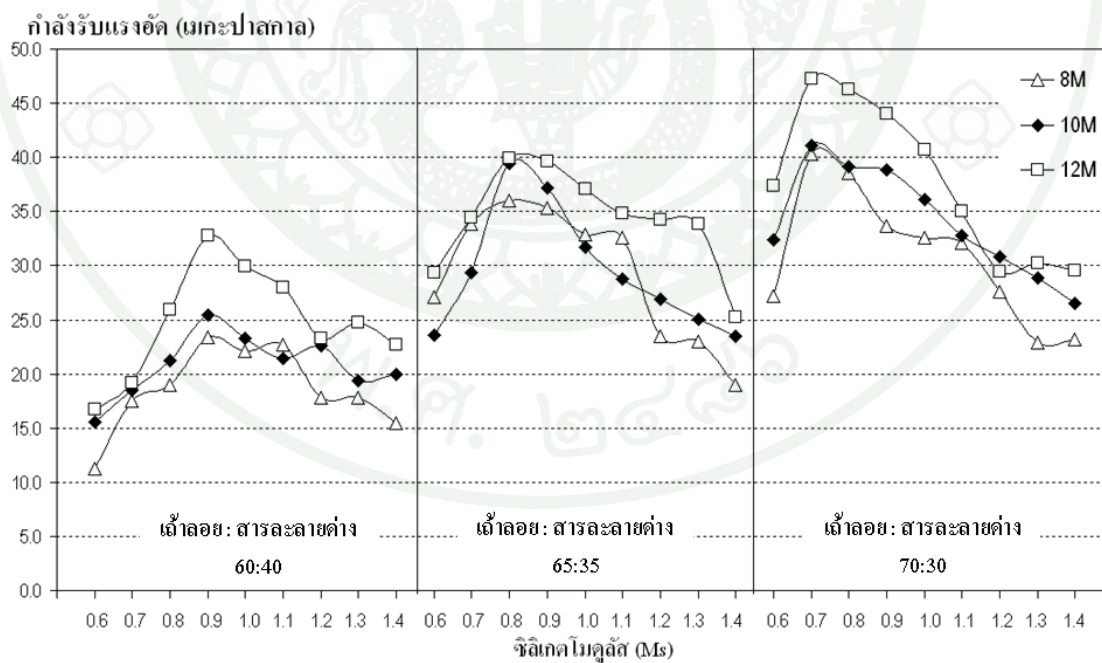
ภาพที่ 78 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของอีโพอキシโพลีเมอร์เฟสท์ที่อายุ 7 วัน



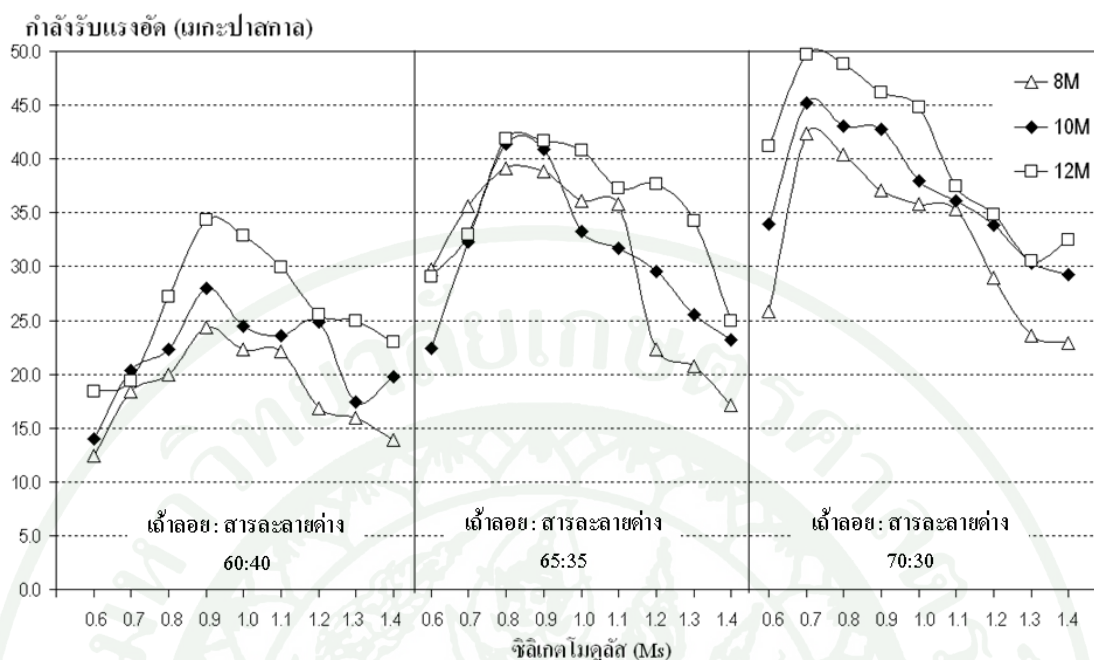
ภาพที่ 79 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของอีโพอキシโพลีเมอร์เฟสท์ที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 80 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสท์ที่อายุ 60 วัน



ภาพที่ 81 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสท์ที่อายุ 90 วัน



ภาพที่ 82 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 180 วัน

จากข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบมาทั้งหมดพบว่าผลในช่วงก่อนการแข็งตัวนั้น สามารถจัดกลุ่มของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง เพื่อการพัฒนาวัสดุก่อสร้างได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มแรกเป็นที่พัฒนากำลังได้อย่างรวดเร็วคือกลุ่มที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 แต่มีช่วงเวลาในการทำงานสั้น ในทางตรงกันข้ามกลุ่มที่สองจะเป็นกลุ่มที่มีเวลาทำงานมากที่สุด แต่พัฒนากำลังช้าที่สุดคือกลุ่มที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และส่วนกลุ่มที่ 3 เป็นทางเลือกกลางระหว่างทั้ง 2 กลุ่มคือกลุ่มที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 ดังนั้นการเลือกใช้จึงควรกำหนดลักษณะของการใช้งานให้เหมาะสมกับการใช้งานเบื้องต้น ซึ่งสิ่งที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่สังเคราะห์ขึ้นในอุณหภูมิต่ำ และทำให้เสริมความเข้าใจในพฤติกรรมของงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องโดยในอุณหภูมิต่ำที่สูงขึ้นได้อย่างเป็นระบบ (Riditirud *et al.*, 2012; Sata *et al.*, 2012; Tho-in *et al.*, 2012; Wongpa *et al.*, 2010)

2.2.7 การหัดตัวเมื่อแห้ง

ผลการทดลองด้านการหัดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่คัดเลือกมาจากส่วนผสมทั้งหมดเป็น 27 ส่วนผสมโดยทั่วไปแล้วพบว่าการหัดตัวเมื่อแห้งอยู่ที่ร้อยละ 0.060 – 0.463

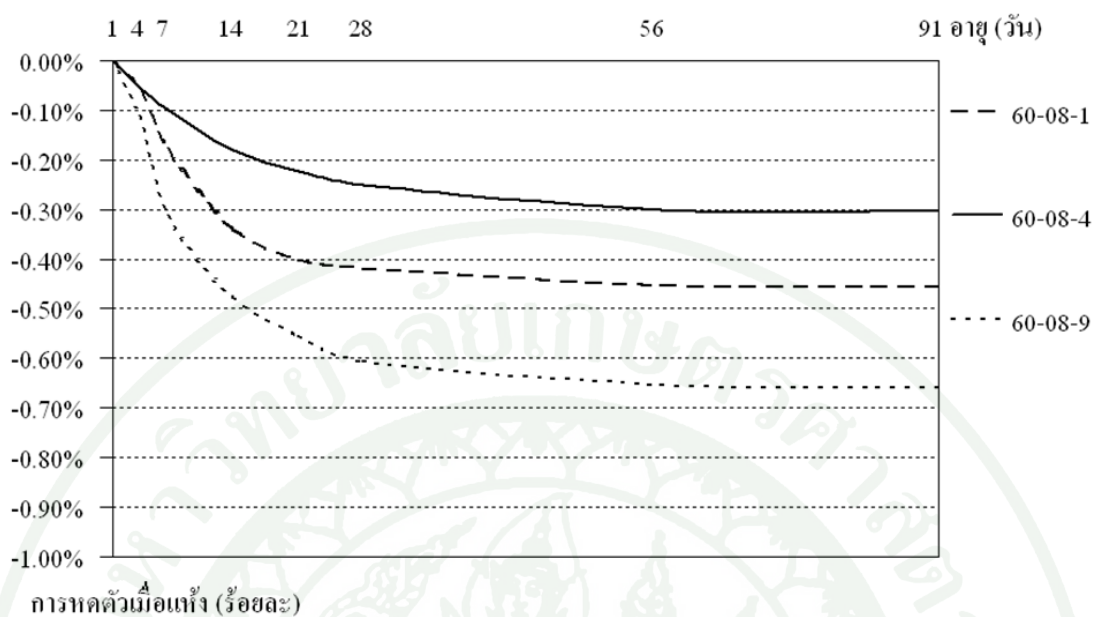
เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 7 วัน ในขณะที่เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน การหดตัวเมื่อแห้งจะเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง $0.150 - 0.779$ และตัวอย่างเริ่มชะลออัตราการหดตัวน้อยลงครบอายุ 90 วัน มีการหดตัวเมื่อแห้งในร้อยละ $0.190 - 0.847$ โดยสามารถจำแนกตามส่วนผสมที่ใช้ได้ลดยปริมาณต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.7.1 การหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ได้ลดยร้อยละ 60

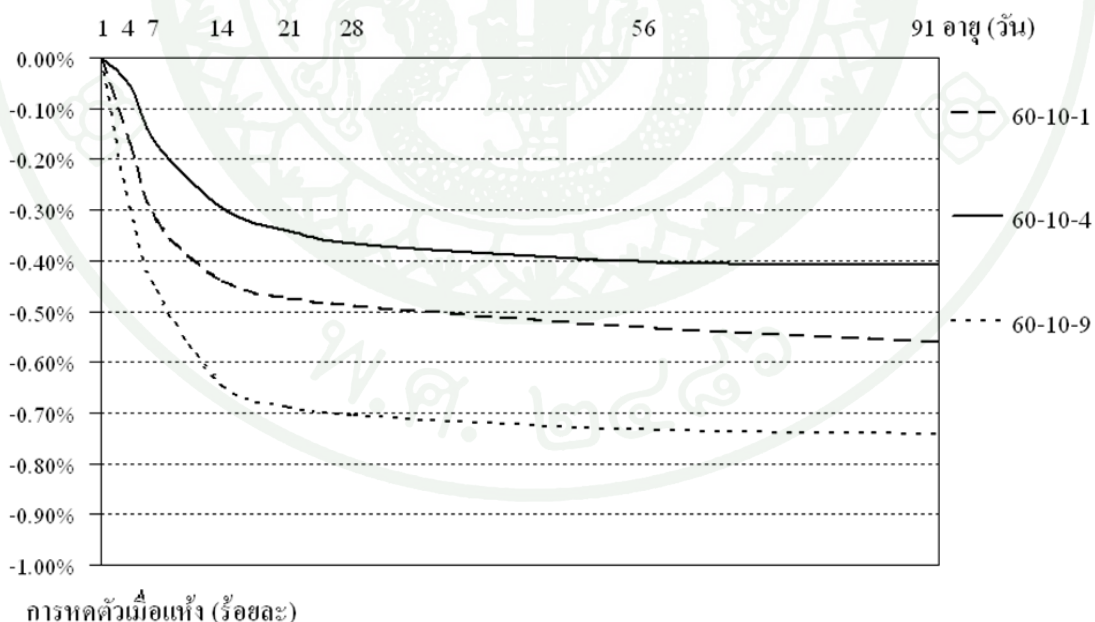
ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าการหดตัวเมื่อแห้งเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 4 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ $0.054 - 0.112$ เมื่อตัวอย่างอายุ 7 วันอยู่ในช่วงร้อยละ $0.101 - 0.315$ จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 28 วันอยู่ในช่วงร้อยละ $0.250 - 0.606$ และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า การหดตัวเมื่อแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ $0.301 - 0.654$ และ $0.303 - 0.660$ เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค28 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 83

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่าการหดตัวเมื่อแห้งเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 4 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ $0.055 - 0.295$ เมื่อตัวอย่างอายุ 7 วันอยู่ในช่วงร้อยละ $0.171 - 0.463$ จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 28 วันอยู่ในช่วงร้อยละ $0.367 - 0.706$ และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า การหดตัวเมื่อแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ $0.404 - 0.734$ และ $0.409 - 0.742$ เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค28 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 84

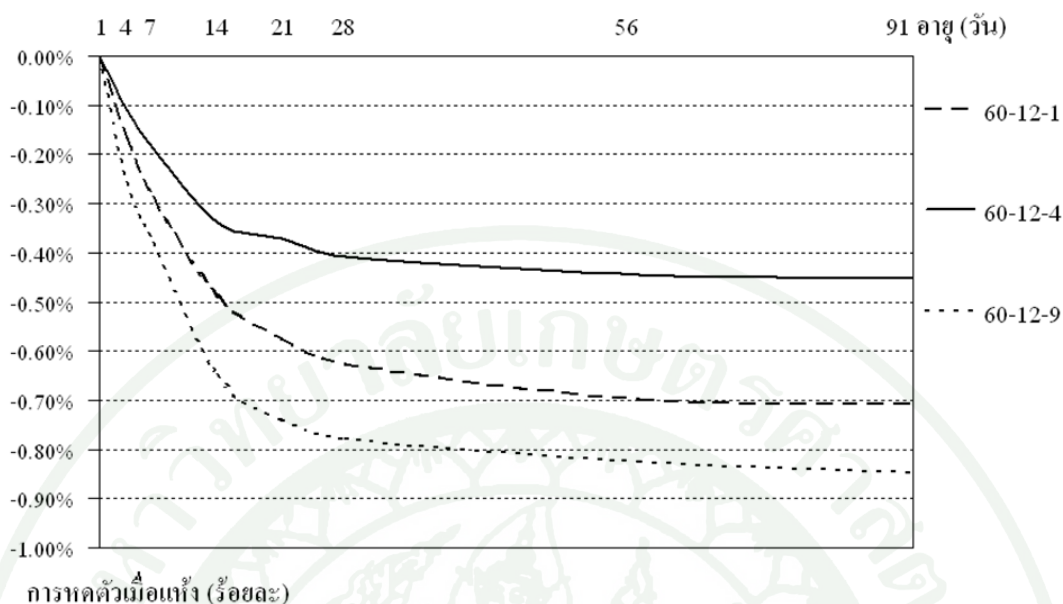
ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่าการหดตัวเมื่อแห้งเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 4 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ $0.110 - 0.258$ เมื่อตัวอย่างอายุ 7 วันอยู่ในช่วงร้อยละ $0.190 - 0.381$ จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 28 วันอยู่ในช่วงร้อยละ $0.407 - 0.779$ และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า การหดตัวเมื่อแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ $0.445 - 0.825$ และ $0.451 - 0.847$ เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค28 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 85



ภาพที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของเนื้อเยื่อกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์



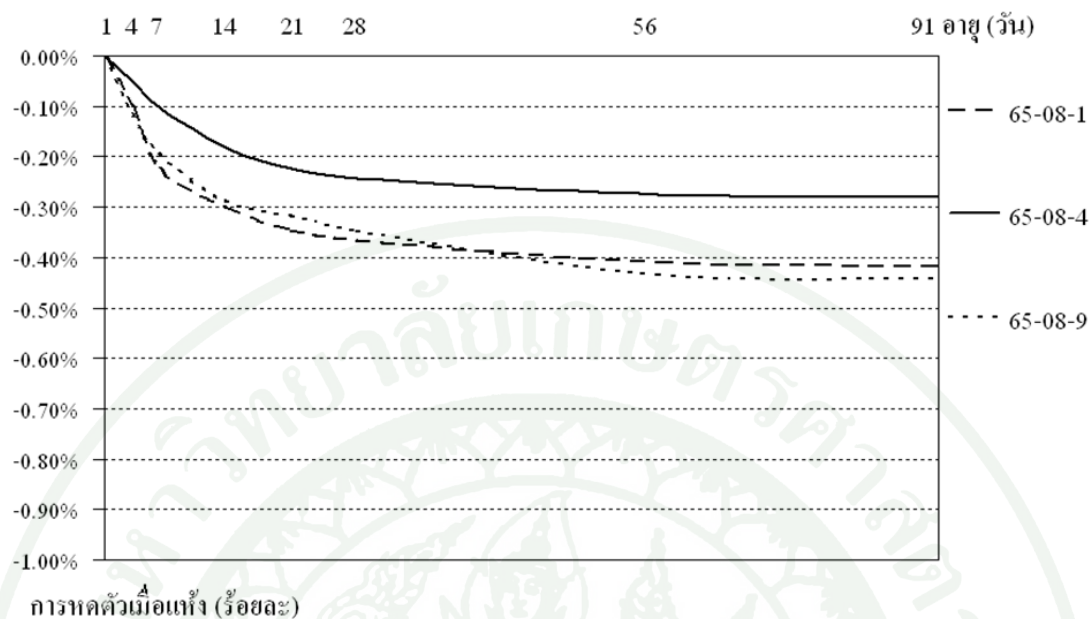
ภาพที่ 84 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของเนื้อเยื่อกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์



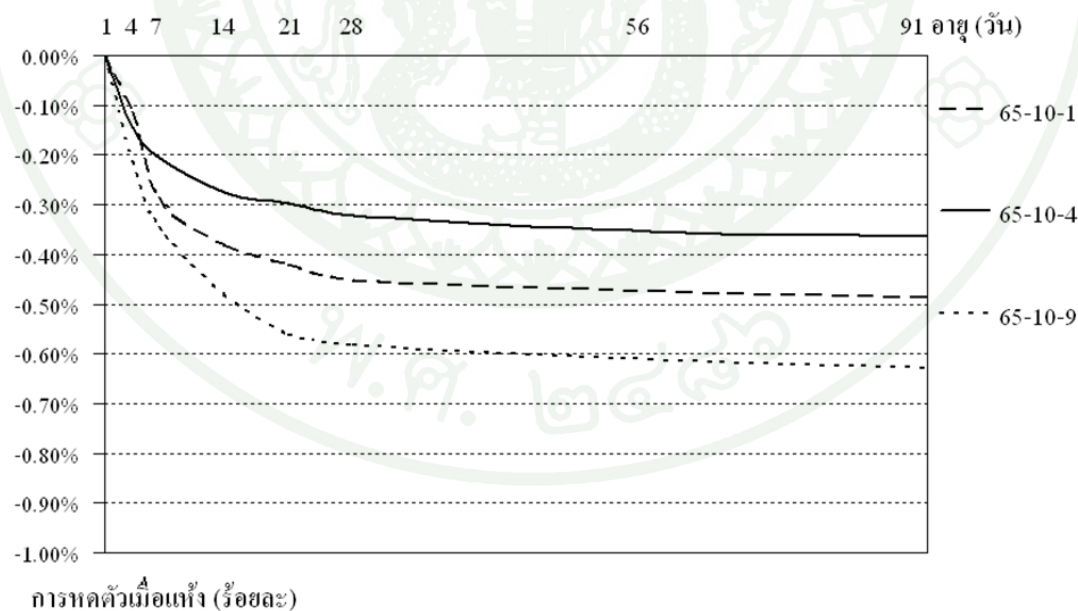
ภาพที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

2.2.5.2 การหดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าการหดตัวเมื่อแห้งเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 4 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0.051 – 0.117 เมื่อตัวอย่างอายุ 7 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0.103 – 0.226 จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0.244 – 0.366 และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า การหดตัวเมื่อแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.274 – 0.434 และ 0.281 – 0.443 เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค29 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 86



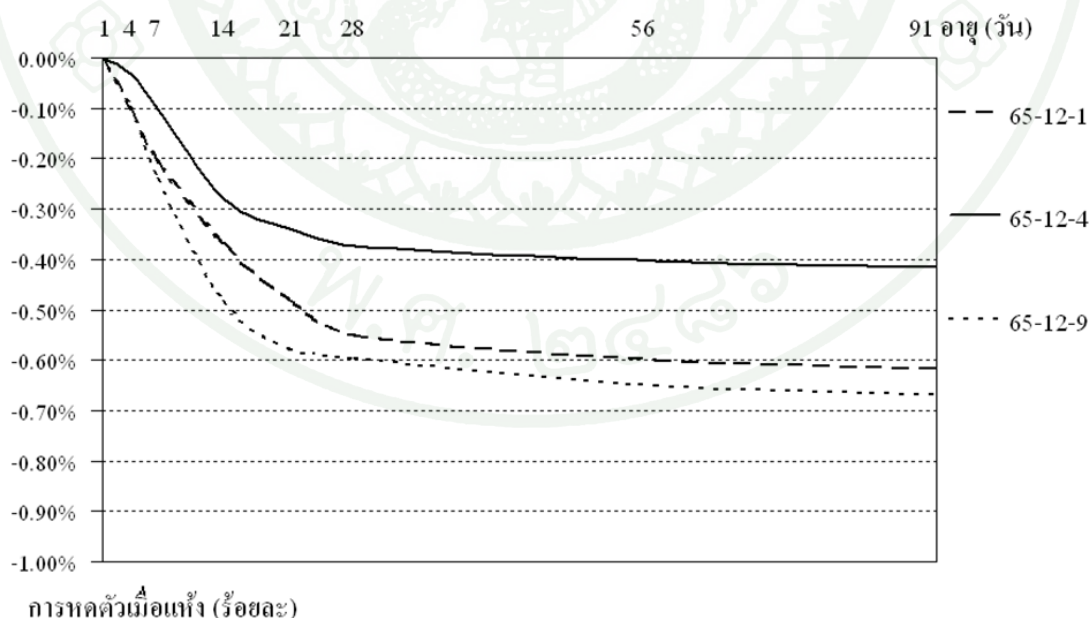
ภาพที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์



ภาพที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่า การหัดตัวเมื่อแห้งเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 4 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0.116 – 0.214 เมื่อตัวอย่างอายุ 7 วันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.206 – 0.305 จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 28 วันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.322 – 0.583 และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า การหัดตัวเมื่อแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.354 – 0.613 และ 0.363 – 0.628 เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค29 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตาม ภาพที่ 87

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่า การหัดตัวเมื่อแห้งเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 4 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0.032 – 0.100 เมื่อตัวอย่างอายุ 7 วันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.102 – 0.241 จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 28 วันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.373 – 0.598 และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า การหัดตัวเมื่อแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.404 – 0.650 และ 0.415 – 0.669 เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค29 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตาม ภาพที่ 88



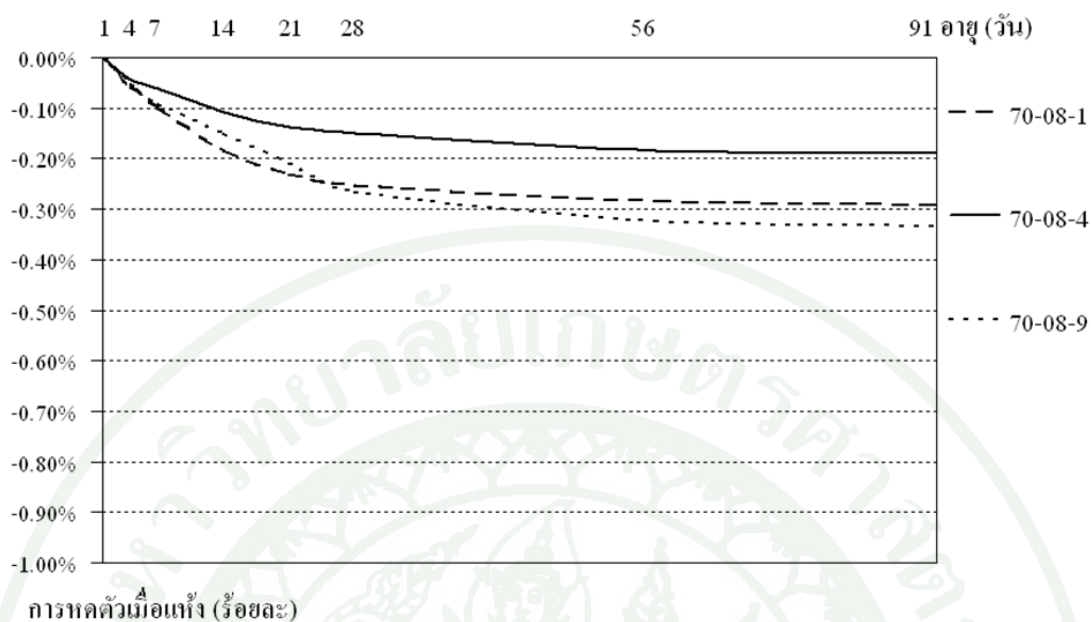
ภาพที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เกลือร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

2.2.5.3 การหัดัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70

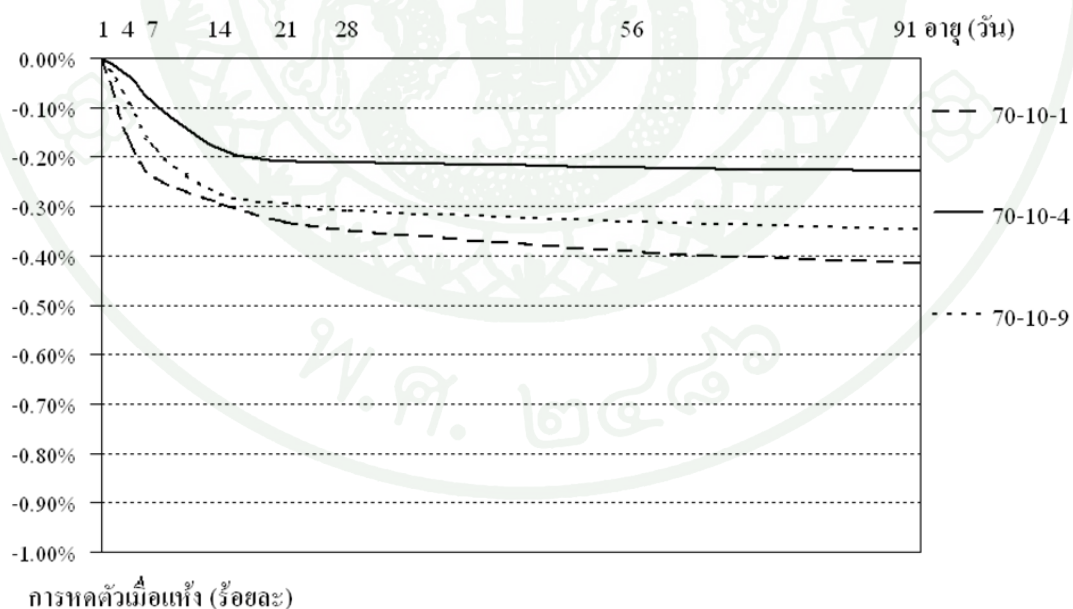
ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ พบว่าการหัดัวเมื่อแห้งเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 4 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0.044 – 0.057 เมื่อตัวอย่างอายุ 7 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0.060 – 0.099 จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 28 วันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.150 – 0.265 และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า การหัดัวเมื่อแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.184 – 0.324 และ 0.190 – 0.335 เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค30 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 89

ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่าการหัดัวเมื่อแห้งเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 4 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0.036 – 0.169 เมื่อตัวอย่างอายุ 7 วันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.096 – 0.243 จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 28 วันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.211 – 0.350 และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า การหัดัวเมื่อแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.221 – 0.394 และ 0.229 – 0.416 เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค30 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 90

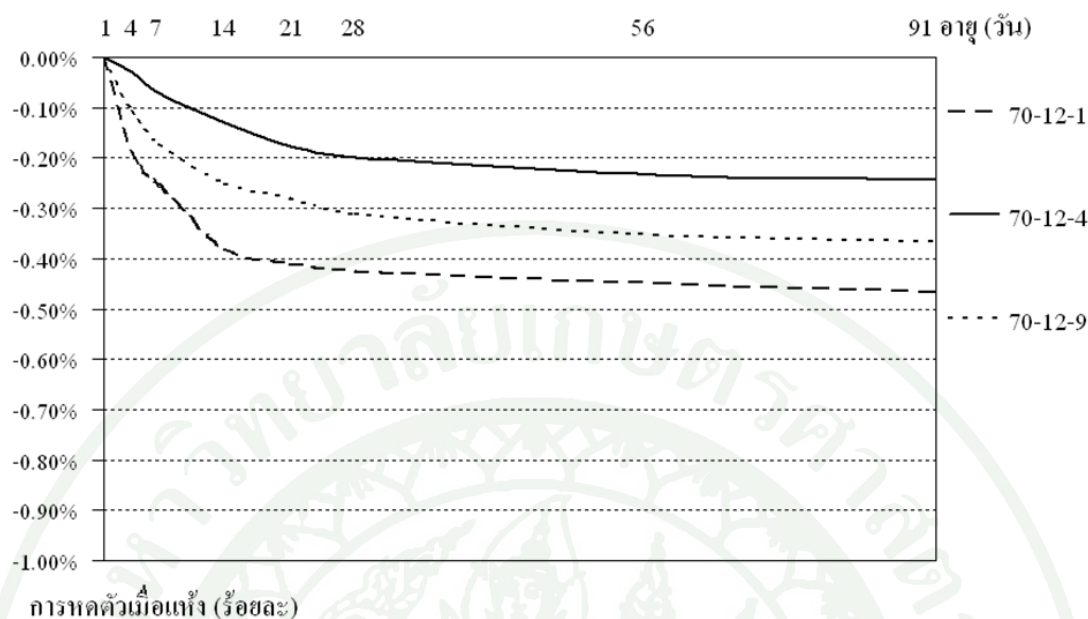
ส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์ พบว่าการหัดัวเมื่อแห้งเมื่อตัวอย่างเริ่มต้นที่ อายุ 4 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0.029 – 0.188 เมื่อตัวอย่างอายุ 7 วันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.072 – 0.256 จนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 28 วันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.200 – 0.425 และเมื่อดำเนินการทดสอบอย่างต่อเนื่องจนครบจำนวนตามที่กำหนดไว้ในวิธีการศึกษาพบว่า การหัดัวเมื่อแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 0.234 – 0.450 และ 0.243 – 0.468 เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค30 โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 91



ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์



ภาพที่ 90 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์



ภาพที่ 91 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเมื่อแห้งกับเวลาของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

