



ผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้
และเถ้าถ่านหิน

นายเชิรศักดิ์ กลับประสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

ผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้
และเถ้าถ่านหิน

นายเชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์ อส.บ.(เทคโนโลยีโยธา)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี


พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์



(รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)

ประธานร่วม



(ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ)

กรรมการ



(รศ.เอนก ศิริพานิชกร)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหิน
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายเชิรศักดิ์ กลับประสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด (s/t) อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (FA:RHBA) ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{OSiO}_2\text{:NaOH}$) โดยน้ำหนักต่อกำลังอัด และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาขณะผสม และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อกำลังอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เช่นเดียวกัน ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ถูกหล่อขึ้นเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ส่วนการทดสอบหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา จะใช้กรดฟิคริกซึ่งเป็นกรดอ่อนกัด ชะละลายจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุที่กำหนด โดยน้ำหนักอนุภาคที่ยังเหลืออยู่ถูกสันนิษฐานว่าเป็นอนุภาคส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา

ผลการศึกษาพบว่า การใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดที่มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ค่าอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 40:60 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด โดยค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันมีค่าเท่ากับ 510 กก/ซม² และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 30:70, 20:80 หรือ 0:100 ทำให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ไม่เสถียร เกิดการขยายตัวและแตกร้าว อย่างชัดเจน ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มมีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อมีอายุหลังจาก 28 วัน โดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไปทำให้การพัฒนา

กำลังในช่วงอายุปลายดีขึ้น และพบว่าอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิของวัสดุขณะผสม มีผลต่อกำลังอัดอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนการบ่มจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น กล่าวคือตัวอย่างที่มี s/t ร้อยละ 65, สัดส่วน FA:RHBA = 40:60, และมีความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 18 โมลาร์, มีสัดส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2:\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5:1 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 510 กก/ชม² ภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้องแต่จะมีกำลังอัดสูงถึง 492 กก/ชม² ภายในระยะเวลา 3 วัน ถ้าบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แสดงให้เห็นว่า อนุภาคของเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยาได้ไวกว่าอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ประการที่สำคัญที่สุดที่พบในการวิจัยในส่วนนี้คือ นอกจากร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นแล้ว คุณภาพของโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ก็มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เช่นกัน

คำสำคัญ : เถ้าถ่านหิน / เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ / จีโอโพลิเมอร์ / อุณหภูมิบ่ม / กำลังอัด

Thesis Title	Effect of Mix Composition and Temperature on Compressive Strength of Rice Husk – Bark Ash and Fly Ash Based Geopolymeric Paste
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Thiensak Klabprasit
Thesis Advisors	Dr. Smith Songpiriyakij Assoc. Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2549

Abstract

The aims of this research is to study the influence of solid to total weight ratio (s/t), fly ash to rice husk-bark ash ratio (FA:RHBA), sodium hydroxide concentration (NaOH) and sodium silicate solution to sodium hydroxide ratio ($\text{Na}_2\text{OSiO}_2:\text{NaOH}$) on compressive strength and on degree of reaction of geopolymer pastes. Besides, influences of mixing and curing temperatures on those of pastes were investigated. Samples in 3 x 6 centimeters cylindrical shape were employed to measure compressive strength of paste at 3, 7, 14, 28, and 90 days. In order to observe the degree of reaction, pastes were dissolved in picric acid which was a mild acid solution at the selected ages. Residual was defined as the unreacted particle.

The results revealed that the increase of solid portion in paste enhanced compressive strength of geopolymer paste. This was due to the low water to binder ratio. Among FA:RHBA ratios, it was found that FA: RHBA = 40:60 gave the highest compressive strength which was 510 ksc at 28 days. In addition, it revealed that use of higher RHBA portion such as 30:70, 20:80 or 0:100 caused unstable microstructure matrix since the samples swelled, and crack could be observed by naked eyes. Degree of concentration of NaOH affected compressive strength of geopolymer after 28 days. The higher alkalinity showed better compressive strength development at later ages. The $\text{Na}_2\text{OSiO}_2:\text{NaOH}$ ratio tended to be optimum at 2.5:1 by weight. It was found that mixing temperature had insignificant effect on the compressive strength of geopolymer paste. However, curing temperature at 60 °C for 24 hours boosted the rate of compressive strength development in

short time. Sample with $s/t = 0.65$, FA: RHBA = 40:60, NaOH concentration = 18 molars, and Na_2OSiO_2 : NaOH = 2.5:1 exhibited compressive strength at 28 days of 510 ksc. Same sample could have compressive strength up to 492 ksc within 3 days if it was cured at 60°C for 24 hours.

Test program on degree of reaction of geopolymer paste showed that fly ash particle was more reactive than of RHBA. The most important finding in this part is that not only the rate of reaction enhances the compressive strength of geopolymer paste, but also the quality of its microstructure.

Keywords : Fly Ash / Rice Husk–Bark Ash / Geopolymer / Curing Temperature / Compressive Strength

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของงานศึกษาวิจัยนี้เกิดขึ้นได้ เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ขั้นตอน วิธีการศึกษา คำแนะนำแนวความคิดที่เป็นประโยชน์และการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างงานวิจัย รวมทั้งได้ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเรียบร้อยสมบูรณ์ ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ ไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ รศ.เอนก ศิริพานิชกร อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้ และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอนทักษะการเรียนรู้ในวิชาชีพ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว และขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา ความดีและประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่บุคคลเหล่านี้และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๙
สารบัญ	๗
รายการตาราง	๑๑
รายการรูปประกอบ	๑๒
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 จีโอโพลีเมอร์	5
2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์	10
2.3 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์	10
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
3. วิธีการทดสอบ	16
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	16
3.1.1 ถ้ำกลบ-เปลือกไม้	16
3.1.2 ถ้ำถ่านหิน	16
3.1.3 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์	18
3.1.4 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์	19
3.1.5 สารเคมีผสมเพิ่ม	19

3.2	วิธีการศึกษา	19
3.2.1	ระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	20
3.2.2	การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่าง น้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด	21
3.2.3	การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเถ้าถ่านหินและเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	21
3.2.4	การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่าง สารโซเดียมซัลไฟเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก	24
3.2.5	การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์	24
3.2.6	การศึกษาผลกระทบของปริมาณการใช้น้ำและสารลดน้ำต่อกำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์	24
3.2.7	การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์	24
3.2.8	การศึกษาแนวโน้มอิทธิพลของสัดส่วนทางเคมีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	25
3.2.9	การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	25
3.3	วิธีการทดสอบ	26
3.3.1	การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	26
3.3.2	การทดสอบหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา	29
4.	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	32
4.1	กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของ สารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด	32
4.2	อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินและเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์	37
4.3	กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซัลไฟเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก	43
4.4	อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์	49
4.5	ผลกระทบของปริมาณน้ำและสารลดน้ำต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	54
4.6	ผลกระทบของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	56

4.7	อิทธิพลของสัดส่วนทางเคมีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	65
4.7.1	อิทธิพลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	65
4.7.2	อิทธิพลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	66
4.7.3	อิทธิพลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	67
4.7.4	อิทธิพลของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	68
4.7.5	อิทธิพลของ W/B ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	70
4.8	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	70
4.8.1	ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	72
4.8.2	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำหนักของสารตั้งต้นและน้ำหนักทั้งหมดต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	73
4.8.3	ผลกระทบของอุณหภูมิบ่มต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	75
4.8.4	ผลกระทบของ $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	76
4.8.5	ผลกระทบของความเข้มข้นของ NaOH ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	77
4.8.6	ผลกระทบของอุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาขณะผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	78
5.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	80
5.1	สรุปผลการทดลอง	80
5.2	ข้อเสนอแนะ	81
	เอกสารอ้างอิง	82
	ภาคผนวก	
ก	ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	86
ข	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	91
ค	ผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	164
ง	ตัวอย่างรายการคำนวณส่วนผสมและอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้สัญลักษณ์ย่อว่า 65FA40 18M (2.5) และ 65FA40 18M (4SP)	170
	ประวัติผู้วิจัย	173

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์	7
2.2 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว	10
3.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหิน	17
3.2 องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์	19
3.3 แสดงคุณสมบัติของโซเดียมซิลิเกต	19
3.4 แสดงอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สำหรับน้ำหนักเพสต์สด 1000 กรัม	22
3.5 อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	23
4.1 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้น ต่อน้ำหนักทั้งหมด	32
4.2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ด้วย เถ้าถ่านหิน	39
4.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า SiO_2/Al_2O_3 กับ Si/Al ของส่วนผสมเมื่อแปรผันปริมาณ การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ด้วยเถ้าถ่านหิน	39
4.4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($Na_2OSiO_2/NaOH$) โดยน้ำหนัก	44
4.5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์($NaOH$)	50
4.6 ผลกระทบของปริมาณการใช้น้ำและสารลดน้ำต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	54
4.7 ผลกระทบของอุณหภูมิผสมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส	60
4.8 ผลกระทบของอุณหภูมิผสมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	61
4.9 ผลการทดสอบการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์(%)	71
ก.1 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 6 โมลาร์	87
ก.2 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์	87
ก.3 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์	88
ก.4 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 12 โมลาร์	88
ก.5 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์	89
ก.6 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 18 โมลาร์	89

ก.7	แสดงการปรับแก้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	90
ข.1	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 10M (2.5) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	92
ข.2	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 10M (2.5) (H) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	93
ข.3	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	94
ข.4	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5) (H) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	95
ข.5	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (1.5) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	96
ข.6	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	97
ข.7	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) (H) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	98
ข.8	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 10M (2.5) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	99
ข.9	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 10M (2.5) (H) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	100
ข.10	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 18M (2.5) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	101
ข.11	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 18M (2.5) (H) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	102
ข.12	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (2.5) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	103
ข.13	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (2.5) (H) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	104
ข.14	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (1.5) (H) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	105
ข.15	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (2.5) ผสมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	106

ค.8	ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) 15	168
ค.9	ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) 60	169

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1	8
2.2	8
2.3	9
3.1	17
3.2	17
3.3	18
3.4	18
3.5	26
3.6	27
3.7	27
3.8	28
3.9	30
3.10	30
3.11	31
3.12	31
4.1	33
4.2	34
4.3	34
4.4	35
4.5	36

4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินา ไตรออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด	37
4.7	แสดงการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่แก้ว่านหินด้วยแก้วเคลบ-เปลือกไม้	40
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินา ไตรออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่แก้ว่านหินด้วยแก้วเคลบ-เปลือกไม้	41
4.9	กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่แก้ว่านหินด้วยแก้วเคลบ-เปลือกไม้	41
4.10	แสดงการแตกร้าวเมื่อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้แก้วเคลบ-เปลือกไม้เพียงอย่างเดียวเป็นสารตั้งต้นแช่น้ำ	42
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่แก้ว่านหินด้วยแก้วเคลบ-เปลือกไม้	42
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินา ไตรออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่แก้ว่านหินด้วยแก้วเคลบ-เปลือกไม้	43
4.13	แสดงการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก	44
4.14	กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก	45
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก	46
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับปริมาณน้ำต่อไดโซเดียมออกไซด์ ($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก	47
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก	47

4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาไตรออกไซด์ (Na ₂ O/Al ₂ O ₃) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก	48
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาไตรออกไซด์ (SiO ₂ /Al ₂ O ₃) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก	48
4.20	แสดงการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	50
4.21	อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	51
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (Na ₂ O/SiO ₂) เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	52
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาไตรออกไซด์ (Na ₂ O/Al ₂ O ₃) เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	52
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับปริมาณน้ำต่อไดโซเดียมออกไซด์ (H ₂ O/Na ₂ O) เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	53
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	53
4.26	ผลกระทบของปริมาณการใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	55
4.27	ผลกระทบของปริมาณการใช้น้ำต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์	56
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 65FA40 10M (2.5)	57
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 65FA40 18M (2.5)	58
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 65FA40 14M (1.5)	58
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 65FA40 14M (2.5)	62
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 70FA40 18M (2.5)	62
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 70FA40 10M (2.5)	63

4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 65FA60 18M (2.5)	63
4.35	ภาพถ่ายกำลังขยาย 200 เท่าของเพสต์ที่ผ่านการอบ	64
4.36	ภาพถ่ายกำลังขยาย 200 เท่าของเพสต์ที่ไม่ผ่านการอบ	64
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับโคโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) ที่อายุ 28 วัน	66
4.38	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับโคโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาไตรออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่อายุ 28 วัน	67
4.39	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาไตรออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่อายุ 28 วัน	68
4.40	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับโมเลกุลของน้ำต่อโคโซเดียมออกไซด์ ($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$) ที่อายุ 28 วัน	69
4.41	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่อายุ 28 วัน	69
4.42	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA00 18M (2.5)	70
4.43	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5)	73
4.44	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5)	74
4.45	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5) (H)	75
4.46	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 18M (0.5) และ 65FA40 18M (2.5)	76
4.47	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5)	77
4.48	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) เมื่อควบคุมอุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เท่ากับ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส	78
ก.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์	90

บทที่ 1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และแนวทางในการศึกษาครั้งนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลทำให้เกิดสถานะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ซึ่งในปัจจุบันความต้องการในการผลิตปูนซีเมนต์สูงถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด [1] ทำให้เกิดแรงกระตุ้นในการวิจัยและพัฒนาที่จะลดปัญหาดังกล่าวมากขึ้น ในปัจจุบันได้มีการวิจัยที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิตวัสดุซีเมนต์ใหม่มากขึ้น เพื่อลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ให้น้อยลงและทดแทนการกำจัดโดยวิธีการฝังกลบอีกทางหนึ่งด้วยการนำเถ้าถ่านหินไปใช้ในงานคอนกรีตในประเทศไทยได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากการทำวิจัยที่ต่อเนื่องในประเทศจำนวนมากออกเผยแพร่ นอกจากนี้เถ้าประเภทอื่นที่เกิดจากการเหลือใช้ในอุตสาหกรรมก็ได้รับความสนใจในการทำวิจัยอย่างต่อเนื่องเช่นกัน อาทิเช่นเถ้าปลาล์มน้ำมัน และเถ้าชีวมวล (เถ้าที่ได้จากการเผาวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร) เนื่องจากเถ้าเหล่านี้มีปริมาณเหลือทิ้งและต้องการ การกำจัดเป็นปริมาณมาก งานวิจัยการใช้ประโยชน์จากเถ้าเหล่านี้เริ่มมีอย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยองค์ความรู้เดิมที่ได้สร้างไว้จากงานวิจัยเถ้าถ่านหิน

อย่างไรก็ตาม แนวทางการใช้เถ้าถ่านหินหรือเถ้าชนิดอื่นเพื่อสร้างวัสดุชนิดใหม่ ในเวทีวิจัยระดับนานาชาติ เริ่มเปลี่ยนไปอย่างสิ้นเชิงจากความพยายามที่จะใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ได้มากที่สุด เท่าที่คอนกรีตยังคงมีประสิทธิภาพสูง เป็นการไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เลยในการผลิตคอนกรีต งานวิจัยหลายชิ้นจึงพยายามที่จะพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เลยในการผลิต โดยใช้สารประกอบซิลิกอนที่ประกอบด้วยสารซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) โดยใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (Polymer) [2]

มีงานวิจัยจำนวนมาก [3-9] ที่ใช้เถ้าถ่านหินและดินขาว (Metakaolin) เป็นสารตั้งต้นและแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิที่ใช้บ่มมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงกลของผลผลิตจีโอโพลิเมอร์ แต่จากการศึกษาโดยใช้เถ้าถ่านหินในประเทศไทยเป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ พบว่าเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ CaO ในบางกรณีสูงถึงร้อยละ 18.75 ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการก่อตัวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ อีกทั้งเถ้าถ่านหินยังมีข้อจำกัดของอัตราส่วน Si:Al ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวมีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ จากปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแก้ไขได้โดยใช้สารตั้งต้นที่มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ต่ำ และมีปริมาณของซิลิกา (Si) สูง และจากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศพบว่ายังไม่มียงานวิจัยใดที่ใช้เถ้าชีวมวลและเถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้นในการทำวัสดุชนิดนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด (S/T) ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณการใช้เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นสารตั้งต้นต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$) โดยน้ำหนัก ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์
4. เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น
5. เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณการใช้น้ำและสารลดน้ำต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น
6. เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มจีโอโพลิเมอร์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น

7. เพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (Degree of Reaction) เพื่อใช้ประกอบการอธิบายถึงคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกกล่าวถึง การทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 26 ส่วนผสม อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิที่ใช้บ่มจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่า 27 และ 60 องศาเซลเซียส วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (Rice Husk – Bark Ash; RHBA) โดยนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดจนกระทั่งมีอนุภาคของวัสดุข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่มากกว่าร้อยละ 2 และเถ้าถ่านหิน (Fly Ash; FA) สารละลายที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งได้จากการผสมเกลือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 98%) กับน้ำสะอาดที่ความเข้มข้น 10, 14 และ 18 โมลาร์

ส่วนที่สองเป็นการทดสอบหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ในช่วงเวลาดังแต่เริ่มทำการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์จนถึงเวลา 1, 6, 24 ชั่วโมง, 2, 7 และ 28 วัน ตามเงื่อนไขที่ได้ทดสอบคุณสมบัติไปแล้วในส่วนแรก เพื่อใช้ในการอธิบายถึงเหตุผลของคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยวิธีทดสอบจะใช้เทคนิคและวิธีการทดสอบคล้ายกับการหาปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นเดียวกับ Ohsawa และคณะ [10], Fernandez-Jimenez และคณะ [11-12] และ Lam และคณะ [13]

1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ในการศึกษาและทำการวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในบทที่ 2 กล่าวถึง ข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการศึกษาและพัฒนาวัสดุโพลีเมอร์ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย และลำดับขั้นตอนในการศึกษาวิจัย ในบทที่ 4 จะเป็นส่วนของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง และในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ คือ บทที่ 5 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง ข้อเสนอแนะที่ควรศึกษาเพิ่มเติมต่อไป รวมทั้งปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ยังมีเอกสารอ้างอิงที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อให้ผู้ที่สนใจได้ใช้ประโยชน์ในการค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม และสุดท้ายคือภาคผนวก ซึ่งแสดงถึงข้อมูลของการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการศึกษาและพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมาและเกี่ยวข้องกับการศึกษารุ่นนี้

2.1 จีโอโพลิเมอร์

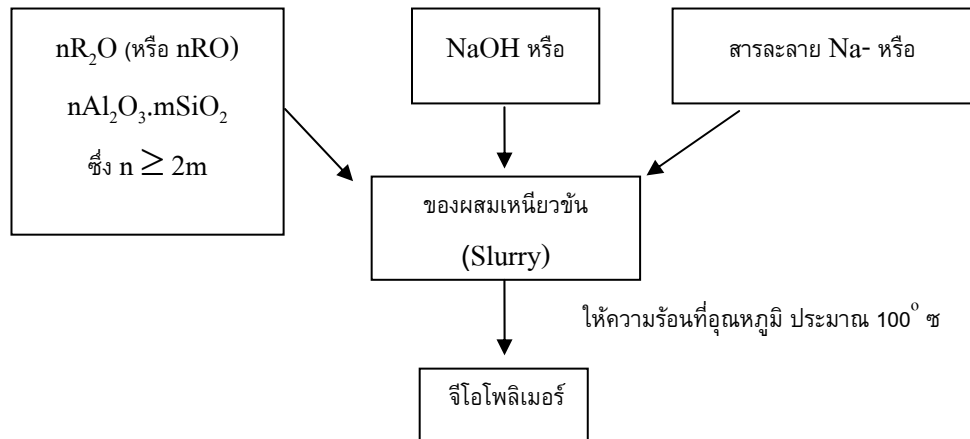
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้านหินเป็นส่วนผสมจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หลังจากนั้นสารปอซโซลาน คือเถ้านหินซึ่งมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และได้สารไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการปอซโซลาน จะแตกต่างจากกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยองค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์จะคล้ายกับซีโอไลต์ แต่อนุภาคจะมีลักษณะเป็นอสัญฐาน [5] อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา ก็ไม่อาจสรุปถึงกระบวนการเกิดโพลิเมอร์ที่แท้จริงได้ [7] มีนักวิจัยหลายกลุ่ม [6,8,9] ได้พยายามผลิตคอนกรีตโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน โดยคอนกรีตที่ได้จะมีส่วนประกอบของ ทรายและหินประมาณร้อยละ 70-80 และมีเถ้านหินเป็นวัสดุประสานหลัก โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) ร่วมกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน

ปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ กับสารละลายซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เรียกว่าปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ทำให้ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีคุณสมบัติคล้ายสารซีเมนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) [5] หรือมีสูตรทางเคมี คือ

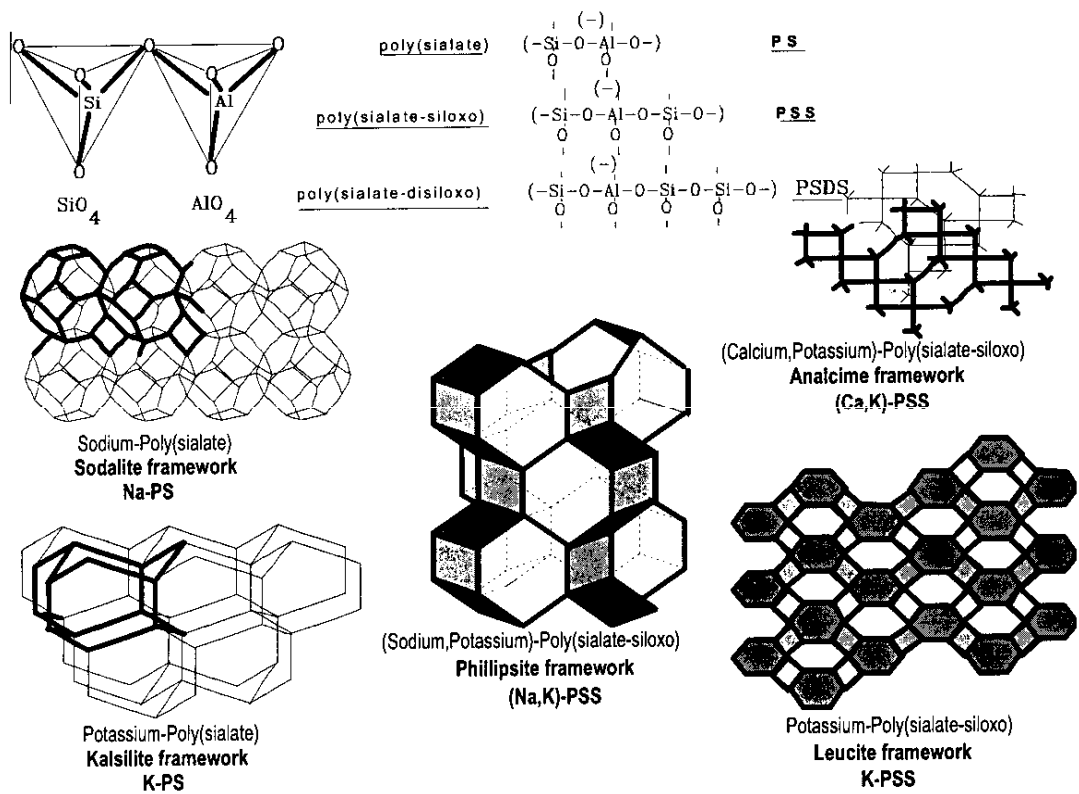
ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์ใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์และซีโอไลต์ การสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์มาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึก อีกทั้งให้คุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และจีโอโพลิเมอร์ [17-18]

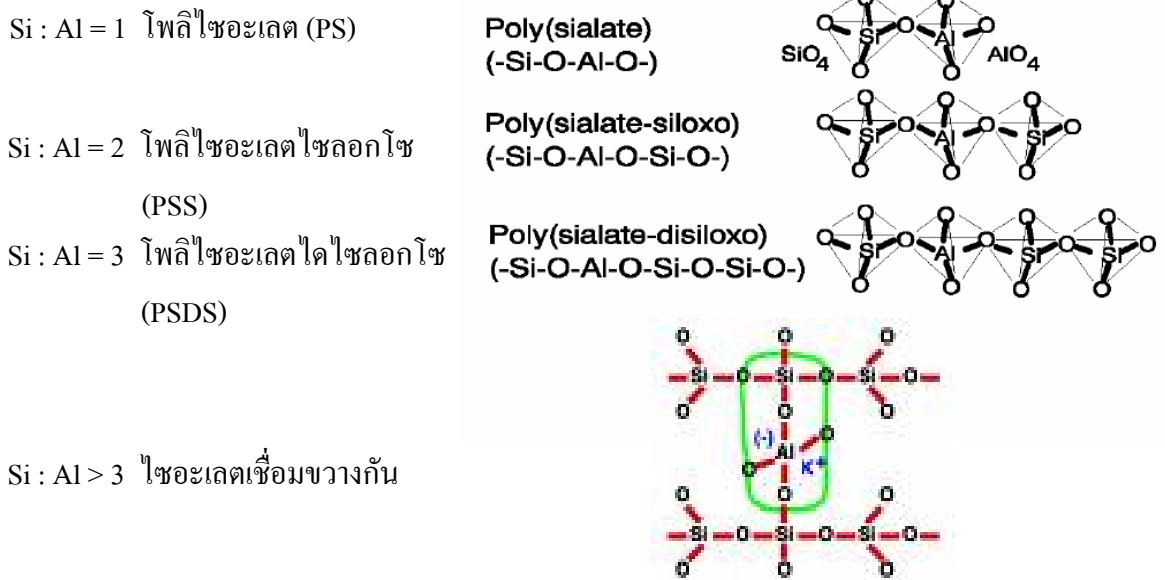
	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ + สารละลายอัลคาไลน์ + ซิลิเกต (ในรูปของแข็ง / ของเหลว)
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ใน สารละลาย	การชะของแข็งที่มี Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกในสารละลาย	การแพร่และควบแน่นของสาร เชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมาใน เฟส
อุณหภูมิในการทำ ปฏิกิริยา	90-300° ซ	อุณหภูมิปกติ
ช่วง pH	6-11	14
ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่แน่นอน ผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว (Unique Crystal)	มีสูตรปริมาณสารสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอน ของผสมของเฟสเจลแบบอสัณฐาน และกึ่งอสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง



รูปที่ 2.1 แผนภูมิการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์

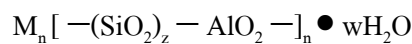


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต [15]



รูปที่ 2.3 สูตร โครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะเลต [15]

วัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี วัสดุนี้นี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลีไซอะเลต (Polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si—O—Al—O] จากสูตร



ถ้า z มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลต (PS)

ถ้า z มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (PSS)

ถ้า z มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si : Al บอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้นๆ เช่น อัตราส่วน 1, 2 และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นสามมิติ หากอัตราส่วนสูงกว่าสาม จะเกิดการเชื่อมขวางขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 หรืออัตราส่วน 15 หรือมากกว่า ทำให้ได้สารประกอบโพลิเมอร์มากขึ้น ตัวอย่างคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้ [15]

อัตราส่วน 2 : 1 เหมาะสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต

อัตราส่วน 3 : 1 สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททานเนียม ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200 - 1,000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วน 20:1 ถึง 35:1 ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ในสองมิติมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงในสารละลายของเกลือคลอไรด์ มีคุณสมบัติในการละลายไขมัน จึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการล้างไขมันออก เช่น อุตสาหกรรมทำสบู่ อุตสาหกรรมกระดาษ ตามบ้านมีใช้ในรูปของยาล้างท่อ หรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ไม่ติดไฟ อาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด [19] คือ

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ ลักษณะทั่วไปเป็นของเหลวข้น ไม่มีสี
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นก้อน เป็นเม็ดหรือเป็นเกล็ด ลักษณะทั่วไป เป็นของแข็ง สีขาวสะอาด

ชนิดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ชนิดที่ 2 และถูกนำมาละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการ

2.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นด่าง ลักษณะทั่วไปไม่มีสี หรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม แบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามาก ออกเป็น 3 ชนิด [20] ดังตารางที่ 2.2 โดยชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ชนิดที่ 2 มีอัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 1 : 2.24

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	1:1.97 ถึง 1: 2.17	1:2.34 ถึง 1: 2.58	1:3.18 ถึง 1: 3.59
เหล็ก ร้อยละ ไม่เกิน	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ร้อยละ ไม่เกิน	0.21	0.21	0.21

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Davidovits [2] ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ โดยพบว่าจะมีการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีอัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 0.20-0.28, ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50, น้ำ (H_2O) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่ออลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20

ในเวลาต่อมา Davidovits [17] ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน หรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation) เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอไลติก (Zeolitic) นอกจากนั้นคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ยังสามารถเติมสารต่างๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์ สามารถพบเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในโครงสร้างยานยนต์และอากาศยาน อุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกะพาสคาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ นอกจากมีความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็นและต้านทานการสึกกร่อน ทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบที่จะใช้กับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน ในด้านการคำนวณต้นทุน โดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์จะดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในด้านการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงที่ต้องใช้เชื้อเพลิงมากในการเตรียมส่วนประกอบและไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

นอกจากนี้ Hardjito และคณะ [23] ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมต่างๆ และอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ ระหว่าง 0.095 ถึง 0.120 ของอัตราส่วน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดมากนัก ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อโซเดียมออกไซด์ และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์ มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และกำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้การรับกำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่า ถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์มากกว่าเนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น แต่ถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

ในเวลาต่อมา Hardjito และคณะ [24] ยังศึกษาพบว่า จีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิโน-ซิลิเกตโพลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียม ในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถ้าถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว จากผลการศึกษาพบว่า จีโอโพลิเมอร์ เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแล้วยังมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย แต่ยังมีเรื่องต้องศึกษาเพิ่มเติม เพื่อสร้างมาตรฐานในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์อีกมาก

ต่อมาในปี 2005 สมิตร์ [25] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิผสม และอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหิน โดยศึกษาถึงค่ากำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. มีสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำเป็นส่วนผสม มีอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 0.376, 0.386, 0.396 และ 0.416 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมมีค่าเท่ากับ 25 และ 45 องศาเซลเซียส หลังจากทำการหล่อตัวอย่าง จะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การทดสอบกำลังอัดทำการทดสอบที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและยังคงพัฒนากำลังอัดต่อไปอีก ส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้นแต่จะมีการพัฒนาค่ากำลังอัดไปเรื่อยๆ จนในที่สุดจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

Alonso และ Palomo [26] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและสัดส่วนผสมที่มีผลต่อจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดี และได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายซีเมนต์ เมื่อใช้ดินขาวผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 และเมื่อทำปฏิกิริยากันอย่างเข้มข้นจะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารที่ใช้กระตุ้นสูงขึ้นการก่อตัวจะช้าลง การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้น สัดส่วนของ Metakaolin/ Ca(OH)_2 ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ แต่พบว่าปริมาณการเกาะตัวกันจะสูงขึ้นเมื่อมี Ca(OH)_2 สูง และการเติม Ca(OH)_2 ลงในผง Metakaolin เมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10M จะได้อลูมิโนซิลิเกตเช่นกันและก่อให้เกิด CSH gel และที่น่าสนใจมากก็คือการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 10M จะหน่วงการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเป็นเพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นทำให้

อ็อนของสารแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยาออกอุนหุมิจะเป็นตัวเร่งให้ทำปฏิกิริยามากขึ้น, การใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะทำให้ปริมาณอุมิโนซิลิเกตเพิ่มสูงขึ้น

ในปี 2006 Chindaprasirt และคณะ [27] ได้ทดลองใช้เถ้าถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำมาผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต ได้ทำการควบคุมการไหลแผ่ (Flow) ร้อยละ 110 ± 5 ถึง 135 ± 5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลแผ่จะดีไม่ดีขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ โดยมีค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำการศึกษายู่ระหว่าง 10-65 เมกะพาสคาล โดยสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ ที่เหมาะจะมีค่าเท่ากับ 0.67-1 และศึกษาพบว่าแม้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นจาก 10M ไปเป็น 20M ก็ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์และพบว่าหลังผสมจีโอโพลิเมอร์ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงในอุมิห้องก่อนให้ความร้อนด้วยการอบซึ่งอุมิที่ใช้บ่มที่เหมาะสมอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส และควรบ่มไม่เกิน 2 วัน จะให้กำลังอัดที่สูงมาก และจากการศึกษาด้วยกล้องขยายอนุภาคของเถ้าถ่านหินพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าถ่านหินเป็นทรงกลม ถึงแม้ว่าขณะผสมจีโอโพลิเมอร์จะเหนียวขึ้นจนต้องอาศัยการเติมน้ำเข้าไปร้อยละ 2-8 จะช่วยให้ความข้นเหลวดีขึ้นได้ และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) ช่วยให้แบบได้ดีก็จริงแต่จะทำให้ค่ากำลังอัดลดต่ำกว่าการใช้ น้ำ จากการศึกษาครั้งนี้สรุปว่าค่าการไหลแผ่ ให้ผลดีถ้าใช้อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ อยู่ที่ 0.67-1 การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10M ถึง 20M ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด และอุมิที่ใช้ในการบ่ม ที่ 60-75 องศาเซลเซียส ถ้ามมากกว่า 75 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายในจะสูญเสียอนุภาคของน้ำทำให้เกิดการแตกร้าวภายในเพราะโครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์ มีโมเลกุลของน้ำ อยู่ในถ้าโดนความร้อนมาก โครงสร้างจะเปลี่ยนไป แม้ว่าจะรักษาอุมิการบ่มคงที่ ที่ 60 องศาเซลเซียส ให้นาน โดยหวังว่าค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สุดท้ายการใช้สารลดน้ำ เพื่อช่วยในการผสมและเข้าแบบพบว่าใช้น้ำธรรมดาจะดีกว่า เพราะการใช้สารลดน้ำจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

Bakharev [21] ศึกษาความคงทนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น และกำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น และพบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ถ้าใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียว เป็นที่น่าเชื่อว่าการใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-Linked Alumino Silicate Polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ ไม่ค่อยละลายในเกลือต่างๆ ดังนั้นความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับว่าการเลือกใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็น

ตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแข็งตัว รวมถึงความเข้มข้นของค่าด้วย จากการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นตัวกระตุ้นอย่างเดียว อีกทั้งยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้น ทำให้มีสารละลาย Alkaline ละลายปนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นเกลือซัลเฟตด้วย และยังพบรอยร้าวในตัวอย่างอีกด้วย และจากการทดลองพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียว และบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4-12 เมื่อแช่อยู่ในสารละลายเกลือซัลเฟต

ในปี 1984 Ohsawa และคณะ [10] ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้านหินในไฮดรตซีเมนต์ โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่นกรดไฮดรอกลอลิก (HCl), กรดพิคลิก (Picric Acid) และ กรดซาลิไซลิก (Salicylic Acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่า เถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาผลการทดสอบพบว่าการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การใช้กรด พิคคลิก + เมทานอล + น้ำ เป็นตัวทำละลาย ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ มีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 ซึ่งการใช้กรดดังกล่าว ให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และ กรดซาลิไซลิกอย่างมาก

Alonso และ Palomo [26] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างระดับไมโครกุล (Microstructure) ของจีโอโพลิเมอร์เพศ์ ขณะเกิดปฏิกิริยากับค่าของจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ที่ทำจากเถ้านหิน พบว่าโดยส่วนมากไมโครกุลของเถ้านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ขนาดต่างๆกัน เมื่อถูกกัดโดยค่าจะเริ่มที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวของทรงกลมและขยายออกเป็นรูใหญ่ จากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปภายในและทำปฏิกิริยาทั้งภายนอกและภายในทรงกลม จากนั้นเกิดการจับตัวกันจนแข็ง จากการดูภาพขยายจะเห็นว่าอนุภาคทรงกลมมีรูทะลุอยู่ทั่วไปในเนื้อจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งแล้วและมีการจับตัวเชื่อมโยกัน นอกจากนั้นสังเกตเห็นว่ายังมีเถ้านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ ซึ่งเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของค่า, ขนาดอนุภาคของเถ้านหิน, ระยะเวลาการบ่ม และ การผสม และจากการศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต ในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำเข้าไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นฝนิกคล้ายๆ กระจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

Fernandez-Jimenez และคณะ [11] ศึกษาหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหิน (Degree of Reaction) ในจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ เมื่อทำการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ที่อุณหภูมิปกติ โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับ Ohsawa และคณะ [10] ที่ว่าเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะทำให้ละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยการทดลองนี้เลือกใช้กรดไฮดรอกลอลิกและน้ำที่ความเข้มข้น 1:20 เป็นตัวทำลาย จากนั้นนำปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินที่คำนวณได้จากวิธีดังกล่าวมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์หาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหิน ด้วยเครื่อง XRPD (XRay Power Diffraction) และ NMR (Nuclear Magnetic Resonance) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่แม่นยำในการหาปริมาณของเถ้าถ่านหินที่ไม่ทำปฏิกิริยากับต่าง ผลการศึกษาพบว่า การหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินด้วยวิธีการทำละลายในกรดไฮดรอกลอลิก ให้ผลทดสอบที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ร้อยละ 5 เมื่อเปรียบเทียบกับการหาโดยวิธี XRPD และ NMR

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เห็นได้ว่าเป็นการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นศักยภาพของเถ้าถ่านหินว่าสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานเทียบเท่ากับซีเมนต์ได้ แต่จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาเถ้าถ่านหินในประเทศไทยซึ่งมี CaO มาก คงไม่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน เพื่อปรับปรุงสัดส่วนทางเคมีของวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้น และคุณสมบัติเชิงกลด้านการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น

บทที่ 3 วิธีการทดสอบ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ใช้และวิธีการทดสอบกำลังอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมกับเถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (Rice Husk – Bark Ash) ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของบริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด จ. ฉะเชิงเทรา โดยใช้แกลบและเปลือกไม้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแก่เตาเผา ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างแกลบและเปลือกไม้ในการเผาเท่ากับ 4:1 โดยแกลบเป็นวัสดุที่เหลือจากโรงสีข้าวขณะที่เปลือกไม้เป็นวัสดุที่เหลือจากการใช้ไม้ยูคาลิปตัสในการทำเชื้อกระดาษ วัตถุประสงค์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของทางบริษัท เพื่อใช้ภายในกลุ่มบริษัทด้วยกัน และที่เหลือบางส่วนจำหน่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพื่อเสริมระบบ เตาเผาที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นแบบฟลูอิดไคซ์ เบด (Fluidized Bed) ความร้อนในการเผาอยู่ระหว่าง 800-900 องศาเซลเซียส คุณภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความสม่ำเสมอสูง โดยทั่วไปพบว่าประมาณร้อยละ 20 ของแกลบและเปลือกไม้ที่เผาจะกลายเป็นเถ้า และจากข้อมูลของทางบริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด พบว่าปริมาณเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ทิ้งมีปริมาณสูงถึง 435 ตัน/วัน หรือประมาณ 160,000 ตัน/ปี รูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 แสดงสถานที่กองแกลบและเปลือกไม้เพื่อรอการเผาภายในบริเวณบริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด และสถานที่ทิ้งเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ตามลำดับ

3.1.2 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยไม่ต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพ มีน้ำหนักข้างตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 32.29 (ดูรูปที่ 3.3) ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหิน

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	LOI
RHBA	84.75	0.16	-	2.78	0.60	3.72
FA	36.02	20.58	15.91	18.75	2.24	0.07



รูปที่ 3.1 กองแกลบและเปลือกไม้ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเผา



รูปที่ 3.2 บริเวณที่ทิ้งเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาใช้ในการวิจัย



รูปที่ 3.3 เถ้าถ่านหินที่ใช้ในการวิจัย

3.1.3 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การวิจัยครั้งนี้ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ด ตาม มอก. 150-2518 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยผสมเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำที่ความเข้มข้น 10, 14 และ 18 โมลาร์ ตารางที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.4 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์

NaOH (Molarity)	Percent by Weight		Density (g/cc)	Volume 500 ml.	
	Na ₂ O	H ₂ O		NaOH (g)	H ₂ O (g)
6M	19.86	80.14	1.208	120	484
8M	25.32	74.68	1.264	160	472
10M	30.40	69.60	1.316	200	458
12M	35.20	64.80	1.364	240	442
14M	39.79	60.21	1.407	280	424
18M	48.55	51.45	1.483	360	382

3.1.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂OSiO₂)

ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต ชนิดที่ 2 ตาม มอก. 433-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของโซเดียมซิลิเกต

Property		
Sodium Oxide (Na ₂ O)	%	15.36
Silicon Dioxide (SiO ₂)	%	33.28
Mole Ratio (Na ₂ O : SiO ₂)		1 : 2.24
Specific Gravity (At 20°C)		1.598
Density	Baume'	54.2

3.1.5 สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures)

สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) ในการศึกษานี้ใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ (Superplastiater) Type FF เทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C494 Type F

3.2 วิธีการศึกษา

ในตารางที่ 3.4 แสดงอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สำหรับน้ำหนักเพสต์สด 1000 กรัม ในส่วนของการศึกษาจะทำการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

วิธีการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เริ่มจากการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซิลิเกตแล้วควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้ได้เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการผสมเข้าเคลือบ-เปลือกไม้กับเถ้านหินให้เข้ากันและควบคุมอุณหภูมิของสารตั้งต้นให้ได้เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส แล้วจึงเทสารละลายทั้งสองลงไปผสม ด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์เป็นเวลา 5 นาที จนส่วนผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสมแล้วมาใส่แบบหล่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.8 จากนั้นนำขึ้นโต๊ะสั่น (Vibrating Table) อีก 5 นาที เพื่อไล่ฟองอากาศในเพสต์ให้เหลือน้อยที่สุด เสร็จแล้วหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกทั้งแบบหล่อ เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ

3.2.1 ระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้มีตัวแปรสำหรับการหาปฏิภาคของส่วนผสมทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ซึ่งโดยทั่วไปใช้สัญลักษณ์ คือ

XXFAXX XXM (XX) (H)

สัญลักษณ์มีความหมายดังนี้

ตัวเลข “XX” หน้า FA หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้น (เถ้าเคลือบ-เปลือกไม้และเถ้านหิน) ต่อน้ำหนักทั้งหมด (เถ้าเคลือบ-เปลือกไม้+เถ้านหิน+โซเดียมซิลิเกต+โซเดียมไฮดรอกไซด์และสารอื่นๆ) ร้อยละ 55, 60, 65 และ 70

ตัวเลข “XX” หลัง FA หมายถึง อัตราการแทนที่เถ้าเคลือบ-เปลือกไม้ด้วยเถ้านหินที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ในอัตราส่วนร้อยละ 40, 60, 80 และ 100

ตัวเลข “XX” หน้า M หมายถึง ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ 10, 14 และ 18 โมลาร์

ตัวเลข “XX” ใน () หมายถึง อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 โดยน้ำหนัก ในบางส่วนผสมอาจใช้ตัวอักษร “1W, 2W, 3W, 4W, 1SP, 2SP, 3SP, 4SP” ซึ่งหมายถึง การใช้น้ำ(W) หรือซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์(SP) แทนที่สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น และใช้อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5:1

สัญลักษณ์ (H) หมายถึง ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสมและเข้าแบบหล่อเสร็จแล้ว หลังจากนั้นปล่อยให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์แข็งตัวในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อีกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงค่อยนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์ออกมาบ่มต่อในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส เพื่อรอการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ เช่น “65FA40 18M (2.5)” หมายถึง จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด ร้อยละ 65 ใช้อัตราส่วนของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 60:40 เป็นสารตั้งต้น ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5:1 โดยน้ำหนัก

3.2.2 การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด

การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้น(เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหิน) ต่อน้ำหนักทั้งหมด (เถ้าแกลบ-เปลือกไม้+เถ้าถ่านหิน+โซเดียมซิลิเกต+โซเดียมไฮดรอกไซด์และสารอื่นๆ) ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในอัตราส่วนร้อยละ 55, 60, 65 และ 70 ตามลำดับ โดยใช้อัตราการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 40 ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และบ่มในห้องที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส โดยมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.4 ตั้งแต่ Mix No. 1 ถึง 4

3.2.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมกับเถ้าถ่านหิน ในอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ร้อยละ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 30:70 และ 20:80 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 0.65 ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5:1 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.4 อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และบ่มในห้องที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส โดยมีส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.4 คือ Mix No. 3 และ 5 ถึง 9

ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สำหรับน้ำหนักเพสต์สด 1000 กรัม

Mix No.	Symbol	Mix Proportion (g.)					
		RHBA	FA	Na ₂ OSiO ₂	NaOH	H ₂ O	SP
1	55FA40 18M (2.5)	330	220	321	129	-	-
2	60FA40 18M (2.5)	360	240	286	114	-	-
3	65FA40 18M (2.5)*	390	260	250	100	-	-
4	70FA40 18M (2.5)*	420	280	214	86	-	-
5	65FA100 18M (2.5)	-	650	250	100	-	-
6	65FA80 18M (2.5)	130	520	250	100	-	-
7	65FA60 18M (2.5)*	260	390	250	100	-	-
8	65FA30 18M (2.5)	455	195	250	100	-	-
9	65FA20 18M (2.5)	520	130	250	100	-	-
10	65FA40 14M (0.5)	390	260	117	233	-	-
11	65FA40 14M (1.5)*	390	260	210	140	-	-
12	65FA40 14M (3.5)	390	260	272	78	-	-
13	65FA40 10M (2.5)*	390	260	250	100	-	-
14	65FA40 14M (2.5)*	390	260	250	100	-	-
15	65FA40 18M (1SP)	390	260	245	98	-	7
16	65FA40 18M (2SP)	390	260	241	96	-	13
17	65FA40 18M (3SP)	390	260	236	94	-	20
18	65FA40 18M (4SP)	390	260	231	93	-	26
19	65FA40 18M (1W)	390	260	245	98	7	-
20	65FA40 18M (2W)	390	260	241	96	13	-
21	65FA40 18M (3W)	390	260	236	94	20	-
22	65FA40 18M (4W)	390	260	231	93	26	-
23	65FA60 18M (1.5)*	260	390	210	140	-	-
24	70FA60 10M (1.5)*	280	420	180	120	-	-
25	70FA60 10M (2.5)*	280	420	214	86	-	-
26	70FA40 10M (2.5)*	420	280	214	86	-	-

*หมายเหตุ ใช้อุณหภูมิผสมที่ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส นอกนั้นผสมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

Symbol	Mole Ratio				W/B
	Na ₂ O/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	
55FA40 18M (2.5)	0.233	17.261	7.116	4.015	0.420
60FA40 18M (2.5)	0.198	16.527	7.116	3.272	0.343
65FA40 18M (2.5)	0.166	15.906	7.116	2.642	0.277
70FA40 18M (2.5)	0.137	15.373	7.116	2.103	0.220
65FA100 18M (2.5)	0.266	4.026	7.116	1.069	0.277
65FA80 18M (2.5)	0.221	6.025	7.116	1.334	0.277
65FA60 18M (2.5)	0.190	9.340	7.116	1.773	0.277
65FA30 18M (2.5)	0.156	22.388	7.116	3.501	0.277
65FA20 18M (2.5)	0.148	35.109	7.116	5.185	0.277
65FA40 14M (0.5)	0.232	14.515	6.225	3.366	0.308
65FA40 14M (1.5)	0.173	15.488	7.515	2.673	0.296
65FA40 14M (3.5)	0.137	16.137	8.825	2.211	0.287
65FA40 10M (2.5)	0.131	15.906	9.901	2.091	0.305
65FA40 14M (2.5)	0.149	15.906	8.299	2.376	0.290
65FA40 18M (1SP)	0.164	15.857	7.247	2.593	0.277
65FA40 18M (2SP)	0.161	15.809	7.383	2.544	0.276
65FA40 18M (3SP)	0.158	15.760	7.525	2.495	0.276
65FA40 18M (4SP)	0.156	15.712	7.672	2.446	0.276
65FA40 18M (1W)	0.164	15.857	7.378	2.593	0.282
65FA40 18M (2W)	0.161	15.809	7.650	2.544	0.286
65FA40 18M (3W)	0.158	15.760	7.933	2.495	0.291
65FA40 18M (4W)	0.156	15.712	8.227	2.446	0.296
65FA60 18M (1.5)	0.226	9.060	6.175	2.044	0.277
70FA60 10M (1.5)	0.139	8.760	9.440	1.214	0.251
70FA60 10M (2.5)	0.124	8.982	9.901	1.117	0.242
70FA40 10M (2.5)	0.108	15.373	9.901	1.664	0.242

*หมายเหตุ ได้แสดงตัวอย่างรายการคำนวณอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ไว้ในภาคผนวก ง

3.2.4 การศึกษากำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก

การศึกษากำล้างอัดของอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ จะนำส่วนผสม 65FA40 14M มาแปรผันปริมาณการใช้อัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5:1, 1.5:1, 2.5:1 และ 3.5:1 โดยน้ำหนัก โดยมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.4 ตั้งแต่ Mix No. 10 ถึง 12 และ 14

3.2.5 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การศึกษากำล้างอัดของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ จะนำส่วนผสม 65FA40 XXM (2.5) มาแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ตามลำดับ โดยมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.4 ตั้งแต่ Mix No. 3, 13 ถึง 14

3.2.6 การศึกษากำล้างอัดของปริมาณการใช้น้ำและสารลดน้ำต่อกำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

วิธีการศึกษาจะนำส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) มาเป็นส่วนผสมควบคุม จากนั้นนำน้ำ (W) หรือซูเปอร์พลาสติกไฟเซอร์ (SP) Type FF แทนที่สารโซเดียมซลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น โดยมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.4 ตั้งแต่ Mix No. 3, 15 ถึง 22

3.2.7 การศึกษากำล้างอัดของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมดที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เท่ากับ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส ในขณะที่มีปฏิภาคส่วนผสมที่แตกต่างกัน 10 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.4 วิธีการผสมเริ่มจากการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมซลิเกตแล้วควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้ได้เท่ากับ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส ตามต้องการ จากนั้นทำการผสมแล้วกลับ-เปลือกลงไม้กับแก้วถ่านหินให้เข้ากันและควบคุมอุณหภูมิของสารตั้งต้นให้ได้เท่ากับ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส ตามต้องการ แล้วจึงเทสารละลายทั้งสองลงไปผสมกับสารตั้งต้น จากนั้นทำการผสมและเข้าแบบหล่อด้วยวิธีเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ใน หัวข้อที่ 3.2 หลังจากนั้นทิ้งไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์แข็งตัว จากนั้นแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกนั้นบ่ม

ต่อไปในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27°C อีกส่วนหนึ่ง นำเข้าเตาอบที่มีอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำออกมาบ่มไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27°C ทำการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุ 3, 7, 14, และ 28 วัน ตามลำดับ โดยมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.4 คือ Mix No. 3-4, 7, 11, 13 และ 14, 23 ถึง 26

3.2.8 การศึกษาแนวโน้มอิทธิพลของสัดส่วนทางเคมีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ในการศึกษาส่วนนี้เป็นการนำเอาค่าสัดส่วนทางเคมีของส่วนผสมทั้งหมดที่ได้ศึกษาครั้งนี้ ในตารางที่ 3.5 มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน สัดส่วนทางเคมีที่นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับได้แก่ อัตราส่วนไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$), ซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), โมเลกุลของน้ำต่อไดโซเดียมออกไซด์ ($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$), ไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) และ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

3.2.9 การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ในส่วนนี้เป็นการกล่าวถึงการทดสอบหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มทำการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์จนถึงเวลา 1, 6, 24 ชั่วโมง, 2, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยมีเงื่อนไขเดียวกันกับที่ได้ทดสอบกลสมบัตินี้ไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2.2 ถึง หัวข้อที่ 3.2.7 เพื่อใช้ในการประกอบการอธิบายถึงเหตุผลของคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ วิธีทดสอบจะใช้เทคนิคและวิธีการทดสอบคล้ายกับการหาปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าถ่านหินที่ยังไม่ถูกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยานั้นเอง ในปี ค.ศ. 1984 Ohsawa [10] ได้ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของถ่านหินในไฮเดรตซีเมนต์ โดยการใช้กรดต่าง ๆ กัน พบว่าการใช้กรดไฮดรอกลอริก ให้ค่าการทดสอบสูงกว่าความเป็นจริง ส่วนกรดฟอสฟอริก ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง และการใช้กรดซัลฟูริก ให้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบโดยวิธี Thermal Gravity Analysis ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Fernandez-Jimenez [11, 12] ได้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากถ่านหินล้วน โดยการใช้กรดไฮดรอกลอริก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ซึ่งผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำวิธีการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้กรดมาประยุกต์ใช้กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาขั้นต้นพบว่า การใช้กรดไฮดรอกลอริก มาหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากถ่านหินซึ่งมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์สูงถึงร้อยละ 18.75 ทำให้ผลการทดสอบมีความแปรปรวนมาก ดังนั้นการทดลองนี้จึงใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวทำละลาย ตามวิธีที่ Ohsawa แนะนำ [10]

3.3 วิธีการทดสอบ

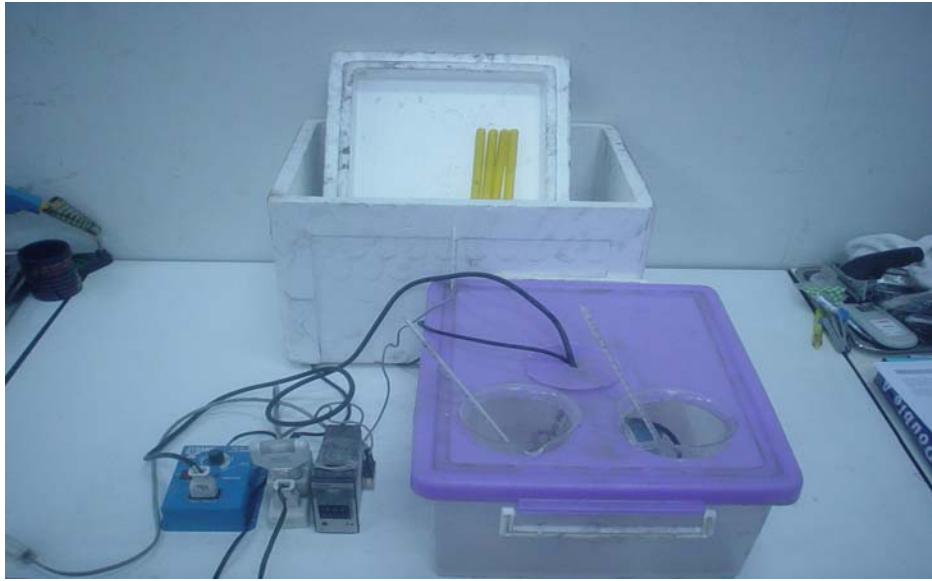
3.3.1 การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

3.3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- แบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ซม. สูง 6 ซม.
- เครื่องชั่งแบบดิจิทัล อ่านละเอียด 0.01 กรัม
- ชุดควบคุมอุณหภูมิ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส
- ตู้อบไฟฟ้า
- เครื่องผสมมอร์ต้าร์ 20 ลิตร
- โต๊ะสั่นคอนกรีต (Vibrating Table)
- เครื่องขัดหน้าคอนกรีต
- เครื่องทดสอบกำลังอัด
(DENISON Model T 42C Maximum Capacity 20 Ton)
- ชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.5 แบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ซม. สูง 6 ซม.



รูปที่ 3.6 ชุดควบคุมอุณหภูมิ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์



รูปที่ 3.8 การทดสอบกำลังของจีโอโพลีเมอร์เพสต์

3.3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัด

เนื่องจากตัวอย่างที่ทำการทดสอบกำลังอัดมีขนาดเล็กมาก และไม่สามารถเคลือบหัวให้เรียบได้ อาจทำให้การทดสอบคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้น การทดสอบในแต่ละครั้งจึงใช้ตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างต่อการทดสอบ แล้วจึงหาค่าเฉลี่ยของการทดสอบ โดยกำหนดให้ค่ากำลังอัดของตัวอย่างแต่ละอันมีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยทั้งหมดไม่เกินร้อยละ 10 ขั้นตอนของการทดสอบเริ่มจากการนำเอาจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ต้องการทดสอบกำลังอัดออกจากแบบหล่อ ดังรูปที่ 3.7 จากนั้นทำการขัดตกแต่งผิวหน้าด้านหัวและด้านท้ายของตัวอย่างให้เรียบ และไม่ต้องเคลือบหัวตัวอย่าง โดยควบคุมให้ตัวอย่างมีความสูงประมาณ 6 เซนติเมตร หลังจากตกแต่งเสร็จแล้วทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่างแล้วชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง เสร็จแล้วนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด (DENISON Model T 42C Maximum Capacity 20 Ton) ดังแสดงในรูปที่ 3.8

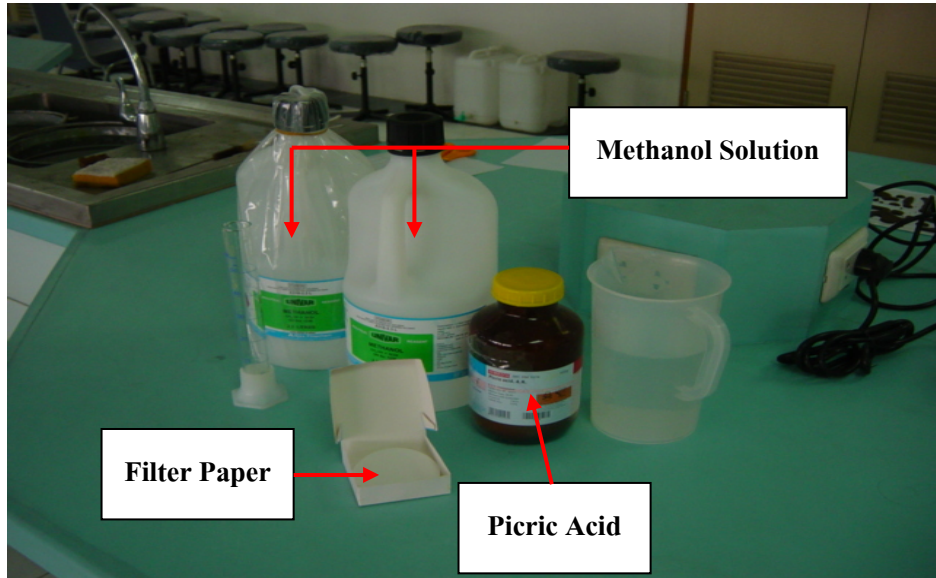
3.3.2 การทดสอบหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

3.3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

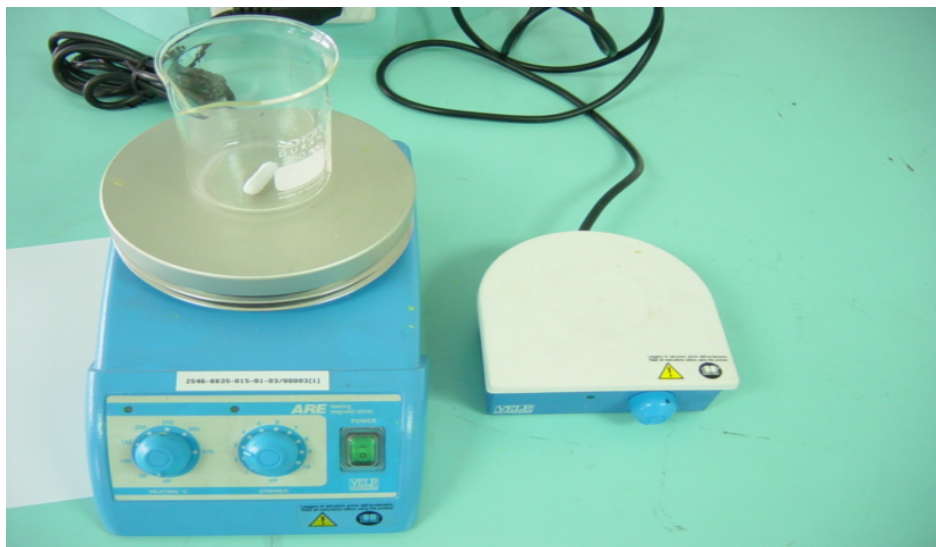
- Picric Acid (Reagent Grade)
- Methanol Solution (Reagent Grade)
- Filter Paper No.42 Ashless Circles ϕ 70 mm.
- Distilled Water
- เครื่องกวนสารเคมี (ARE Heating Magnetic Stirrer)
- เครื่องชั่งแบบดิจิทัล อ่านละเอียด 0.01 กรัม และ 0.0001 กรัม
- ชุดอุปกรณ์กรองสารละลาย โดยอาศัยปั๊มสุญญากาศ
- อ่างแก้วดูดความชื้น (Desiccator)
- ตู้อบไฟฟ้า อุณหภูมิ 100-2000 องศาเซลเซียส