2.2.8 ผลของปัจจัยส่วนผสมที่มีต่อการหดตัวเมื่อแห้ง

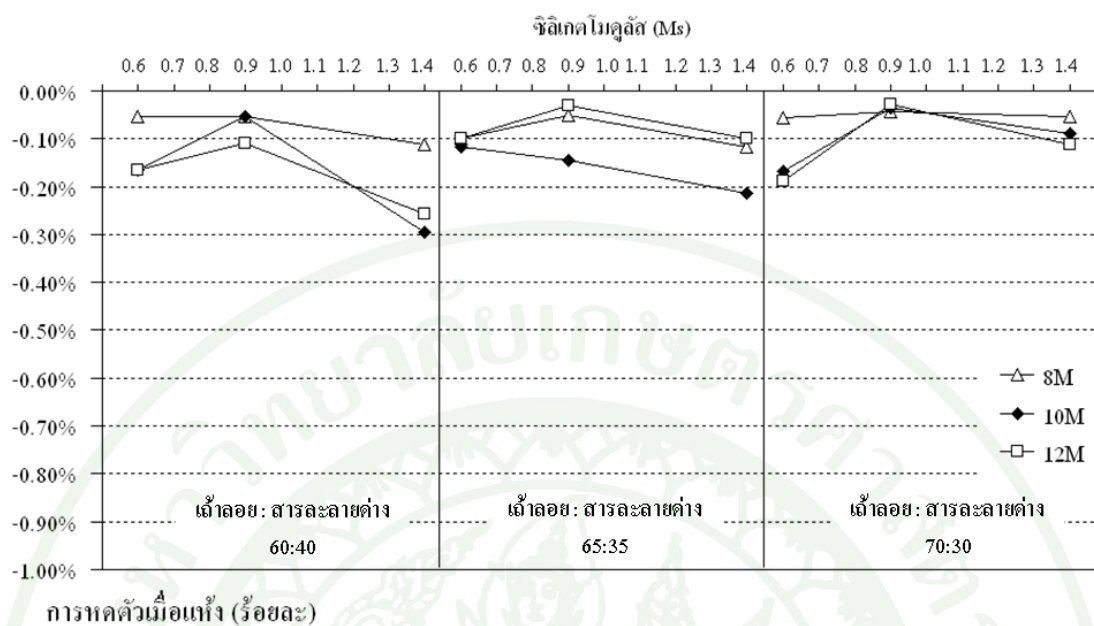
ภาพที่ 92-98 ได้แสดงการเปรียบเทียบถึงปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ ปริมาณเถ้าลอย ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาโมดูลัส ได้ดังนี้

2.2.8.1 ผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยที่มีต่อการหดตัวเมื่อแห้ง พบว่าเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน โดยเริ่มจากในส่วนของตัวเองที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 60 และการหดตัวลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่ใช้ (ดังตัวอย่างตามภาพที่ 96) กล่าวคือเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 70 ทำให้การหดตัวเมื่อแห้ง ลดลงประมาณร้อยละ 10-12 ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณของอนุภาคเถ้าลอยที่ถือเป็นของแข็งความหนาแน่นมากที่สุดภายในส่วนผสม มีทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.*, (2009) อันเนื่องมาจากการระเหยของน้ำภายในซีเมนต์โพลิเมอร์พอสต์ตามหลักการของปฏิกิริยาซีเมนต์โพลิเมอร์เซชัน (Davidovits, 2008: 10-45)

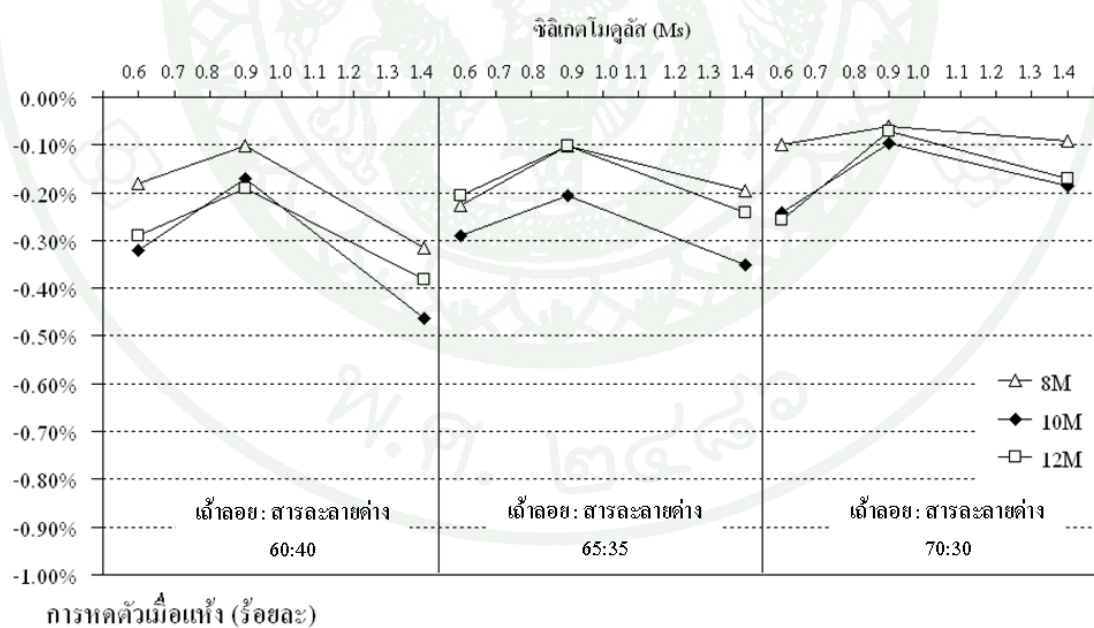
โดยปัจจัยที่กระทบเด่นชัดคือปริมาณการใช้เถ้าลอย ซึ่งมีค่าการหดตัวน้อยกว่า ส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยน้อย จึงข้อสังเกตที่ดีว่า เนื้อพั้นระสามารถต้านทานความเค้นภายในอันเนื่องมาจากการสูญเสียได้ ซึ่งข้อสันนิษฐานนี้มีประเด็นสนับสนุนที่ได้สังเกตพฤติกรรมของการหดตัวคือ อัตราการหดตัวมีพัฒนาการไปในทิศทางเดียวกันกับการพัฒนากำลังรับแรงอัด และเป็นที่น่าสังเกตว่าจุดเปลี่ยนตรงนี้เมื่อค่าหนึ่ง เช่น ชุดที่ใช้เถ้าลอยปริมาณร้อยละ 60 จะเริ่มชะลอตัวที่ 28 วัน ส่วนชุดที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 จะเริ่มชะลอตัวที่ 21 และชุดในปริมาณเถ้าลอย 70 จะเริ่มชะลอตัวที่ 14 หรือ ซึ่งช่วงของกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 20-25 เมกะปาสกาลเช่นกันซึ่งสอดคล้องกับทิศทางการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมา (Riditirud *et. al.*, 2011) ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้แคลเซียมสูงและแคลเซียมต่ำและรวมถึงงานที่ใช้ Slag ด้วย (Palomo *et. al.*, 2005)

2.2.8.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการหดตัวเมื่อแห้ง จากการเปรียบเทียบภาพชุดที่ 92-98 พบว่าเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 28 วันขึ้นไป พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นจาก 8 -12 โมลาร์ การหดตัวเมื่อแห้ง ลดลงประมาณร้อยละ 5-10 เมื่อพิจารณาในกลุ่มเดียวกัน(ดังตัวอย่างตามภาพที่ 97) ถึงแม้กำลังรับแรงอัดของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากจะดีกว่า แต่กลับส่งผลให้ อาจจะเนื่องมาจากผลของการควั่นแน่นของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้อัตราการคายน้ำมีสูงกว่าที่ใช้ความเข้มข้นต่ำ และเมื่อกำลังยังพัฒนาถึงจุดที่รับไม่ได้จึงมีอัตราที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมา (Riditirud *et. al.*, 2011) ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้แคลเซียมสูงและแคลเซียมต่ำและรวมถึงงานที่ใช้ Slag รวมด้วย (Duxzon *et. al.*, 2005)

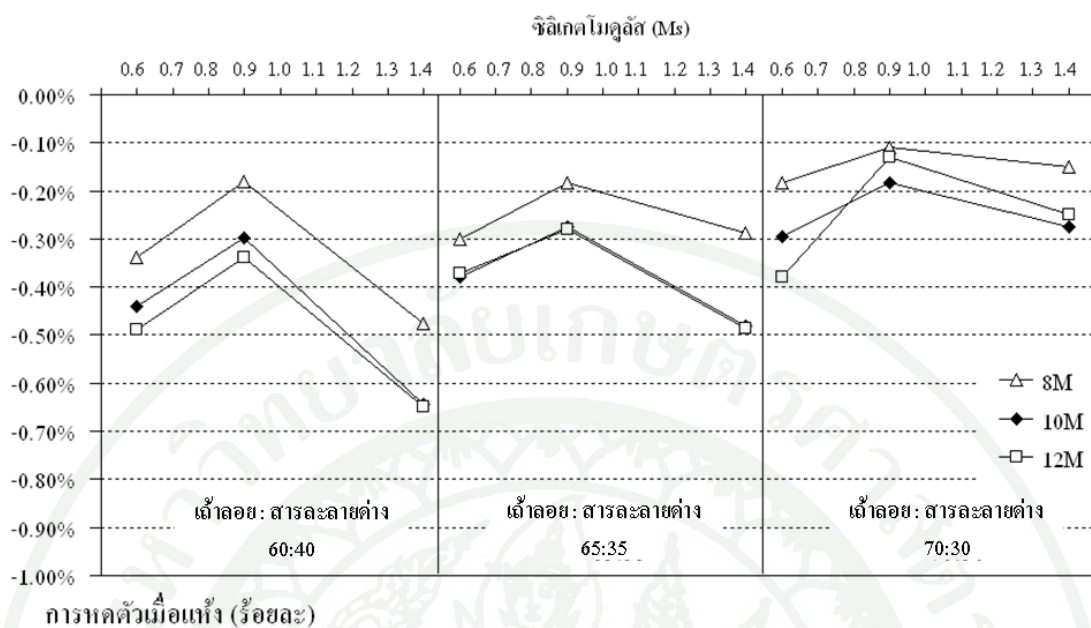
2.2.8.3 ผลของซิลิกาโมดูลัสที่มีต่อการหดตัวเมื่อแห้ง ด้วยการเปรียบเทียบภาพชุดที่ 92-98 พบว่าเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ในลักษณะที่แตกต่างกับ 2 ตัวแปรที่ผ่านมา โดยเป็นในลักษณะของจุดยอดของกราฟ จนครบอายุของการทดลอง (ดังตัวอย่างตามภาพที่ 98) พบว่ามีจุดที่มีการหดตัวเมื่อแห้งน้อยสุด ส่วนผสมที่มีค่าซิลิกาโมดูลัส 0.90 ซึ่งปริมาณน้ำส่วนเกินหรือโครงสร้างของสารละลายที่เปลี่ยนไป เมื่อเลขจุดสมดุลมีเหตุมาจากค่า pH ลดลง ปริมาณ Na_2O จึงให้เกิดการคาย น้ำ เร็วกว่าการพัฒนากำลัง ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมา (Riditirud *et. al.*, 2011) ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้แคลเซียมสูงและแคลเซียมต่ำและรวมถึงงานที่ใช้ Slag ด้วย (Duxzon *et. al.*, 2005)



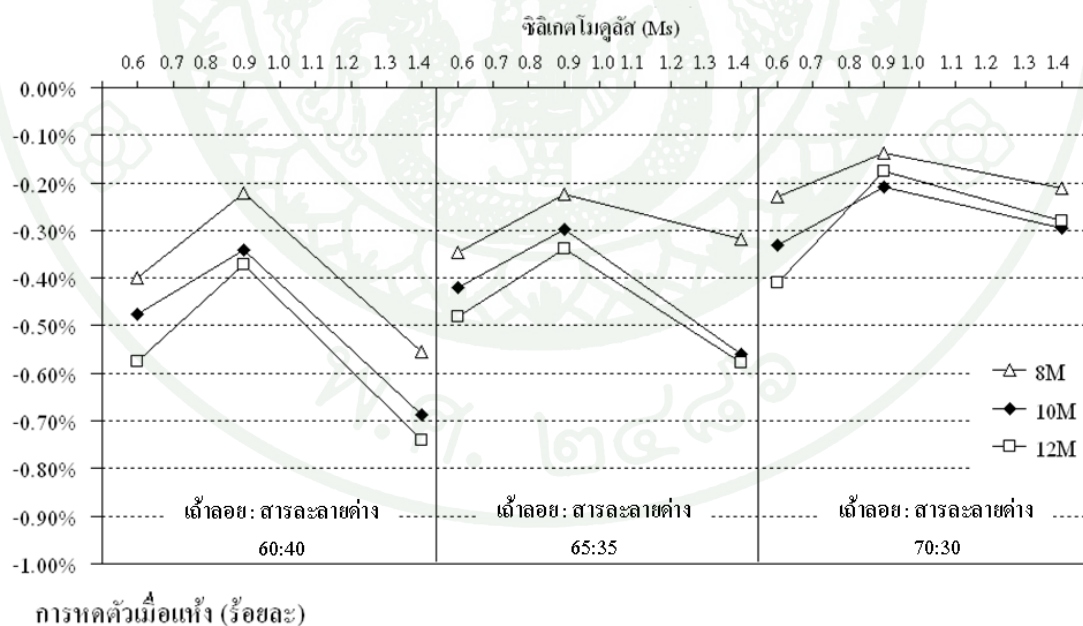
ภาพที่ 92 การเปรียบเทียบหาค่าของจลิกคโมดูลัสของโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 4 วัน



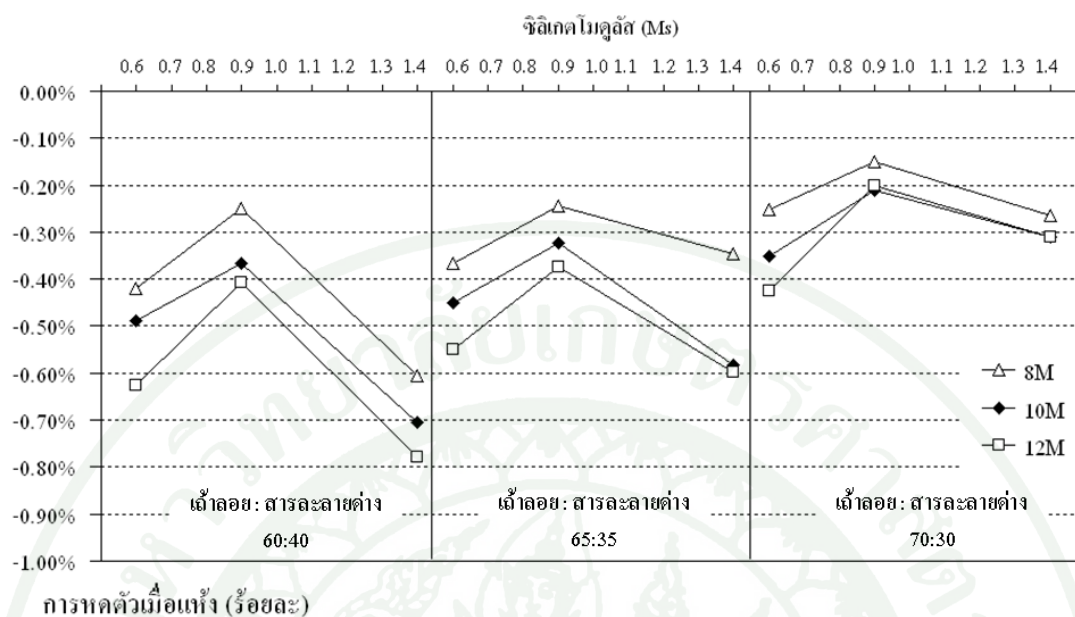
ภาพที่ 93 การเปรียบเทียบหาค่าของจลิกคโมดูลัสของโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 7 วัน



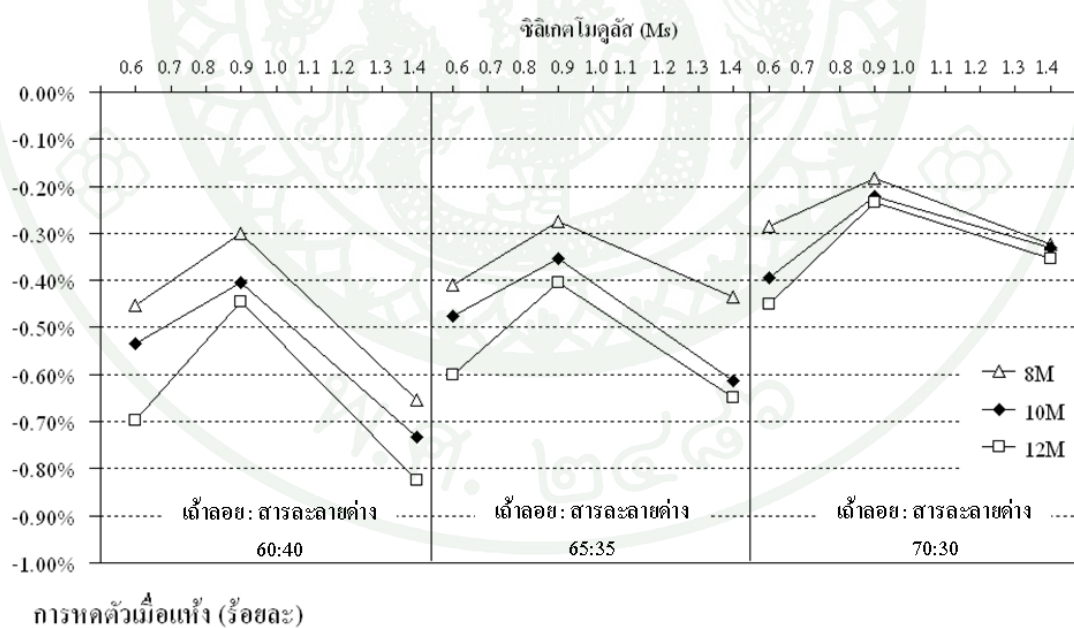
ภาพที่ 94 การเปรียบเทียบหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อายุ 14 วัน



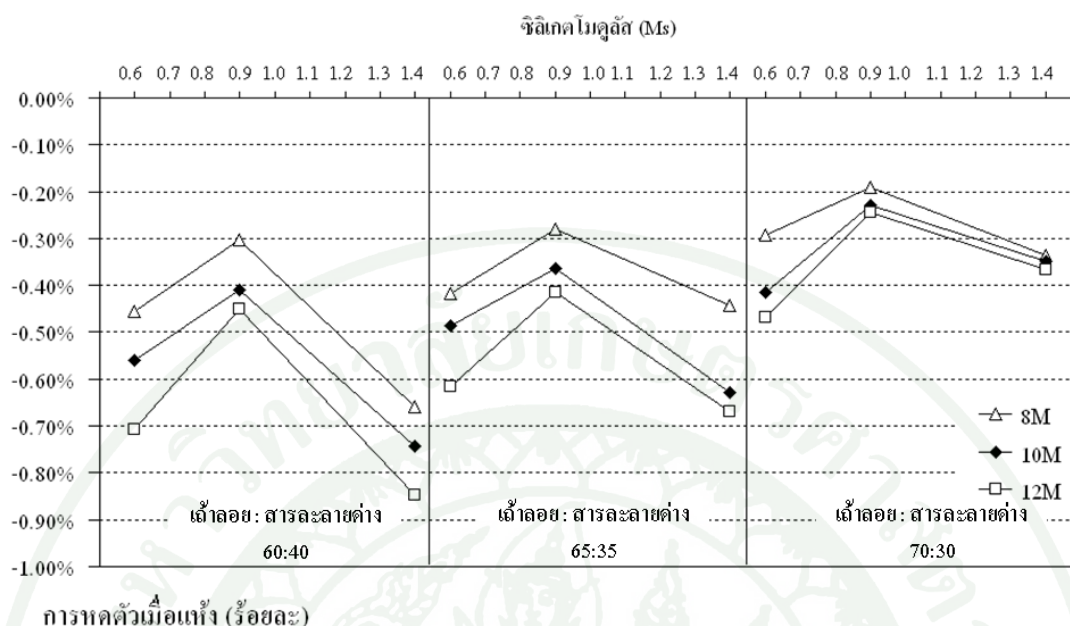
ภาพที่ 95 การเปรียบเทียบหดตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อายุ 21 วัน



ภาพที่ 96 การเปรียบเทียบหาคัดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 97 การเปรียบเทียบหาคัดตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 56 วัน



ภาพที่ 98 การเปรียบเทียบหดตัวของอีโพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 90 วัน

จากข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบมาทั้งหมดสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม เช่นเดียวกับการแบ่งกลุ่มโดยใช้เกณฑ์ด้านกำลังรับแรงอัด ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือส่วนผสมที่มีการหดตัวเมื่อแห้งต่ำ (น้อยกว่า -0.30%) ตัวอย่างเช่นส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และค่าซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.90 กลุ่มที่ 2 คือส่วนผสมที่มีการหดตัวเมื่อแห้งปานกลาง (อยู่ในช่วง -0.30% ถึง -0.60%) ตัวอย่างเช่นส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และ 60 ที่มีค่าซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.90 และ กลุ่มที่ 3 คือส่วนผสมที่มีการหดตัวเมื่อแห้งสูง (มากกว่า -0.60%) ตัวอย่างเช่นส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 ที่มีค่าซิลิเกตโมดูลัสเท่ากับ 0.60 หรือ 1.40

กล่าวโดยสรุปคือเมื่ออีโพอลิเมอร์เพสต์ต้องมีการพัฒนากำลังจนถึงค่าระดับหนึ่งที่สามารถต้านทานได้จะชะลอการหดตัว (จากการทดลองนี้แนะนำว่าควรมากกว่า 20 เมกะปาสกาลขึ้นไป) ดังนั้นการเลือกใช้จึงควรกำหนดลักษณะของการใช้งานให้สอดคล้องกับรูปแบบที่ประยุกต์ใช้ รวมถึงใช้สารผสมเพิ่มหรือปรับปรุงด้วยเงื่อนไขการบ่มต่างๆ ที่ต่อยอดพื้นฐานจากงานวิจัยได้

3. โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

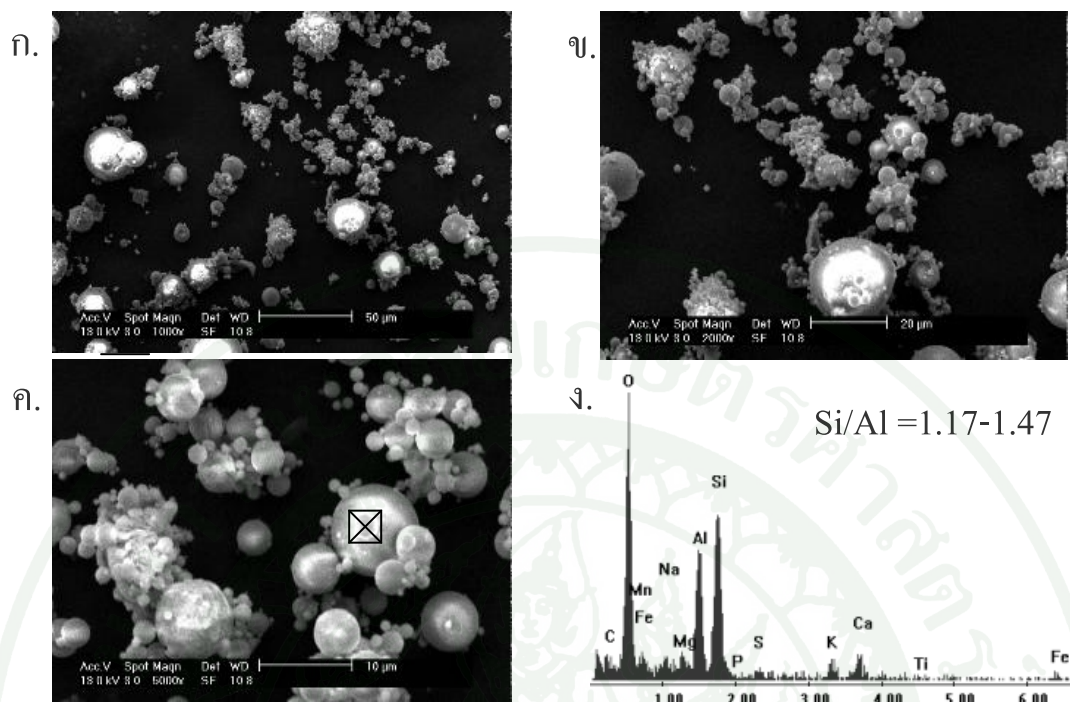
ในส่วนนี้เป็นผลการศึกษาด้านโครงสร้างจุลภาคภายในจีโอโพลิเมอร์ซึ่งประกอบภาพถ่ายที่ได้จาก SEM และ TEM พร้อมกับผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยอุปกรณ์ EDS รวมถึงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD และ FT-IR ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

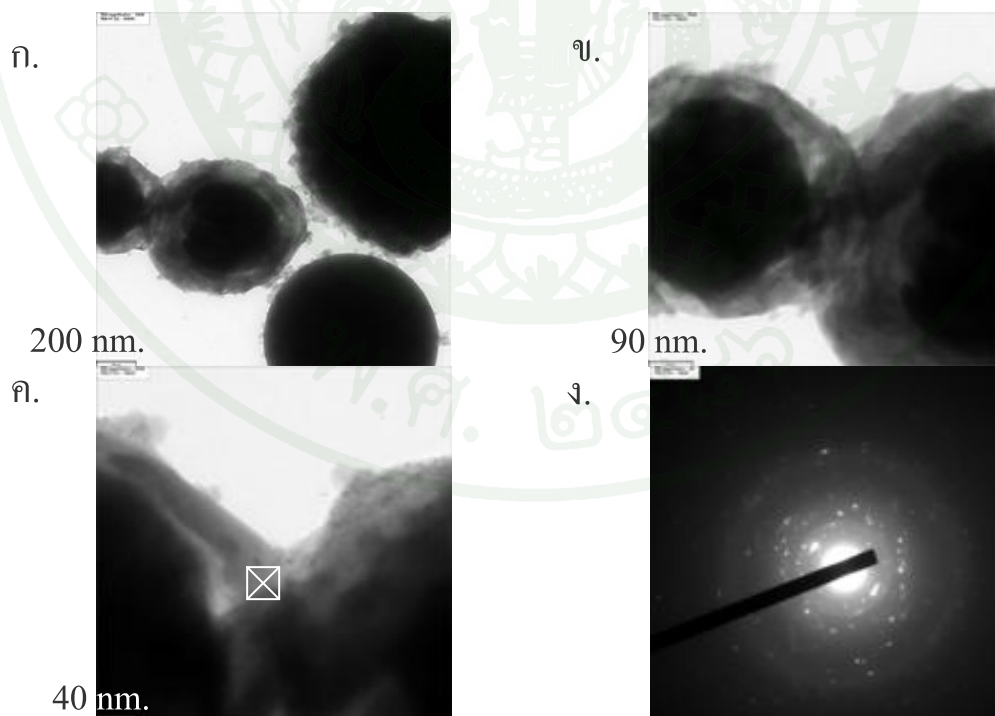
ภาพขยายของตัวอย่างที่ได้จาก SEM และ TEM ได้แสดงไว้ตามภาพที่ 99 และ 100 ตามลำดับ จากภาพที่ 99 ก-ค ได้เรียงลำดับจากกำลังขยายน้อย (1,000 เท่า) จนถึงกำลังขยายสูง (5,000 เท่า) ซึ่งสังเกตได้ถึงรูปร่างและขนาดโดยรวมที่สอดคล้องกันกับการกระจายของขนาดตัวอย่างตามที่แสดงไว้ตามตารางที่ 16 และเมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุพื้นฐานพบว่า ประกอบด้วย Si Al เป็นหลัก ตามด้วย Ca และ Fe รวมถึง O ด้วย (ภาพที่ 99 ง) ซึ่งธาตุหลักทั้ง 4 ธาตุนี้สอดคล้องกับมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง (สมอ, 2545; ASTM, 2012)

ภาพที่ 100 ก-ค เป็นภาพกำลังขยายสูงในระดับนาโนเมตรที่ได้จาก TEM โดยเรียงขนาดจาก 200, 90 และ 40 นาโนเมตร ตามลำดับ จากภาพดังกล่าวได้เผยให้เห็นตัวอย่างขนาดเล็กในระดับขนาดนาโนเมตรและภาพที่ 100 ง เป็นภาพ Diffraction pattern ของตัวอย่างบริเวณที่ทำเครื่องหมายซึ่งภาพนี้จะเป็นแบบจุดสว่างบางส่วนและฟุ้งกระจายบางส่วนผสมกันแสดงถึงว่ามีทั้งส่วนผลึกและอสัณฐานภายในตัวอย่าง

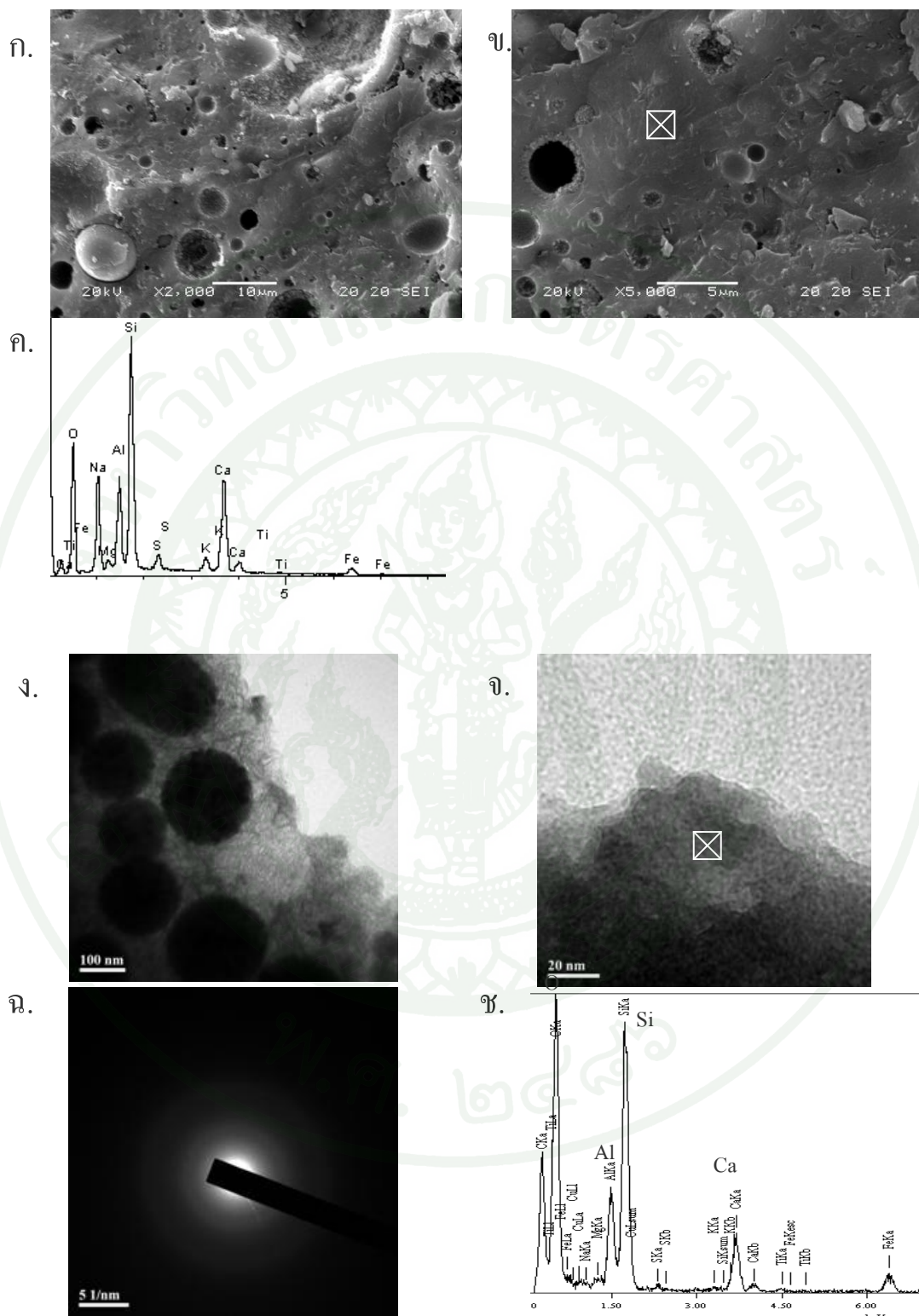
ภาพชุดที่ 101 เป็นการเปรียบเทียบภาพขยายของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ส่วนผสมที่ 65-08-4) ซึ่งภาพที่ 101 ก และ ข มีกำลังขยาย 2,000 และ 5,000 เท่าตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วสภาพของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุแล้วพบว่า องค์ประกอบธาตุหลักได้แก่ Si Al และ O รวมถึง Na และ Ca ด้วย นอกจากนั้นแล้ว ภาพที่ 101 ง และ จ ที่ได้จาก TEM ได้ขยายให้เห็นเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ที่เชื่อมประสานระหว่างตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกทำปฏิกิริยาจากสารละลายต่าง และภาพที่ 101 ฉ ได้แสดง Diffraction pattern บริเวณที่ทำเครื่องหมาย พบว่าเป็น อสัณฐานเนื่องจากไม่พบจุดเข้มของแสง ซึ่งแสดงความเป็นผลึกของตัวอย่าง และธาตุที่สำคัญภายในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ธาตุตามภาพที่ 101 ข นั้นได้ยืนยันองค์ประกอบที่ตรงกันกับผลที่ได้จาก SEM/EDS เช่นกัน



ภาพที่ 99 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย



ภาพที่ 100 ภาพถ่าย TEM ของเถ้าลอย



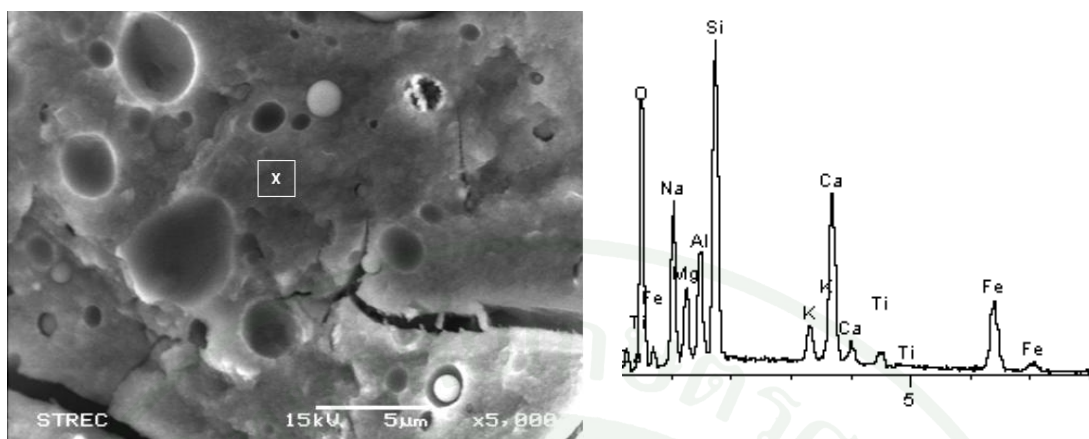
ภาพที่ 101 การเปรียบเทียบภาพถ่าย SEM กับ TEM ของจีโอโพลิเมอร์เฟสส์

ภาพขยายที่ได้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งแบบส่องกราดและส่องผ่านสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่ได้รับผลกระทบจากเถ้าลอยได้แสดงไว้ตามชุดภาพที่ 102 ถึง 107 ซึ่งเรียงตามลำดับของตัวแปรที่ใช้ที่การทดลอง โดยภาพชุดดังกล่าวได้เผยให้เห็นความแตกต่างของเนื้อส่วนผสมที่เป็นจีโอโพลิเมอร์เฟสแล้วและส่วนที่ยังคงค้างอยู่ในตัวอย่างซึ่งในปฏิกิริยานอกจากนั้นภายในภาพชุดนี้ได้แสดงภาพสเปกตรัมที่เกิดจากรังสีเอกซ์ในบริเวณที่ทำเครื่องหมายสี่เหลี่ยมไว้ที่ด้านขวาของภาพถ่ายขยายทั้ง SEM และ TEM ส่วนผลการวิเคราะห์ธาตุได้แสดงไว้ตามตารางที่ 23

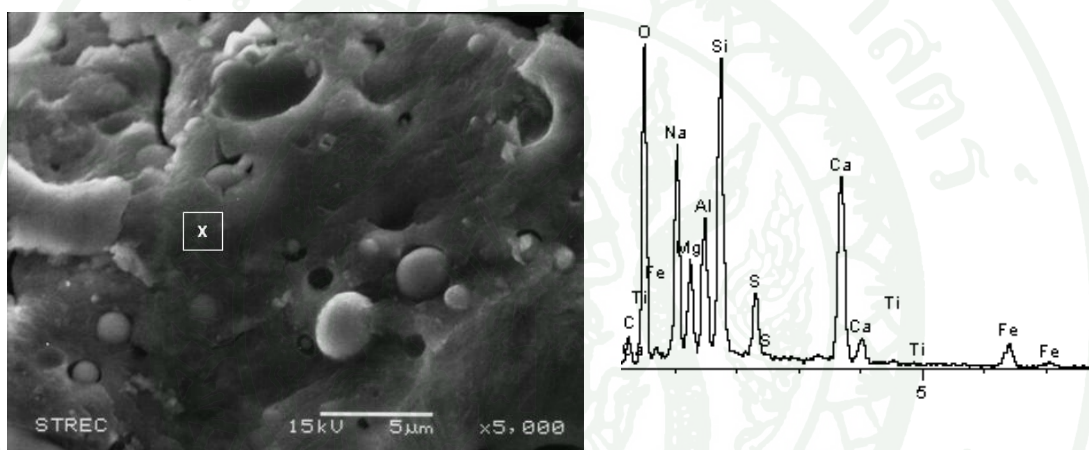
ภาพขยายที่ 102 ก ถึง 102 ค เป็นภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า จากส่วนผสมที่ 60-10-3, 65-10-3 และ 70-10-3 ตามลำดับ (อายุ 28 วัน) เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลอันเนื่องจากการแปรเปลี่ยนปริมาณของเถ้าลอย พบว่าลักษณะเนื้อจีโอโพลิเมอร์เฟสของส่วนที่มีการใช้ปริมาณเถ้าลอยสูงกว่านั้นมีร่องรอยของเถ้าลอยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์เฟสของส่วนที่มีการใช้ปริมาณเถ้าลอยต่ำ จากลักษณะที่ตรวจสอบเป็นแนวทางที่สอดคล้องและเป็นข้อมูลเสริมกันได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt *et al.*, 2009; Chindaprasirt and Rattanasak, 2010; Hanjitsuwan *et al.*, 2011; Somna *et al.*, 2011)

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย SEM/EDS และ TEM/EDS

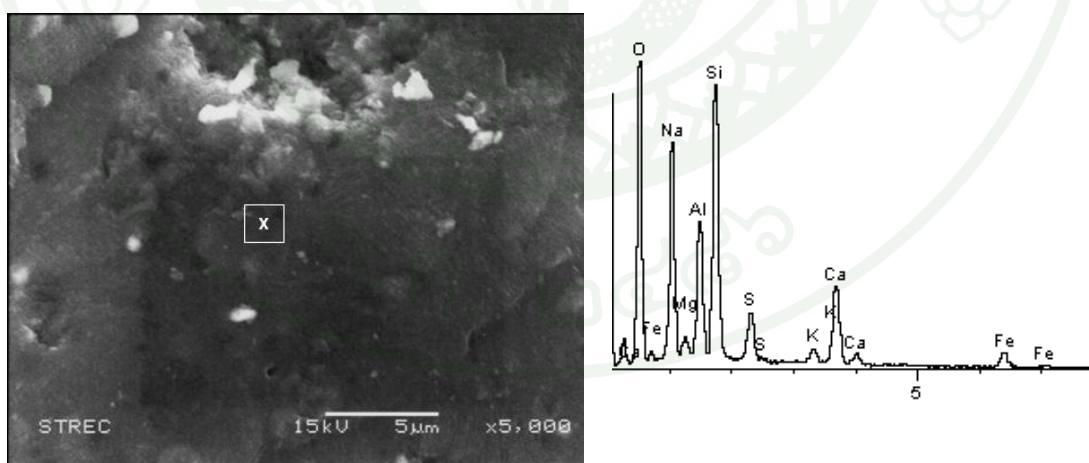
ส่วนผสม	SEM/EDS	TEM/EDS
	Si/Al	Si/Al
60-10-3	2.79-3.21	2.71-3.14
65-10-3	2.46-2.96	2.41-2.88
70-10-3	2.17-2.44	2.01-2.44
65-08-4	2.55-2.72	2.62-2.83
65-10-4	2.48-2.81	2.56-2.86
65-12-4	2.51-2.67	2.46-2.69
70-08-1	2.15-2.34	2.26-2.48
70-08-4	2.22-2.45	1.96-2.40
70-08-9	2.24-2.39	2.16-2.42



ก. ส่วนผสมที่ 60-10-3

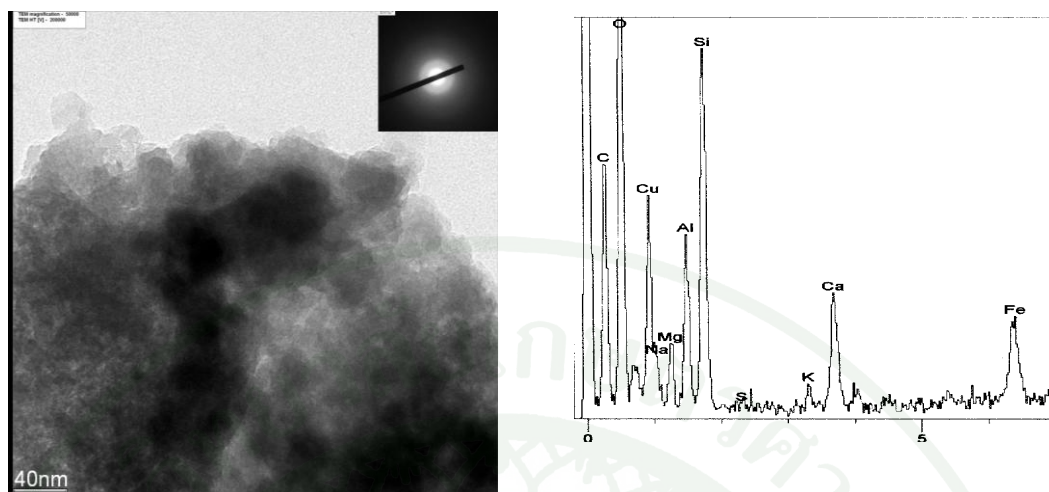


ข. ส่วนผสมที่ 65-10-3

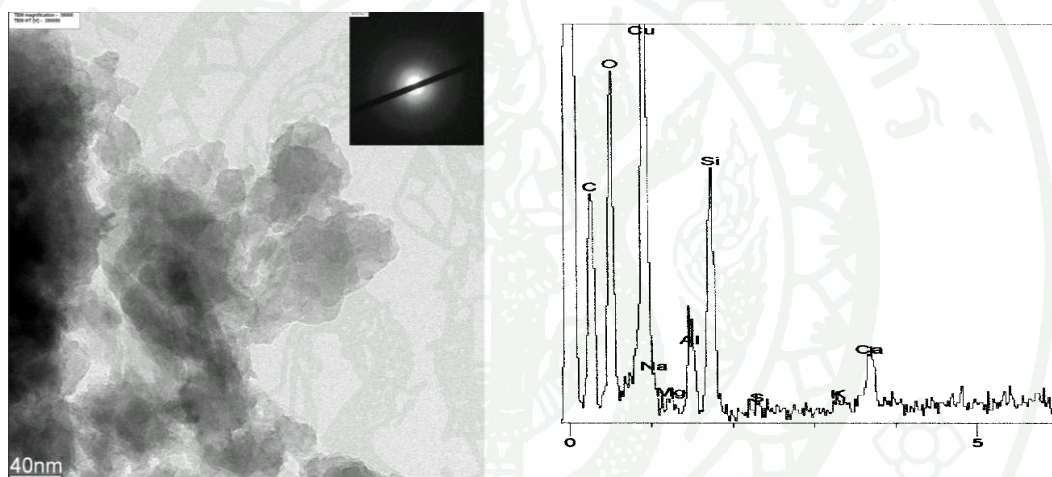


ค. ส่วนผสมที่ 70-10-3

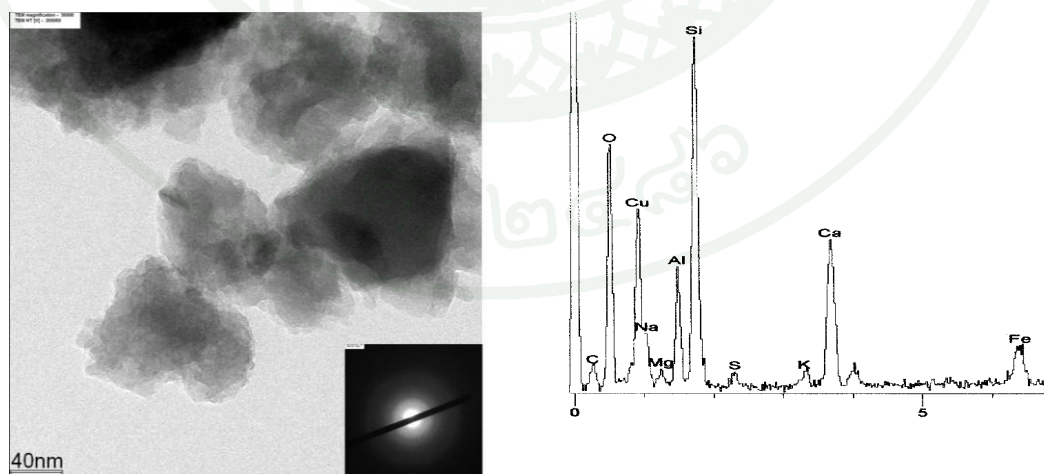
ภาพที่ 102 ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่างกัน



ก. ส่วนผสมที่ 60-10-3



ข. ส่วนผสมที่ 65-10-3



ค. ส่วนผสมที่ 70-10-3

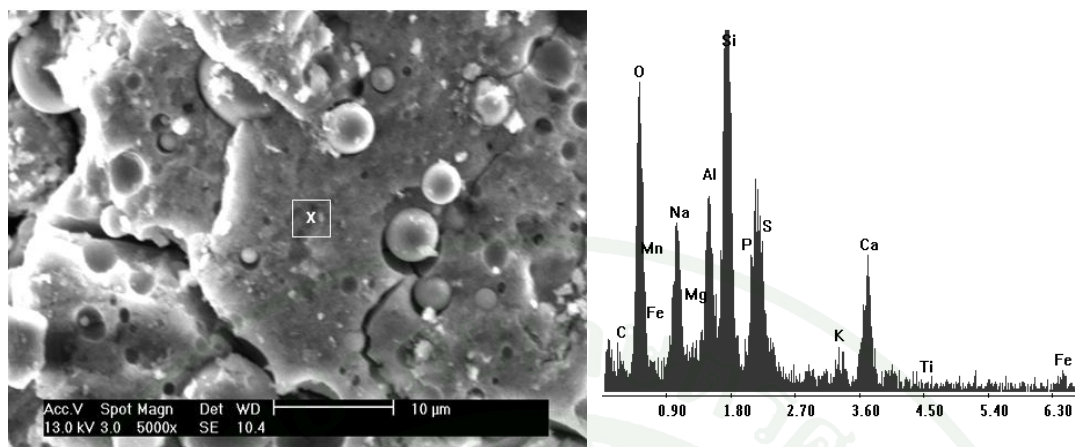
ภาพที่ 103 ภาพถ่าย TEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่างกัน

ภาพขยายที่ 103 ก ถึง 103 ค เป็นภาพถ่าย TEM ที่ระดับ 40 นาโนเมตรจากส่วนผสมที่ 60-10-3, 65-10-3 และ 70-10-3 ตามลำดับ (อายุ 28 วัน) เช่นกัน จากภาพได้เผยให้เห็นลักษณะของเนื้อจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีความเป็นอสัณฐานได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาพร้อมกับภาพการเลี้ยวของรังสีเอกซ์ประกอบ นับว่าเป็นหลักฐานสำคัญประการหนึ่งในการสนับสนุนหลักการของการเกิดจีโอโพลิเมอร์

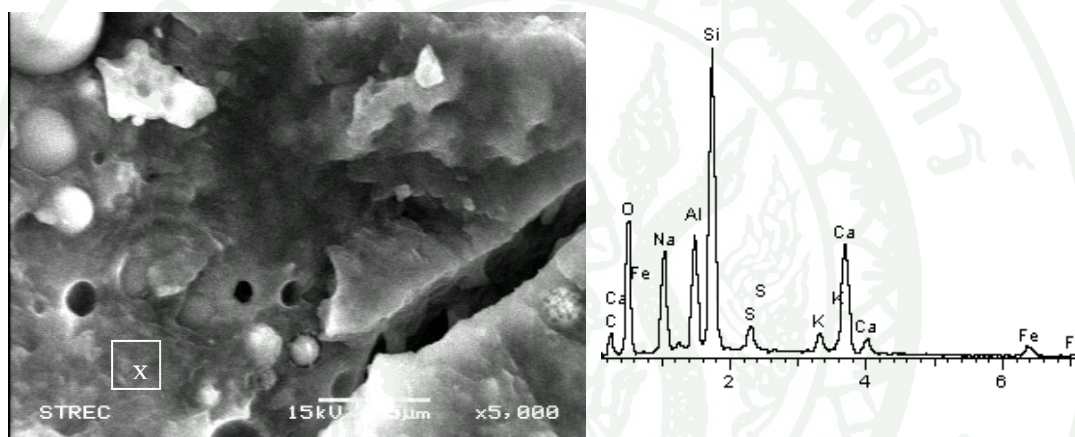
ในส่วนของการวิเคราะห์ธาตุแล้วพบว่า องค์ประกอบธาตุหลักได้แก่ Si Al และ O รวมถึง Na และ Ca ด้วย (ด้วยข้อจำกัดของฉากรับตัวอย่างภายในกล้อง TEM ที่ใช้นั้นทำมาจากทองแดงจึงไม่สามารถระบุจุดยอดของโซเดียมที่ชัดเจนได้) โดยในส่วนการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนโดยอะตอมระหว่าง Si ต่อ Al (ตารางที่ 23) พบว่าการเปลี่ยนปริมาณของเถ้าลอยของส่วนผสมมีผลต่อโครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์เพสต์อย่างชัดเจน โดยส่วนผสมที่ปริมาณของเถ้าลอยสูงมีอัตราส่วนของอะตอม Si ต่อ Al ต่ำ และในทางตรงกันข้าม ส่วนผสมที่ปริมาณของเถ้าลอยต่ำมีอัตราส่วนของอะตอม Si ต่อ Al สูง สอดคล้องกับการวิเคราะห์ในระดับนาโนเมตรเช่นกัน ทั้งนี้ยังสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ไปสู่กำลังรับแรงอัดที่ได้หัวข้อ 2.5 กล่าวคือส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยมีความแข็งแรงได้มากกว่าเนื่องจากมีโอกาสและแนวโน้มของการเชื่อมประสานระหว่าง Si และ Al มีมากขึ้น ทั้งนี้ด้วยบทบาทของไอออนบวกของโซเดียมและแคลเซียมที่มีอยู่ในสารละลายและเถ้าลอยเป็นส่วนเสริมโครงสร้างภายในตามทฤษฎีของ Davidovits ได้เป็นอย่างดี

นอกจากนั้นแล้วถ้าเปรียบเทียบกับภาพของของจีโอโพลิเมอร์ที่มาจากวัตถุประเภทวัตถุดิบผสมที่มีแคลเซียมประกอบจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะความสอดคล้องในส่วนนี้อย่างชัดเจน (Garcia *et al.*, 2003)

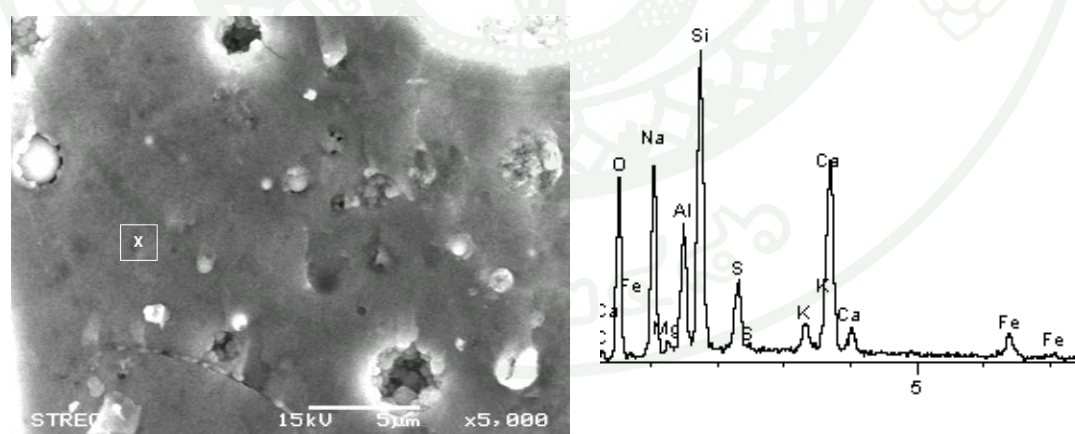
สำหรับปัจจัยต่อมาคือผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้แสดงไว้ในภาพชุดขยายที่ 104 ถึง 105 โดยภาพชุดที่ 104 ก ถึง 104 ค เป็นภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า จากส่วนผสมที่ 65-08-4, 65-10-4 และ 65-12-4 ตามลำดับ (อายุ 28 วัน) เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลอันเนื่องจากการแปรเปลี่ยนปริมาณของเถ้าลอย พบว่าลักษณะเนื้อจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของส่วนที่มีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่านั้น มีร่องรอยของเถ้าลอยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของส่วนที่มีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่า แนวทางที่สอดคล้องเมื่อเทียบงานวิจัยที่ผ่านมาของ (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009; Somna *et al.*, 2011)



ก. ส่วนผสมที่ 65-08-3

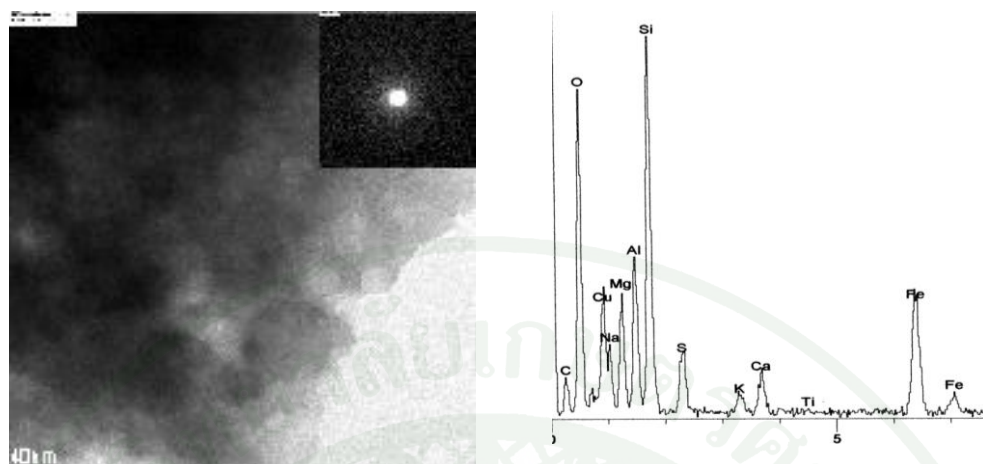


ข. ส่วนผสมที่ 65-10-3

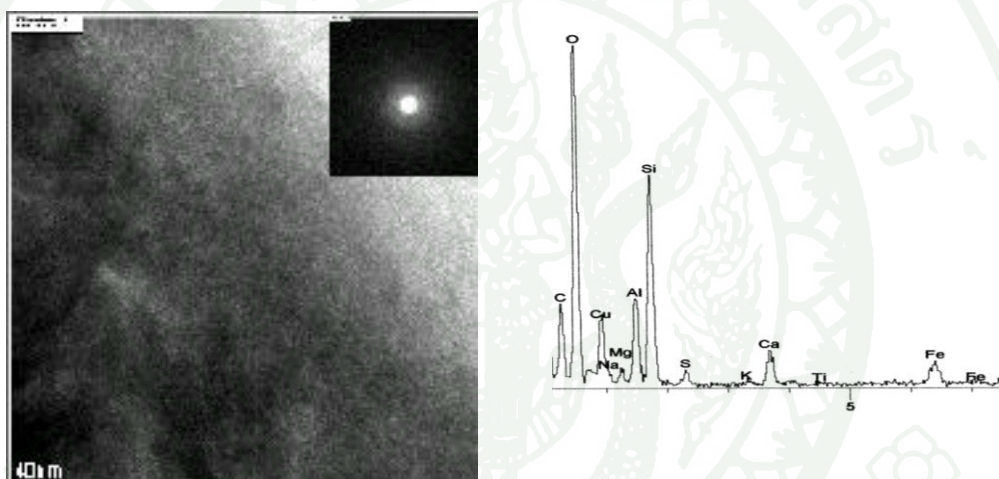


ค. ส่วนผสมที่ 65-12-3

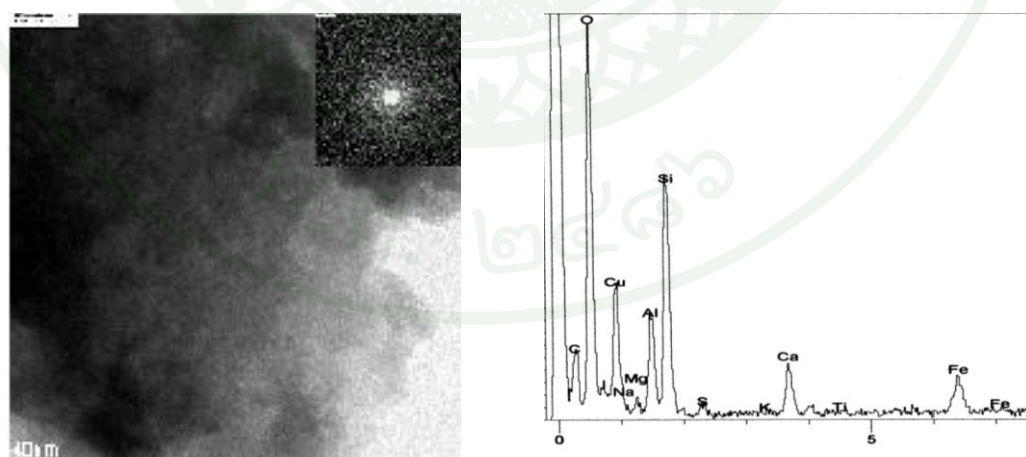
ภาพที่ 104 ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน



ก. ส่วนผสมที่ 65-08-4



ข. ส่วนผสมที่ 65-10-4



ค. ส่วนผสมที่ 65-12-4

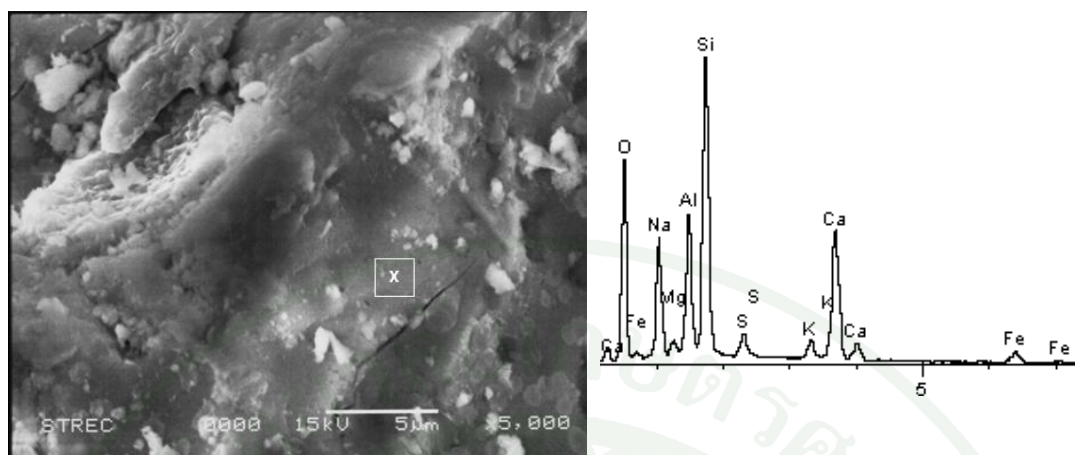
ภาพที่ 105 ภาพถ่าย TEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน

ภาพขยายที่ 105 ก ถึง 105 ค เป็นภาพถ่าย TEM ที่ระดับ 40 นาโนเมตรจากส่วนผสมที่ 65-08-4, 65-10-4 และ 65-12-4 ตามลำดับ (อายุ 28 วัน) เช่นกัน จากภาพได้เผยให้เห็นลักษณะของเนื้ออีอีโพลิเมอร์เพสต์ที่มีความเป็นอสัณฐานได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาร่วมกับภาพการเลี้ยวของรังสีเอกซ์ประกอบ ในทำนองเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเถ้าลอย

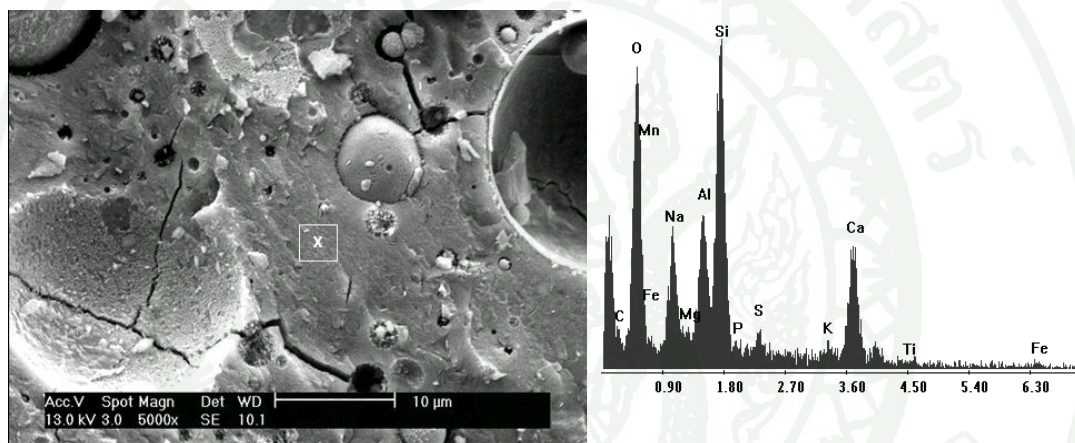
โดยในส่วนการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนโดยอะตอมระหว่าง Si ต่อ Al (ตารางที่ 23) พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อสัดส่วนโดยอะตอมระหว่าง Si ต่อ Al ในลักษณะสัมพันธ์ไม่มากเท่ากับเมื่อเทียบกับผลของการใช้เถ้าลอยต่างกัน แต่ก็ยังแนวโน้มของส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงมีอัตราส่วนของอะตอม Si ต่อ Al ต่ำกว่าส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าเล็กน้อย

สำหรับปัจจัยสุดท้ายคือผลของซิลิกาได้แสดงไว้ในภาพชุดขยายที่ 106 ถึง 107 โดยภาพชุดที่ 106 ก ถึง 106 ค เป็นภาพ SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า จากส่วนผสมที่ 70-08-1, 70-08-4 และ 70-08-9 ตามลำดับ (อายุ 28 วัน) เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลอันเนื่องจากการแปรเปลี่ยนปริมาณของซิลิกาได้ พบว่าลักษณะเนื้ออีอีโพลิเมอร์เพสต์ของส่วนที่มีการใช้ซิลิกาสูงกว่านั้นมียอรรอยของเถ้าลอยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยามากกว่าอีอีโพลิเมอร์เพสต์ของส่วนที่มีการใช้ซิลิกาน้อยกว่า ทั้งนี้สะท้อนการชะละลายเถ้าลอยที่น้อยกว่าถ้าหากใช้ปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิกาสูงเกินไป

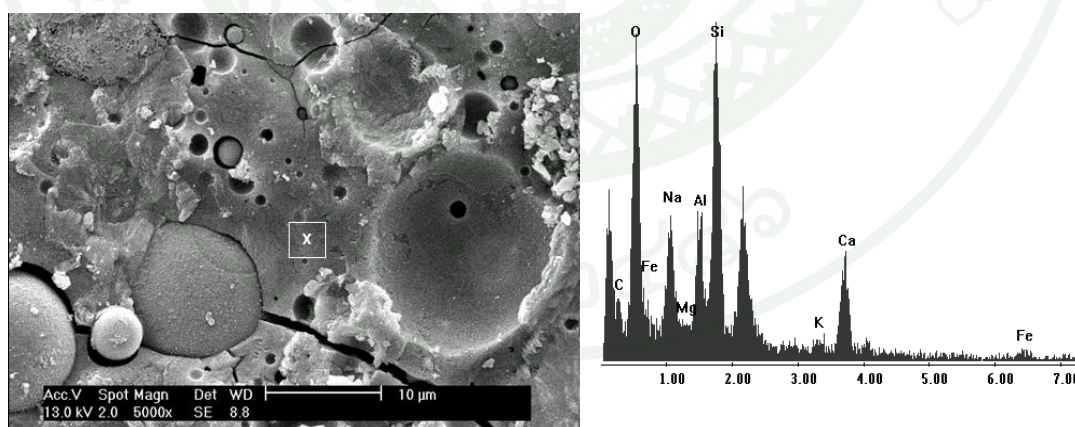
ภาพขยายที่ 107 ก ถึง 107 ค เป็นภาพถ่าย TEM ที่ระดับ 40 นาโนเมตรจากส่วนผสมที่ 70-08-1, 70-08-4 และ 70-08-9 ตามลำดับ (อายุ 28 วัน) เช่นกัน จากภาพได้เผยให้เห็นลักษณะของเนื้ออีอีโพลิเมอร์เพสต์ที่มีความเป็นอสัณฐานได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาร่วมกับภาพการเลี้ยวของรังสีเอกซ์ประกอบ ในทำนองเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเถ้าลอยและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยในส่วนการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนโดยอะตอมระหว่าง Si ต่อ Al (ตารางที่ 23) พบว่าซิลิกาส่งผลต่อสัดส่วนโดยอะตอมระหว่าง Si ต่อ Al ในลักษณะสัมพันธ์ไม่ชัดเจนมากเท่ากับเมื่อเทียบกับผลของการใช้เถ้าลอยต่างกัน แต่มีจุดน่าสังเกตว่าแนวโน้มของอัตราส่วนของอะตอม Si ต่อ Al มาค่าต่ำเข้าสู่จุดค่ากลางในการทำนองเดียวกันกับพฤติกรรมของกำลังรับแรงอัด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าลักษณะโครงสร้างภายในของอีอีโพลิเมอร์ที่ได้มีความเป็นอสัณฐานสูงโดยขึ้นกับปัจจัยหลักของสารตั้งต้นตามที่ได้กล่าวมาแล้ว



ก. ส่วนผสมที่ 70-08-1

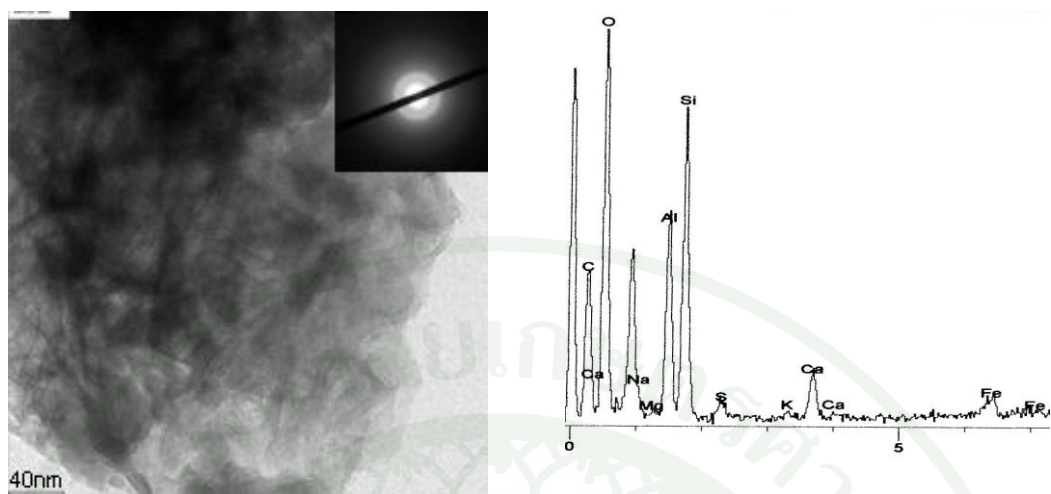


ข. ส่วนผสมที่ 70-08-4

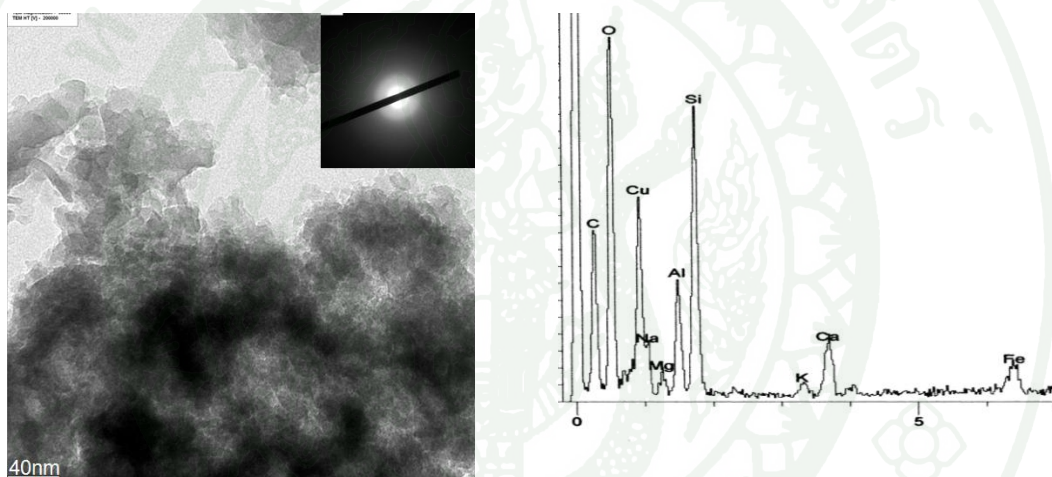


ค. ส่วนผสมที่ 70-08-9

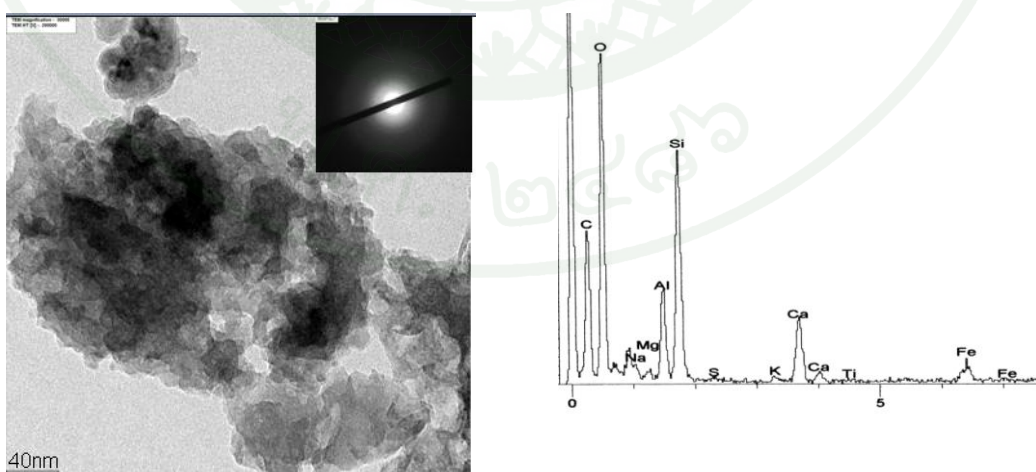
ภาพที่ 106 ภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาโมดูลัสต่างกัน



ก. ส่วนผสมที่ 70-08-1



ข. ส่วนผสมที่ 70-08-4

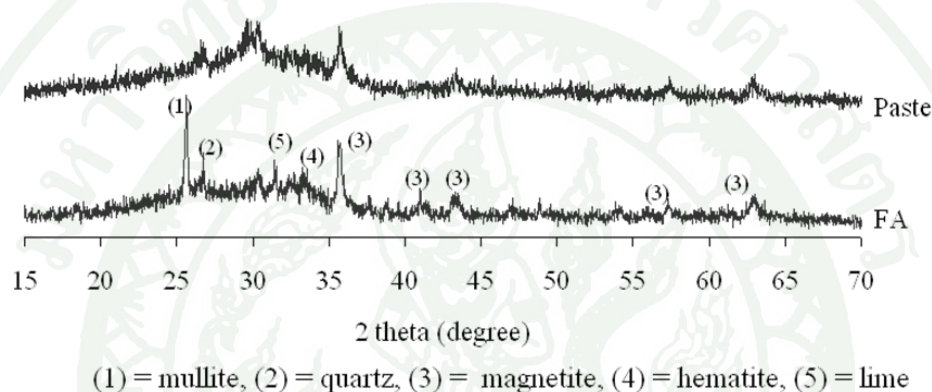


ค. ส่วนผสมที่ 70-08-9

ภาพที่ 107 ภาพถ่าย TEM ของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ใช้อัตราส่วนของซิลิกาเกตโมดูลัสต่างกัน

3.2 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

ภาพดิฟแฟรคโตแกรมของเถ้าลอยที่ได้เครื่อง XRD ได้แสดงไว้ในภาพที่ 108 (เส้นล่าง) ทั้งนี้สามารถระบุถึงโครงสร้างผลึกหลักของเถ้าลอยคือ ควอตซ์ (Quartz, Q) มุลไลต์ (Mullite, A) แมกเนไทต์ (Magnetite, M) เฮมาไทต์ (Hematite, H) และไลม์ (Lime) ตามลำดับ นอกจากนี้สามารถสังเกตได้ชัดเจนถึงช่วงกว้างของกราฟตั้งแต่ 20-40 องศา

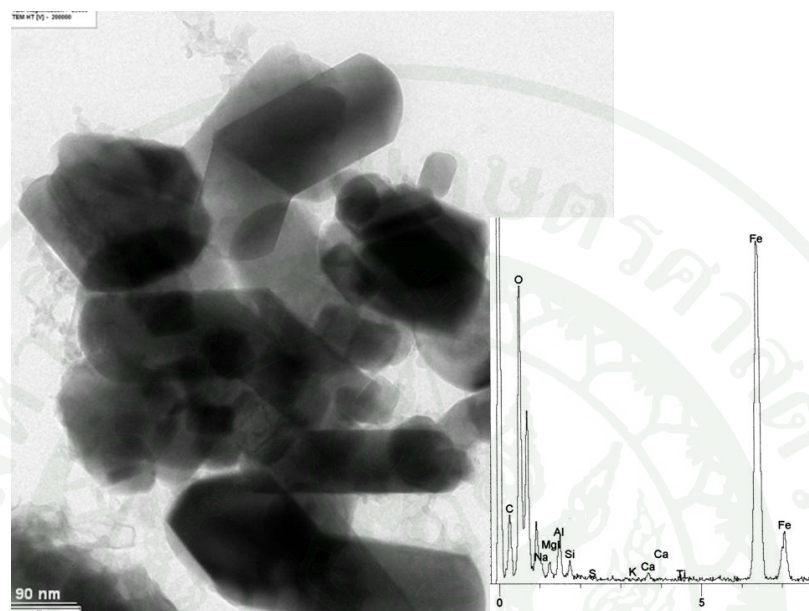


ภาพที่ 108 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเถ้าลอยและจีโอโพลิเมอร์เพสต์

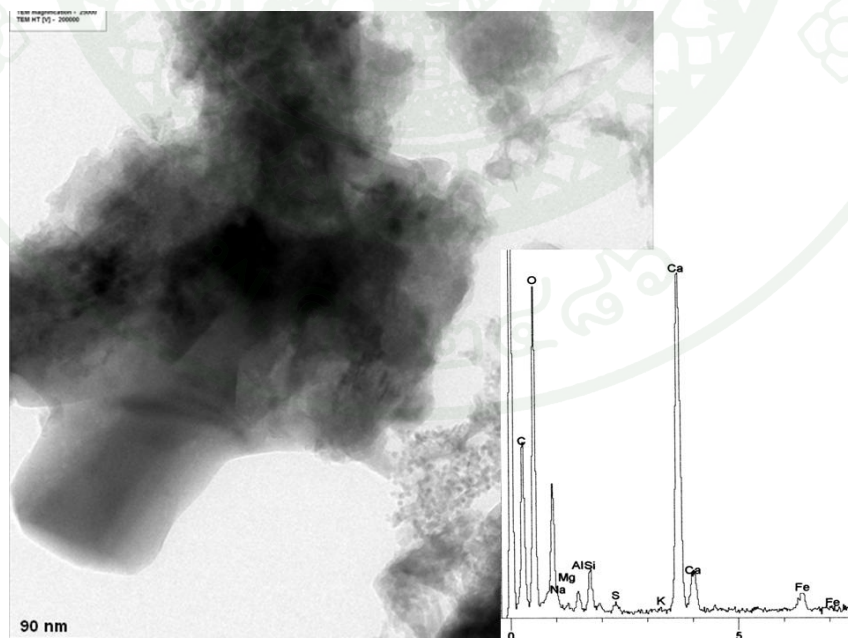
ภาพดิฟแฟรคโตแกรมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ภาพที่ 108 เส้นบน) สามารถระบุโครงสร้างผลึกที่คงค้างจากเถ้าลอยได้แก่ ควอตซ์ และไลม์ (บางส่วน) โดยในส่วนของแมกเนไทต์และเฮมาไทต์บางส่วน ยังคงสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน โดยในส่วนของมุลไลต์ที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินามีความสูงของจุดยอดลดลง แล้วพบช่วงกว้างของกราฟช่วงค่า 2θ เท่ากับ 25-40 องศาโดยประมาณ เป็นผลที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Davidovits (2008) กับภาพขยายที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นในด้านความเป็นโครงสร้างอณูฐาน

นอกจากนั้นแล้วจากปฏิกิริยาย้อนกลับนี้ได้อำนาจให้เกิดโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ตามทฤษฎีที่ Davidovits, (2011) ได้บันทึกไว้ และสอดคล้องกับการศึกษาของ (Chindaprasirt *et al.*, 2012) ทั้งเป็นการยืนยันถึงปฏิกิริยาแคลเซียมที่กระจายไปในเนื้อหาลิโพลิเมอร์เพสต์และเกิดคู่นานกับน้ำและ องค์ประกอบอื่นด้วยกัน โดยที่ซึ่งช่วงสั่นกว้างของ ดิฟแฟรคโตแกรมนั้นสะท้อนถึงโครงสร้างภายใต้ความเป็นอณูฐานมากกว่า หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ มีหน่วยซ้ำของผลึกบ้างแต่ไม่มาก พอที่จะส่งให้จุดยอดขึ้นได้ชัดเจน ตามหลักการของเครื่อง XRD

ส่วนผลึกที่เกี่ยวข้องและสามารถถ่ายภาพขยายได้แก่ผลึกของเหล็กตามภาพที่ 109 และผลึกของแคลเซียมตามภาพที่ 110

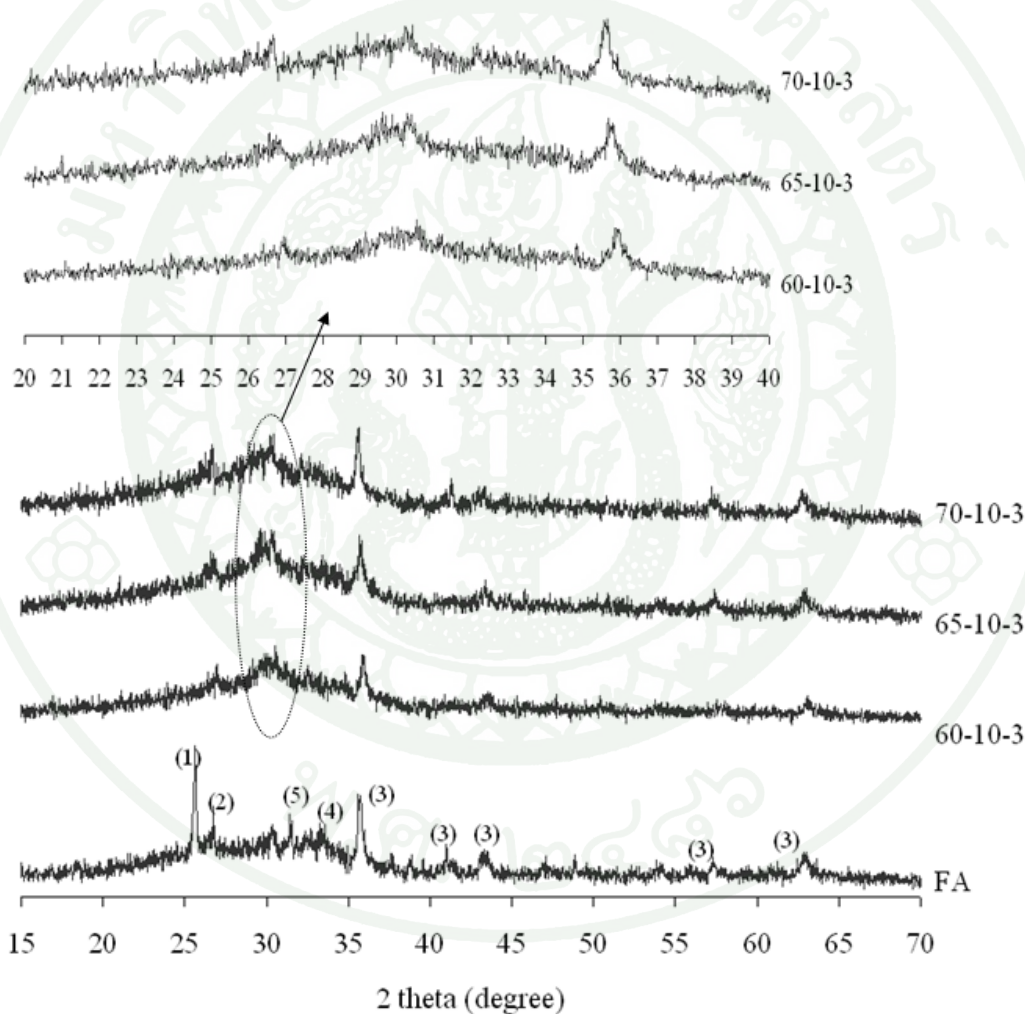


ภาพที่ 109 ภาพ TEM ผลึกของเหล็ก

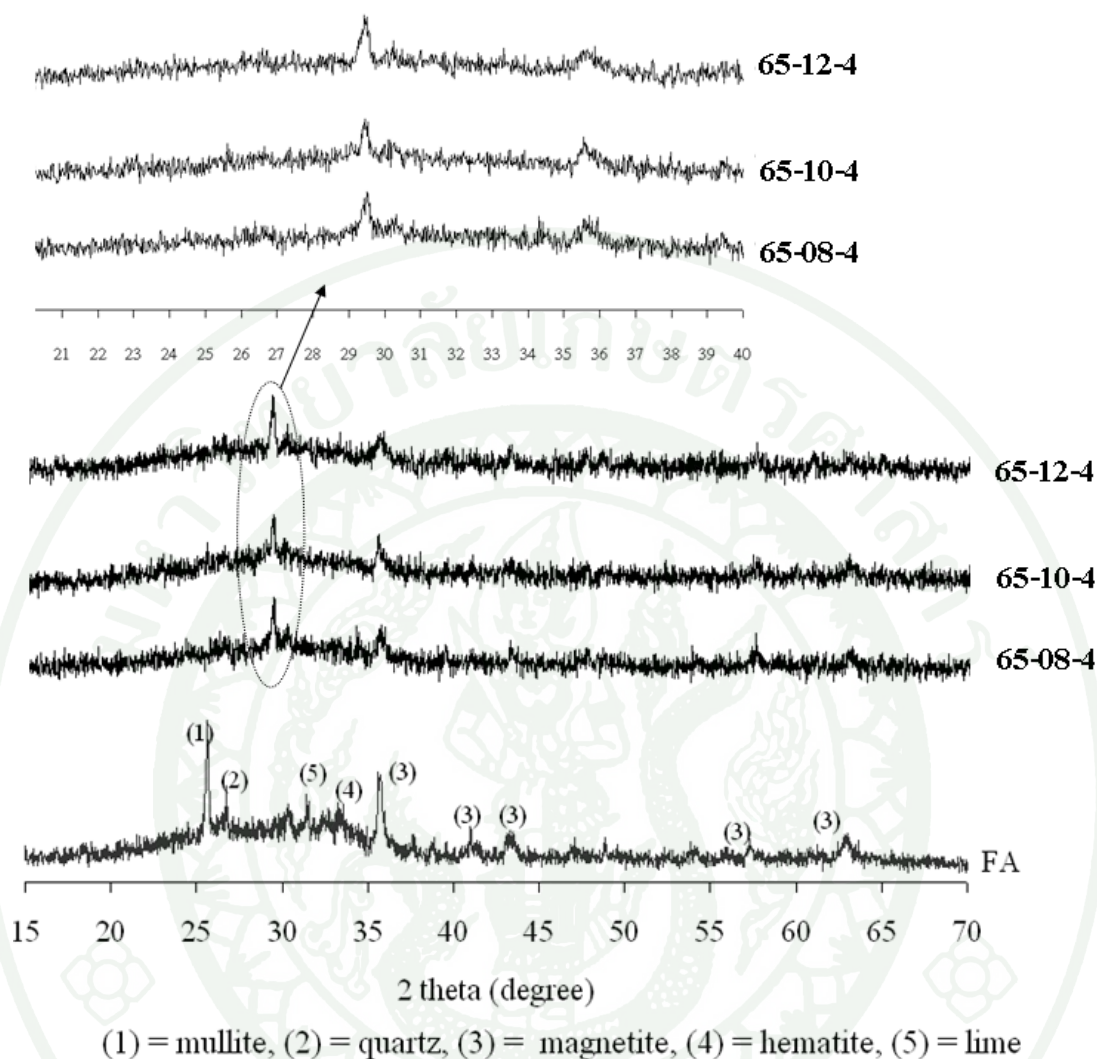


ภาพที่ 110 ภาพ TEM ผลึกของแคลเซียม

สำหรับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีต่อโครงสร้างความเป็นผลึกได้แสดงไว้ในภาพชุดที่ 111 ถึง 113 โดยภาพชุดที่ 111 เป็นการเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่มาจากเถ้าลอย ส่วนผสมที่ 60-10-3, 65-10-3 และ 70-10-3 ส่วนภาพชุดที่ 112 เป็นการเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่มาจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนผสมที่ 65-08-4, 65-10-4 และ 65-12-4 และภาพชุดที่ 114 เป็นการเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่มาจากความเข้มข้นของซิลิกาโมดูลัส 70-08-1, 70-08-4 และ 70-08-9

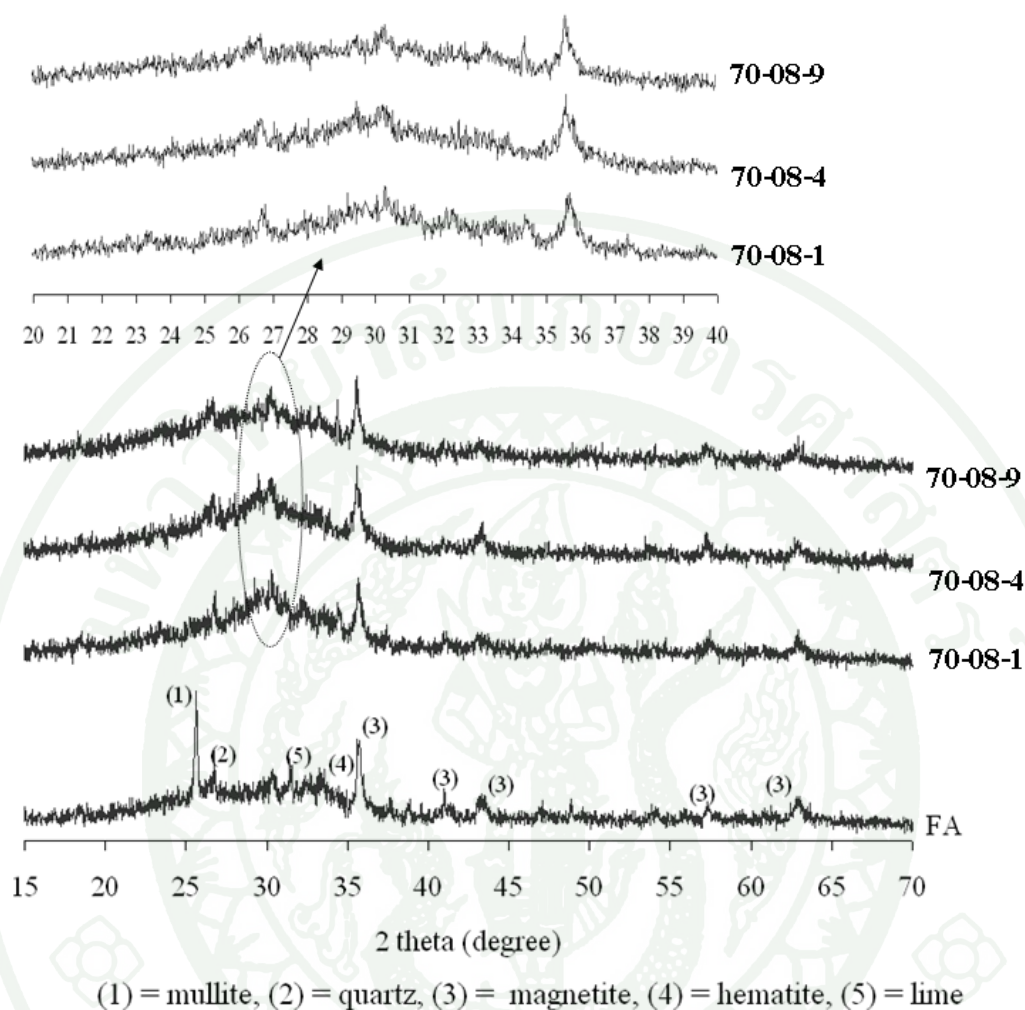


ภาพที่ 111 การเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่างกัน



ภาพที่ 112 การเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน

ภาพที่ 111 และ 112 ได้เผยให้เห็นถึงผลกระทบของเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าลอยและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือมีความเป็นอสัณฐานมากกว่าความเป็นผลึก สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ (Chindaprasirt and Rattanasak, 2010; Chindaprasirt *et al.*, 2011; Rattanasak and Chindaprasirt, 2009) นอกจากนี้มีข้อสังเกตประการหนึ่งว่าช่วงความสูงของยอดที่บริเวณของ CSH ของส่วนผสมที่ใช้ปริมาณเถ้าลอยมากมีความสูงของยอดมากกว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยน้อยกว่า ทั้งนี้จึงผลประการหนึ่งที่เคลเซียมมีโอกาสผลึกได้มากกว่า โดยในส่วนของ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่พบแนวโน้มลักษณะนี้ชัดเจนมากนัก

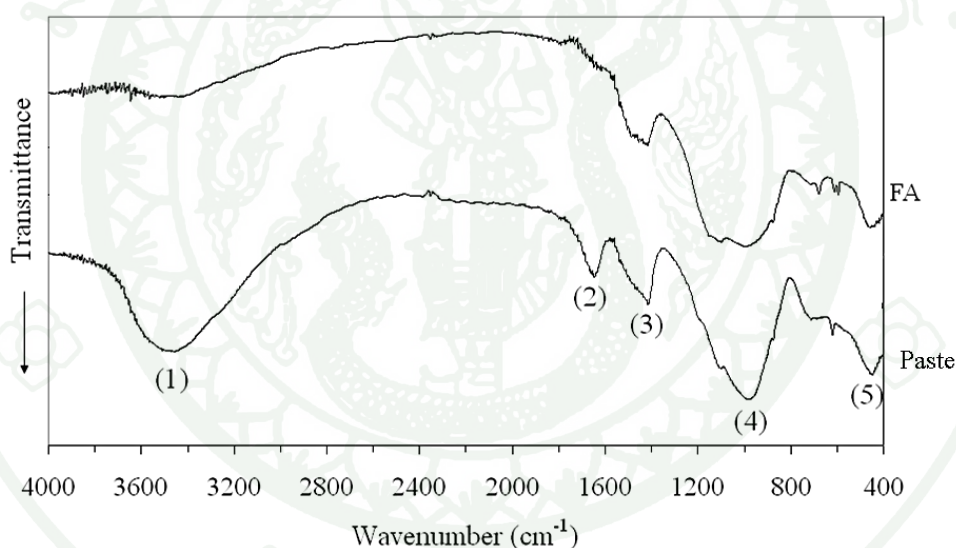


ภาพที่ 113 XRD ดิฟแฟรคโตรแกรมอีโพอキシเรซินที่ใช้อัตราส่วนซิลิเกตโมดูลัสต่างกัน

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงซิลิเกตโมดูลัสนั้น จากภาพที่ 113 พบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลักที่ทิศทางเดียวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณการใช้เถ้าลอยและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างส่วนผสมที่ใช้ซิลิเกตโมดูลัสต่างนั้น ช่วงความสูงที่ขุดบริเวณ CSH รวมถึงบริเวณของออสซิลานทั้งหมดมีส่วนสูงมากขึ้นเข้าสู่ค่ากลางคือใช้โซเดียมซิลิเกตไม่มากและไม่น้อยเกินไป นอกจากนั้นแล้วลักษณะของโครงสร้างที่ได้จากเครื่อง XRD นี้สอดคล้องกับพฤติกรรมของการรับแรงด้วยเช่นกัน ซึ่งลักษณะจะเป็นลักษณะเฉพาะของอีโพอキシเรซินจากเถ้าลอยแคลเซียมที่แตกต่างโครงสร้างที่มาจากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ (Criado *et al.*, 2007a 2008, 2009, 2010a, 2010b; Hajimohammadi *et al.*, 2010; Jimenez *et al.*, 2010)