3.3.2.2 ขั้นตอนในการทดสอบหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

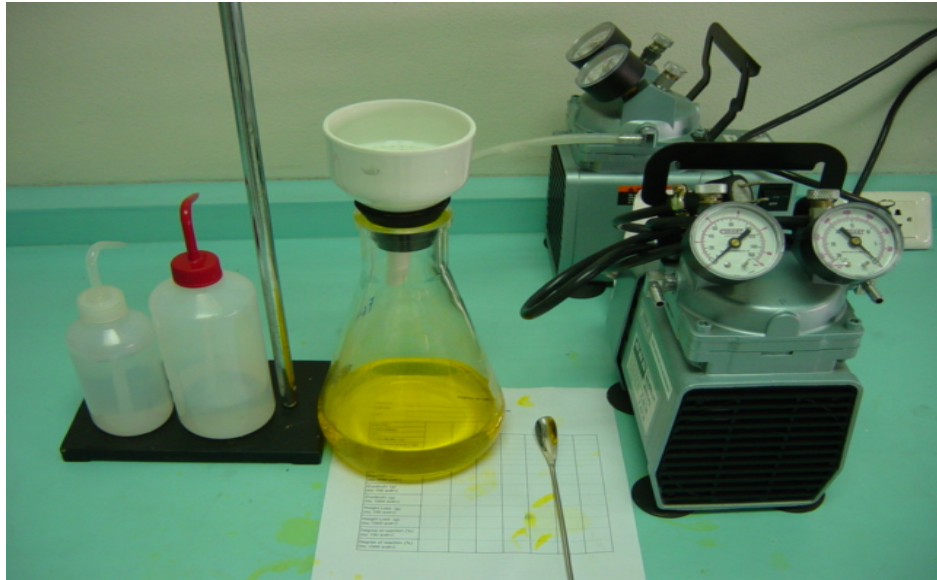
การทดสอบเริ่มจากการเตรียมสารละลายโดยการนำกรดพิกริก ปริมาณ 5 กรัม ละลายในเมทานอล ปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ต้องการทดสอบบดให้ละเอียดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในสารละลายข้างต้นและกวนด้วยเครื่องกวนสารเคมี (Magnetic Stirrer) เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วกวนสารละลายต่อไปอีก 30 นาที เสร็จแล้วนำสารละลายมากรองผ่านกระดาษกรอง (Filter Paper No.42 Ashless Circles ϕ 70 mm.) ด้วยชุดอุปกรณ์กรองสารละลาย โดยอาศัยปั๊มสุญญากาศ และทำการล้างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ค้างอยู่บนกระดาษกรองด้วยเมทานอล จนกระทั่งสีของกรดพิกริก เริ่มเจือจางลง จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง จึงนำไปภาชนะและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำการชั่งน้ำหนัก แล้วทำการอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดน้ำหนักของกระดาษกรองออกจากตัวอย่าง จากนั้นคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ซึ่งก็คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยานั่นเอง [11] สำหรับรูปที่ 3.9, 3.10, 3.11, และ 3.12 แสดงถึงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหิน



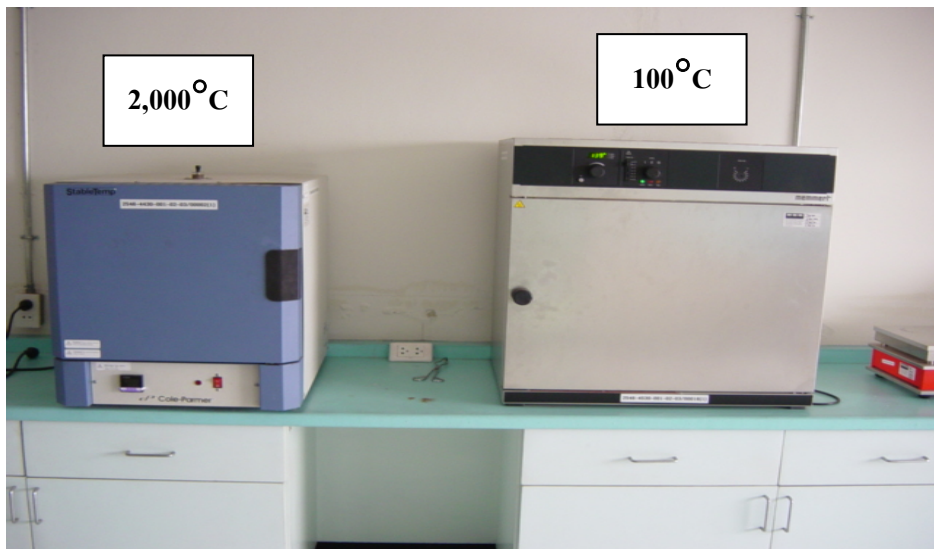
รูปที่ 3.9 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.10 เครื่องกวนสารเคมี



รูปที่ 3.11 ชุดอุปกรณ์การงสารละลาย โดยอาศัยปั๊มสูดซูญกาศ



รูปที่ 3.12 ตู้อบไฟฟ้า อุณหภูมิ 100 และ 2,000 องศาเซียสเซล

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

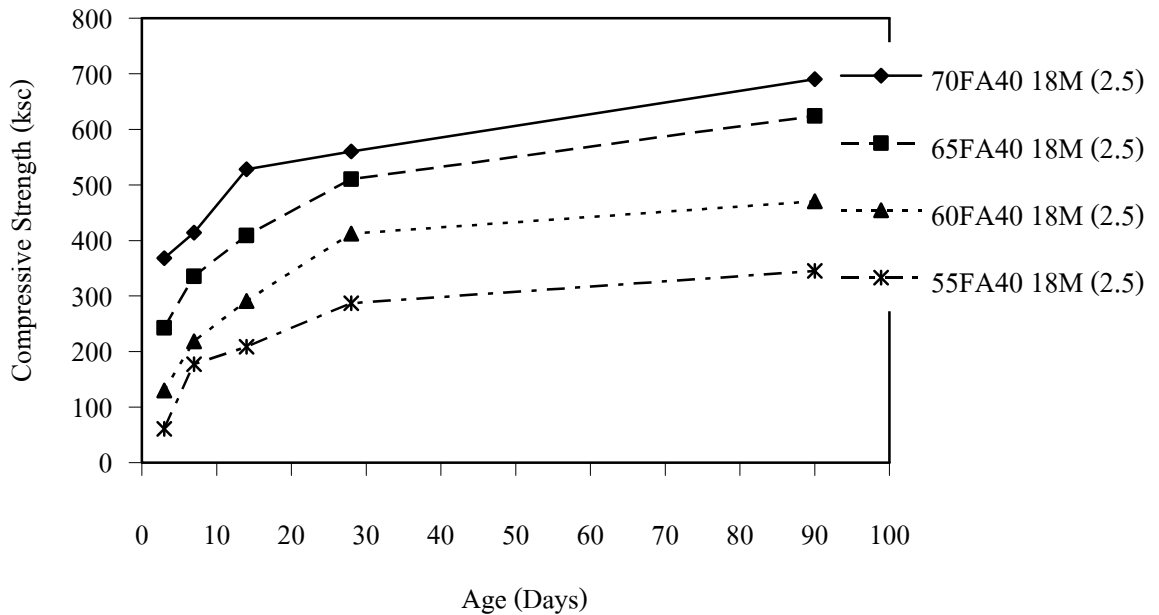
ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบกำลังอัดตามตัวแปรที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยา และภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกำลังขยาย 200 เท่า ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน

4.1 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด (S/T) ร้อยละ 55, 60, 65 และ 70 และใช้อัตราการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 40 ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5:1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียสและบ่มในห้องที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 จากรูปจะเห็นว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน มีการพัฒนากำลังอัดขึ้นตามอายุการบ่มตั้งแต่อายุ 3, 7, 14, 28, และ 90 วัน

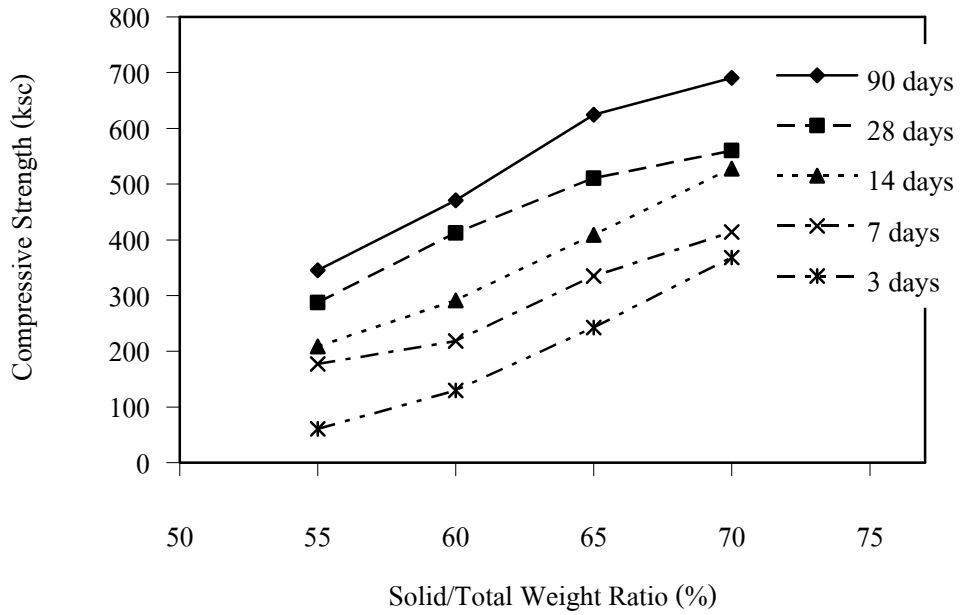
ตารางที่ 4.1 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด

Symbol	Curing Temperature (°C)	Compressive Strength (ksc)				
		3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
55FA40 18M (2.5)	27	61	177	209	287	345
60FA40 18M (2.5)		130	219	291	412	471
65FA40 18M (2.5)		243	335	409	510	624
70FA40 18M (2.5)		368	414	528	560	690

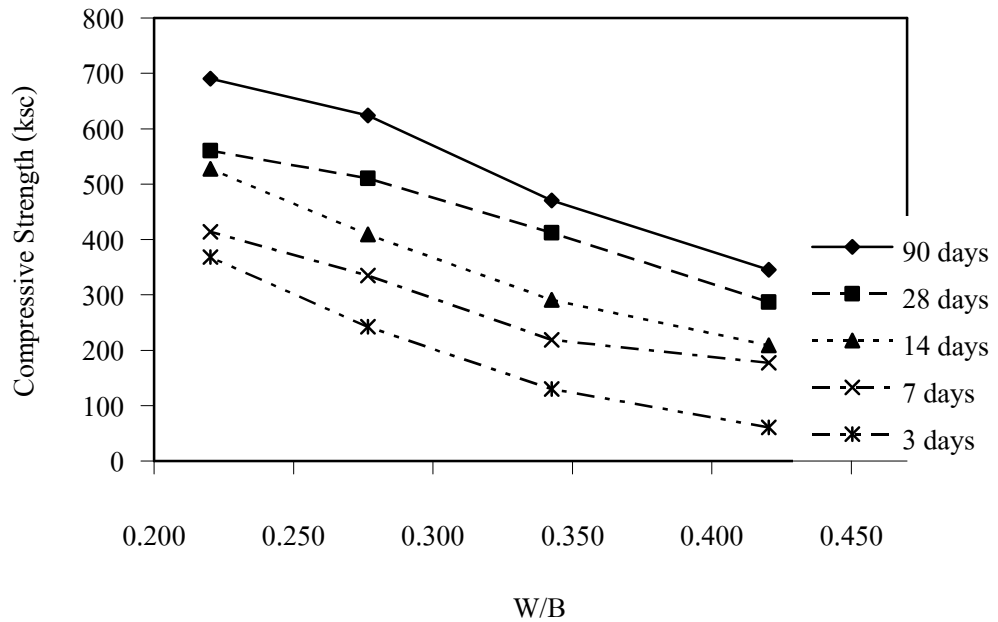


รูปที่ 4.1 แสดงการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด

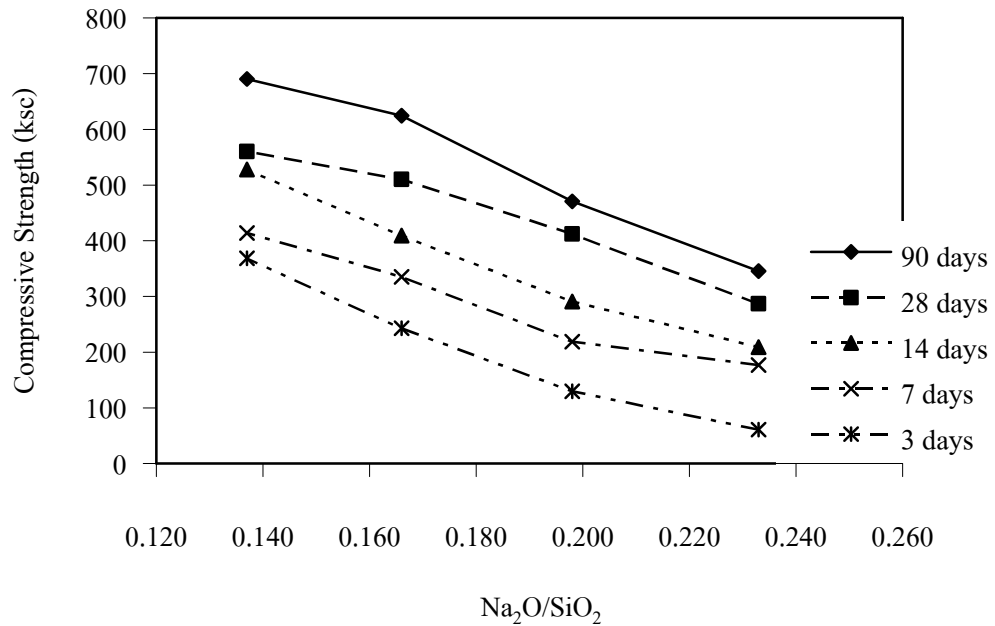
จากผลการศึกษาพบว่าการใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด (S/T) ร้อยละ 55, 60, 65 และ 70 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 3 วันเท่ากับ 61, 130, 243 และ 395 กก/ชม² และกำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยมีค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 345, 471, 624 และ 690 กก/ชม² ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าลักษณะการพัฒนากำลังใกล้เคียงกับการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ปกติ จากข้อมูลนี้เมื่อนำมาพล็อตกราฟดังรูปที่ 4.2 พบว่าค่าของกำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อลดอัตราส่วนน้ำหนักสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดที่น้อยลง โดยอัตราส่วนน้ำหนักสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 55 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันน้อยที่สุดเท่ากับ 287 กก/ชม² และอัตราส่วนน้ำหนักสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 70 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันมากที่สุดเท่ากับ 560 กก/ชม² เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับงานวิจัยของ Hardjito และคณะ [24] พบว่าผลการทดลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน กล่าวคือเมื่อสัดส่วน S/T เท่ากับ ร้อยละ 65 และใช้ความเข้มข้น NaOH ตั้งแต่ 8-16 โมลาร์ มีกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตั้งแต่ 300-700 กก/ชม² เช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วน S/T ก็ไม่ใช่ดัชนีที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดเพียงอย่างเดียว Swanepoel และ Strydom [16] ใช้อัตราส่วน S/T เท่ากับร้อยละ 70 แต่กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ได้ที่อายุ 28 วัน มีค่ามากที่สุดเพียง 70 กก/ชม²



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด (S/T)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด



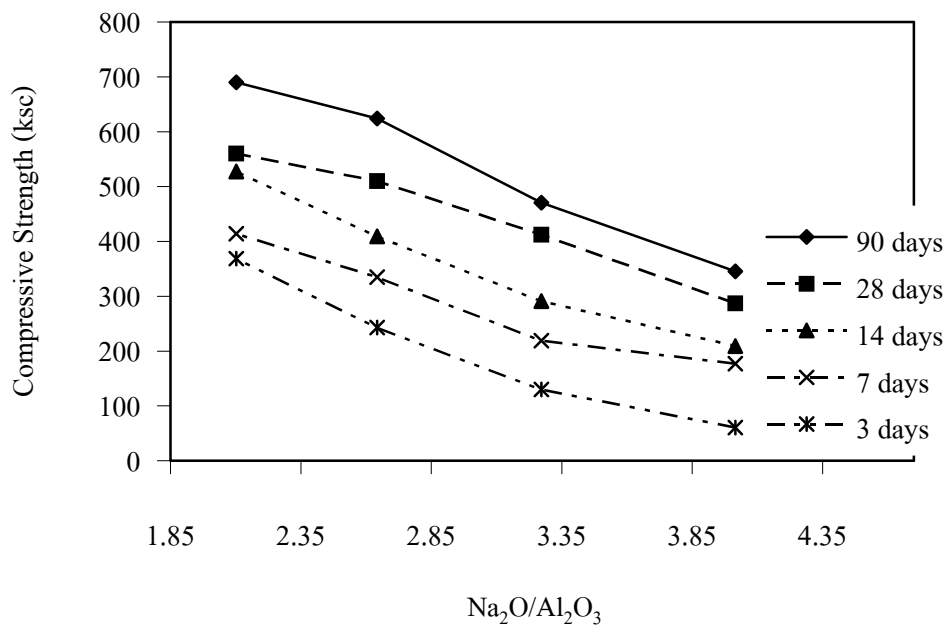
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด

นอกจากค่า S/T แล้วอัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน W/B เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณา เมื่อคำนวณปริมาณน้ำที่อยู่ในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด ร้อยละ 55, 60, 65 และ 70 ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.420, 0.343, 0.277 และ 0.220 ตามลำดับ รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน จากรูปพบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับกฎของ Abrams [22] ที่ว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลง

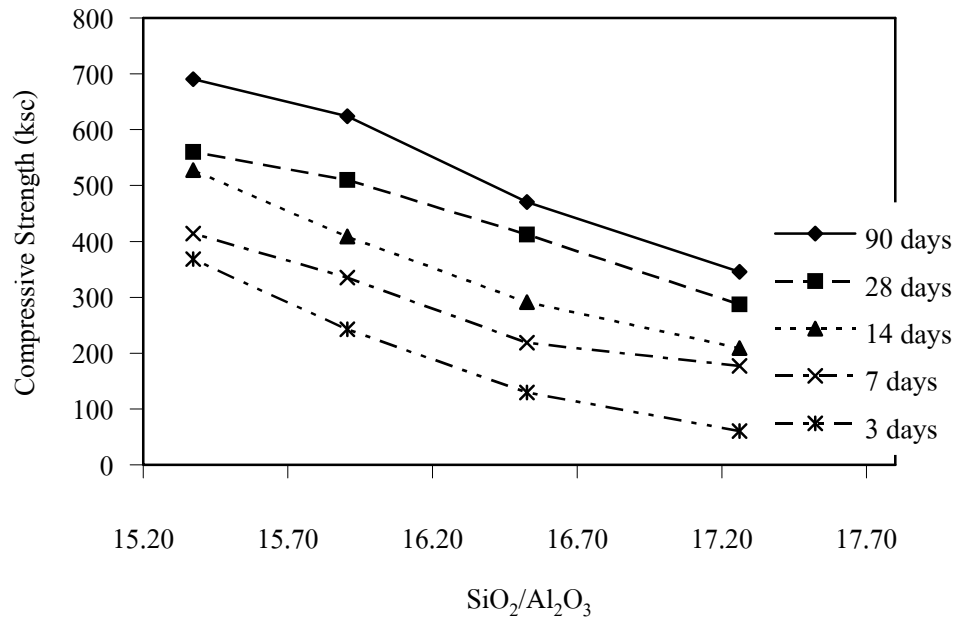
เมื่อนำค่าอัตราส่วนทางเคมีโดยโมล (Mole Ratio) ของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$), ไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) และ ซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.137-0.233, 2.103-4.015 และ 15.373-17.261 ที่คำนวณได้จากส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 55, 60, 65 และ 70 มาเปรียบเทียบกับกำลังอัด ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) มีแนวโน้มที่ทำให้ค่ากำลังอัดลดลง และรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในช่วง

15.373-17.261 ทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มที่ลดลง ในการทดลองนี้ค่าอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของ ปริมาณน้ำต่อไดโซเดียมออกไซด์ (H_2O/Na_2O) มีค่าคงที่เท่ากับ 7.116

อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดที่มีค่ามาก ทำให้ได้ค่า กำลังอัดสูงขึ้นแต่ก็ส่งผลเสียให้ค่าความสามารถในการเทได้ ลดน้อยลงด้วยเช่นกัน การใช้สารตั้งที่มี อนุภาคเล็กและกลมสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ให้ดีขึ้นได้ เช่นเดียวกันกับซีเมนต์ เพลสต์