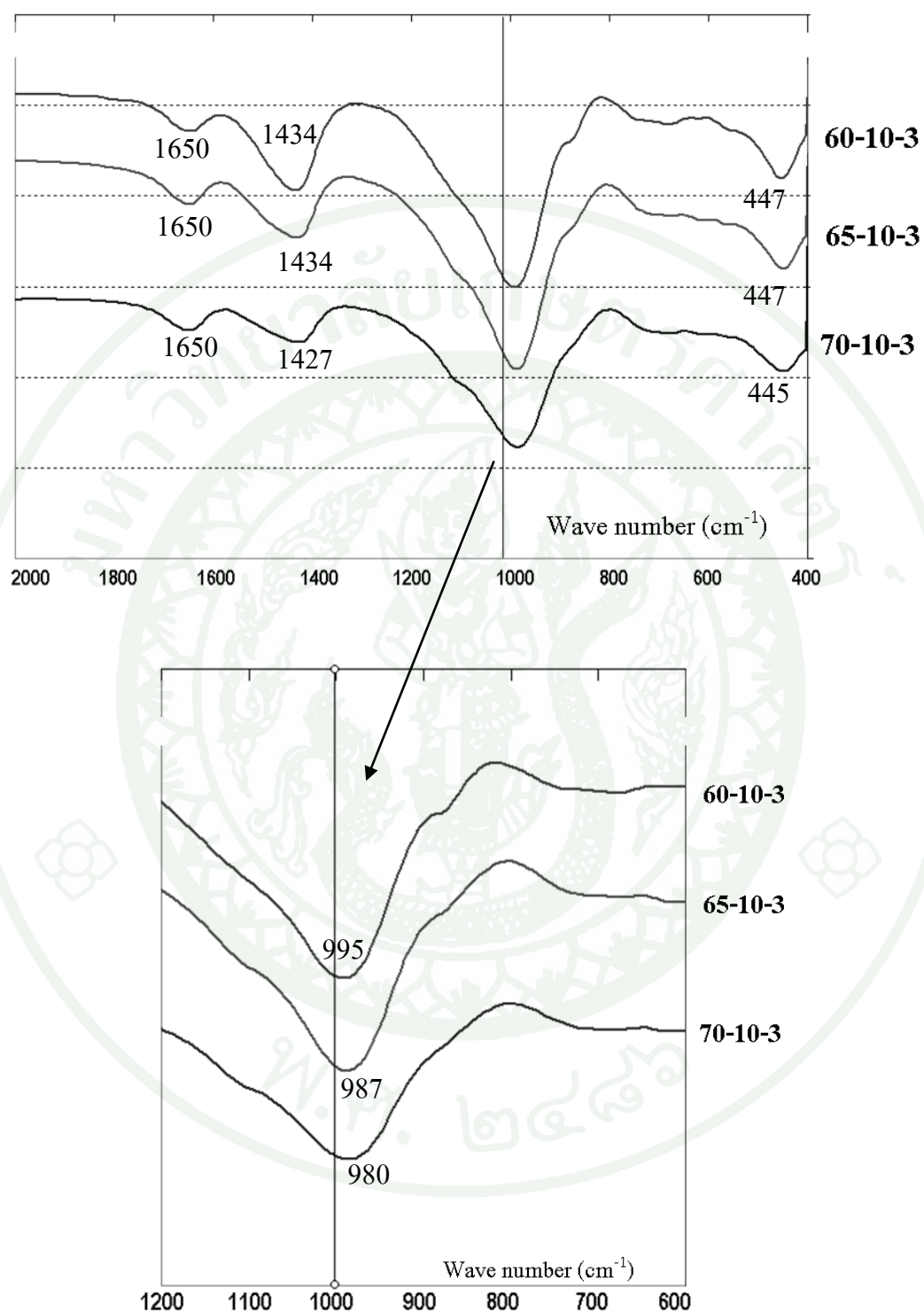
3.4 โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มสเปกโตรมิเตอร์

สเปกตรัมของแก้วลอยและจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตามภาพที่ 114 ได้เผยให้เห็นถึงพันธะเคมีหลักที่เกี่ยวข้องกับแก้วลอยและจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้แก่ พันธะ O-H stretch ที่ $3,450\text{ cm}^{-1}$ (ตำแหน่งหมายเลข 1) และ H-O-H bending ที่ $1,650\text{ cm}^{-1}$ (ตำแหน่งหมายเลข 2) พันธะเคมีต่อมาคือ กลุ่มคาร์บอเนต ที่ $1,460\text{--}1,420\text{ cm}^{-1}$ (ตำแหน่งหมายเลข 3) โดยในส่วนที่แสดงให้เห็นถึงพันธะสำคัญ สามารถระบุลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์คือ พันธะ Si-O-Si และ Al-O-Si ที่ช่วงประมาณ $1,050\text{--}950\text{ cm}^{-1}$ (ตำแหน่งหมายเลข 4) ร่วมกับพันธะ O-Si-O bending ที่ช่วงประมาณ $460\text{--}450\text{ cm}^{-1}$ (ตำแหน่งหมายเลข 5) ซึ่งปรากฏเห็นความแตกต่างในส่วนนี้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับแก้วลอยตั้งต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rattanasak *et al.*, (2011)

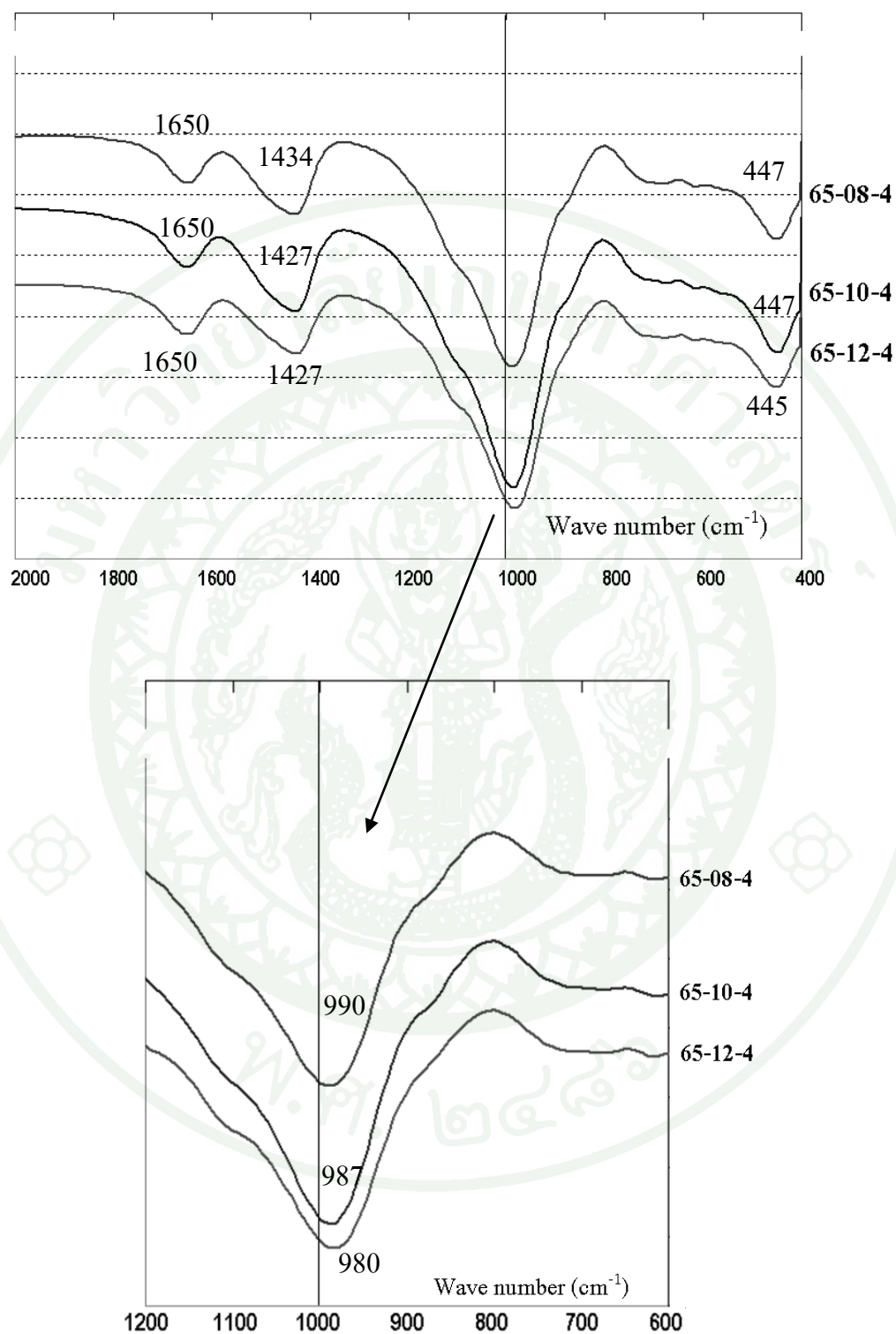


ภาพที่ 114 FT-IR สเปกตรัมแก้วลอยเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์

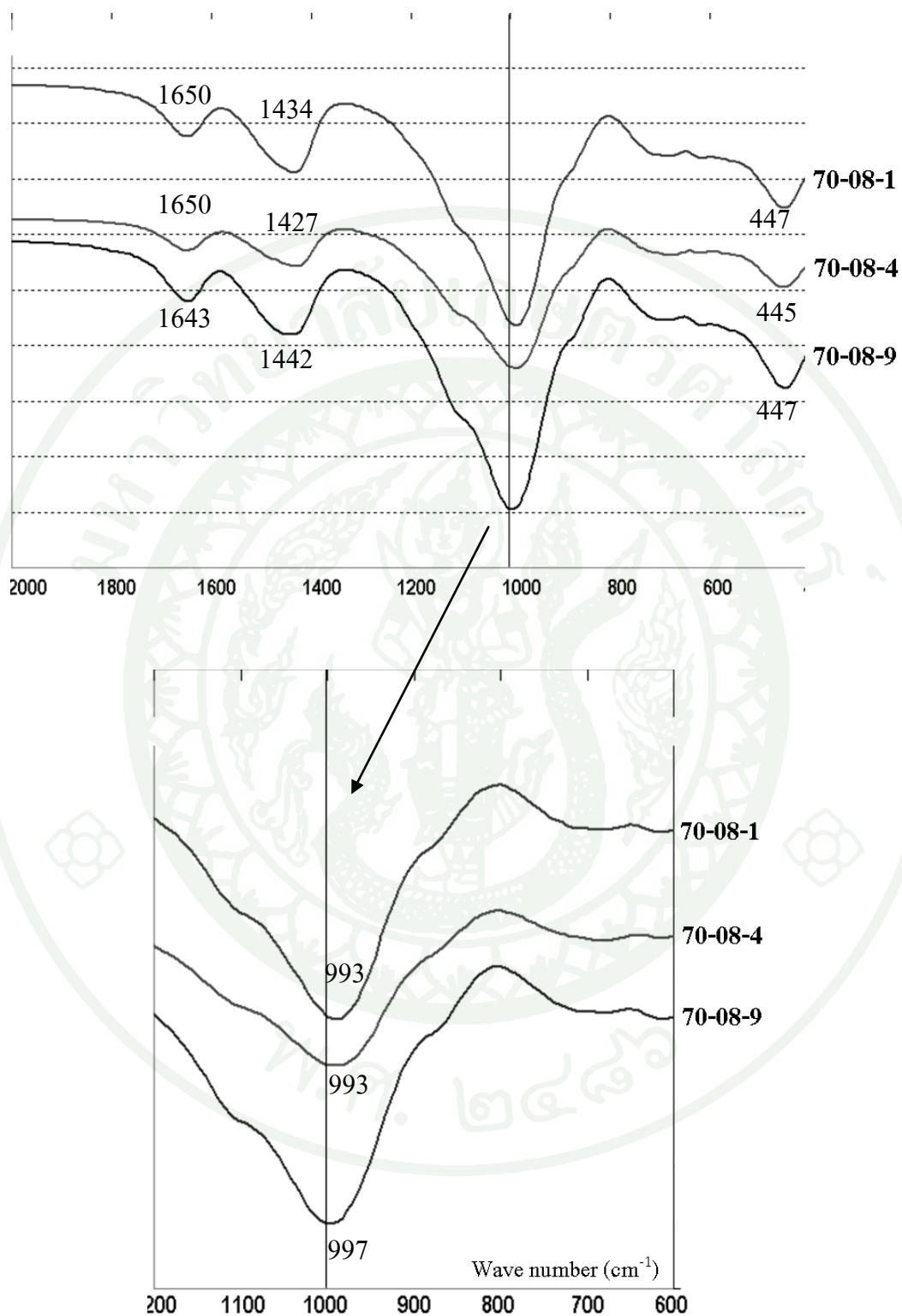
สำหรับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่ออินฟราเรดสเปกตรัมของ โดย ภาพชุดที่ 115 เป็นการเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่มาจากแก้วลอย ส่วนผสมที่ 60-10-3, 65-10-3 และ 70-10-3 ภาพชุดที่ 116 เป็นการเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่มาจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนผสมที่ 65-08-4, 65-10-4 และ 65-12-4 ภาพชุดที่ 117 เป็นการเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่มาจากความเข้มข้นของซิลิกาโมดูลัส 70-08-1, 70-08-4 และ 70-08-9 ตามลำดับ



ภาพที่ 115 FT-IR สเปกตรัมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนเข้าลยต่างกัน



ภาพที่ 116 FT-IR สเปกตรัมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน



ภาพที่ 117 FT-IR สเปกตรัมของอีพอกซีโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้อัตราส่วนซิลิเกตโมดูลัสต่างกัน

จากภาพชุดที่ 115 ถึง 117 แสดงให้เห็นแนวโน้มตามปัจจัยที่ได้กำหนดไว้ คือ เมื่อปริมาณเถ้าลอยมีมากขึ้นส่งผลให้จุดยอดของพันธะ Si(Al)-O มีแนวโน้มของเลขคลื่นที่เบนออกจากค่า $1,000 \text{ cm}^{-1}$ ไปทางค่าที่น้อยกว่า ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงว่ามีสัดส่วนพันธะของ Al-O มากกว่า อันเนื่องมาจาก ความยาวพันธะของ Si-O และ Al-O มีค่าไม่เท่ากัน (Davidovits, 2008: 16) ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับปริมาณของอะลูมินาที่มาจากเถ้าลอยโดยตรง ในส่วนที่พฤติกรรมของตัวแปรอื่นที่ส่งผลในลักษณะเดียวคือการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลกระทบต่อการเบนเลขคลื่นไปทิศทางที่น้อยกว่าเช่นกัน เมื่อพิจารณาผลปัจจัยทั้ง 2 ประการนี้ สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของไอออนบวกของโซเดียมและแคลเซียมอย่างชัดเจนตามทฤษฎีของ Davidovits และสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt, 2009; Chindaprasirt and Rattanasak, 2010) แต่เมื่อพิจารณาถึงการแปรเปลี่ยนปริมาณโซเดียมซิลิเกตนั้น พบว่าจุดยอดของพันธะดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 24 เป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมของของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มาจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง และจากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ (Criado *et al.*, 2007a; Hajimohammadi *et al.*, 2010) พบว่ามีช่วงพันธะหลักที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถเป็นหลักฐานที่ยืนยันได้อีกประการหนึ่งว่า โครงสร้างอัญฐานที่ตรวจพบจากขั้นตอนของ SEM TEM และ XRD นั้น เป็นหลักที่สำคัญของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มาจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงเช่นกัน

ตารางที่ 24 ผลการเปรียบเทียบช่วงเลขคลื่นและพันธะหลัก

พันธะหลัก	ช่วงเลขคลื่น (cm^{-1})		ลักษณะการสั่น
	เถ้าลอยแคลเซียมสูง (จากงานวิจัยนี้)	เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ	
Si(Al)-O	987-1,002	993-1,008	Asymmetrical vibration
Si-O	445-455	469-470	In plane bending vibration

โดยสรุปโครงสร้างจุลภาคตามแสดงและอภิปรายผลไปแล้วนั้น ล้วนมีความสอดคล้องกับตัวแปรของการวิจัยอย่างชัดเจน และยังสะท้อนได้ว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูงสามารถผลิตสารจีโอโพลิเมอร์ได้ ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะบางประการที่แตกต่างออกเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ

4. แนวทางการประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้าง

จากผลที่ได้รับในขั้นตอนที่ผ่านมาจึงได้นำมาขยายผลสู่การนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อตอบสนองกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยข้อสุดท้าย โดยมุ่งเน้นที่ประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตในกลุ่มประเภทของมอร์ตาร์คือวัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์กับทรายเป็นวัสดุก่อสร้าง ด้วยเกณฑ์ในการเลือกส่วนผสมในมิติของการผลิตที่สามารถทำงานได้ คุณสมบัติที่แข็งแรงคงทนต่อการขึ้นรูปและรับน้ำหนัก ตลอดจนพิจารณาต้นทุนของวัตถุดิบในการผลิต

ด้วยหลักการดังกล่าวจึงนำไปสู่การคัดเลือกส่วนผสมที่ได้ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ มาแล้วทั้งคุณสมบัติก่อนการแข็งตัวและเมื่อแข็งตัวแล้ว โดยได้คัดเลือกส่วนผสมมา 3 ส่วนผสม ได้แก่ ส่วนผสม 60-10-4, 65-10-3 และ 70-10-2 นำมาผสมกับทรายในอัตราส่วนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่อทรายเท่ากับ 1:1.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งการเลือกจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้ง 3 ส่วนผสมดังกล่าว พิจารณามาจากผลของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ในแต่ละช่วงของซิลิกेटโมดูลีสร่วมกับผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสภาพที่คงสภาพการทำงานขึ้นรูปได้โดยไม่ขึ้นจนเกินไป ทั้งนี้ชื่อของส่วนผสมจะต่อท้ายด้วยน้ำหนักของทราย ตัวอย่างเช่น ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่ 60-10-4 ปริมาณ 1 กิโลกรัม เมื่อรวมกับทราย 1.50 กิโลกรัม ก็จะเปลี่ยนชื่อเป็น 60-10-4-1.5 เป็นต้น

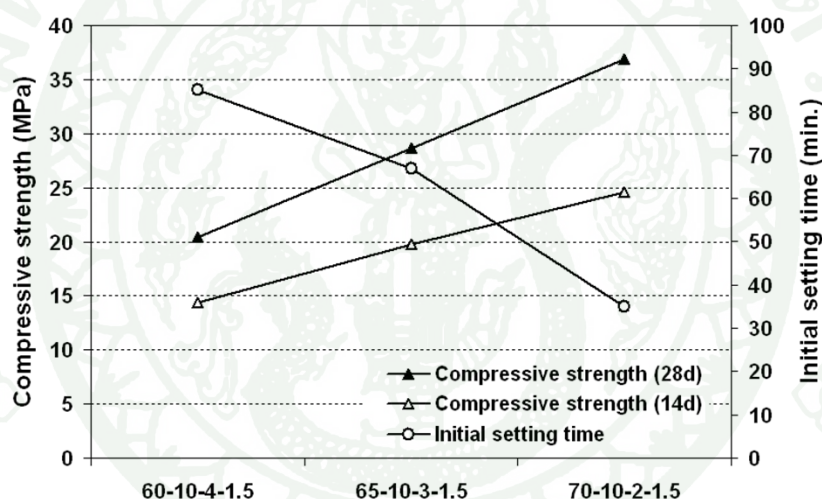
ผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้แก่ ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดที่อายุต่างๆ ได้แสดงไว้ตามตารางผนวกที่ ก31 จากผลที่ได้พบว่าการผสมวัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์กับทรายในอัตราส่วนเดียวกันนั้น ส่งผลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อย่างชัดเจนเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์ และได้มีการเปรียบเทียบกับเวลาก่อตัวของเพสต์ในภาพที่ 117 โดยมีในรายละเอียดของคุณสมบัติที่ได้ในแต่ละส่วนผสมดังนี้

1. ความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อยู่ในช่วง 2,147-2,189 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบกับมีค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ พบว่ามีค่าสูงกว่าร้อยละ 18-23

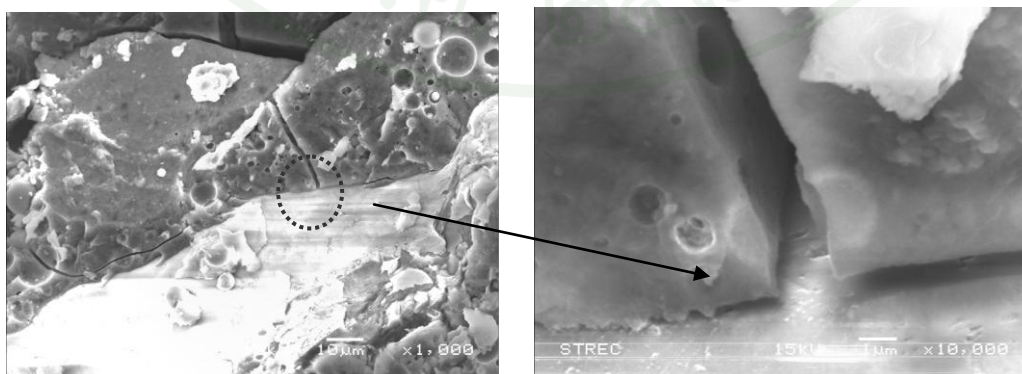
2. กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดในรูปแบบของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ กล่าวคือ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ที่ค่าสูงสุดที่ส่วนผสม 70-10-2-1.5 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 48.67 เมกะปาสกาล และกำลังรับแรงอัดที่มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ส่วนผสม 60-10-4-1.5 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 24.48 เมกะปาสกาล

ภาพที่ 119 เป็นภาพถ่ายจาก SEM ของส่วนผสมที่ 65-10-3-1.5 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ได้เผยให้เห็นถึงโครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากภาพพบว่าการถ่ายเทแรงที่กระทำบนตัวอย่างนั้นมีทิศทางเข้าหาทราย ที่สามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือมวลรวมภายในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังนั้นด้วยพฤติกรรมการรับแรงในลักษณะนี้ความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จึงขึ้นกับความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เฟสต์เป็นสำคัญ



ภาพที่ 118 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



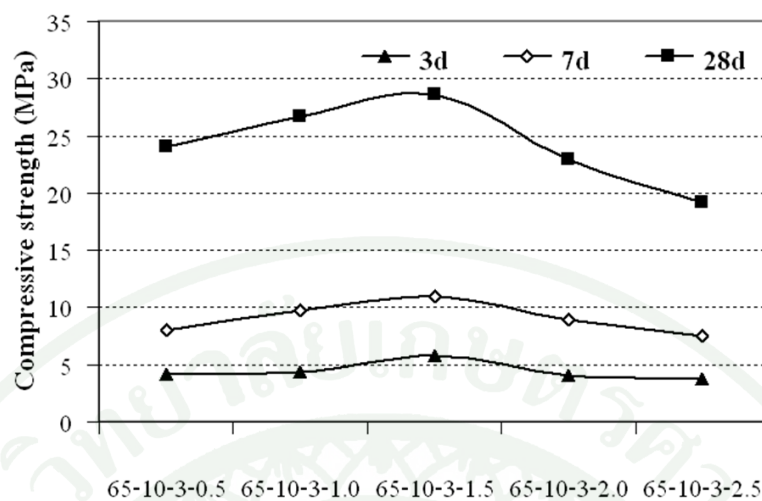
ภาพที่ 119 ภาพถ่าย SEM ของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

เมื่อได้คุณสมบัติเบื้องต้นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แล้ว จึงได้ทำการศึกษาต่อเนื่องถึงส่วนที่สำคัญของการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในวัสดุก่อสร้าง คืออัตราส่วนของวัสดุประสานต่อทราย เพราะทั้งนี้ด้วยพฤติกรรมและโครงสร้างภายในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีลักษณะ โครงสร้างภายในเป็นรูปแบบของอสัณฐานจากผลผลิตของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชัน (Geopolymerization reaction) นั้น มีความแตกต่างจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate: CSH) ที่มาจากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในวัสดุก่อสร้างในปัจจุบันโดยทั่วไป

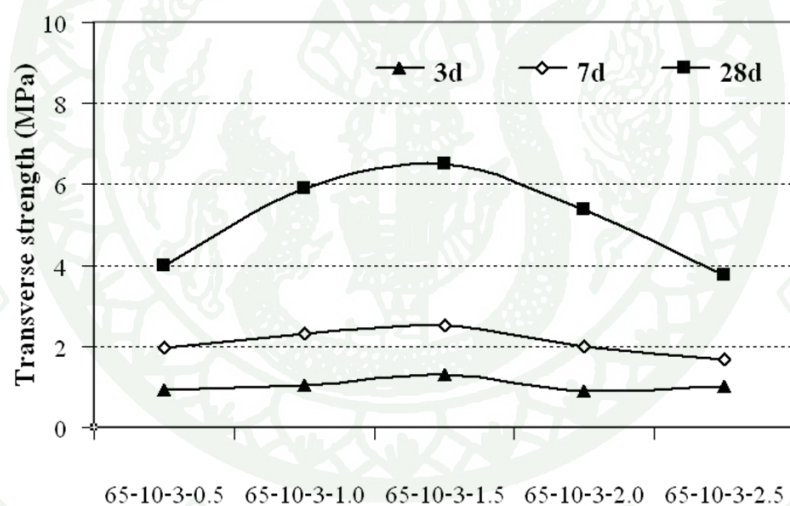
หลักเกณฑ์ในการเลือกส่วนผสมเพื่อให้ได้ผลที่สามารถบรรลุถึงองค์ความรู้ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว การพิจารณาเลือกส่วนผสมจึงคำนึงถึงกำลังรับแรงและความสามารถในการทำงานได้ตามภาพที่ 118 โดยส่วนผสมที่ได้คัดเลือกเพื่อการศึกษาวิจัยถึงผลของอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อทรายคือ 1:1.5 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ 65-10-3 ด้วยสาเหตุที่ส่วนผสมนี้มีเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีความสามารถในการรับแรงได้ดีทั้งส่วนผสมที่เป็นเพสต์และมอร์ตาร์ โดยที่มีช่วงเวลาในการทำงานได้ดีกว่าส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ 70-10-2 ทั้งนี้การเลือกส่วนผสมนี้เพื่อให้ผสมทรายได้หลายอัตราส่วน ได้แก่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายโดยน้ำหนักเท่ากับ 1.0 ต่อ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 จึงมีชื่อเรียกว่า 65-10-3-0.5, 65-10-3-1.0, 65-10-3-1.5, 65-10-3-2.0 และ 65-10-3-2.5 ตามลำดับ เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดและแรงดัด ซึ่งผลการศึกษาจากการด้วยหล่อตัวอย่างใน 2 รูปแบบนั้นได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ ค32 และ ค33 โดยทั้ง 2 รูปแบบคือ แบบลูกบาศก์เพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของการเป็นวัสดุก่อสร้างโดยทั่วไป และแบบแผ่นเพื่อทดสอบหาค่าของกำลังรับแรงดัดทางขวาง โดยมีผลดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดในรูปแบบของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ กล่าวคือ กำลังรับแรงอัดที่ 90 วันของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ค่าสูงสุดที่ส่วนผสม 65-10-3-1.5 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 37.96 เมกะปาสกาล และกำลังรับแรงอัดที่มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ส่วนผสม 60-10-4-2.5 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 23.12 เมกะปาสกาล

2. กำลังรับแรงดัดทางขวางของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดในรูปแบบของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยกำลังรับแรงดัดทางขวางที่ 28 วันของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ค่าสูงสุดที่ส่วนผสม 65-10-3-1.5 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 7.89 เมกะปาสกาล และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ส่วนผสม 60-10-4-2.5 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 5.61 เมกะปาสกาล

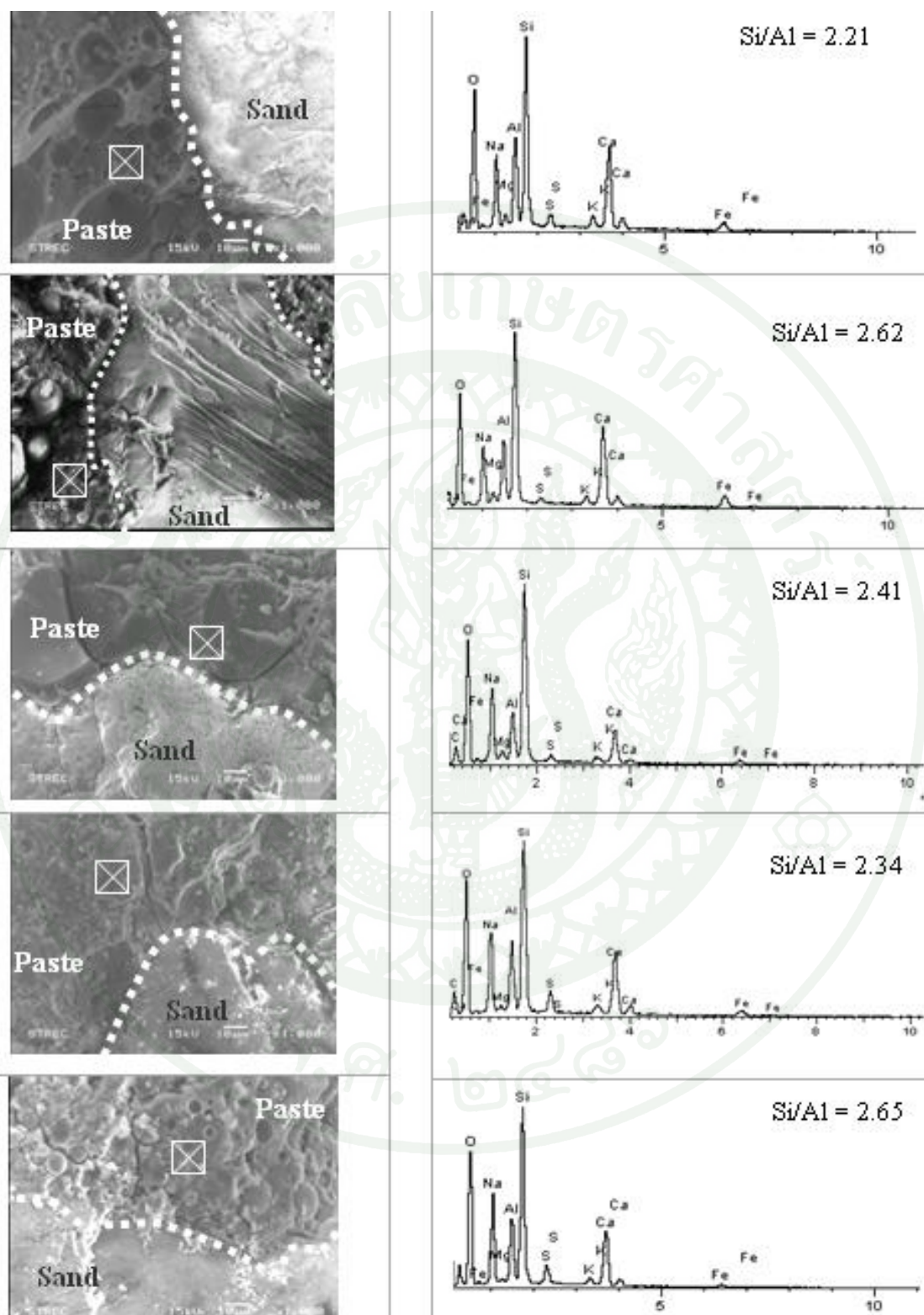


ภาพที่ 120 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



ภาพที่ 121 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงคดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ในส่วนของโครงสร้างภายในได้แสดงไว้ตามภาพที่ 122 โดยได้เรียงลำดับจากด้านบนลงด้านล่างตามสัดส่วนของทรายคือ 0.50 ถึง 2.50 ตามลำดับ (กำลังขยาย 1,000 เท่า) จากภาพจะเห็นได้ชัดเจนว่าเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ยึดกับทรายได้ จึงสามารถถ่ายเทแรงอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อวิเคราะห์ประกอบธาตุที่บริเวณเพสต์ พบว่าสัดส่วนของ Si/Al อยู่ในช่วง 2.21-2.65 ซึ่งสัดส่วนนี้สอดคล้องสัดส่วนของการศึกษาที่ผ่านมาที่ได้แนะนำไว้สำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีตในช่วงประมาณ 2.0-3.0 (Davidovits, 2008, 2011)



ภาพที่ 122 การเปรียบเทียบภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

นอกจากนั้นแล้วค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอันเป็นคุณสมบัติที่มีความโดดเด่นมากประการหนึ่งของวัสดุอีโพอลิเมอร์เรื่องการป้องกันความร้อนจากข้อสรุปของ Davidovits (2008, 2011) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์อยู่ในช่วง 0.219-0.260 W/m.K ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในช่วงนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่กันความร้อนได้

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกันกับงานวิจัยที่ได้ใช้เถ้าลอยเคลือบสูงที่ผ่านมาของ Ridditirud *et al.* (2011) ที่ได้ผลกำลังรับแรงอัดของอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ (ใช้อัตราส่วนพесต์:ทราย เท่ากับ 1:2.75) อยู่ในช่วงประมาณ 22 เมกะปาสกาลขึ้นไปก่อนทำการอบร้อนและเมื่อทำการอบร้อนแล้วกำลังจะเพิ่มขึ้นอีก 1.5-2.0 เท่า (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Ridditirud *et al.*, 2011)

เมื่อเปรียบเทียบกับอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยเคลือบต่ำของ Jimenez and Palomo (2003) ที่ใช้สัดส่วนสัดส่วนของพесต์ต่อทรายเท่ากับ 1:2 แล้วอบที่ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่ามีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 70 เมกะปาสกาล จึงเห็นได้ว่าเถ้าลอยเคลือบสูงจึงมีศักยภาพในการทำผลิตภัณฑ์มอร์ตาร์ได้

ทั้งนี้สิ่งที่ได้เพิ่มเติมจากการค้นคว้าที่ได้กล่าวถึงคือความสัมพันธ์ของปริมาณอีโพอลิเมอร์ต่อทรายที่ให้กำลังสูงสุดทั้งแรงอัดและแรงดัดก่อนการอบร้อนคือส่วนผสมที่มีทรายในสัดส่วน 1.5 เท่า ดังนั้นจากจุดนี้ถ้ามีความต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์กำลังสูงสามารถเป็นทางเลือกที่น่าสนใจต่อไป ทั้งนี้สามารถเลือกสัดส่วนของทรายมากกว่านี้ได้ ถ้ามีปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากกำลังรับแรงยังมีอยู่ในช่วงประมาณ 20 เมกะปาสกาลขึ้นไป ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่แนะนำในการพัฒนาได้แก่ กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก กระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา และ คอนกรีตประสานปูพื้น เป็นต้น (สมอ, 2531, 2533, 2540, 2543)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การวิเคราะห์ส่วนผสมของการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

การวิเคราะห์ถึงอัตราส่วนหลักภายในส่วนประกอบของการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาอัตราส่วนโดยของออกไซด์ที่เป็นสารประกอบตั้งต้นของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรซ์เซชัน ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) ที่มาจากเถ้าลอยโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่มาจากลิกไนต์ด้วยแล้ว ต้องมีการวิเคราะห์สัดส่วนโดยโมลของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร่วมด้วย สำหรับการพิจารณาอัตราส่วนโดยของออกไซด์ในส่วนที่เป็นสารละลายต่างต้องมีการพิจารณาสัดส่วนของ ซิลิกา (SiO_2) และ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ที่มาสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เช่นกัน โดยควรแยกผลกระทบต่ออัตราส่วนต่างๆ ตามปัจจัยของการผลิตได้ตามตารางที่ 25

ตารางที่ 25 สรุปผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนการผสมวัสดุจีโอโพลิเมอร์

อัตราส่วน โดยโมล	การเปลี่ยนแปลงของ อัตราส่วนเถ้าลอย ต่อสารละลายต่าง		การเปลี่ยนแปลงความ เข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์		การเปลี่ยนแปลง ซิลิเกตโมดูลัส (Ms)	
	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
$\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด	ลด	เพิ่ม
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด
$\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$	ลด	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด
$\text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด	ลด	เพิ่ม
CaO/SiO_2	เพิ่ม	ลด	ลด	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม
$\text{H}_2\text{O}/\text{CaO}$	ลด	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม	ลด	เพิ่ม
$\text{CaO}/\text{M}_2\text{O}$	เพิ่ม	ลด	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด

2. ปัจจัยพื้นฐานของสารตั้งต้นและปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ในการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

2.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง มีผลต่อเวลาก่อตัวและร้อยละของการไหลแผ่เพิ่มขึ้นของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สด เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อ สารละลายต่างลดลง จาก 70:30 สู่ 60:40 อันมีสาเหตุหลักจากปริมาณของแคลเซียมภายในส่วนผสม

2.2 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนโดยโมล ของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ในสารละลายต่าง มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันอย่างชัดเจน โดยช่วงเวลาก่อตัวและร้อยละของการไหลแผ่เพิ่มขึ้น เมื่อ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลดลงจาก 12 ถึง 8 โมลาร์ และอัตราส่วนซิลิกेटโมดูลัสในสารละลายต่างลดลงจาก 1.40 ถึง 0.60 ทั้งนี้โครงสร้างของสารละลายต่างที่มีค่าซิลิกेटโมดูลัสต่างกัันนั้นส่งผลต่อคุณสมบัติเหล่านี้อย่างชัดเจน

2.3 คุณสมบัติด้านความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วน โดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง ส่วนปัจจัยอื่นส่งผลเพียงเล็กน้อย และด้านการดูดซึมน้ำ มีผลต่อเวลาก่อตัวและร้อยละ

2.4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ขึ้นกับปัจจัยหลักในองค์ประกอบของส่วนผสมที่สามารถสรุปได้จากผลการทดลองดังนี้

2.4.1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 โมลาร์ ถึง 12 โมลาร์และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่างเพิ่มขึ้นจาก ร้อยละ 60 ถึง ร้อยละ 70

2.4.2 อัตราส่วนซิลิกेटโมดูลัสในสารละลายต่าง ที่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงสุดคือ 0.70 สำหรับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของเถ้าลอยต่อสารละลายต่างเท่ากับ 70:30

2.4.3 อัตราส่วนซิกเมนต์โมดูลัสในสารละลายต่าง ที่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงสุดคือ 0.80 สำหรับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง เท่ากับ 65:35

2.4.4 อัตราส่วนซิกเมนต์โมดูลัสในสารละลายต่าง ที่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงสุดคือ 0.90 สำหรับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง เท่ากับ 60:40

2.5 การหาคัดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ขึ้นกับปัจจัยหลักในองค์ประกอบของส่วนผสมที่สามารถสรุปได้จากผลการทดลองดังนี้

2.5.1 การหาคัดตัวเมื่อแห้งของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่างเพิ่มขึ้น

2.5.2 อัตราส่วนซิกเมนต์โมดูลัสในสารละลายต่าง ที่ส่งผลให้ การหาคัดตัวเมื่อแห้งจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่ำสุดคือ 0.90 สำหรับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของเถ้าลอยต่อสารละลายต่างเท่ากับ 70:30 ถึง 60:30

3. โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและส่องผ่านพร้อมกับการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ รวมถึงการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน และการวิเคราะห์พันธะของโครงสร้างภายในสารประกอบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน มีสาระสำคัญโดยสรุปดังนี้

3.1 โครงสร้างจุลภาคของสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่สังเกตได้จากภาพถ่ายขยายที่ระดับกำลังขยาย 100-10,000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีลักษณะพื้นฐานที่เป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างชัดเจน และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ได้

เผยให้เห็นถึงความสอดคล้องกันในรายละเอียดของโครงสร้างอสังหาริมทรัพย์ในระดับนาโนเมตรที่เป็นเนื้อเดียวกัน

3.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ สามารถยืนยันได้ว่า องค์ประกอบที่สำคัญของโครงสร้างจุลภาคแบบอสังหาริมทรัพย์ประกอบด้วย ซิลิกา อะลูมินาและ ออกซิเจน ซึ่งอัตราส่วนโดยอะตอมของซิลิกาและอะลูมินาภายในโครงสร้างจุลภาคนั้น ส่งผลโดยตรงคุณสมบัติโดยตรงในช่วงของค่าซิลิกเกตโมดูลัสในสารละลายต่ำกว่าจุดที่เหมาะสมในแต่ละช่วงของการใช้เถ้าลอย

3.3 สอดคล้องกับพันธะของ ซิลิกา อะลูมินา ออกซิเจนที่ได้จากผลของการดูดกลืนแสง อินฟราเรด ส่วนผลของการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างภายในที่ไม่เป็นผลึกเช่นกัน โดยรูปแบบของแผนภูมิการเลี้ยวเบนที่เปลี่ยนแปลงไปจากเถ้าลอยแสดงให้เห็นถึงผลของการชะละลายสารอลูมิโนซิลิกเกตอย่างชัดเจน ด้วยลักษณะของแผนภูมิการเลี้ยวเบนที่ขยายเป็นแบบสันกว้างกว่าเถ้าลอย

4. แนวทางการประยุกต์ใช้ในวัสดุก่อสร้าง

รูปแบบของวัสดุก่อสร้างที่จะนำเทคโนโลยีของสารจีโอโพลิเมอร์ไปใช้นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งานในส่วนต่างๆ ของสิ่งก่อสร้าง โดยจากผลของการศึกษาในครั้งนี้ได้นำส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยร้อยละ 65 ไปสู่การผลิตต้นแบบของวัสดุก่อสร้างชนิดสำเร็จรูปในลักษณะของวัสดุก่อและวัสดุแผ่นที่มีความเป็นฉนวนกันความร้อนได้

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาด้านวัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย มีองค์ความรู้ที่ต้องการขยายผลการค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติมในส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ผลของอัตราส่วนสารละลายกลุ่มแอลคาไลในรูปแบบของ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมซิลิกเกตที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์พอสต์

2. ผลของขนาดมวลรวมหยาบและละเอียดที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

3. รูปแบบของการประยุกต์เป็นวัสดุซ่อมแซมโครงสร้างหรือเสริมกำลังโครงการที่ต้องการกำลังและความทนทานต่ออุณหภูมิ

ทั้งนี้เพื่อเติมเต็มศักยภาพและขีดความสามารถการวิจัยของประเทศ ด้านการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างด้วยวัตถุดิบหลักภายในประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้วัสดุเหลือจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอื่นเป็นพื้นฐานที่สำคัญของการพัฒนาสังคมอย่างยั่งยืนต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2550. รายงานประจำปี 2549.

_____. 2551. รายงานประจำปี 2550.

_____. 2552. รายงานประจำปี 2551.

_____. 2553. รายงานประจำปี 2552.

_____. 2554. รายงานประจำปี 2553.

ชัยชนา ธนชยานนท์ และ ยศ บุญทองคง. 2549. เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องผ่านกับชีวิตประจำวัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, ปทุมธานี.

ชัยวิทย์ อุณหศิริกุล. 2548. สถานการณ์และแนวโน้มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กรุงเทพฯ.

ณัฐนิ โล่ห์พัฒนานนท์. 2552. พอลิเมอร์เชิงประกอบ: ความรู้พื้นฐานและสมบัติ. พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์ปัตตานีการช่าง, ปัตตานี.

ธงชัย พึ่งรัมย์, เทิดทูน ดำรงค์ฤทธิรามาศย์, สุณารี บดีพงษ์ และ สุกิจ อติพันธ์. 2553. สมุดแผ่นที่ผลวิเคราะห์แร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

บัญชา ธนบุญสมบัติ. 2544. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน: พื้นฐานสำหรับฟิสิกส์ เคมี วัสดุศาสตร์ และวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ ศ.ศ.ท., กรุงเทพฯ.

บัญชา ธนบุญสมบัติ และ ศุภกาญจน์ คำมณี. 2544. จุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบสแกนนิ่ง ประตูลู่
โลกระดับจุลภาค. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, ปทุมธานี.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547. ปูนซีเมนต์ ปอชโซลานและคอนกรีต.
พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

_____. 2548. เถ้าลอยในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2 สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

พินิติ รัตนานุกูล, ธวัชชัย ต้นทุลานี, นัทธมน คุณแสง, อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี และ จอมใจ สุกใส.
2551ก. เคมี 2 (ธาตุเรฟรีเซนเททีฟ กลุ่ม S ธาตุเรฟรีเซนเททีฟ กลุ่ม P ธาตุทรานซิชัน
แลนทาไนด์และแอคติไนด์ ของแข็ง). พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัทด้านสุทธาการพิมพ์ จำกัด,
กรุงเทพฯ.

_____, นัยนา ชวนเกริกกุล, พรพรรณ อุดมกาญจนนันท์, วรพรรณ พันธมนาวิน, สุชาดา จูอนวัณ
นกุล, ชีรยุทธ วิไลวัลย์, นัทธมน คุณแสง และ อรพินท์ เกียรธาวร. 2551ข. เคมี (เคมี
คำนวณ อะตอม ตารางธาตุ พันธะเคมี). พิมพ์ครั้งที่ 4. บริษัทด้านสุทธาการพิมพ์ จำกัด,
กรุงเทพฯ.

แม่น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม, ยุวดี เชี่ยววัฒนา, อติยา ศิริภิญญานนท์, ศรีวิไล โอมอภิญญาณ
และ อุทมพร สุขม่วง. 2552. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่
1. บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด, กรุงเทพฯ.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2547. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต.
พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ.

สมเดช กนกเมธากุล. 2547. สเปกโทรสโกปี. พิมพ์ครั้งที่ 1. ห้างหุ้นส่วนจำกัด ขอนแก่นการพิมพ์,
ขอนแก่น.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2531. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้อง
คอนกรีตปูพื้น. มอก. 378-2531

_____. 2533. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก. มอก. 57-2533.

_____. 2534. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมไฮดรอกไซด์ประเภทอุตสาหกรรม.
มอก. 150-2534.

_____. 2539. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมซัลเฟตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม.
มอก. 433-2539.

_____. 2540. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา. มอก. 535-2540.

_____. 2543. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตประสานปูพื้นสำหรับงานหนัก. มอก.
2035-2543.

_____. 2545. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต.
มอก. 2135-2545.

สุธรรม ศรีห่มสัก. 2554. เอกเรย์ดิฟแฟรกชันเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุรชาติพิศศิริไพศาลพัฒน์. 2552. เคมีโคออร์ดิเนชัน. พิมพ์ครั้งที่ 2 โอ เอส พรินต์ติ้ง เฮาส์,
กรุงเทพฯ.

เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. 2546. วัสดุศาสตร์มูลฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 3. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อาสาฬห์ จิตรแจ่ม และ เอกฉนัย กอกิมพงษ์. 2548. พิธีสารควบคุมสภาวะโลกร้อน. แลปทูเดย์
4(32): 49-52.

อินทรีา หาญพงษ์พันธ์ และ บัญชา พูลโกคา. 2549. **เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 8. บริษัทด้านสุทธาการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

Alonso, S. and A. Palomo. 2001a. Calorimetric Study of Alkaline Activation of Calcium Hydroxide–Metakaolin Solid Mixtures. **Cement and Concrete Research** 31 (1): 25-30.

_____. and _____. 2001b. Alkaline Activation of Metakaolin and Calcium Hydroxide Mixtures: Influence of Temperature, Activator Concentration and Solids Ratio. **Materials Letters** 47 (1–2): 55-62.

Andini, S., R. Cioffi, F. Colangelo, T. Grieco, F. Montagnaro and L. Santoro. 2008. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. **Waste Management** 28 (2): 416-423.

ASTM International. 1998. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement-C230.

_____. 2001. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle-C191.

_____. 2002. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars-C109.

_____. 2002. Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete-C490.

_____. 2012. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete-C618.

- Bakharev, T. 2005. Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. **Cement and Concrete Research** 35 (6): 1224-1232.
- Barbosa, V.F. F., K.J. D. Mackenzie and C. Thaumaturgo. 2000. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials** 2 (4): 309-317.
- Chang, R. 2007. **Chemistry**. Ninth Edition. McGraw-Hill, United States of America.
- Chindaprasirt, P., T. Chareerat and V. Sirivivatnanon. 2007. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. **Cement and Concrete Composites** 29 (3): 224-229.
- _____, C. Jaturapitakkul, W. Chalee and U. Rattanasak. 2009. Comparative Study on the Characteristics of Fly Ash and Bottom Ash Geopolymers. **Waste Management** 29 (2): 539-543.
- _____, U. Rattanasak. and C. Jaturapitakkul. 2011. Utilization of Fly Ash Blends from Pulverized Coal and Fluidized Bed Combustions in Geopolymeric Materials. **Cement and Concrete Composites** 33 (1): 55-60.
- _____, P. D. Silva, K. S. Crentsil and S. Hanjitsuwan. 2012. Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. **Journal of Material Science** 47 (12): 4876-4883.
- Criado, M., A. F. Jimenez and A. Palomo. 2007a. Alkali Activation of Fly Ash: Effect of the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ Ratio Part I: Ftir Study. **Microporous and Mesoporous Materials** 106 (1-3): 180-191.

- Criado, M., A. F. Jimenez and A. Palomo. 2010a. Alkali Activation of Fly Ash, Part III: Effect of Curing Conditions on Reaction and Its Graphical Description. **Fuel** 89 (11): 3185-3192.
- _____, _____ and _____. 2010b. Effect of Sodium Sulfate on the Alkali Activation of Fly Ash. **Cement & Concrete Composites** 32 (8): 589-594.
- _____, _____, _____, I. Sobrados and J. Sanz. 2008. Effect of the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ Ratio on the Alkali Activation of Fly Ash, Part II: Si-29 Mas-Nmr Survey. **Microporous and Mesoporous Materials** 109 (1-3): 525-534.
- _____, _____, A.G. de la Torre, M.A.G. Aranda and A. Palomo. 2007b. An XRD Study of the Effect of the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ Ratio on the Alkali Activation of Fly Ash. **Cement and Concrete Research** 37 (5): 671-679.
- _____, A. Palomo, A. F. Jimenez and P.F.G. Banfill. 2009. Alkali Activated Fly Ash: Effect of Admixtures on Paste Rheology. **Rheologica Acta** 48 (4): 447-455.
- Connor, S.J.O. and K.J.D. MacKenzie. 2010. A New Hydroxide-Based Synthesis Method for Inorganic Polymers. **Journal of Materials Science** 45 (12): 3284-3288.
- Connor, S.J.O., K.J.D. MacKenzie, M. E. Smith and J. V. Hanna. 2010. Ion exchange in the charge-balancing sites of aluminosilicate inorganic polymers. **Journal of Materials Chemistry** 20 (45): 10234-10240.
- Davidovits, J. 1982. **Mineral Polymers and Methods of Making Them**. U.S. Patent 4,349,386.
- _____. 1984. **Early high-strength mineral polymer**. U.S. Patent 4,509,985.

Davidovits, J. 1991. Geopolymers Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 37: 1633-1656.

_____. 1994. Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries. **World Resource Review** 6 (2): 263-278.

_____. 2008. **Geopolymer Chemistry & Applications**. Second Edition. Geopolymer Institute, France.

_____. 2011. **Geopolymer Chemistry & Applications**. Thrid Edition. Geopolymer Institute, France.

Detphan, S. and P. Chindaprasirt. 2009. Preparation of Fly Ash and Rice Husk Ash Geopolymer. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials** 16 (6): 720-726.

Deventer, J.S.J., J.L. Provis, P. Duxson and G.C. Lukey. 2007. Reaction Mechanisms in the Geopolymeric Conversion of Inorganic Waste to Useful Products. **Journal of Hazardous Materials** 139 (3): 506-513.

Duxson, P., G.C. Lukey and J.S.J. van Deventer. 2006a. Evolution of Gel Structure During Thermal Processing of Na-Geopolymer Gels. **Langmuir** 22: 8750-8757.

_____, _____ and _____. 2006b. Thermal Evolution of Metakaolin Geopolymers: Part 1 - Physical Evolution. **Journal of Non-Crystalline Solids** 352 (52-54): 5541-5555.

_____, _____ and _____. 2006c. Thermal Conductivity of Metakaolin Geopolymers Used as a First Approximation for Determining Gel Interconnectivity. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 45 (23): 7781-7788.

- Duxson, P., G.C. Lukey and J.S.J. van Deventer. 2007a. The Thermal Evolution of Metakaolin Geopolymers: Part 2 - Phase Stability and Structural Development. **Journal of Non-Crystalline Solids** 353 (22-23): 2186-2200.
- _____, _____ and _____. 2007b. Physical Evolution of Na-Geopolymer Derived from Metakaolin up to 1000 Degrees C. **Journal of Materials Science** 42 (9): 3044-3054.
- _____, _____, F. Separovic and J.S.J. van Deventer. 2005a. Effect of Alkali Cations on Aluminum Incorporation in Geopolymeric Gels. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 44 (4): 832-839.
- _____, S.W. Mallicoat, G.C. Lukey, W.M. Kriven and J.S.J. van Deventer. 2007c. The Effect of Alkali and Si/Al Ratio on the Development of Mechanical Properties of Metakaolin-Based Geopolymers. **Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects** 292 (1): 8-20.
- _____, J.L. Provis, G.C. Lukey and J.S.J. van Deventer. 2007d. The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of 'Green Concrete'. **Cement and Concrete Research** 37 (12): 1590-1597.
- _____, _____, _____, F. Separovic and J.S.J. van Deventer. 2005b. Si-29 Nmr Study of Structural Ordering in Aluminosilicate Geopolymer Gels. **Langmuir** 21 (7): 3028-3036.
- _____, _____, _____, S.W. Mallicoat, W.M. Kriven and J.S.J. van Deventer. 2005c. Understanding the Relationship between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties. **Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects** 269 (1-3): 47-58.
- Freidin, C. 2007. Cementless Pressed Blocks from Waste Products of Coal-Firing Power Station. **Construction and Building Materials** 21 (1): 12-18.

Fultz, B. and J. M. Howe. 2007. **Transmission Electron Microscopy and Differactometry of Materials**. Thrid Edition. Springer, United States of America.

Garcia, J.I.E., A.V. Gorokhovsky, G. Mendoza and A.F. Fuentes. 2003. Effect of Geothermal Waste on Strength and Microstructure of Alkali-Activated Slag Cement Mortars. **Cement and Concrete Research** 33 (10): 1567-1574.

Goldstein, J.I., A.D.R. Jr, D.E. Newbury, C.E. Lyman, P. Echlin, C. Fiori, D.C. Joy and E. Lifshin. 1992. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. Second Edition. Plenum Press, New York.

Gordon, L.E., J.L. Provis and J.S.J. van Deventer. 2011a. Durability of Fly Ash/GGBFS Based Geopolymers Exposed to Carbon Capture Solvents. **Advances in Applied Ceramics** 110 (8): 446-452.

_____, _____ and _____. 2011b. Non-Traditional (“Geopolymer”) Cements and Concretes for Construction of Large CCS Equipment. **Energy Procedia** 4 (0): 2058-2065

Goretta, K.C., N. Chen, F. Gutierrez-Mora, J.L. Routbort, G.C. Lukey and J.S.J. van Deventer. 2004. Solid-Particle Erosion of a Geopolymer Containing Fly Ash and Blast-Furnace Slag. **Wear** 256 (7-8): 714-719.

_____, F. Gutierrez-Mora, D. Singh, J.L. Routbort, G.C. Lukey and J.S.J. van Deventer. 2007. Erosion of Geopolymers Made from Industrial Waste. **Journal of Materials Science** 42 (9): 3066-3072.

Graef, M.D. and M.E. McHenry. 2007. **Struture of Materials: An Introduction to Crystallography, Diffraction and Symmetry**. First Edition. Cambridge University Press, United Kingdom.

Hajimohammadi, A., J.L. Provis and J.S.J. van Deventer. 2010. Effect of Alumina Release Rate on the Mechanism of Geopolymer Gel Formation. **Chemistry of Materials** 22 (18): 5199-5208.

_____, _____ and _____. 2011. The Effect of Silica Availability on the Mechanism of Geopolymerisation. **Cement and Concrete Research** 41 (3): 210-216.

Hanjitsuwan, S., P. Chindaprasirt and K. Pimraksa. 2011. Electrical Conductivity and Dielectric Property of Fly Ash Geopolymer Pastes. **International Journal of Minerals Metallurgy and Materials** 18 (1): 94-99.

Housecroft, C. E. and E. C. Constable. 2006. **Chemistry**. Thrid Edition. Prentice hall, United Kingdom.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2005. **IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**

Jaarsveld, J.G.S., J.S.J. van Deventer and G.C. Lukey. 2002. The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash- and Kaolinite-Based Geopolymers. **Chemical Engineering Journal** 89 (1-3): 63-73.

_____, _____ and _____. 2003. The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-Based Geopolymers. **Materials Letters** 57 (7): 1272-1280.

Jimenez, A. F., I. G. Lodeiro and A. Palomo. 2007. Durability of Alkali-Activated Fly Ash Cementitious Materials. **Journal of Materials Science** 42 (9): 3055-3065.

_____ and A. Palomo. 2003. Characterisation of Fly Ashes. Potential Reactivity as Alkaline Cements. **Fuel** 82 (18): 2259-2265.

- Jimenez, A. F. and A. Palomo. 2005a. Mid-Infrared Spectroscopic Studies of Alkali-Activated Fly Ash Structure. **Microporous and Mesoporous Materials** 86 (1-3): 207-214.
- _____ and _____. 2005b. Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator. **Cement and Concrete Research** 35 (10): 1984-1992.
- _____ and _____. 2007. Factors Affecting Early Compressive Strength of Alkali Activated Fly Ash (OPC-Free) Concrete. **Materiales De Construcción** 57 (287): 7-22.
- _____, _____ and M. Criado. 2005. Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: A Descriptive Model. **Cement and Concrete Research** 35 (6): 1204-1209.
- _____, _____ and _____. 2006a. Alkali Activated Fly Ash Binders. A Comparative Study between Sodium and Potassium Activators. **Materiales De Construcción** 56 (281): 51-65.
- _____, _____ and _____. 2008a. New Cementitious Materials Based on Alkali-Activated Fly Ash: Performance at High Temperatures. **Journal of the American Ceramic Society** 91 (10): 3308-3314.
- _____, _____ and T. Vazquez. 2008b. Alkaline Activation of Blends of Metakaolin and Calcium Aluminate. **Journal of the American Ceramic Society** 91 (4): 1231-1236.
- _____, A. F., J.Y. Pastor, A. Martin and A. Palomo. 2010. High-Temperature Resistance in Alkali-Activated Cement. **Journal of the American Ceramic Society** 93 (10): 3411-3417.

Jimenez, A. F., A.G. de la Torre, A. Palomo, G. Lopez-Olmo, M.M. Alonso and M.A.G. Aranda.

2006b. Quantitative Determination of Phases in the Alkaline Activation of Fly Ash. Part II: Degree of Reaction. **Fuel** 85 (14-15): 1960-1969.

_____, T. Vazquez and A. Palomo. 2011. Effect of Sodium Silicate on Calcium Aluminate Cement Hydration in Highly Alkaline Media: A Microstructural Characterization. **Journal of the American Ceramic Society** 94 (4): 1297-1303.

Kamhangrittirong, P., P. Suwanvitaya and P. Chindaprasirt. 2006. The Effect of Fly Ash Content and Sodium Hydroxide Molarity on Geopolymer, pp. 213-218. *In* **International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer**. Khon Kaen University, Khon Kaen.

Khater, H. M. 2012. Effect of Calcium on Geopolymerization of Aluminosilicate Wastes. **Journal of Materials in Civil Engineering** 24 (1): 92-101.

Kovalchuk, G., A. Fernandez-Jimenez and A. Palomo. 2007. Alkali-Activated Fly Ash: Effect of Thermal Curing Conditions on Mechanical and Microstructural Development - Part II. **Fuel** 86 (3): 315-322.

_____, _____ and _____. 2008. Alkali-Activated Fly Ash. Relationship between Mechanical Strength Gains and Initial Ash Chemistry. **Materiales De Construcción** 58 (291): 35-52.

Lee, W.K.W., and J.S.J. van Deventer. 2002a. Structural Reorganisation of Class F Fly Ash in Alkaline Silicate Solutions. **Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects** 211 (1): 49-66.

_____ and _____. 2002b. Effects of Anions on the Formation of Aluminosilicate Gel in Geopolymers. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 41 (18): 4550-4558.

- Lee, W.K.W., and J.S.J. van Deventer. 2003. Use of Infrared Spectroscopy to Study Geopolymerization of Heterogeneous Amorphous Aluminosilicates. **Langmuir** 19 (21): 8726-8734.
- Lloyd, R.R., J.L. Provis and J.S.J. van Deventer. 2009a. Microscopy and Microanalysis of Inorganic Polymer Cements. 1: Remnant Fly Ash Particles. **Journal of Materials Science** 44 (2): 608-619.
- _____, _____ and _____. 2009b. Microscopy and Microanalysis of Inorganic Polymer Cements. 2: The Gel Binder. **Journal of Materials Science** 44 (2): 620-631.
- Lodeiro, I. G., A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo and D.E. Macphee. 2010. Effect of Calcium Additions on Na-S-H Cementitious Gels. **Journal of the American Ceramic Society** 93 (7): 1934-1940.
- _____, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez and D.E. Macphee. 2011. Compatibility Studies between Na-S-H and Ca-S-H Gels. Study in the Ternary Diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. **Cement and Concrete Research** 41 (9): 923-931.
- Miranda, J.M., A. Fernandez-Jimenez, J.A. Gonzalez and A. Palomo. 2005. Corrosion Resistance in Activated Fly Ash Mortars. **Cement and Concrete Research** 35 (6): 1210-1217.
- Nazari, A. and S. Riahi. 2012. Experimental investigations and ANFIS prediction of water absorption of geopolymers produced by waste ashes. **Journal of Non-Crystalline Solids** 358 (1): 40-46.
- Nuruddin, M.F., S. Demie and N. Shafiq. 2011. Effect of Mix Composition on Workability and Compressive Strength of Self-Compacting Geopolymer Concrete. **Canadian Journal of Civil Engineering** 38 (11): 1196-1203.

- Palomo, A., R.F.G. Banfill, A. Fernandez-Jimenez and D.S. Swift. 2005. Properties of Alkali-Activated Fly Ashes Determined from Rheological Measurements. **Advances in Cement Research** 17 (4): 143-151.
- Palomo, A., A. F. Jimenez and M. Criado. 2004. "Geopolymers": Same Basic Chemistry, Different Microstructures. **Materiales De Construcción** 54 (275): 77-91.
- _____, M.W. Grutzeck and M.T. Blanco. 1999. Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future. **Cement and Concrete Research** 29 (8): 1323-1329.
- _____ and M. Palacios. 2003. Alkali-Activated Cementitious Materials: Alternative Matrices for the Immobilisation of Hazardous Wastes - Part II. Stabilisation of Chromium and Lead. **Cement and Concrete Research** 33 (2): 289-295.
- Pavia, D.L., G.M. Lampman, G.S. Kriz and J.R. Vyvyan. 2009. **Introduction to Spectroscopy**. Fourth Edition. Brooks/Cole, United States of America.
- Phair, J.W., and J.S.J. van Deventer. 2001. Effect of Silicate Activator pH on the Leaching and Material Characteristics of Waste-Based Inorganic Polymers. **Minerals Engineering** 14 (3): 289-304.
- _____ and _____. 2002a. Characterization of Fly-Ash-Based Geopolymeric Binders Activated with Sodium Aluminate. **Industrial & Engineering Chemistry Research** (17): 4242-4251.
- _____ and _____. 2002b. Effect of the Silicate Activator pH on the Microstructural Characteristics of Waste-Based Geopolymers. **International Journal of Mineral Processing** 66 (1-4): 121-143.