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพลสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินา ไตรออกไซด์ (Na_2O/Al_2O_3) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้น ต่อน้ำหนักทั้งหมด



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาไดออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด

4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 36.02 และอลูมินาไดออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 20.58 ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 84.75 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 0.65 ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ร้อยละ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 30:70, 20:80 โดยน้ำหนัก จากงานวิจัยด้านจีโอโพลิเมอร์ที่ได้รายงานมาตลอดตั้งแต่ ค.ศ. 1984 [1-17,21-32] จะเห็นได้ว่างานวิจัยทุกงานวิจัยใช้ สารตั้งต้นประเภทเถ้าถ่านหิน Metakaolin หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งวัสดุที่กล่าวมามีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน จึงทำให้ได้ค่าสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าในช่วงแคบๆ อยู่ระหว่าง 1.0-4.5 เท่านั้น ในการทดลองนี้สามารถสร้างสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ได้กว้างมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ในการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และบ่มในห้องที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการพัฒนาขึ้นตามอายุการบ่ม โดยสัดส่วนที่ใช้เถ้านหินล้วนเป็นสารตั้งต้น 65FA100 18M (2.5) ให้ค่ากำลังอัดน้อยที่สุดเท่ากับ 109, 170, 257, 340 และ 353 กก/ซม² และสัดส่วนที่ใช้อัตราส่วนเถ้านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ร้อยละ 40:60 เป็นสารตั้งต้น ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 243, 335, 409, 510 และ 624 กก/ซม² ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 223, 328, 159, 150 และ 177 ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้านหินล้วนเป็นสารตั้งต้น 65FA100 18M (2.5)

ส่วนจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนเถ้านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ร้อยละ 30:70 และ 20:80 เป็นสารตั้งต้น พบว่ากำลังอัดของสัดส่วนดังกล่าวเริ่มมีค่าน้อยลงตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อลดปริมาณเถ้านหินน้อยลง ทำให้ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ชาติอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ทำให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ไม่เสถียรและเกิดการแตกร้าว

งานวิจัยที่ผ่านมา [15] แนะนำว่าช่วงอัตราส่วนของ Si:Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและความเหมาะสมของการใช้งานวัสดุนั้นๆ โดยที่อัตราส่วน 2 : 1 เหมาะสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต อัตราส่วน 3 : 1 สามารถใช้เป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททาเนียม อัตราส่วน 20-35 : 1 ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ในสองมิติมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites) การศึกษาในงานวิจัยนี้ ใช้ค่า Si/Al มีค่าที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2.1:1 ถึง 18.3:1 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 การปรับค่าของ Si/Al นี้ทำให้ได้สารประกอบโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลิไซอะเลต ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ (SiO_2/Al_2O_3) ในช่วงระหว่าง 4.026-15.906 หรือเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนของ Si:Al มีค่าเท่ากับ 2.095-8.278 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วน Si/Al มีค่ามากขึ้น และมีกำลังอัดสูงที่สุดที่อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 8.278 (SiO_2/Al_2O_3 มีค่าเท่ากับ 15.906) หลังจากนั้นเมื่อยิ่งเพิ่มอัตราส่วน Si/Al ให้สูงขึ้นอีก ในช่วง 8.273-18.273 (SiO_2/Al_2O_3 เท่ากับ 15.906-35.109) พบว่ากำลังอัดมีค่าต่ำลงในช่วงก่อนอายุ 28 วัน แต่พอจีโอโพลิเมอร์มีอายุ มากกว่า 28 วันขึ้นไปแล้ว ตัวอย่างที่ทำการทดสอบเริ่มแสดงให้เห็นถึงรอยร้าวได้อย่างชัดเจน จนไม่สามารถทดสอบกำลังอัดได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าการใช้ปริมาณเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มากขึ้น จะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นแต่จะมีค่าลดลงเมื่อมีการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มากกว่าร้อยละ 70 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพียงอย่างเดียวหรือการใช้วัสดุที่มีซิลิก้า (Si) เป็นองค์ประกอบแต่ไม่มีอลูมินา (Al) เป็นองค์ประกอบเลย มาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ทำให้พันธะการยึดเกาะกันของ

โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ที่ได้ไม่ดีพอ ส่งผลให้โครงสร้างไม่เสถียร เกิดการขยายตัวและแตกร้าวรูปที่ 4.10 แสดงการแตกร้าวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแช่ในน้ำ

Davidovits [2] ได้ทำศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาว โดยพบว่าจะมีการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ อยู่ในช่วง 3.50-4.50 (Si:Al มีค่าประมาณ 1.8-2.3) แต่จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์จะยิ่งมีมากขึ้น เมื่อสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่ามากขึ้น กล่าวคือตั้งแต่ 4.0 ถึง 15.9 (Si:Al มีค่าเท่ากับ 2.1-8.3) และมีค่าลดลงเมื่อ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่ามากกว่านี้

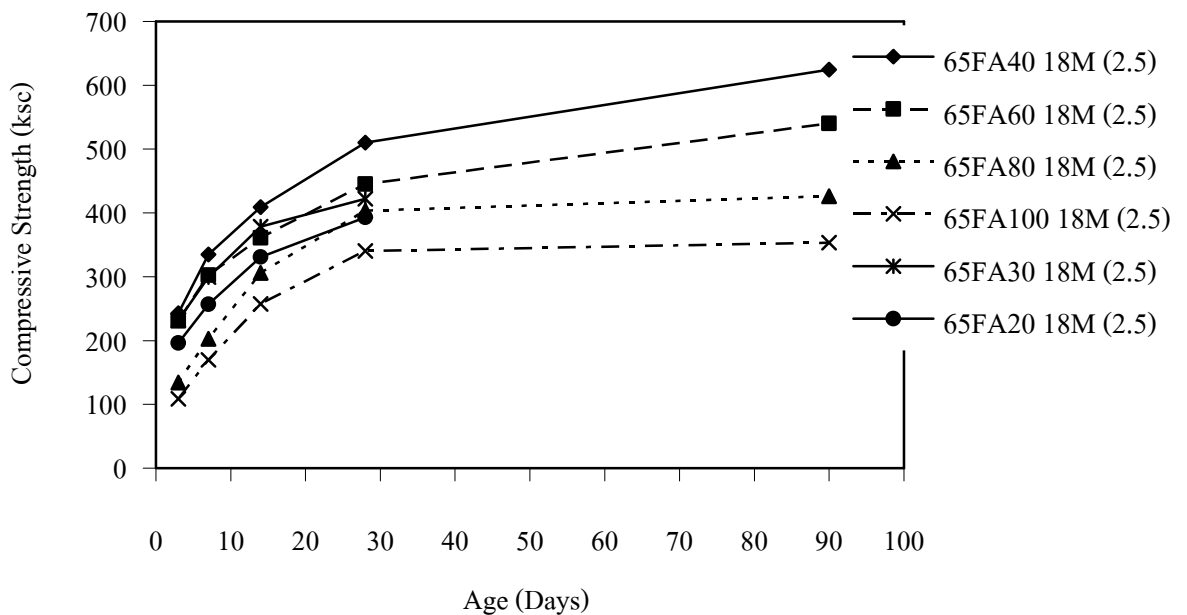
ตารางที่ 4.2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ด้วยเถ้าถ่านหิน

Symbol	Curing Temperature (°C)	Compressive Strength (ksc)				
		3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
65FA100 18M (2.5)	27	109	170	257	340	353
65FA80 18M (2.5)		134	203	306	404	426
65FA60 18M (2.5)		231	303	361	445	540
60FA40 18M (2.5)		243	335	409	510	624
60FA30 18M (2.5)		232	299	379	422	NA
60FA20 18M (2.5)		196	257	331	393	NA

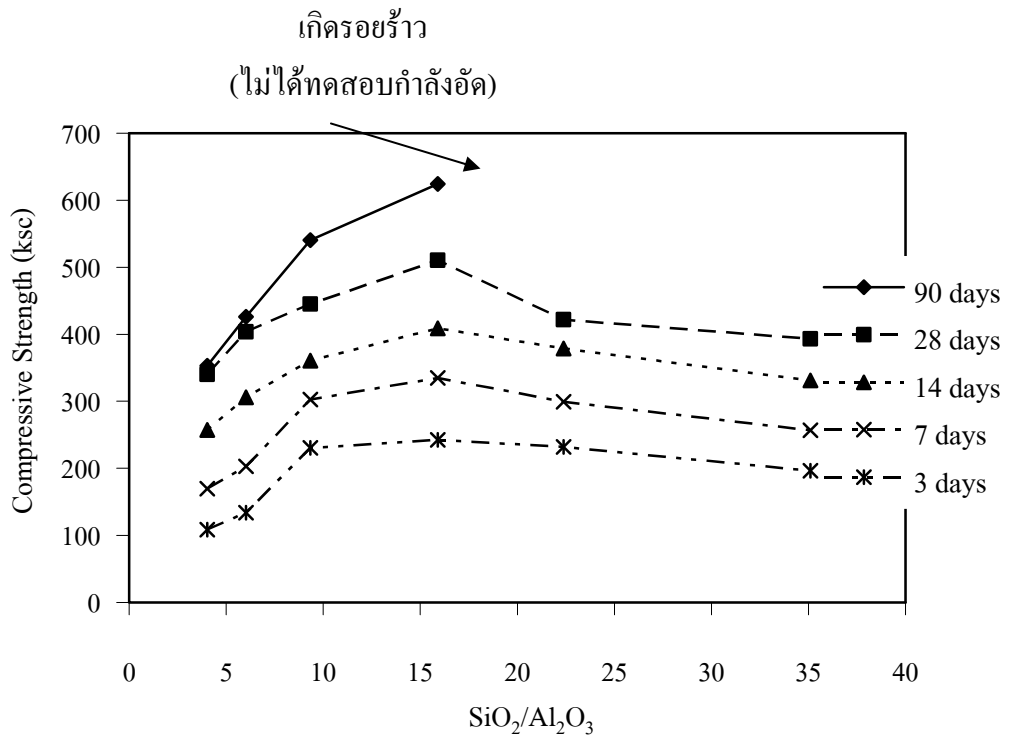
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ กับ Si/Al ของส่วนผสมเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ด้วยเถ้าถ่านหิน

Symbol	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Si/Al
65FA100 18M (2.5)	4.026	2.095
65FA80 18M (2.5)	6.025	3.136
65FA60 18M (2.5)	9.340	4.861
65FA40 18M (2.5)	15.906	8.278
65FA30 18M (2.5)	22.388	11.652
65FA20 18M (2.5)	35.109	18.273

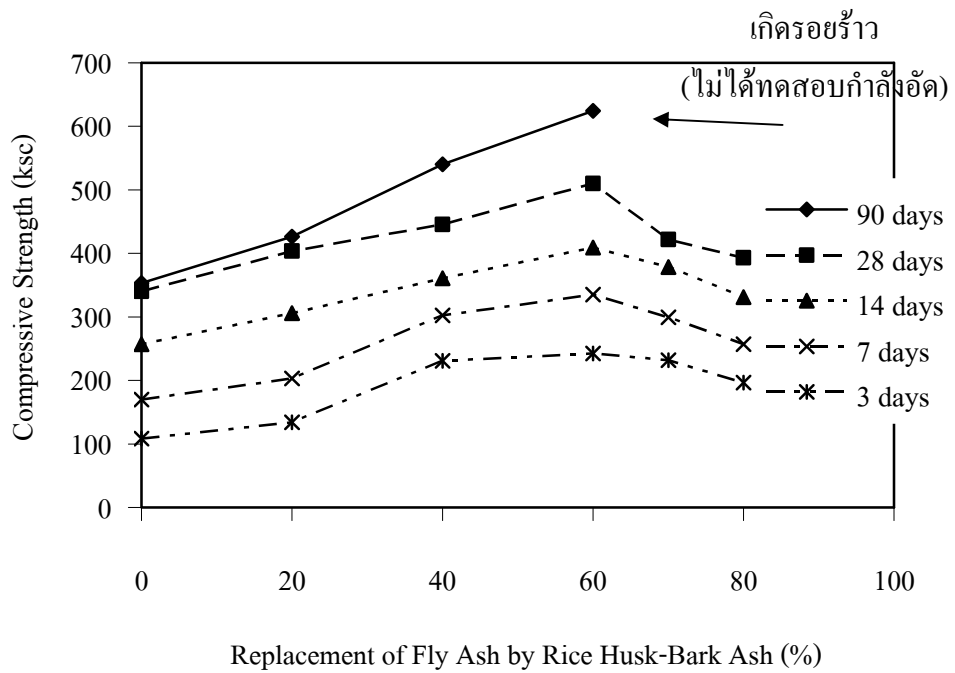
ในการทดลองนี้ เมื่อนำส่วนผสมที่ทำการศึกษาตามค่าอัตราส่วนทางเคมีโดยโมล (Mole Ratio) แล้วพบว่าเมื่อทำการแปรผันปริมาณการแทนที่เก้าถ่านหินด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ จะทำให้ค่าสัดส่วนของปริมาณน้ำต่อโคโซเดียมออกไซด์ (H_2O/Na_2O) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) มีค่าคงที่เท่ากับ 7.116 และ 0.277 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.5 นอกจากนี้เมื่อนำสัดส่วนระหว่าง Na_2O/SiO_2 และ Na_2O/Al_2O_3 มาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ รูปที่ 4.11 พบว่าการเพิ่มขึ้นของ Na_2O/SiO_2 ในช่วง 0.148-0.166 ทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ Na_2O/SiO_2 ในช่วง 0.166-0.266 และรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน Na_2O/Al_2O_3 ในช่วง 1.069-2.642 ทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นกำลังอัดเริ่มมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ Na_2O/Al_2O_3 ในช่วง 2.642-5.185



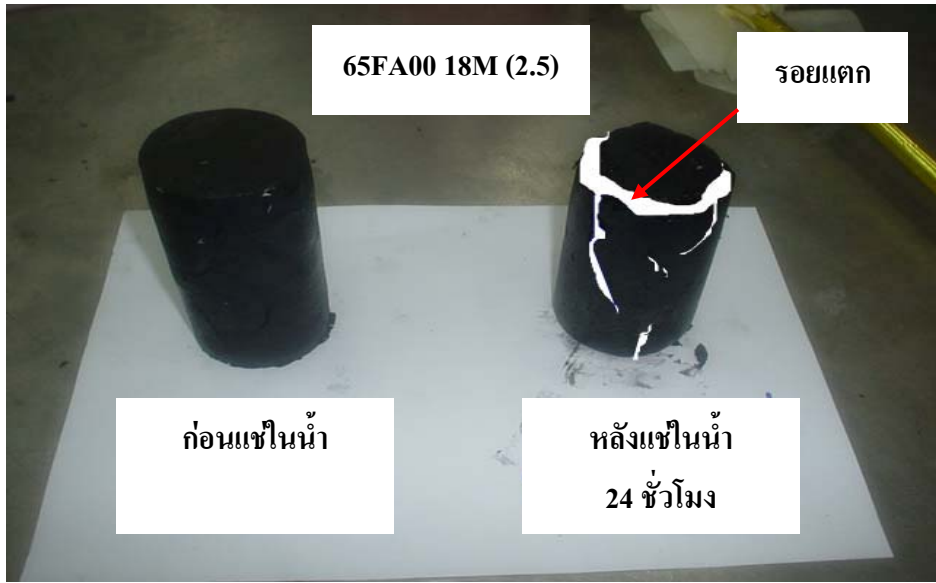
รูปที่ 4.7 การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่เก้าถ่านหินด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้



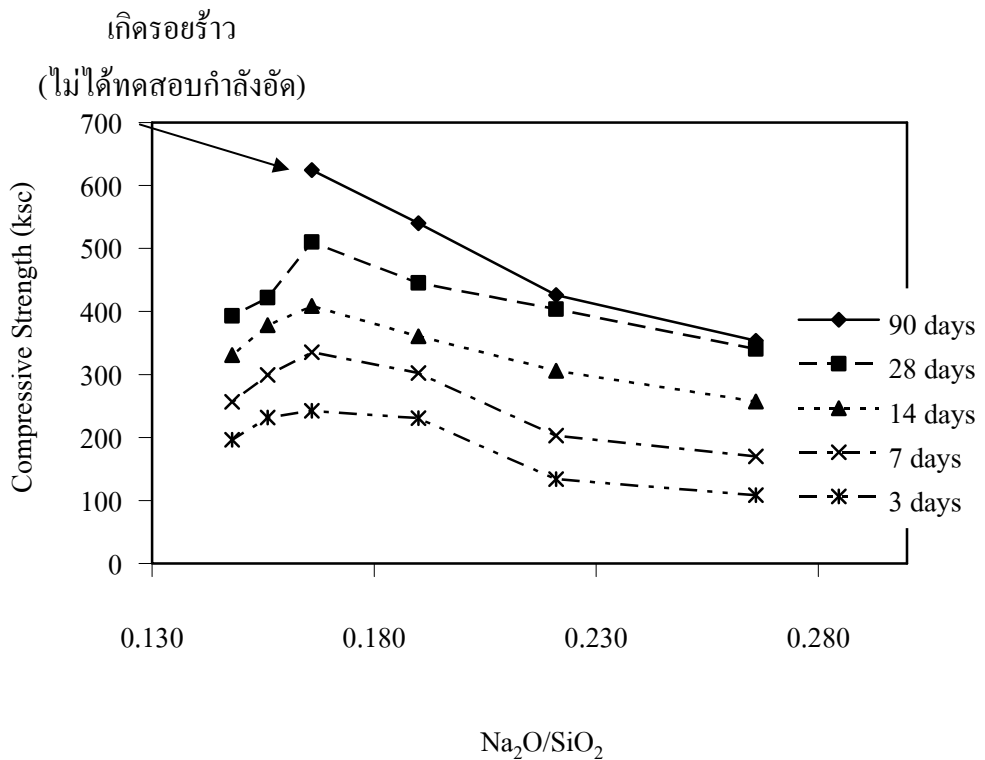
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาไดออกไซด์ (SiO₂/Al₂O₃) เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้



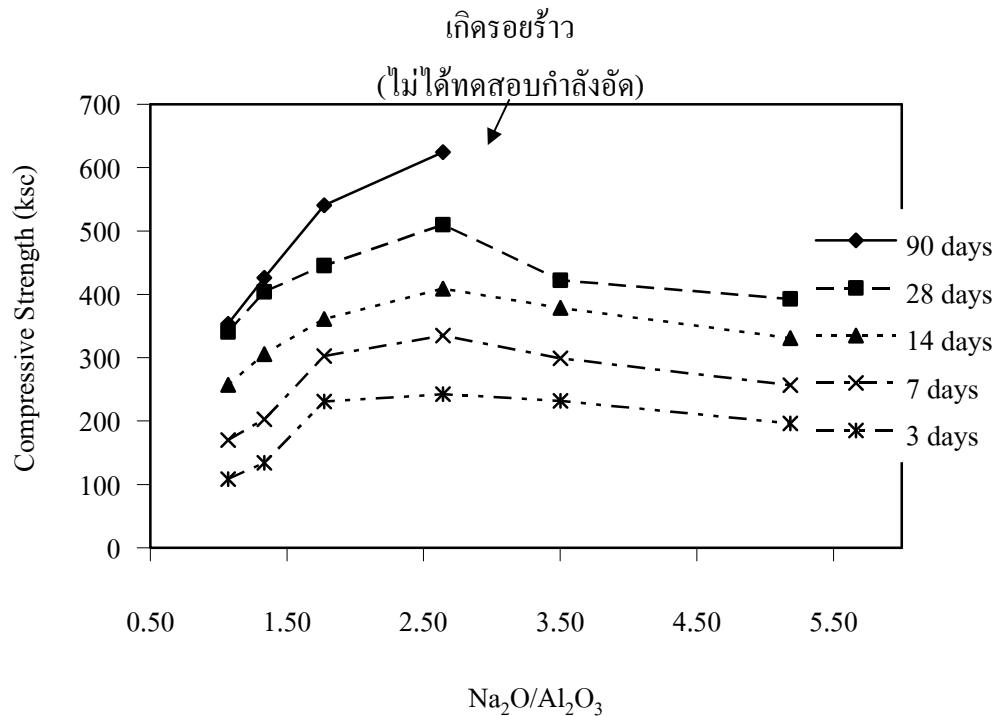
รูปที่ 4.9 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้



รูปที่ 4.10 แสดงการแตกร้าวของอีโพอซีโพลีเมอร์เพสต์ที่ใช้แก้วเคลบ-เปลือกไม้เพียงอย่างเดียว เป็นสารตั้งต้นเมื่อแช่น้ำ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของอีโพอซีโพลีเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (Na₂O/SiO₂) เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่แก้วผ่านหินด้วยแก้วเคลบ-เปลือกไม้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาไดรออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่เก้า่ำนหินด้วยเก้า่ำนกลบ-เปลือกไม้