- Philip, G. M. and A. R. Charlie. 1985. **Potential Applications of Alkali-Activated Alumino-Silicate Binders in Military Operations**. Department of the Army, Washington. อ้างถึง
- Purdon, A. O. 1940. The Action of Alkalis on Blast-Furnace Slag. **Journal of the Society of Chemical Industry** 59(9): 191-202.
- Provis, J.L., P. Duxson and J.S.J. van Deventer. 2010. The Role of Particle Technology in Developing Sustainable Construction Materials. **Advanced Powder Technology** 21 (1): 2-7.
- _____, A. Kilcullen, P. Duxson, D.G. Brice and J.S.J. van Deventer. 2012. Stabilization of Low-Modulus Sodium Silicate Solutions by Alkali Substitution. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 51 (5): 2483-2486.
- _____, V. Rose, R.P. Winarski and J.S.J. van Deventer. 2011. Hard X-Ray Nanotomography of Amorphous Aluminosilicate Cements. **Scripta Materialia** 65 (4): 316-319.
- _____, C.Z. Yong, P. Duxson and J.S.J. van Deventer. 2009. Correlating Mechanical and Thermal Properties of Sodium Silicate-Fly Ash Geopolymers. **Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects** 336 (1-3): 57-63.
- Qiao, X.C., M. Tyrer, C.S. Poon and C.R. Cheeseman. 2008. Characterization of Alkali-Activated Thermally Treated Incinerator Bottom Ash. **Waste Management** 28 (10): 1955-1962.
- Rattanasak, U. and P. Chindaprasirt. 2009. Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. **Minerals Engineering** 22 (12): 1073-1078.
- _____, K. Pankhet and P. Chindaprasirt. 2011. Effect of Chemical Admixtures on Properties of High-Calcium Fly Ash Geopolymer. **International Journal of Minerals Metallurgy and Materials** 18 (3): 364-369.

Rees, C.A., J.L. Provis, G.C. Lukey and J.S.J. van Deventer. 2007a. In Situ Atr-Ftir Study of the Early Stages of Fly Ash Geopolymer Gel Formation. **Langmuir** 23 (17): 9076-9082.

_____, _____, _____ and _____. 2007b. Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Analysis of Fly Ash Geopolymer Gel Aging. **Langmuir** 23 (15): 8170-8179.

Riditirud, C., P. Chindaprasirt and K. Pimraksa. 2012. Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials** 18 (1): 100-104.

Sata, V., A. Sathonsaowaphak and P. Chindaprasirt. 2012. Resistance of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar to Sulfate and Sulfuric Acid Attack. **Cement and Concrete Composites** 34 (5): 700-708.

Sathonsalawaphak, A., P. Chindaprasirt and K. Pimraksa. 2009. Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar. **Journal of Hazardous Materials** 168 (1): 44-50.

Shanthakumar, S., D.N. Singh and R.C. Phadke. 2008. Flue gas conditioning for reducing suspended particulate matter from thermal power stations. **Progress in Energy and Combustion Science** 34 (6): 685-695.

Shi, C.J., A.F. Jimenez and A. Palomo. 2011. New Cements for the 21st Century: The Pursuit of an Alternative to Portland Cement. **Cement and Concrete Research** 41 (7): 750-763.

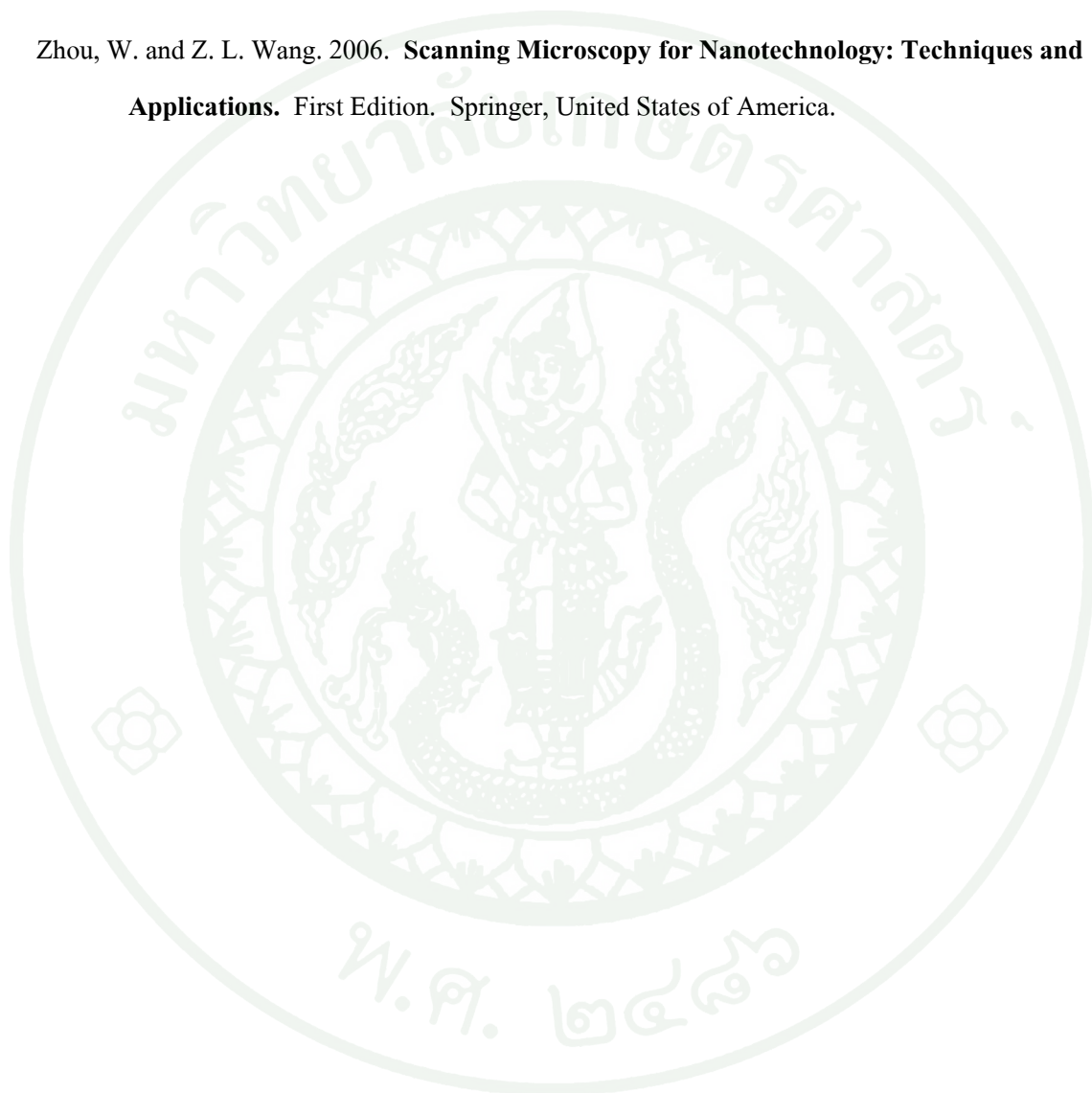
_____, P. V. Krivenko and D. Roy. 2006. **Alkali-Activated Cements and Concretes**. First Edition. Taylor & Francis, New York.

- Skoog, D.A., F.J. Holler and S.R. Crouch. 2007. **Principles of Instrumental Analysis**. Sixth Edition. Thomson Higher Education, Canada
- Sindhunata, J.L. Provis, G.C. Lukey, H. Xu and J.S.J. van Deventer. 2008. Structural Evolution of Fly Ash Based Geopolymers in Alkaline Environments. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 47 (9): 2991-2999.
- _____, J.S.J. van Deventer, G.C. Lukey and H. Xu. 2006. Effect of Curing Temperature and Silicate Concentration on Fly-Ash-Based Geopolymerization. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 45 (10): 3559-3568.
- Sofi, M., J.S.J. van Deventer, P.A. Mendis and G.C. Lukey. 2007. Engineering Properties of Inorganic Polymer Concretes (IPCs). **Cement and Concrete Research** 37 (2): 251-257.
- Somna, K., C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul and P. Chindaprasirt. 2011. NaOH-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. **Fuel** 90 (6): 2118-2124.
- Songpiriyakij, S., T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt. 2010. Compressive Strength and Degree of Reaction of Biomass- and Fly Ash-Based Geopolymer. **Construction and Building Materials** 24 (3): 236-240.
- Temuujin, J., A. V. Riessen and R. Williams. 2009. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. **Journal of Hazardous Materials** 167 (1-3): 82-88.
- Tho-in, T., V. Sata, P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul. 2012. Pervious High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. **Construction and Building Materials** 30 (0): 366-371.

- Winnefeld, F., A. Leemann, M. Lucuk, P. Svoboda and M. Neuroth. 2010. Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials. **Construction and Building Materials** 24 (6): 1086-1093.
- Wongpa, J., K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul and P. Chindapasirt. 2010. Compressive Strength, Modulus of Elasticity, and Water Permeability of Inorganic Polymer Concrete. **Materials & Design** 31 (10): 4748-4754.
- Xie, Z. H., and Y. P. Xi. 2001. Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. **Cement and Concrete Research** 31 (9): 1245-1249.
- Xu, H. and J.S.J. Van Deventer. 2000. The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. **International Journal of Mineral Processing** 59 (3): 247-266.
- _____. and _____. 2002a. Geopolymerisation of Multiple Minerals. **Minerals Engineering** 15 (12): 1131-1139.
- Yang, K. H., J. K. Song, A. F. Ashour and E. T. Lee. 2008. Properties of cementless mortars activated by sodium silicate. **Construction and Building Materials** 22 (9): 1981-1989.
- Yip, C.K., G.C. Lukey, J.L. Provis and J.S.J. van Deventer. 2008a. Effect of Calcium Silicate Sources on Geopolymerisation. **Cement and Concrete Research** 38 (4): 554-564.
- _____, _____ and J.S.J. van Deventer. 2005. The Coexistence of Geopolymeric Gel and Calcium Silicate Hydrate at the Early Stage of Alkaline Activation. **Cement and Concrete Research** 35 (9): 1688-1697.
- _____, J.L. Provis, G.C. Lukey and J.S.J. van Deventer. 2008b. Carbonate Mineral Addition to Metakaolin-Based Geopolymers. **Cement & Concrete Composites** 30 (10): 979-985.

Zhang, L., S. Ahmari and J. Zhang. 2011. Synthesis and Characterization of Fly Ash Modified Mine Tailings-Based Geopolymers. **Construction and Building Materials** 25 (9): 3773-3781.

Zhou, W. and Z. L. Wang. 2006. **Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications**. First Edition. Springer, United States of America.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
รายละเอียดการทดสอบวัสดุ

แบบ วศ.1



รายงานการทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง

เครื่องหมาย / ตรา

หมายเลขปฏิบัติการ

ถั่วลันเตา

YU.464

ผลการทดสอบ

1. คุณสมบัติทางเคมี

ซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ	35.3
อะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ	21.5
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ	14.2
แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ	18.7
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ	3.0
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ	2.5
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ร้อยละ	2.0
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ	0.4

2. คุณสมบัติทางกายภาพ

ความถี่จำเพาะ	2.3
ค่าที่คำนวณแรงขนาด 325 เมช ร้อยละ	33.6

ชื่อผู้ให้บริการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ที่อยู่ผู้ให้บริการ 50 ถ.พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900
 ลักษณะตัวอย่าง ผงละเอียด สีน้ำตาลเข้ม
 วันที่ทดสอบ 18 สิงหาคม – 6 ตุลาคม 2549
 วิธีทดสอบ ASTM C 311
 หมายเหตุ ค่าธรรมเนียมการวิเคราะห์ 5,300 บาท (ห้าพันสามร้อยบาทถ้วน)

ผู้รับรอง

ผู้รายงาน

(นางสาว อ. น. ส. อ. น. ส.)
 (นางวรรณมา ต.แสงจันทร์)

(นางสาวอรรณพ ไพบูรณ์วัฒน์ผล)
 (นางสาวอรรณพ ไพบูรณ์วัฒน์ผล)

นักวิทยาศาสตร์ 8ว.

นักวิทยาศาสตร์ 6ว.

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
 ห้ามคัดลอกไปรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
 ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

หน้า 2/2



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี King Mongkut's University of Technology Thonburi

ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ใบแจ้งผลการทดสอบ

หมายเลข : 0181-51-2
วันที่รายงานผล : 21 กรกฎาคม 2551
แหล่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วันที่รับตัวอย่าง : 9 กรกฎาคม 2551
ชนิดตัวอย่าง : Fly Ash
จำนวน : 1 ตัวอย่าง
เครื่องมือที่ใช้ : Particle Size Analysis

ผลการวิเคราะห์
Wet mode

ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง 50% (mu)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (mu)
Cemt 3	21.39	35.50

นางเพ็ญทิมล เด็กชีน
ผู้ทำการวิเคราะห์

(รศ.ดร. เพ็ญพิศ นุชารอม)

อาจารย์ผู้ควบคุมและตรวจสอบคุณภาพ

รายงานนี้ - รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ตรวจวิเคราะห์ ทดสอบเท่านั้น
- ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐาน ฯ

คณะวิทยาศาสตร์ โทร. 0-2470-8907 โทรสาร 0-2470-8900

91 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทรศัพท์ (662) 470-8000, 427-0039 โทรสาร (662) 427-9860
91 Pracha-utis Rd., Bangmod, Toong-kru, Bangkok 10140 Thailand Tel. (662) 470-8000, 427-0039 Fax. (662) 427-9860



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1180 Liquid

Range : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref : Cemt3
 Type produit :
 Client :
 Comments :
 Liquid :
 Dispersing agent :
 Operator : Scientist
 Company :
 Location :
 Date : 30/06/2008 Time : 18:48:53
 Index meas. : 2410 (2409)

Ultrasounds : 60 s
 Concentration : 55
 Diameter at 10% : 0.90 mu
 Diameter at 50% : 21.39 mu
 Diameter at 90% : 94.36 mu
 Mean diameter : 35.50 mu
 Fraunhofer
 Density/Factor :
 Specific surface :
 Automatic dilution : No / No
 Meas./Rins. : 60/60/4
 SOP : Standard L

Standards classes

in volume / undersize

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.40	0.95	2.59	3.93	5.40	6.93	8.16	9.03	9.58
q3	0.00	0.06	0.14	0.21	0.30	0.46	0.62	0.61	0.51	0.37
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	10.01	10.41	10.83	11.25	11.69	12.13	13.01	13.88	14.73	15.59
q3	0.33	0.34	0.40	0.43	0.49	0.53	0.59	0.67	0.73	0.81
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	16.42	17.22	18.71	21.83	24.39	26.70	27.80	28.89	29.96	31.02
q3	0.86	0.90	0.94	0.98	1.03	1.14	1.24	1.32	1.40	1.48
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	32.07	33.10	35.07	36.90	38.57	40.09	41.48	42.78	43.99	45.15
q3	1.56	1.62	1.68	1.73	1.73	1.71	1.69	1.70	1.69	1.72
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	46.27	47.36	48.45	50.65	54.10	57.54	61.68	65.18	66.70	68.09
q3	1.76	1.82	1.91	2.08	2.43	2.73	2.79	2.68	2.53	2.44
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	71.12	73.72	75.17	76.55	79.61	82.78	84.24	85.93	87.48	88.89
q3	2.32	2.22	2.24	2.26	2.34	2.39	2.40	2.36	2.30	2.22
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	90.16	91.31	92.56	93.66	95.64	96.26	97.30	97.72	98.09	98.70
q3	2.11	2.02	1.93	1.80	1.62	1.42	1.26	1.08	0.98	0.85
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	99.14	99.46	99.67	99.82	99.92	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.65	0.50	0.35	0.26	0.15	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
x	600.0	700.0	800.0	900.0	1000.0	1100.0	1200.0	1300.0	1400.0	1500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	1600.0	1700.0	1800.0	1900.0	2000.0	2100.0	2200.0	2300.0	2400.0	2500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diameter / mu Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %



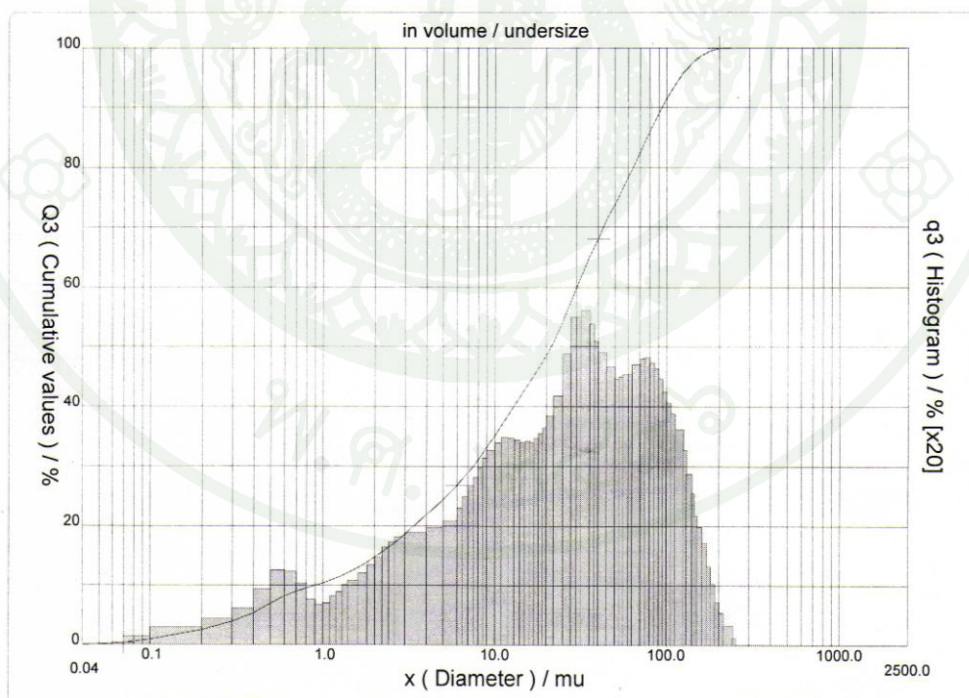
PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1180 Liquid

Range : 0.04 μ m - 2500.00 μ m / 100 Classes

Sample Ref : Cemt3
 Type produit :
 Client :
 Comments :
 Liquid :
 Dispersing agent :
 Operator : Scientist
 Company :
 Location :
 Date : 30/06/2008 Time : 18:48:53
 Index meas. : 2410 (2409)

Ultrasounds : 60 s
 Concentration : 55
 Diameter at 10% : 0.90 μ m
 Diameter at 50% : 21.39 μ m
 Diameter at 90% : 94.36 μ m
 Mean diameter : 35.50 μ m
 Fraunhofer
 Density/Factor :
 Specific surface :
 Automatic dilution : No / No
 Meas./Rins. : 60/60/4
 SOP : Standard L



Serial nb : 566

Ref : 2.r110.m0.66A1818/5.00/2410*/m20 12.40.20.1Fh.20.40.20.Bh/Q-0.0.0.0/300.0.15.g60.2.16.10.1.10.P7200.27.80.P29.0/V 4.0/635



ภาคผนวก ข

รายละเอียดการคำนวณอัตราส่วนโดยโมลภายในส่วนผสม

ตารางผนวกที่ ข1 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการชะละลายของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60

ส่วนผสม	Ms	H ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/M ₂ O	H ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/CaO
60-08-1	0.60	3.37	9.82	9.38	5.93
60-08-2	0.70	3.15	9.62	8.77	5.54
60-08-3	0.80	2.94	9.40	8.19	5.18
60-08-4	0.90	2.74	9.18	7.64	4.83
60-08-5	1.00	2.55	8.95	7.11	4.50
60-08-6	1.10	2.38	8.71	6.62	4.19
60-08-7	1.20	2.21	8.46	6.15	3.89
60-08-8	1.30	2.04	8.20	5.70	3.60
60-08-9	1.40	1.89	7.93	5.27	3.33
60-10-1	0.60	3.00	8.07	8.36	5.29
60-10-2	0.70	2.78	7.89	7.76	4.90
60-10-3	0.80	2.58	7.71	7.19	4.55
60-10-4	0.90	2.39	7.52	6.66	4.21
60-10-5	1.00	2.21	7.33	6.16	3.90
60-10-6	1.10	2.04	7.13	5.69	3.60
60-10-7	1.20	1.89	6.92	5.26	3.32
60-10-8	1.30	1.74	6.70	4.85	3.06
60-10-9	1.40	1.60	6.47	4.46	2.82
60-12-1	0.60	2.70	6.83	7.54	4.77
60-12-2	0.70	2.49	6.67	6.94	4.39
60-12-3	0.80	2.30	6.52	6.39	4.04
60-12-4	0.90	2.11	6.36	5.89	3.72
60-12-5	1.00	1.95	6.19	5.42	3.43
60-12-6	1.10	1.79	6.01	4.99	3.15
60-12-7	1.20	1.65	5.83	4.58	2.90
60-12-8	1.30	1.51	5.64	4.21	2.66
60-12-9	1.40	1.38	5.45	3.85	2.44

ตารางผนวกที่ ข2 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการชะละลายของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65

ส่วนผสม	Ms	H ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/M ₂ O	H ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/CaO
65-08-1	0.60	2.72	9.16	7.58	4.79
65-08-2	0.70	2.54	8.94	7.08	4.48
65-08-3	0.80	2.37	8.71	6.61	4.18
65-08-4	0.90	2.21	8.47	6.17	3.90
65-08-5	1.00	2.06	8.23	5.75	3.63
65-08-6	1.10	1.92	7.98	5.35	3.38
65-08-7	1.20	1.78	7.72	4.96	3.14
65-08-8	1.30	1.65	7.46	4.60	2.91
65-08-9	1.40	1.53	7.18	4.26	2.69
65-10-1	0.60	2.42	7.56	6.76	4.27
65-10-2	0.70	2.25	7.37	6.26	3.96
65-10-3	0.80	2.08	7.18	5.81	3.67
65-10-4	0.90	1.93	6.98	5.38	3.40
65-10-5	1.00	1.79	6.77	4.98	3.15
65-10-6	1.10	1.65	6.56	4.60	2.91
65-10-7	1.20	1.52	6.34	4.25	2.69
65-10-8	1.30	1.40	6.11	3.91	2.47
65-10-9	1.40	1.29	5.88	3.60	2.28
65-12-1	0.60	2.18	6.42	6.09	3.85
65-12-2	0.70	2.01	6.26	5.61	3.55
65-12-3	0.80	1.85	6.09	5.16	3.27
65-12-4	0.90	1.71	5.91	4.76	3.01
65-12-5	1.00	1.57	5.73	4.38	2.77
65-12-6	1.10	1.45	5.55	4.03	2.55
65-12-7	1.20	1.33	5.36	3.70	2.34
65-12-8	1.30	1.22	5.16	3.40	2.15
65-12-9	1.40	1.12	4.96	3.11	1.97

ตารางผนวกที่ ข3 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการชะละลายของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70

ส่วนผสม	Ms	H ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/M ₂ O	H ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/CaO
70-08-1	0.60	2.16	8.40	6.03	3.81
70-08-2	0.70	2.02	8.16	5.64	3.56
70-08-3	0.80	1.89	7.93	5.26	3.33
70-08-4	0.90	1.76	7.68	4.91	3.10
70-08-5	1.00	1.64	7.43	4.57	2.89
70-08-6	1.10	1.53	7.18	4.25	2.69
70-08-7	1.20	1.42	6.92	3.95	2.50
70-08-8	1.30	1.31	6.65	3.66	2.32
70-08-9	1.40	1.22	6.37	3.39	2.14
70-10-1	0.60	1.93	6.98	5.38	3.40
70-10-2	0.70	1.79	6.77	4.99	3.15
70-10-3	0.80	1.66	6.57	4.62	2.92
70-10-4	0.90	1.54	6.36	4.28	2.71
70-10-5	1.00	1.42	6.14	3.96	2.50
70-10-6	1.10	1.31	5.92	3.66	2.32
70-10-7	1.20	1.21	5.70	3.38	2.14
70-10-8	1.30	1.12	5.47	3.11	1.97
70-10-9	1.40	1.03	5.24	2.86	1.81
70-12-1	0.60	1.74	5.95	4.84	3.06
70-12-2	0.70	1.60	5.77	4.46	2.82
70-12-3	0.80	1.48	5.59	4.11	2.60
70-12-4	0.90	1.36	5.41	3.79	2.39
70-12-5	1.00	1.25	5.22	3.49	2.20
70-12-6	1.10	1.15	5.03	3.21	2.03
70-12-7	1.20	1.06	4.83	2.95	1.86
70-12-8	1.30	0.97	4.64	2.70	1.71
70-12-9	1.40	0.89	4.43	2.48	1.57

ตารางผนวกที่ ๔ อัตราส่วนของน้ำในช่วงการผสมรวมของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60

ส่วนผสม	Ms	H ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/M ₂ O	H ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/CaO
60-08-1	0.60	3.95	11.68	12.95	8.19
60-08-2	0.70	3.84	11.80	12.82	8.11
60-08-3	0.80	3.73	11.92	12.70	8.03
60-08-4	0.90	3.63	12.03	12.58	7.95
60-08-5	1.00	3.54	12.15	12.46	7.88
60-08-6	1.10	3.46	12.26	12.36	7.81
60-08-7	1.20	3.38	12.38	12.25	7.75
60-08-8	1.30	3.31	12.49	12.16	7.69
60-08-9	1.40	3.24	12.60	12.06	7.63
60-10-1	0.60	3.71	10.23	12.38	7.83
60-10-2	0.70	3.60	10.42	12.28	7.76
60-10-3	0.80	3.51	10.61	12.18	7.70
60-10-4	0.90	3.42	10.80	12.08	7.64
60-10-5	1.00	3.34	10.98	12.00	7.59
60-10-6	1.10	3.27	11.16	11.92	7.54
60-10-7	1.20	3.21	11.34	11.84	7.49
60-10-8	1.30	3.15	11.51	11.77	7.44
60-10-9	1.40	3.10	11.68	11.70	7.40
60-12-1	0.60	3.52	9.21	11.92	7.54
60-12-2	0.70	3.42	9.46	11.84	7.49
60-12-3	0.80	3.34	9.70	11.77	7.44
60-12-4	0.90	3.26	9.94	11.70	7.40
60-12-5	1.00	3.20	10.17	11.64	7.36
60-12-6	1.10	3.14	10.39	11.58	7.32
60-12-7	1.20	3.08	10.62	11.53	7.29
60-12-8	1.30	3.03	10.83	11.48	7.26
60-12-9	1.40	2.99	11.05	11.43	7.23

ตารางผนวกที่ ข5 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการผสมรวมของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65

ส่วนผสม	Ms	H ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/M ₂ O	H ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/CaO
65-08-1	0.60	3.29	10.99	10.46	6.62
65-08-2	0.70	3.20	11.09	10.36	6.55
65-08-3	0.80	3.12	11.19	10.25	6.48
65-08-4	0.90	3.05	11.28	10.16	6.42
65-08-5	1.00	2.98	11.38	10.07	6.37
65-08-6	1.10	2.92	11.47	9.98	6.31
65-08-7	1.20	2.86	11.56	9.90	6.26
65-08-8	1.30	2.80	11.65	9.82	6.21
65-08-9	1.40	2.75	11.74	9.74	6.16
65-10-1	0.60	3.10	9.67	10.00	6.32
65-10-2	0.70	3.02	9.84	9.92	6.27
65-10-3	0.80	2.95	10.00	9.84	6.22
65-10-4	0.90	2.88	10.17	9.76	6.17
65-10-5	1.00	2.82	10.32	9.69	6.13
65-10-6	1.10	2.77	10.48	9.62	6.09
65-10-7	1.20	2.72	10.63	9.56	6.05
65-10-8	1.30	2.68	10.78	9.51	6.01
65-10-9	1.40	2.63	10.92	9.45	5.98
65-12-1	0.60	2.94	8.74	9.62	6.09
65-12-2	0.70	2.87	8.96	9.56	6.05
65-12-3	0.80	2.81	9.17	9.50	6.01
65-12-4	0.90	2.75	9.38	9.45	5.98
65-12-5	1.00	2.71	9.58	9.40	5.94
65-12-6	1.10	2.66	9.78	9.35	5.91
65-12-7	1.20	2.62	9.98	9.31	5.89
65-12-8	1.30	2.58	10.17	9.27	5.86
65-12-9	1.40	2.55	10.35	9.23	5.84

ตารางผนวกที่ ข6 อัตราส่วนของน้ำในช่วงการผสมรวมของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70

ส่วนผสม	Ms	H ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/M ₂ O	H ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/CaO
70-08-1	0.60	2.69	10.19	8.33	5.27
70-08-2	0.70	2.62	10.27	8.24	5.21
70-08-3	0.80	2.56	10.34	8.16	5.16
70-08-4	0.90	2.51	10.42	8.08	5.11
70-08-5	1.00	2.46	10.49	8.01	5.07
70-08-6	1.10	2.41	10.56	7.94	5.02
70-08-7	1.20	2.37	10.63	7.88	4.98
70-08-8	1.30	2.33	10.70	7.82	4.94
70-08-9	1.40	2.29	10.77	7.76	4.90
70-10-1	0.60	2.53	9.02	7.96	5.03
70-10-2	0.70	2.48	9.16	7.89	4.99
70-10-3	0.80	2.43	9.30	7.83	4.95
70-10-4	0.90	2.38	9.43	7.77	4.91
70-10-5	1.00	2.34	9.56	7.71	4.88
70-10-6	1.10	2.30	9.69	7.66	4.84
70-10-7	1.20	2.26	9.81	7.61	4.81
70-10-8	1.30	2.23	9.93	7.57	4.78
70-10-9	1.40	2.20	10.05	7.52	4.76
70-12-1	0.60	2.41	8.19	7.66	4.84
70-12-2	0.70	2.36	8.37	7.61	4.81
70-12-3	0.80	2.32	8.56	7.56	4.78
70-12-4	0.90	2.28	8.73	7.52	4.76
70-12-5	1.00	2.24	8.90	7.48	4.73
70-12-6	1.10	2.21	9.07	7.44	4.71
70-12-7	1.20	2.18	9.24	7.41	4.69
70-12-8	1.30	2.15	9.40	7.38	4.67
70-12-9	1.40	2.13	9.55	7.35	4.65

ตารางผนวกที่ ข7 อัตราส่วนออกไซด์หลักของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60

ส่วนผสม	Ms	M ₂ O/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/M ₂ O	M ₂ O/Al ₂ O ₃
60-08-1	0.60	0.34	3.28	11.68	1.11
60-08-2	0.70	0.33	3.34	11.80	1.09
60-08-3	0.80	0.31	3.40	11.92	1.07
60-08-4	0.90	0.30	3.46	12.03	1.04
60-08-5	1.00	0.29	3.52	12.15	1.03
60-08-6	1.10	0.28	3.57	12.26	1.01
60-08-7	1.20	0.27	3.62	12.38	0.99
60-08-8	1.30	0.27	3.67	12.49	0.97
60-08-9	1.40	0.26	3.72	12.60	0.96
60-10-1	0.60	0.36	3.34	10.23	1.21
60-10-2	0.70	0.35	3.41	10.42	1.18
60-10-3	0.80	0.33	3.47	10.61	1.15
60-10-4	0.90	0.32	3.53	10.80	1.12
60-10-5	1.00	0.30	3.59	10.98	1.09
60-10-6	1.10	0.29	3.64	11.16	1.07
60-10-7	1.20	0.28	3.69	11.34	1.04
60-10-8	1.30	0.27	3.74	11.51	1.02
60-10-9	1.40	0.27	3.78	11.68	1.00
60-12-1	0.60	0.38	3.39	9.21	1.29
60-12-2	0.70	0.36	3.46	9.46	1.25
60-12-3	0.80	0.34	3.52	9.70	1.21
60-12-4	0.90	0.33	3.58	9.94	1.18
60-12-5	1.00	0.31	3.64	10.17	1.14
60-12-6	1.10	0.30	3.69	10.39	1.11
60-12-7	1.20	0.29	3.74	10.62	1.09
60-12-8	1.30	0.28	3.78	10.83	1.06
60-12-9	1.40	0.27	3.83	11.05	1.03

ตารางผนวกที่ ข8 อัตราส่วนออกไซด์หลักของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65

ส่วนผสม	Ms	M ₂ O/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/M ₂ O	M ₂ O/Al ₂ O ₃
65-08-1	0.60	0.30	3.18	10.99	0.95
65-08-2	0.70	0.29	3.24	11.09	0.93
65-08-3	0.80	0.28	3.29	11.19	0.92
65-08-4	0.90	0.27	3.33	11.28	0.90
65-08-5	1.00	0.26	3.38	11.38	0.88
65-08-6	1.10	0.25	3.42	11.47	0.87
65-08-7	1.20	0.25	3.46	11.56	0.86
65-08-8	1.30	0.24	3.50	11.65	0.84
65-08-9	1.40	0.23	3.54	11.74	0.83
65-10-1	0.60	0.32	3.23	9.67	1.03
65-10-2	0.70	0.31	3.29	9.84	1.01
65-10-3	0.80	0.29	3.34	10.00	0.98
65-10-4	0.90	0.28	3.39	10.17	0.96
65-10-5	1.00	0.27	3.43	10.32	0.94
65-10-6	1.10	0.26	3.48	10.48	0.92
65-10-7	1.20	0.26	3.52	10.63	0.90
65-10-8	1.30	0.25	3.55	10.78	0.88
65-10-9	1.40	0.24	3.59	10.92	0.87
65-12-1	0.60	0.34	3.27	8.74	1.10
65-12-2	0.70	0.32	3.33	8.96	1.07
65-12-3	0.80	0.31	3.38	9.17	1.04
65-12-4	0.90	0.29	3.43	9.38	1.01
65-12-5	1.00	0.28	3.47	9.58	0.98
65-12-6	1.10	0.27	3.52	9.78	0.96
65-12-7	1.20	0.26	3.56	9.98	0.93
65-12-8	1.30	0.25	3.59	10.17	0.91
65-12-9	1.40	0.25	3.63	10.35	0.89

ตารางผนวกที่ ข9 อัตราส่วนออกไซด์หลักของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70

ส่วนผสม	Ms	M ₂ O/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/M ₂ O	M ₂ O/Al ₂ O ₃
70-08-1	0.60	0.26	3.10	10.19	0.82
70-08-2	0.70	0.26	3.14	10.27	0.80
70-08-3	0.80	0.25	3.18	10.34	0.79
70-08-4	0.90	0.24	3.22	10.42	0.78
70-08-5	1.00	0.23	3.26	10.49	0.76
70-08-6	1.10	0.23	3.29	10.56	0.75
70-08-7	1.20	0.22	3.32	10.63	0.74
70-08-8	1.30	0.22	3.36	10.70	0.73
70-08-9	1.40	0.21	3.39	10.77	0.72
70-10-1	0.60	0.28	3.14	9.02	0.88
70-10-2	0.70	0.27	3.18	9.16	0.86
70-10-3	0.80	0.26	3.23	9.30	0.84
70-10-4	0.90	0.25	3.26	9.43	0.82
70-10-5	1.00	0.24	3.30	9.56	0.81
70-10-6	1.10	0.24	3.33	9.69	0.79
70-10-7	1.20	0.23	3.37	9.81	0.78
70-10-8	1.30	0.22	3.40	9.93	0.76
70-10-9	1.40	0.22	3.42	10.05	0.75
70-12-1	0.60	0.29	3.17	8.19	0.94
70-12-2	0.70	0.28	3.22	8.37	0.91
70-12-3	0.80	0.27	3.26	8.56	0.88
70-12-4	0.90	0.26	3.30	8.73	0.86
70-12-5	1.00	0.25	3.33	8.90	0.84
70-12-6	1.10	0.24	3.37	9.07	0.82
70-12-7	1.20	0.24	3.40	9.24	0.80
70-12-8	1.30	0.23	3.43	9.40	0.79
70-12-9	1.40	0.223	3.45	9.55	0.77

ตารางผนวกที่ ข10 อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60

ส่วนผสม	Ms	CaO/SiO ₂	CaO/Al ₂ O ₃	CaO/M ₂ O
60-08-1	0.60	0.48	1.58	1.43
60-08-2	0.70	0.47	1.58	1.46
60-08-3	0.80	0.46	1.58	1.48
60-08-4	0.90	0.46	1.58	1.51
60-08-5	1.00	0.45	1.58	1.54
60-08-6	1.10	0.44	1.58	1.57
60-08-7	1.20	0.44	1.58	1.60
60-08-8	1.30	0.43	1.58	1.62
60-08-9	1.40	0.43	1.58	1.65
60-10-1	0.60	0.47	1.58	1.31
60-10-2	0.70	0.46	1.58	1.34
60-10-3	0.80	0.46	1.58	1.38
60-10-4	0.90	0.45	1.58	1.41
60-10-5	1.00	0.44	1.58	1.45
60-10-6	1.10	0.43	1.58	1.48
60-10-7	1.20	0.43	1.58	1.51
60-10-8	1.30	0.42	1.58	1.55
60-10-9	1.40	0.42	1.58	1.58
60-12-1	0.60	0.47	1.58	1.22
60-12-2	0.70	0.46	1.58	1.26
60-12-3	0.80	0.45	1.58	1.30
60-12-4	0.90	0.44	1.58	1.34
60-12-5	1.00	0.43	1.58	1.38
60-12-6	1.10	0.43	1.58	1.42
60-12-7	1.20	0.42	1.58	1.46
60-12-8	1.30	0.42	1.58	1.49
60-12-9	1.40	0.41	1.58	1.53

ตารางผนวกที่ ข11 อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลอยร้อยละ 65

ส่วนผสม	Ms	CaO/SiO ₂	CaO/Al ₂ O ₃	CaO/M ₂ O
65-08-1	0.60	0.50	1.58	1.66
65-08-2	0.70	0.49	1.58	1.69
65-08-3	0.80	0.48	1.58	1.73
65-08-4	0.90	0.47	1.58	1.76
65-08-5	1.00	0.47	1.58	1.79
65-08-6	1.10	0.46	1.58	1.82
65-08-7	1.20	0.46	1.58	1.85
65-08-8	1.30	0.45	1.58	1.88
65-08-9	1.40	0.45	1.58	1.91
65-10-1	0.60	0.49	1.58	1.53
65-10-2	0.70	0.48	1.58	1.57
65-10-3	0.80	0.47	1.58	1.61
65-10-4	0.90	0.47	1.58	1.65
65-10-5	1.00	0.46	1.58	1.68
65-10-6	1.10	0.45	1.58	1.72
65-10-7	1.20	0.45	1.58	1.76
65-10-8	1.30	0.45	1.58	1.79
65-10-9	1.40	0.44	1.58	1.83
65-12-1	0.60	0.48	1.58	1.44
65-12-2	0.70	0.48	1.58	1.48
65-12-3	0.80	0.47	1.58	1.53
65-12-4	0.90	0.46	1.58	1.57
65-12-5	1.00	0.46	1.58	1.61
65-12-6	1.10	0.45	1.58	1.65
65-12-7	1.20	0.44	1.58	1.69
65-12-8	1.30	0.44	1.58	1.73
65-12-9	1.40	0.44	1.58	1.77

ตารางผนวกที่ ข12 อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70

ส่วนผสม	Ms	CaO/SiO ₂	CaO/Al ₂ O ₃	CaO/M ₂ O
70-08-1	0.60	0.51	1.58	1.93
70-08-2	0.70	0.50	1.58	1.97
70-08-3	0.80	0.50	1.58	2.00
70-08-4	0.90	0.49	1.58	2.04
70-08-5	1.00	0.49	1.58	2.07
70-08-6	1.10	0.48	1.58	2.10
70-08-7	1.20	0.48	1.58	2.13
70-08-8	1.30	0.47	1.58	2.17
70-08-9	1.40	0.47	1.58	2.20
70-10-1	0.60	0.50	1.58	1.79
70-10-2	0.70	0.50	1.58	1.84
70-10-3	0.80	0.49	1.58	1.88
70-10-4	0.90	0.48	1.58	1.92
70-10-5	1.00	0.48	1.58	1.96
70-10-6	1.10	0.47	1.58	2.00
70-10-7	1.20	0.47	1.58	2.04
70-10-8	1.30	0.47	1.58	2.08
70-10-9	1.40	0.46	1.58	2.11
70-12-1	0.60	0.50	1.58	1.69
70-12-2	0.70	0.49	1.58	1.74
70-12-3	0.80	0.49	1.58	1.79
70-12-4	0.90	0.48	1.58	1.84
70-12-5	1.00	0.47	1.58	1.88
70-12-6	1.10	0.47	1.58	1.93
70-12-7	1.20	0.47	1.58	1.97
70-12-8	1.30	0.46	1.58	2.01
70-12-9	1.40	0.46	1.58	2.06



ตารางผนวกที่ ค1 การไหลแผ่ เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก)	เวลาการก่อตัวสิ้นสุด (นาทีก)
60-08-1	170.0	810.0	1800.0
60-08-2	170.0	420.0	1440.0
60-08-3	170.0	130.0	720.0
60-08-4	170.0	100.0	360.0
60-08-5	167.8	85.0	240.0
60-08-6	165.5	77.0	200.0
60-08-7	162.0	70.0	150.0
60-08-8	161.0	67.0	120.0
60-08-9	160.0	65.0	100.0

ตารางผนวกที่ ค2 การไหลแผ่ เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก)	เวลาการก่อตัวสิ้นสุด (นาทีก)
60-10-1	170.0	750.0	1440.0
60-10-2	170.0	300.0	600.0
60-10-3	170.0	85.0	200.0
60-10-4	165.0	80.0	150.0
60-10-5	160.0	75.0	125.0
60-10-6	156.0	70.0	115.0
60-10-7	154.0	65.0	105.0
60-10-8	152.0	62.0	100.0
60-10-9	150.0	60.0	97.0

ตารางผนวกที่ ค3 การไหลแผ่ เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก)	เวลาการก่อตัวสิ้นสุด (นาทีก)
60-12-1	170.0	660.0	840.0
60-12-2	170.0	240.0	360.0
60-12-3	170.0	105.0	180.0
60-12-4	165.0	75.0	120.0
60-12-5	160.0	72.5	115.0
60-12-6	150.0	62.5	105.0
60-12-7	147.0	60.0	100.0
60-12-8	146.0	57.0	95.0
60-12-9	145.0	55.0	90.0

ตารางผนวกที่ ค4 การไหลแผ่ เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก)	เวลาการก่อตัวสิ้นสุด (นาทีก)
65-08-1	170.0	540.0	720.0
65-08-2	160.0	240.0	360.0
65-08-3	150.0	80.0	180.0
65-08-4	137.0	70.0	115.0
65-08-5	135.0	65.0	110.0
65-08-6	132.5	60.0	100.0
65-08-7	125.6	52.5	95.0
65-08-8	119.0	50.0	90.0
65-08-9	112.8	45.0	85.0

ตารางผนวกที่ ค5 การไหลแผ่ เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก)	เวลาการก่อตัวสิ้นสุด (นาทีก)
65-10-1	160.0	480.0	600.0
65-10-2	155.0	180.0	240.0
65-10-3	128.0	70.0	150.0
65-10-4	126.6	65.0	100.0
65-10-5	124.0	57.5	100.0
65-10-6	121.5	53.0	95.0
65-10-7	119.5	47.0	90.0
65-10-8	113.3	42.0	85.0
65-10-9	110.9	35.0	80.0

ตารางผนวกที่ ค6 การไหลแผ่ เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก)	เวลาการก่อตัวสิ้นสุด (นาทีก)
65-12-1	160.0	450.0	540.0
65-12-2	148.0	160.0	180.0
65-12-3	126.7	70.0	120.0
65-12-4	120.4	52.0	85.0
65-12-5	117.9	50.0	80.0
65-12-6	115.5	45.0	77.5
65-12-7	111.9	42.5	75.0
65-12-8	106.0	35.0	72.0
65-12-9	100.4	30.0	70.0

ตารางผนวกที่ ค7 การไหลแผ่ เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก)	เวลาการก่อตัวสิ้นสุด (นาทีก)
70-08-1	155.0	360.0	420.0
70-08-2	120.0	110.0	150.0
70-08-3	103.5	47.5	120.0
70-08-4	101.0	45.0	75.0
70-08-5	99.0	37.5	70.0
70-08-6	92.5	32.5	60.0
70-08-7	90.0	27.5	55.0
70-08-8	81.9	25.0	47.0
70-08-9	79.2	22.5	45.0

ตารางผนวกที่ ค8 การไหลแผ่ เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก)	เวลาการก่อตัวสิ้นสุด (นาทีก)
70-10-1	150.0	300.0	360.0
70-10-2	110.0	55.0	120.0
70-10-3	92.5	40.0	90.0
70-10-4	89.0	32.5	70.0
70-10-5	87.3	30.0	60.0
70-10-6	85.5	27.0	55.0
70-10-7	81.5	25.0	50.0
70-10-8	73.5	22.0	45.0
70-10-9	69.5	20.0	40.0

ตารางผนวกที่ ๙ การไหลแผ่ เวลาของการก่อตัวเริ่มและสิ้นสุดของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	การไหลแผ่ (ร้อยละ)	เวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก)	เวลาการก่อตัวสิ้นสุด (นาทีก)
70-12-1	148.0	240.0	300.0
70-12-2	110.0	70.0	120.0
70-12-3	84.0	35.0	80.0
70-12-4	83.3	27.5	55.0
70-12-5	82.0	25.0	50.0
70-12-6	81.5	22.5	45.0
70-12-7	77.1	20.0	40.0
70-12-8	72.9	17.5	35.0
70-12-9	65.0	15.0	30.0

ตารางผนวกที่ ๑๐ ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)		การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	7 วัน	28 วัน	
60-08-1	1,709	1,691	2.80%
60-08-2	1,726	1,699	3.87%
60-08-3	1,693	1,669	2.94%
60-08-4	1,688	1,668	3.65%
60-08-5	1,713	1,672	4.46%
60-08-6	1,708	1,669	3.82%
60-08-7	1,738	1,681	4.50%
60-08-8	1,762	1,719	4.60%
60-08-9	1,745	1,700	4.80%

ตารางผนวกที่ ค11 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)		การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	7 วัน	28 วัน	
60-10-1	1,786	1,747	3.57%
60-10-2	1,777	1,709	2.82%
60-10-3	1,759	1,690	3.36%
60-10-4	1,803	1,703	3.50%
60-10-5	1,794	1,732	3.60%
60-10-6	1,783	1,711	3.80%
60-10-7	1,808	1,737	3.93%
60-10-8	1,805	1,741	4.08%
60-10-9	1,799	1,731	3.98%

ตารางผนวกที่ ค12 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)		การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	7 วัน	28 วัน	
60-12-1	1,705	1,682	2.85%
60-12-2	1,726	1,669	2.57%
60-12-3	1,757	1,730	2.23%
60-12-4	1,725	1,693	3.19%
60-12-5	1,715	1,692	4.24%
60-12-6	1,716	1,678	4.32%
60-12-7	1,705	1,677	4.67%
60-12-8	1,695	1,678	4.10%
60-12-9	1,674	1,642	4.74%

ตารางผนวกที่ 13 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลอยร้อยละ 65 และ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)		การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	7 วัน	28 วัน	
65-08-1	1,824	1,766	3.80%
65-08-2	1,809	1,766	3.42%
65-08-3	1,789	1,750	3.20%
65-08-4	1,818	1,771	3.58%
65-08-5	1,829	1,793	3.56%
65-08-6	1,829	1,768	3.54%
65-08-7	1,790	1,710	3.78%
65-08-8	1,792	1,738	3.74%
65-08-9	1,803	1,740	3.44%

ตารางผนวกที่ 14 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลอยร้อยละ 65 และ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)		การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	7 วัน	28 วัน	
65-10-1	1,795	1,760	3.48%
65-10-2	1,781	1,711	3.99%
65-10-3	1,814	1,732	3.36%
65-10-4	1,825	1,735	3.88%
65-10-5	1,824	1,730	4.18%
65-10-6	1,842	1,778	3.98%
65-10-7	1,814	1,730	4.03%
65-10-8	1,802	1,732	3.28%
65-10-9	1,815	1,725	4.02%

ตารางผนวกที่ 15 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลอยร้อยละ 65 และ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)		การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	7 วัน	28 วัน	
65-12-1	1,844	1,796	3.72%
65-12-2	1,875	1,804	3.10%
65-12-3	1,860	1,787	3.42%
65-12-4	1,870	1,793	4.06%
65-12-5	1,833	1,756	3.15%
65-12-6	1,851	1,750	4.60%
65-12-7	1,801	1,744	3.70%
65-12-8	1,823	1,714	4.32%
65-12-9	1,811	1,719	3.35%

ตารางผนวกที่ 16 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลอยร้อยละ 70 และ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)		การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	7 วัน	28 วัน	
70-08-1	1,725	1,681	4.30%
70-08-2	1,803	1,776	4.16%
70-08-3	1,825	1,784	3.98%
70-08-4	1,801	1,779	4.51%
70-08-5	1,781	1,745	4.83%
70-08-6	1,781	1,730	4.53%
70-08-7	1,700	1,681	4.54%
70-08-8	1,721	1,694	4.50%
70-08-9	1,735	1,703	4.19%

ตารางผนวกที่ ค17 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลอยร้อยละ 70 และ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)		การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	7 วัน	28 วัน	
70-10-1	1,846	1,804	3.30%
70-10-2	1,885	1,834	3.35%
70-10-3	1,871	1,829	3.10%
70-10-4	1,867	1,807	3.91%
70-10-5	1,849	1,798	3.69%
70-10-6	1,828	1,787	3.12%
70-10-7	1,857	1,800	3.38%
70-10-8	1,819	1,747	3.61%
70-10-9	1,802	1,760	3.21%

ตารางผนวกที่ ค18 ค่าความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลอยร้อยละ 70 และ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)		การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
	7 วัน	28 วัน	
70-12-1	1,914	1,888	2.81%
70-12-2	1,850	1,804	2.75%
70-12-3	1,865	1,828	3.48%
70-12-4	1,855	1,830	2.92%
70-12-5	1,838	1,794	3.24%
70-12-6	1,832	1,816	3.00%
70-12-7	1,861	1,746	3.17%
70-12-8	1,758	1,708	3.03%
70-12-9	1,785	1,738	3.65%

ตารางผนวกที่ ค19 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
60-08-1	0.7	1.9	4.4	10.1	10.6	11.3	12.4
60-08-2	0.6	1.9	5.5	13.8	15.9	17.5	18.4
60-08-3	0.6	1.8	5.3	14.7	16.5	19.0	19.9
60-08-4	0.5	1.7	5.1	15.6	20.1	23.4	24.4
60-08-5	0.6	2.0	5.6	17.7	20.1	22.2	22.3
60-08-6	1.0	3.2	9.6	18.4	19.0	22.7	22.1
60-08-7	2.6	6.0	13.0	17.0	18.7	17.8	16.9
60-08-8	1.6	4.7	12.0	15.0	16.1	17.8	16.0
60-08-9	1.9	4.4	9.6	14.8	16.3	15.5	13.9

ตารางผนวกที่ ค20 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
60-10-1	0.9	2.0	4.4	14.9	16.4	15.6	14.0
60-10-2	1.5	4.0	10.0	16.0	17.6	18.5	20.3
60-10-3	2.1	6.2	16.3	17.7	19.3	21.3	22.3
60-10-4	2.3	6.8	18.0	21.0	23.1	25.4	28.0
60-10-5	2.6	7.2	17.9	20.2	21.2	23.3	24.4
60-10-6	2.4	5.9	13.8	19.4	20.4	21.4	23.6
60-10-7	1.6	5.1	14.4	18.0	19.6	22.6	24.8
60-10-8	1.5	3.7	8.4	17.8	19.6	19.4	17.4
60-10-9	1.1	3.4	9.7	15.9	18.1	19.9	19.7

ตารางผนวกที่ ค21 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
60-12-1	0.7	1.9	5.0	14.0	14.7	16.8	18.4
60-12-2	1.6	3.4	7.0	19.0	20.2	19.2	19.4
60-12-3	1.2	3.5	9.2	21.4	24.0	25.9	27.2
60-12-4	1.6	4.9	13.4	26.6	30.6	32.7	34.4
60-12-5	1.8	5.2	13.2	25.4	27.4	29.9	32.9
60-12-6	1.9	5.3	13.4	23.8	25.9	28.0	29.9
60-12-7	1.9	4.9	11.9	20.5	21.5	23.2	25.6
60-12-8	1.2	3.8	11.0	19.4	21.5	24.7	25.0
60-12-9	1.4	3.9	9.9	19.5	20.3	22.7	23.0

ตารางผนวกที่ ค22 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
65-08-1	1.5	3.9	9.2	24.3	25.5	27.1	29.8
65-08-2	1.5	4.8	13.7	26.8	30.8	33.9	35.6
65-08-3	1.6	5.3	15.4	27.0	33.0	36.0	39.1
65-08-4	1.7	5.8	17.1	27.2	30.5	35.3	38.9
65-08-5	1.8	5.6	15.8	26.2	29.9	32.9	36.1
65-08-6	1.2	3.9	11.8	24.9	28.1	32.6	35.8
65-08-7	1.8	4.2	9.1	22.5	24.8	23.5	22.3
65-08-8	1.2	3.5	9.0	21.6	23.3	23.0	20.7
65-08-9	1.9	4.3	9.3	18.2	20.0	19.0	17.1

ตารางผนวกที่ ค23 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
65-10-1	2.0	4.6	10.0	22.5	24.8	23.5	22.4
65-10-2	2.2	6.0	15.0	25.4	27.9	29.3	32.3
65-10-3	2.7	8.3	23.0	31.6	35.8	39.4	41.4
65-10-4	2.9	8.5	22.5	30.7	33.8	37.1	40.9
65-10-5	3.3	8.9	22.0	27.4	28.8	31.7	33.2
65-10-6	3.8	9.5	21.9	25.6	26.9	28.8	31.7
65-10-7	2.9	8.4	22.0	24.0	26.2	26.9	29.6
65-10-8	3.1	7.8	17.7	23.0	25.3	25.0	25.5
65-10-9	0.9	2.9	8.1	18.7	21.3	23.4	23.2

ตารางผนวกที่ ค24 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 65 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
65-12-1	1.0	3.2	9.0	25.0	28.5	29.4	29.1
65-12-2	3.3	7.1	14.5	30.1	31.9	34.4	33.0
65-12-3	2.2	6.6	17.5	33.0	37.0	39.9	41.9
65-12-4	2.5	7.5	20.4	32.2	37.1	39.7	41.6
65-12-5	3.2	8.9	22.7	31.5	34.1	37.1	40.8
65-12-6	3.1	8.8	22.4	29.6	32.3	34.9	37.3
65-12-7	3.1	8.2	19.8	28.4	29.8	34.2	37.6
65-12-8	1.7	5.5	16.0	27.3	30.3	33.9	34.2
65-12-9	1.8	5.6	15.7	20.1	22.9	25.2	25.0

ตารางผนวกที่ ค25 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
70-08-1	1.2	2.8	8.0	25.0	27.5	27.2	25.9
70-08-2	1.0	2.9	10.4	31.9	36.7	40.3	42.3
70-08-3	1.6	4.7	17.3	29.9	33.5	38.5	40.5
70-08-4	1.9	5.7	21.2	25.9	29.0	33.7	37.1
70-08-5	2.1	6.0	21.1	26.0	29.6	32.6	35.8
70-08-6	1.7	5.5	20.6	24.5	27.7	32.1	35.3
70-08-7	2.2	6.1	20.0	23.0	25.1	27.6	29.0
70-08-8	3.0	7.0	20.0	21.0	23.1	22.9	23.6
70-08-9	2.2	5.1	14.5	21.3	23.4	23.2	22.9

ตารางผนวกที่ ค26 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
70-10-1	1.4	3.7	12.1	27.0	29.4	32.4	34.0
70-10-2	2.6	7.2	19.2	34.0	39.1	41.1	45.2
70-10-3	3.1	8.4	21.6	33.1	35.5	39.1	43.1
70-10-4	3.2	9.0	23.9	32.1	35.3	38.8	42.7
70-10-5	3.8	9.8	24.3	31.3	32.9	36.1	37.9
70-10-6	4.0	9.5	22.0	29.7	31.2	32.8	36.1
70-10-7	2.5	7.0	19.2	25.0	27.3	30.8	33.9
70-10-8	3.1	8.1	20.1	25.0	26.3	28.9	30.3
70-10-9	2.6	6.7	16.7	23.0	25.3	26.6	29.2

ตารางผนวกที่ ค27 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 70 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12 โมลาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	180 วัน
70-12-1	1.9	5.2	13.7	31.3	32.8	37.4	41.2
70-12-2	2.3	6.3	16.6	39.1	43.8	47.3	49.7
70-12-3	3.1	8.1	20.7	37.4	42.4	46.2	48.9
70-12-4	3.2	9.1	24.8	35.8	41.1	44.0	46.2
70-12-5	4.0	10.7	27.4	34.6	37.4	40.7	44.8
70-12-6	4.1	10.9	28.0	29.7	32.4	35.0	37.4
70-12-7	4.3	10.8	26.0	26.0	27.3	29.5	34.8
70-12-8	2.5	7.6	22.0	26.0	28.9	30.2	30.5
70-12-9	2.2	5.7	14.4	25.4	26.4	29.6	32.5

ตารางผนวกที่ ค28 การหดตัวเมื่อแห้งของส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60

ส่วนผสม	การหดตัวเมื่อแห้ง (ร้อยละ)						
	4 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
60-08-1	-0.054%	-0.181%	-0.339%	-0.400%	-0.419%	-0.453%	-0.456%
60-08-3	-0.055%	-0.101%	-0.181%	-0.222%	-0.250%	-0.301%	-0.303%
60-08-9	-0.112%	-0.315%	-0.476%	-0.554%	-0.606%	-0.654%	-0.660%
60-10-1	-0.166%	-0.321%	-0.441%	-0.475%	-0.488%	-0.534%	-0.561%
60-10-3	-0.055%	-0.171%	-0.297%	-0.341%	-0.367%	-0.404%	-0.409%
60-10-9	-0.295%	-0.463%	-0.645%	-0.688%	-0.706%	-0.734%	-0.742%
60-12-1	-0.166%	-0.290%	-0.489%	-0.575%	-0.627%	-0.697%	-0.707%
60-12-3	-0.110%	-0.190%	-0.338%	-0.370%	-0.407%	-0.445%	-0.451%
60-12-9	-0.258%	-0.381%	-0.650%	-0.740%	-0.779%	-0.825%	-0.847%

ตารางผนวกที่ ค29 การหาค่าเฉลี่ยของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 65

ส่วนผสม	การหาค่าเฉลี่ย (ร้อยละ)						
	4 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
65-08-1	-0.099%	-0.226%	-0.299%	-0.346%	-0.366%	-0.410%	-0.418%
65-08-3	-0.051%	-0.103%	-0.183%	-0.223%	-0.244%	-0.274%	-0.281%
65-08-9	-0.117%	-0.197%	-0.287%	-0.317%	-0.347%	-0.434%	-0.443%
65-10-1	-0.116%	-0.290%	-0.380%	-0.419%	-0.451%	-0.475%	-0.486%
65-10-3	-0.146%	-0.206%	-0.276%	-0.298%	-0.322%	-0.354%	-0.363%
65-10-9	-0.214%	-0.350%	-0.480%	-0.560%	-0.583%	-0.613%	-0.628%
65-12-1	-0.100%	-0.207%	-0.372%	-0.480%	-0.550%	-0.600%	-0.616%
65-12-3	-0.032%	-0.102%	-0.279%	-0.339%	-0.373%	-0.404%	-0.415%
65-12-9	-0.098%	-0.241%	-0.487%	-0.578%	-0.598%	-0.650%	-0.669%

ตารางผนวกที่ ค30 การหาค่าเฉลี่ยของส่วนผสมที่ใช้ถั่วลยร้อยละ 70

ส่วนผสม	การหาค่าเฉลี่ย (ร้อยละ)						
	4 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
70-08-1	-0.057%	-0.099%	-0.184%	-0.230%	-0.253%	-0.284%	-0.293%
70-08-3	-0.044%	-0.060%	-0.109%	-0.138%	-0.150%	-0.184%	-0.190%
70-08-9	-0.053%	-0.091%	-0.150%	-0.210%	-0.265%	-0.324%	-0.335%
70-10-1	-0.169%	-0.243%	-0.296%	-0.331%	-0.350%	-0.394%	-0.416%
70-10-3	-0.036%	-0.096%	-0.184%	-0.208%	-0.211%	-0.221%	-0.229%
70-10-9	-0.090%	-0.186%	-0.274%	-0.295%	-0.310%	-0.332%	-0.348%
70-12-1	-0.188%	-0.256%	-0.380%	-0.410%	-0.425%	-0.450%	-0.468%
70-12-3	-0.029%	-0.072%	-0.131%	-0.176%	-0.200%	-0.234%	-0.243%
70-12-9	-0.111%	-0.171%	-0.250%	-0.279%	-0.311%	-0.354%	-0.366%

ตารางผนวกที่ ค31 ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (กก/ลบ.ม.)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)			
		7	14	28	90
60-10-4-1.5	2,147	7.50	14.42	20.47	24.48
65-10-3-1.5	2,164	10.97	19.78	28.61	37.96
70-10-2-1.5	2,189	14.74	24.57	36.86	48.67

ตารางผนวกที่ ค32 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสกาล)		
	3 วัน	7 วัน	28 วัน
65-10-3-0.5	4.11	7.97	24.01
65-10-3-1.0	4.38	9.75	26.70
65-10-3-1.5	5.77	10.97	28.61
65-10-3-2.0	4.02	8.92	22.89
65-10-2-2.5	3.78	7.52	19.20

ตารางผนวกที่ ค33 กำลังรับแรงค้ำและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ส่วนผสม	กำลังรับแรงค้ำ (เมกะปาสกาล)			ค่า K (W/m.K)
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	
65-10-3-0.5	0.92	1.96	4.00	0.219
65-10-3-1.0	1.03	2.32	5.91	0.230
65-10-3-1.5	1.31	2.52	6.50	0.230
65-10-3-2.0	0.90	2.00	5.38	0.260
65-10-2-2.5	1.02	1.67	3.77	0.252

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 13 กรกฎาคม 2510
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	-ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ -ระดับปริญญาตรี สาขานิเทศศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช -ระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาคาร -รองผู้อำนวยการศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทาง อาคาร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	ประกาศเกียรติคุณ ประเภทอาจารย์ผู้สอนดีเด่น คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2545 2546 และ 2554
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการพัฒนาอาจารย์ สาขาขาดแคลนเพื่อศึกษาใน ประเทศ