4.3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก

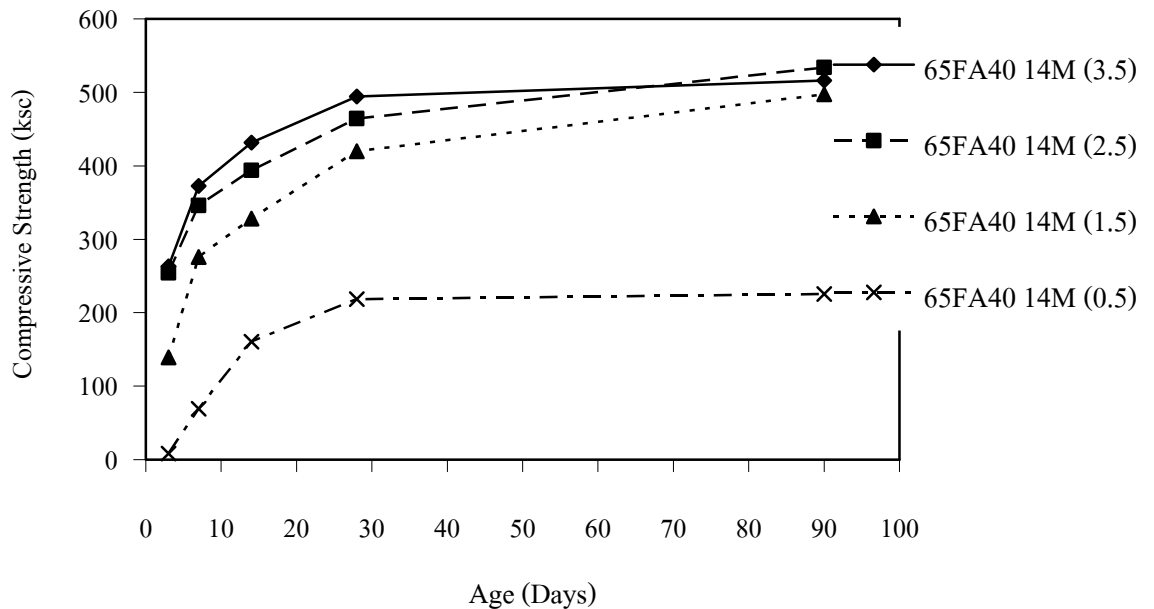
การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เมื่อนำส่วนผสม 65FA40 14M มาแปรผันปริมาณการใช้อัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$) เท่ากับ 0.5:1, 1.5:1, 2.5:1 และ 3.5:1 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราส่วนเท่ากับ 0.5 ให้ค่ากำลังอัดน้อยที่สุดคือ 8, 69, 160, 218 และ 225 กก/ซม² ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และเห็นได้จากรูปที่ 4.13 ว่ากำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการพัฒนากำลังอัดขึ้นตามอายุการบ่ม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วัน มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจาก 225 เป็น 497, 534 และ 516 กก/ซม² เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5:1, 1.5:1, 2.5:1 และ 3.5:1 โดยน้ำหนักตามลำดับ

จากการศึกษาของ Hardjito และคณะ [24] พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.4:1 จะให้ค่ากำลังอัด

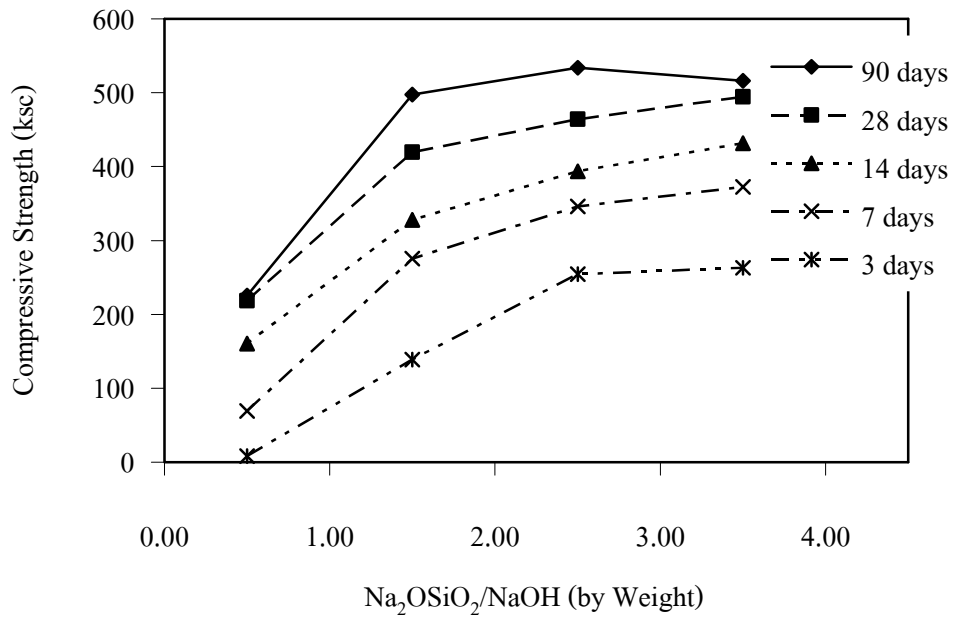
น้อยกว่าอัตราส่วน 2.5:1 ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 170 และ 570 กก/ซม² เมื่อใช้ความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8 โมลาร์ และยังพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 โมลาร์ เป็น 14 โมลาร์ ค่าอัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.4:1 ยังคงให้ค่ากำลังอัดน้อยกว่าอัตราส่วน 2.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ในรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าค่า อัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 2.5:1 แต่ผล การศึกษาในงานวิจัยนี้ไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Chindapasirt และคณะ [28] ที่พบว่าเมื่อใช้ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 และ 15 โมลาร์ ปริมาณของสาร โซเดียมซิลิเกตมีผล ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์น้อยมาก

ตารางที่ 4.4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$) โดยน้ำหนัก

Symbol	Curing Temperature (°C)	Compressive Strength (ksc)				
		3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
65FA40 14M (0.5)	27	8	69	160	218	225
65FA40 14M (1.5)		139	276	328	420	497
65FA40 14M (2.5)		254	346	394	464	534
65FA40 14M (3.5)		263	373	432	494	516



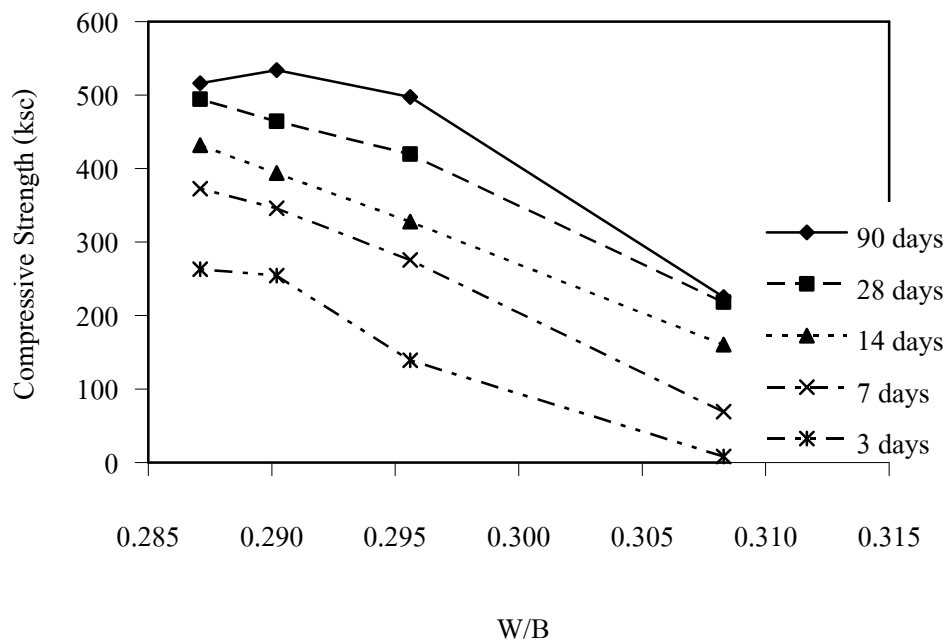
รูปที่ 4.13 การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก



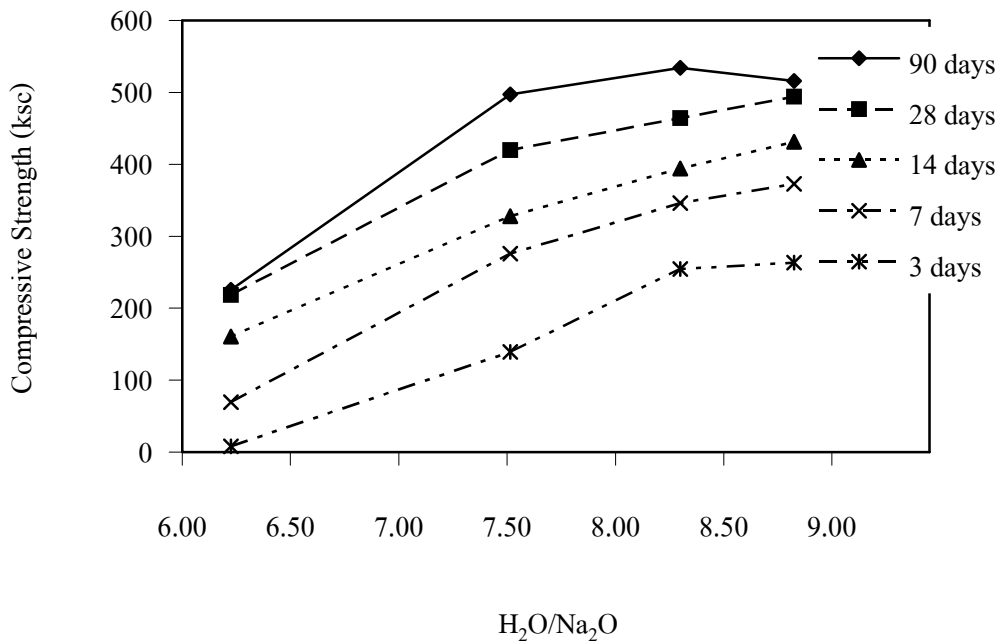
รูปที่ 4.14 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก

เมื่อนำส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มาวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนทางเคมีโดยโมล (Mole Ratio) พบว่าการแปรผันอัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 โดยน้ำหนัก ให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ใกล้เคียงกันมากคือ 0.308, 0.296, 0.290 และ 0.287 ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เมื่อนำปริมาณน้ำในส่วนผสมมาเปรียบเทียบกับปริมาณของไดโซเดียมออกไซด์ (H_2O/Na_2O) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 6.225-8.825 ดังรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อสัดส่วนของ H_2O/Na_2O มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อนำสัดส่วนระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์และไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ (Na_2O/SiO_2 และ Na_2O/Al_2O_3) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.137-0.232 และ 2.211-3.366 ตามลำดับ มาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อสัดส่วนของ Na_2O/SiO_2 และ Na_2O/Al_2O_3 มีค่าเพิ่มขึ้น

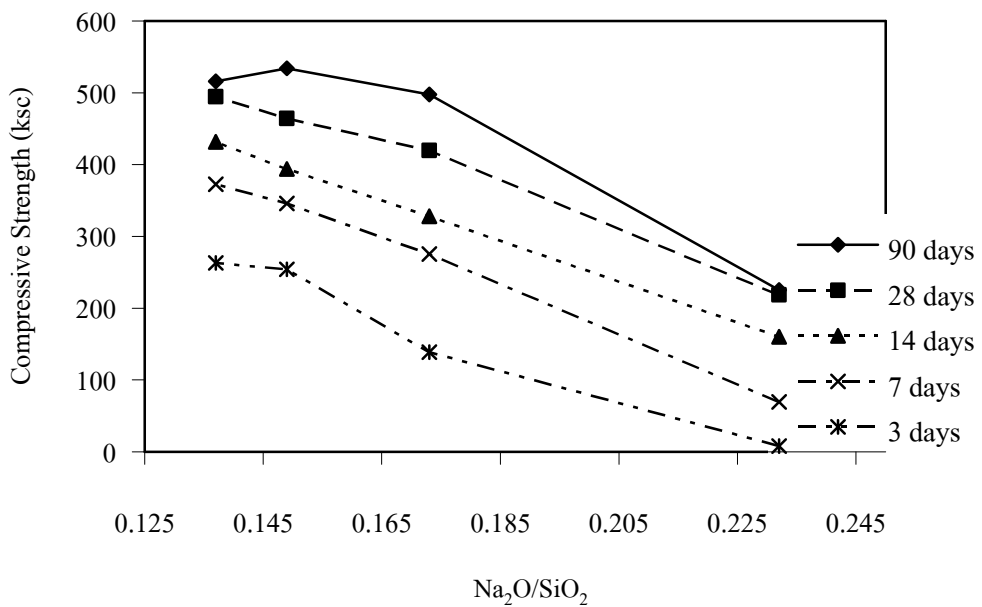
เมื่อนำสัดส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 14.515-16.137 พิจารณาร่วมกับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ พบว่าเมื่อสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าเพิ่มขึ้น แนวโน้มของกำลังอัดก็มีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ผลการทดลองในหัวข้อนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 กล่าวคือการเพิ่มปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีอยู่ในเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และลดปริมาณอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินลง ทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการใช้อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มปริมาณโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ร้อยละ 33.28 ในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ปริมาณอลูมินาออกไซด์ในส่วนผสมมีค่าคงที่ จึงทำให้สัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังอัดจึงมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกันกับอิทธิพลของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในหัวข้อที่ 4.2



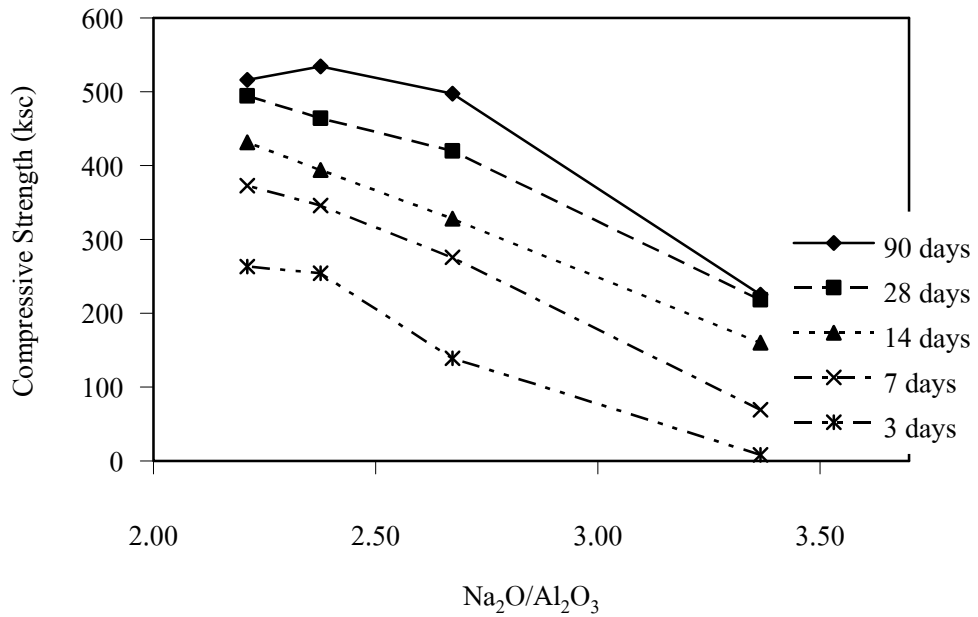
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยน้ำหนัก



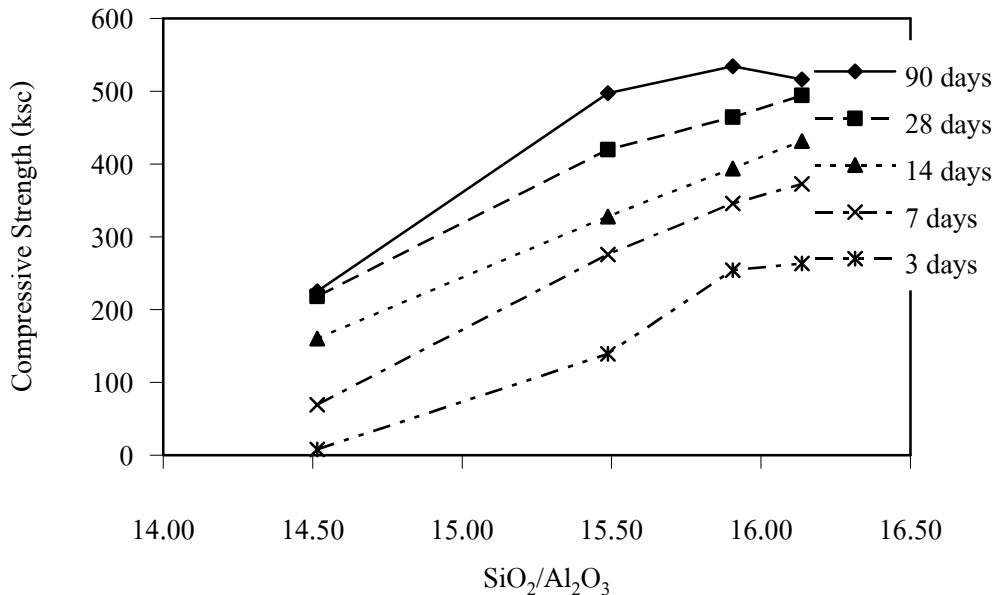
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์พาสต์กับปริมาณน้ำต่อไดโซเดียมออกไซด์ (H₂O/Na₂O) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์พาสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (Na₂O/SiO₂) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินา ไตรออกไซด์ (Na₂O/Al₂O₃) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินา ไตรออกไซด์ (SiO₂/Al₂O₃) เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก

4.4 อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

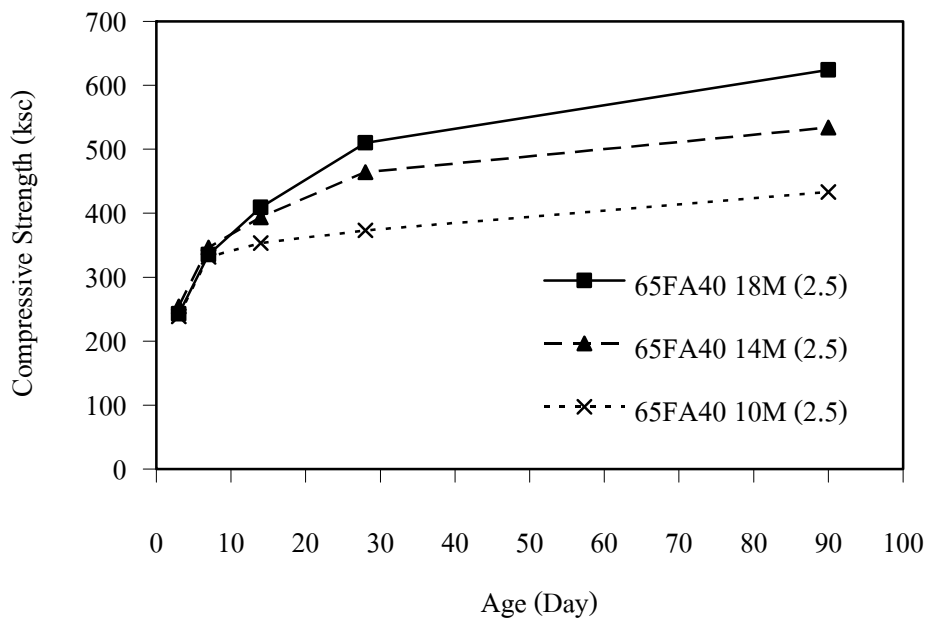
การศึกษานี้ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด ตาม มอก. 150-2518 น้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมล (Molecular Weight) มีค่าเท่ากับ 40 กรัม ซึ่งประกอบไปด้วย โซเดียม (Na) 24 กรัม, ออกซิเจน (O) 16 กรัม และไฮโดรเจน (H) 1 กรัม ดังนั้นการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ (Molarity) สามารถทำได้โดยการคำนวณน้ำหนักของเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการแล้วเติมน้ำสะอาดให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตรพอดี ตัวอย่างเช่น ต้องการเตรียมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ (10M) ต้องใช้เกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400 กรัม ละลายในน้ำสะอาดให้ได้ปริมาตร 1 ลิตรพอดี เมื่อนำสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์มาทำการทดสอบหาความหนาแน่น ดังแสดงในตารางที่ ก.3 (อยู่ในภาคผนวก ก) พบว่ามีความหนาแน่นเท่ากับ 1.320 กรัม/ซม³ ดังนั้นในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ที่มีปริมาตร 1 ลิตร จึงประกอบด้วยเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400 กรัม และน้ำเท่ากับ 916 กรัม

ผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เมื่อนำส่วนผสม 65FA40 XXM (2.5) มาแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยมีอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และบ่มในห้องที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่ากำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์มีการพัฒนาขึ้นตามอายุการบ่ม และอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อกำล้างในชวงอายุ 3 และ 7 วัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chindaprasirt และคณะ [27] ที่พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อกำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน ทั้งยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hardjito และคณะ [24] ที่พบว่ากำล้างอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อกำล้างอัดมากนัก แต่ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.4 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อกำล้างของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

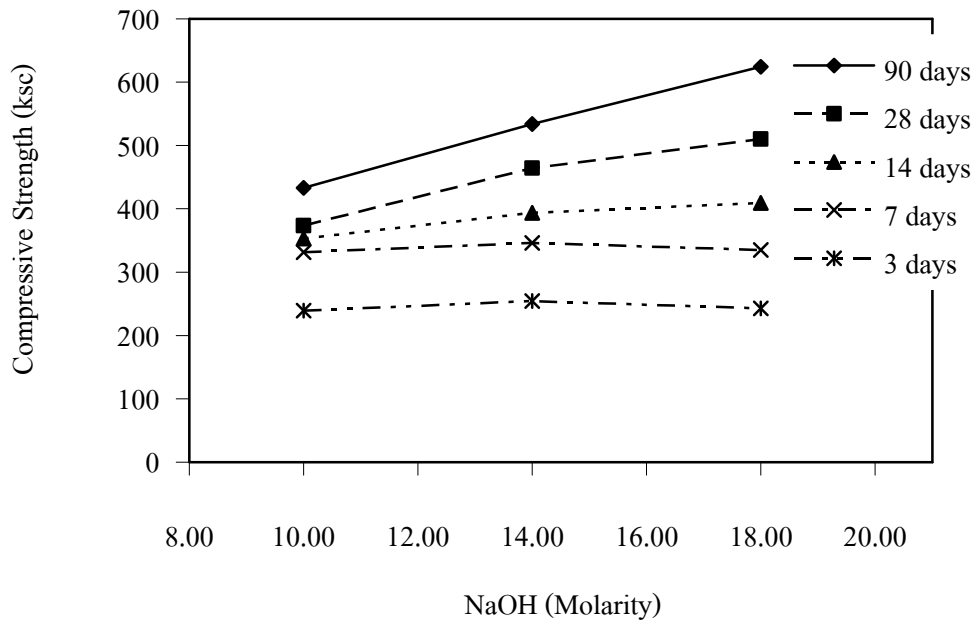
อย่างไรก็ดีการศึกษาครั้งนี้พบว่าเมื่อจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีอายุมากกว่า 7 วัน ผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เริ่มมีมากขึ้น เช่นที่อายุ 14 วัน กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ มีค่าเท่ากับ 353, 394 และ 409 กก/ซม² และที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 433, 534 และ 624 กก/ซม² ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

Symbol	Curing Temperature (°C)	Compressive Strength (ksc)				
		3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
65FA40 10M (2.5)	27	239	332	353	373	433
65FA40 14M (2.5)		254	346	394	464	534
65FA40 18M (2.5)		243	335	409	510	624

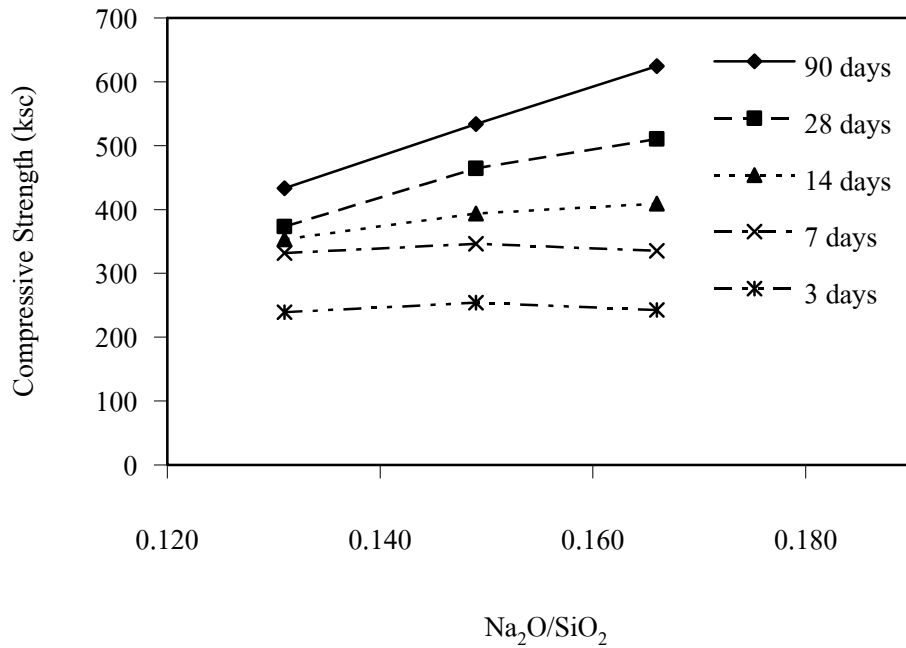


รูปที่ 4.20 การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

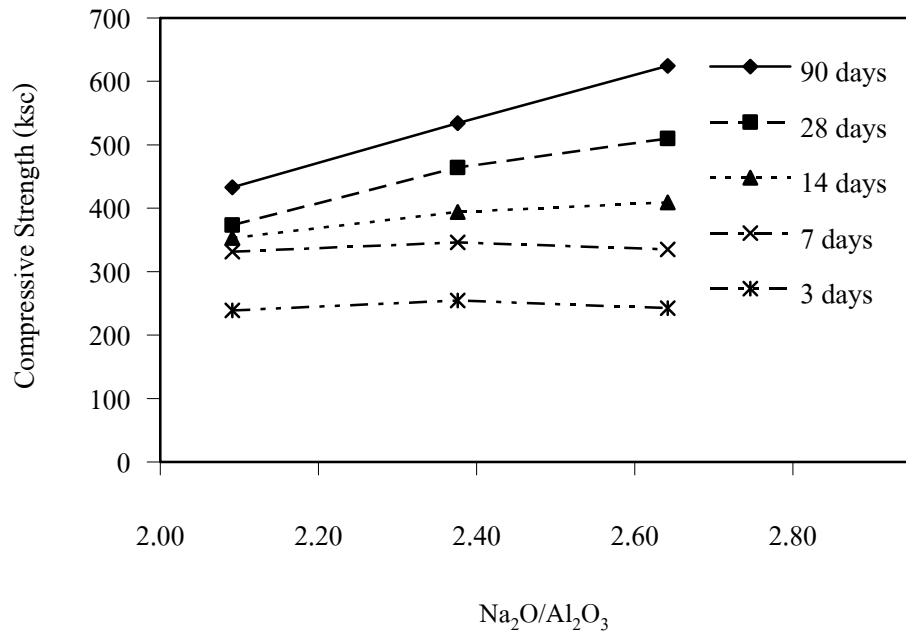


รูปที่ 4.21 อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

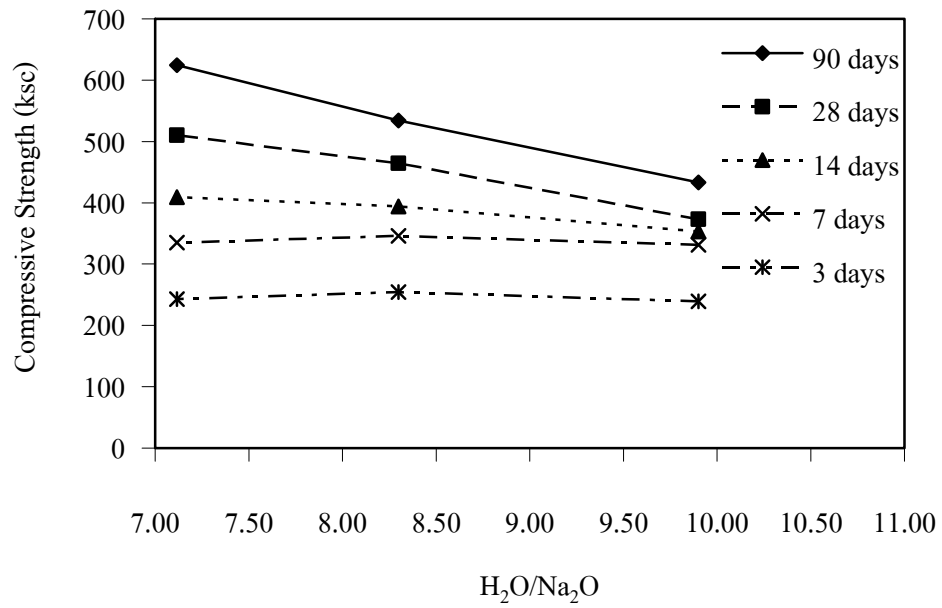
เมื่อนำส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มาวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนทางเคมีโดยโมล (Mole Ratio) พบว่าการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ ให้ค่าสัดส่วนของปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่คงที่เท่ากับ 15.906 และสัดส่วนระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$), ไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$), ปริมาณน้ำต่อไดโซเดียมออกไซด์ ($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.131-0.166, 2.091-2.642, 7.116-9.901 และ 0.290-0.308 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อค่าสัดส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ได้จากการแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าลดลง ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ รูปที่ 4.23 การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมาก จะทำให้สัดส่วนของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ มีค่าน้อยลง ส่งผลทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นน้อยลง ทำให้สัดส่วนของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ มีค่ามากขึ้น ส่งผลทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และจากการศึกษาพบว่าเมื่อนำค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับกำลังอัด พบว่าให้แนวโน้มเดียวกันกับการเปรียบเทียบในหัวข้อที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ซึ่งมีตัวแปรที่แตกต่างกัน นั่นคือ เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าที่ต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.25



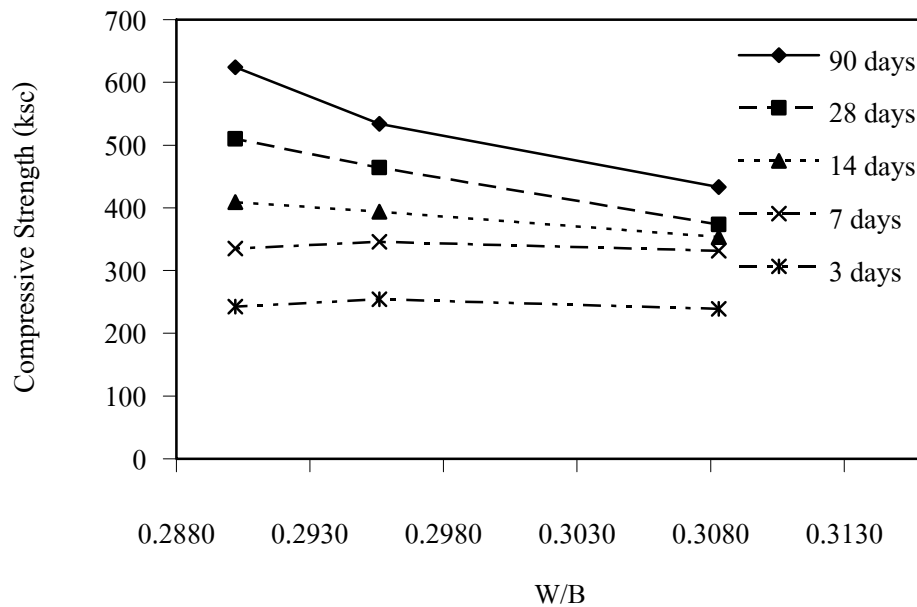
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์พาสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์พาสต์กับไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาไดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับปริมาณน้ำต่อไดโซเดียมออกไซด์ (H_2O/Na_2O) เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



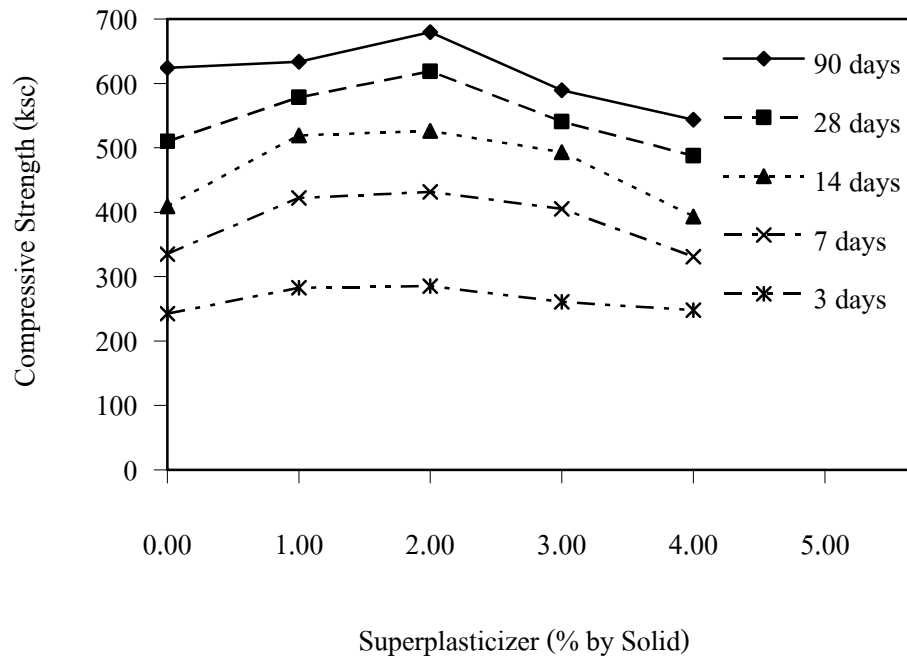
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.5 ผลกระทบของปริมาณน้ำและสารลดน้ำตอกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ผลกระทบของปริมาณน้ำและสารลดน้ำตอกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เมื่อนำส่วนผสมที่มีสัญลักษณ์ 65FA40 18M (2.5) มาเป็นส่วนผสมควบคุม จากนั้นนำน้ำ (W) หรือซูปเปอร์พลาสติกไฮเซอร์ (SP) แทนที่สารโซเดียมซilikेटและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้นและใช้สัญลักษณ์ 65FA40 18M (1W), 65FA40 18M (2W), 65FA40 18M (3W) และ 65FA40 18M (4W) เมื่อนำน้ำแทนที่สารโซเดียมซilikेटและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น หรือ ใช้สัญลักษณ์ว่า 65FA40 18M (1SP), 65FA40 18M (2SP), 65FA40 18M (3SP) และ 65FA40 18M (4SP) เมื่อนำซูปเปอร์พลาสติกไฮเซอร์แทนที่สารโซเดียมซilikेटและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) ที่นำมาเป็นส่วนผสมควบคุมมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 243, 335, 409, 510 และ 624 กก/ซม² ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

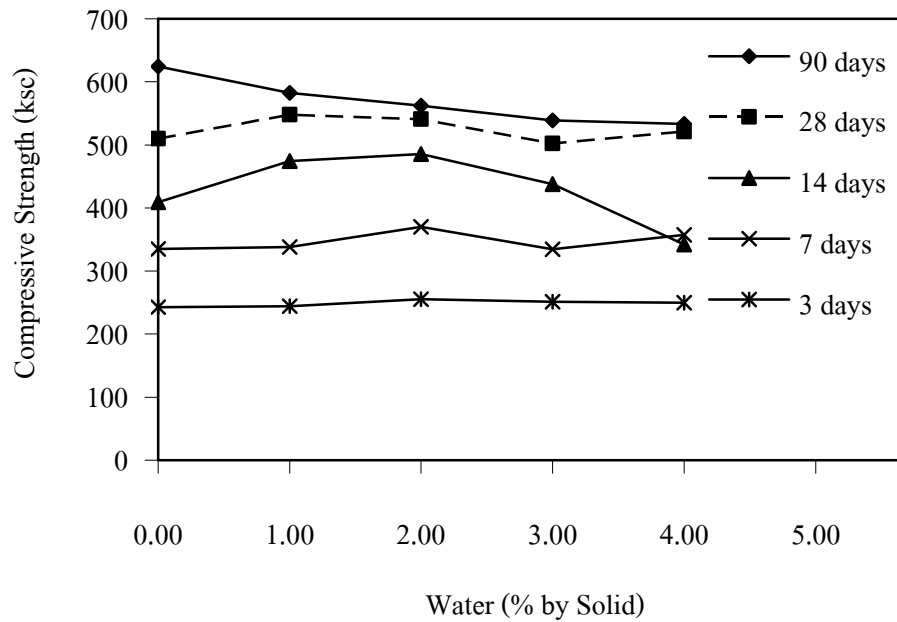
ตารางที่ 4.6 ผลกระทบของปริมาณน้ำและสารลดน้ำตอกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Symbol	Curing Temperature (°C)	Compressive Strength (ksc)				
		3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
65FA40 18M (2.5)		243	335	409	510	624
65FA40 18M (1SP)		283	422	519	602	634
65FA40 18M (2SP)	27	285	432	526	619	680
65FA40 18M (3SP)		261	405	493	541	589
65FA40 18M (4SP)		248	331	393	488	544
65FA40 18M (1W)		244	338	474	548	582
65FA40 18M (2W)	27	255	370	486	541	562
65FA40 18M (3W)		252	335	438	502	539
65FA40 18M (4W)		250	357	342	521	533



รูปที่ 4.26 ผลกระทบของปริมาณการใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสดี

รูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์แทนที่สารโซเดียมซิงเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น พบว่าปริมาณการใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 285, 432, 526, 619 และ 680 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 118, 129, 129, 121 และ 109 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม 65FA40 18M (2.5) ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ในขณะที่ผลการทดสอบพบว่าการเพิ่มปริมาณการใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์แทนที่สารโซเดียมซิงเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 3 และ 4 ทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มที่ลดลง แต่ปริมาณการใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วนร้อยละ 3 {65FA40 18M (3SP)} ยังคงให้ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน สูงกว่าส่วนผสมควบคุม 65FA40 18M (2.5) ในทุกอายุการบ่ม โดยมีค่าเท่ากับ 261, 405, 493 และ 541 กก/ชม² ส่วนที่อายุ 90 วัน ให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่ามีค่าเท่ากับ 589 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 108, 121, 121, 106 และ 94 ของส่วนผสมควบคุม และเริ่มแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วนร้อยละ 4 เริ่มส่งผลให้กำลังอัดมีค่าน้อยกว่าส่วนผสมควบคุม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปริมาณการใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสม ควรมีอัตราส่วนอยู่ที่ระหว่างร้อยละ 2-3 ของน้ำหนักสารตั้งต้น



รูปที่ 4.27 ผลกระทบของปริมาณน้ำต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

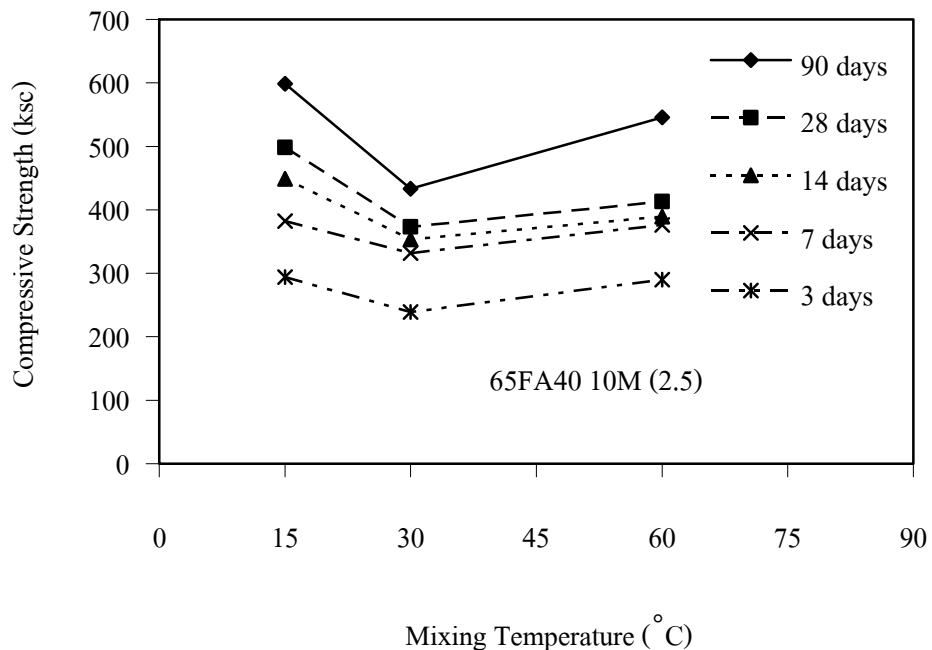
ตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.27 พบว่าปริมาณน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 ยังไม่ส่งผลต่อกำลังอัดให้เห็นเป็นที่ชัดเจนนักแต่มีแนวโน้มว่าการใช้น้ำมากขึ้นจะมีผลทำให้กำลังอัดยิ่งต่ำลงเพราะค่าของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่คำนวณได้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.282, 0.286, 0.291 และ 0.296 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบปริมาณการใช้ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ อาจกล่าวได้ว่าผลการศึกษานี้ สอดคล้องกับรายงานของ Chindaprasirt และคณะ [27] ที่พบว่าการใช้น้ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่การใช้สารลดน้ำทำให้กำลังอัดต่ำลง

4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

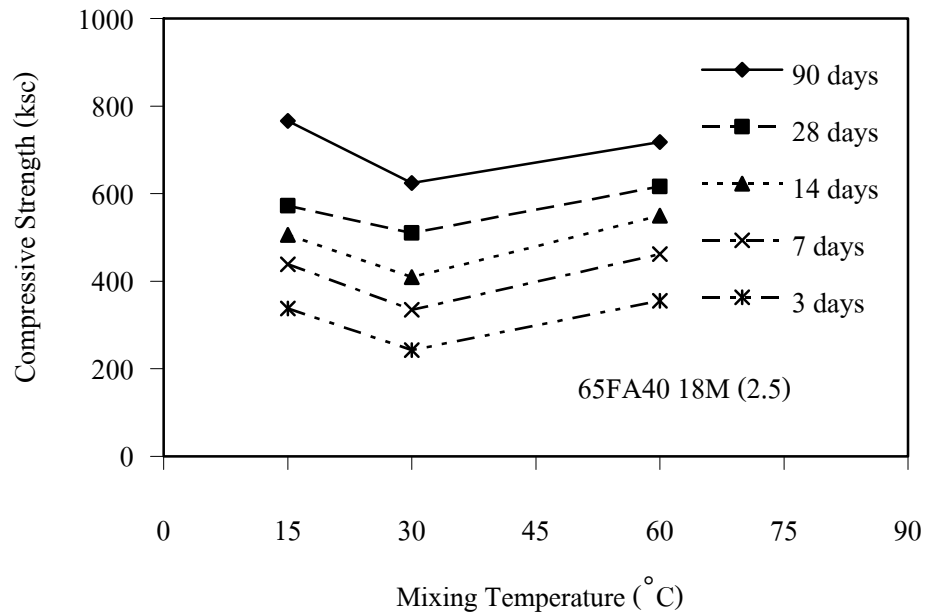
ผลการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่อกำลังอัด โดยมีสัดส่วนของปฏิภาคส่วนผสมที่แตกต่างกัน 10 ส่วนผสม มีการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์เท่ากับ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 โดยตารางที่ 4.7 แสดงถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ที่ทำการบ่มในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส ตลอดเวลา ผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดคือ 70FA40 18M (2.5) โดยมีการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมดที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 403, 511, 619, 609 และ 784 กก/ชม²

ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ และส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดได้แก่ 65FA60 18M (1.5) โดยมีการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมดที่ใช้ผสมจีโอโพลีเมอร์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 66, 192, 268, 430 และ 264 กก/ซม² ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ส่วนในตารางที่ 4.8 แสดงถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ที่ทำการบ่มด้วยเตาอบที่มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำออกมาบ่มไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดเมื่อทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง คือ 70FA40 18M (2.5) โดยมีการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมดที่ใช้ผสมจีโอโพลีเมอร์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 604, 592, 706, 771, และ 842 กก/ซม² ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

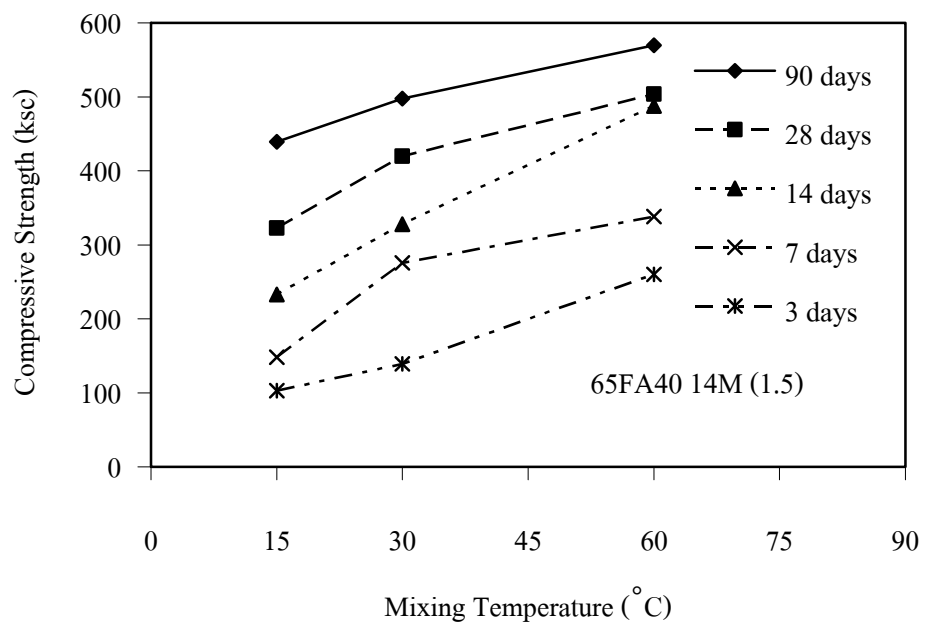
เมื่อนำส่วนผสม 65FA40 10M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5) มาเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลีเมอร์เพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.29 พบว่าสัดส่วนทั้งสองให้แนวโน้มเดียวกัน เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสม เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่า การใช้อุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาผสม เท่ากับ 15 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งค่ากำลังอัดของสัดส่วนทั้งสองมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอายุการบ่ม



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลีเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 65FA40 10M (2.5)



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 65FA40 18M (2.5)



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน เมื่อใช้สัดส่วน 65FA40 14M (1.5)

เมื่อนำส่วนผสม 65FA40 14M (1.5), 65FA40 14M (2.5) และ 70FA40 18M (2.5) มาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.30, รูปที่ 4.31 และ รูปที่ 4.32 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลีเมอร์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียสของทั้งสามสัดส่วนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า การใช้อุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสม เท่ากับ 30 และ 15 องศาเซลเซียส ซึ่งค่ากำลังอัดของสัดส่วนทั้งสามมีแนวโน้มเดียวกันในทุกอายุการบ่ม

เมื่อนำส่วนผสม 70FA40 10M (2.5) และ 65FA60 18M (2.5) มาเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.34 พบว่าอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสม ของสัดส่วนทั้งสองที่ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดเท่ากับ 15 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่าให้ค่ากำลังอัดของสัดส่วน 70FA40 10M (2.5) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก เมื่อควบคุมอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมเป็น 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส และจากรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของสัดส่วน 65FA60 18M (2.5) มีค่ามากที่สุด เมื่อใช้อุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลา เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบผลกระทบของอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ในการผสมจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลีเมอร์มีผลกระทบโดยตรงต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์เพราะอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลีเมอร์ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์แตกต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญ

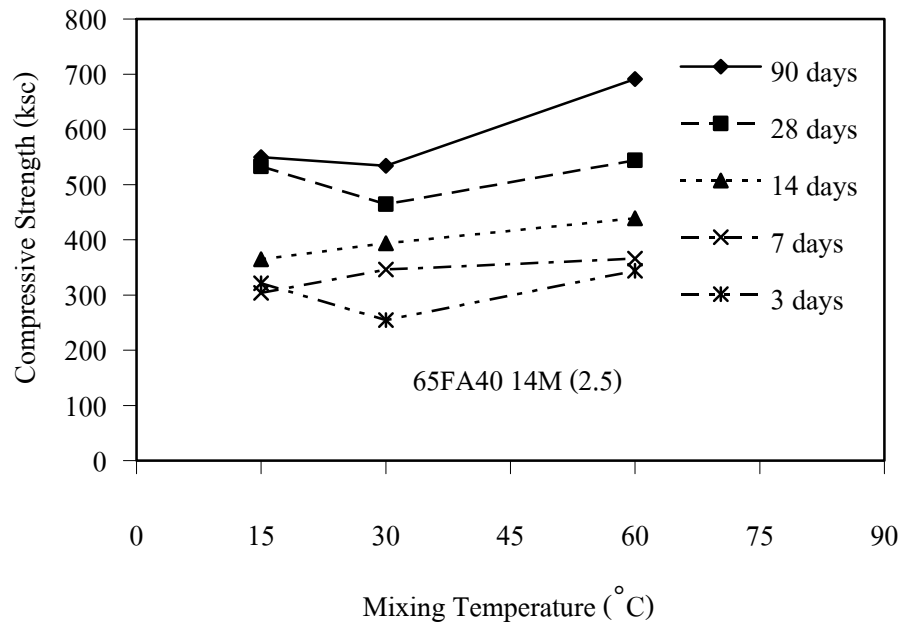
ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการบ่มจีโอโพลีเมอร์เพสต์ ด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาบ่มต่อในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์พัฒนาได้รวดเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การบ่มจีโอโพลีเมอร์เพสต์ ในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส ตลอดเวลา ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของนักวิจัยอีกหลายท่าน [7, 23, 25, 26] ที่พบว่า การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้การรับกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์สูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของนักวิจัยอีกหลายท่าน [26, 29, 30, 32] ในปี 2006 พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มในช่วง 60-75 องศาเซลเซียส จะไม่ทำให้โครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์เปลี่ยนไป ถ้าใช้อุณหภูมิในการบ่มมากกว่า 75 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายในจะสูญเสียอนุภาคของน้ำทำให้เกิดการแตกร้าวภายใน เพราะโครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลีเมอร์จะประกอบไปด้วยโมเลกุลของน้ำอยู่ภายใน ถ้าได้รับความร้อนมากๆ โครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์จะเปลี่ยนไป ซึ่งจากรูปถ่ายกำลังขยาย 200 เท่า ในรูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 ก็แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างทั้งที่อบและไม่อบก็มีโครงสร้างที่สมบูรณ์ไม่แตกร้าว

ตารางที่ 4.7 ผลกระทบของอุณหภูมิผสมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสตีเมื่อปมที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

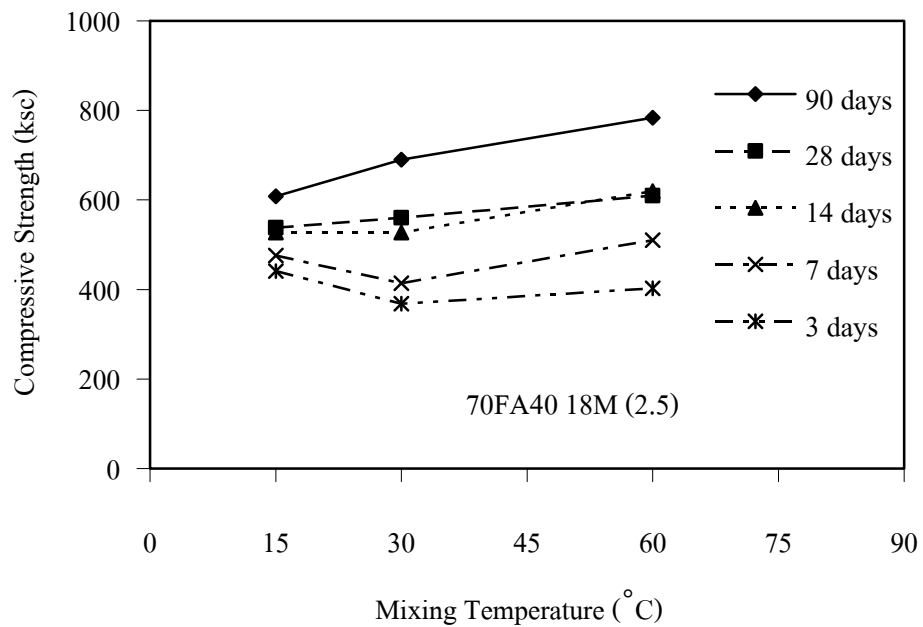
Symbol	Mixing Temperature (°C)	Compressive Strength (ksc)				
		3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
65FA40 10M (2.5)	15	294	382	449	498	599
	30	239	332	353	373	433
	60	290	376	389	413	545
65FA40 14M (2.5)	15	321	304	365	533	550
	30	254	346	394	464	534
	60	344	366	439	544	691
65FA40 14M (1.5)	15	103	148	233	323	439
	30	139	276	328	420	497
	60	260	338	488	504	570
65FA40 18M (2.5)	15	337	439	506	572	766
	30	243	335	409	510	624
	60	355	462	550	616	718
70FA40 10M (2.5)	15	280	364	438	448	563
	30	251	423	465	467	618
	60	383	356	469	479	539
70FA40 18M (2.5)	15	441	476	528	538	608
	30	368	414	528	560	690
	60	403	511	619	609	784
70FA60 10M (2.5)	15	296	401	415	435	462
	30	257	363	415	440	332
	60	367	339	377	490	444
70FA60 10M (1.5)	15	NA	NA	NA	NA	NA
	30	240	384	444	459	466
	60	257	359	261	386	365
65FA60 18M (2.5)	15	168	223	306	386	400
	30	231	303	361	445	540
	60	195	247	326	404	362
65FA60 18M (1.5)	15	NA	NA	NA	NA	NA
	30	71	256	310	328	370
	60	66	192	268	430	264

ตารางที่ 4.8 ผลกระทบของอุณหภูมิผสมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์
เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

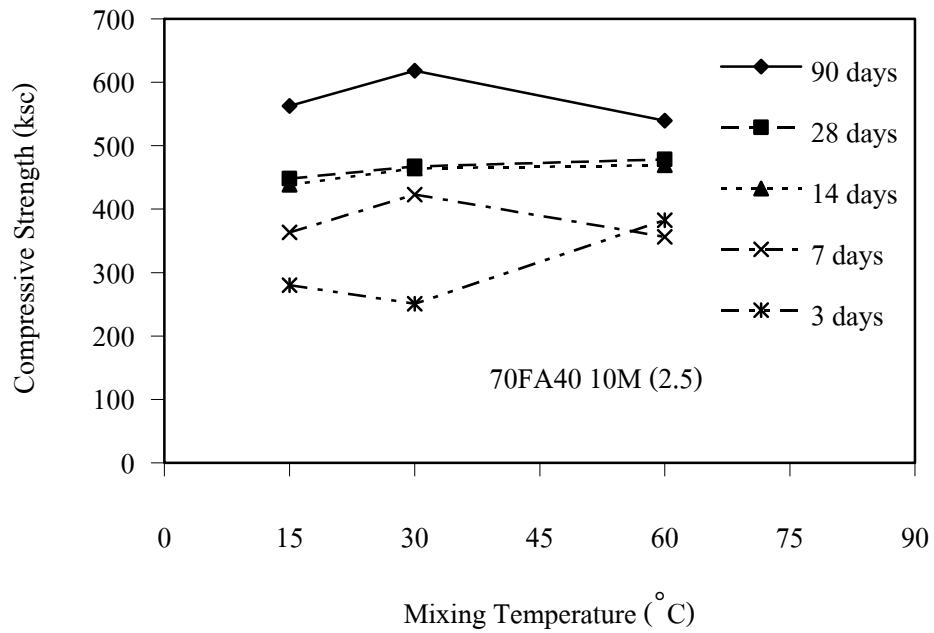
Symbol	Mixing Temperature (°C)	Compressive Strength (ksc)				
		3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
65FA40 10M (2.5)	15	326	359	518	478	608
	30	337	390	387	412	532
	60	445	401	462	496	535
65FA40 14M (2.5)	15	453	318	350	583	583
	30	414	400	427	426	614
	60	508	451	496	724	745
65FA40 14M (1.5)	15	NA	NA	NA	NA	NA
	30	383	456	456	447	540
	60	500	550	606	552	584
65FA40 18M (2.5)	15	587	645	616	593	706
	30	492	492	549	560	728
	60	614	675	694	713	759
70FA40 10M (2.5)	15	537	528	523	565	580
	30	499	474	562	578	600
	60	667	631	539	550	535
70FA40 18M (2.5)	15	673	714	657	670	651
	30	450	447	452	583	669
	60	604	592	706	771	842
70FA60 10M (2.5)	15	458	509	360	423	384
	30	450	466	474	504	540
	60	419	351	336	515	392
70FA60 10M (1.5)	15	440	335	327	446	455
	30	323	377	437	451	423
	60	341	339	313	445	402
65FA60 18M (2.5)	15	313	336	314	471	356
	30	524	523	567	555	426
	60	452	318	366	376	336
65FA60 18M (1.5)	15	NA	NA	NA	NA	NA
	30	185	449	277	511	489
	60	391	393	232	530	422



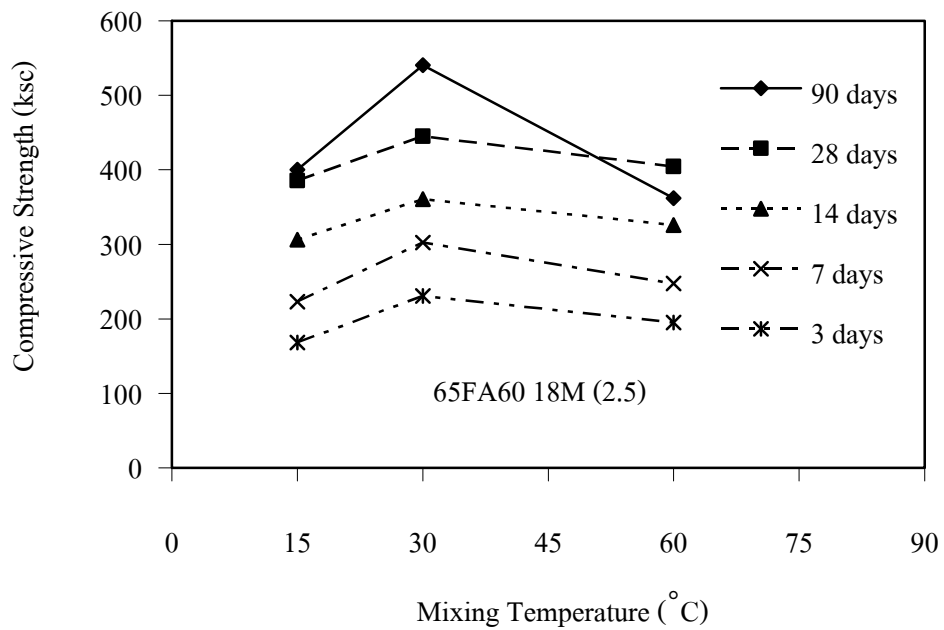
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 65FA40 14M (2.5)



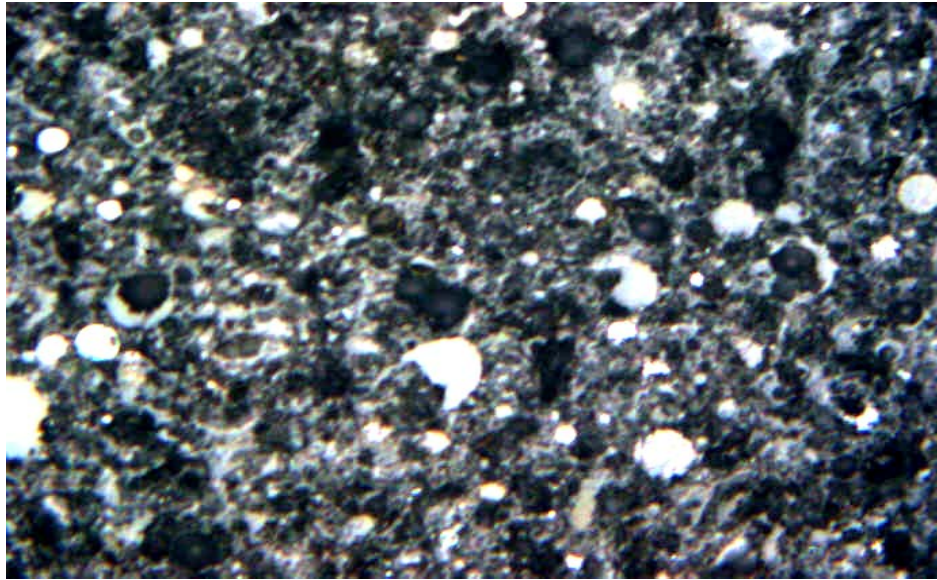
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 70FA40 18M (2.5)



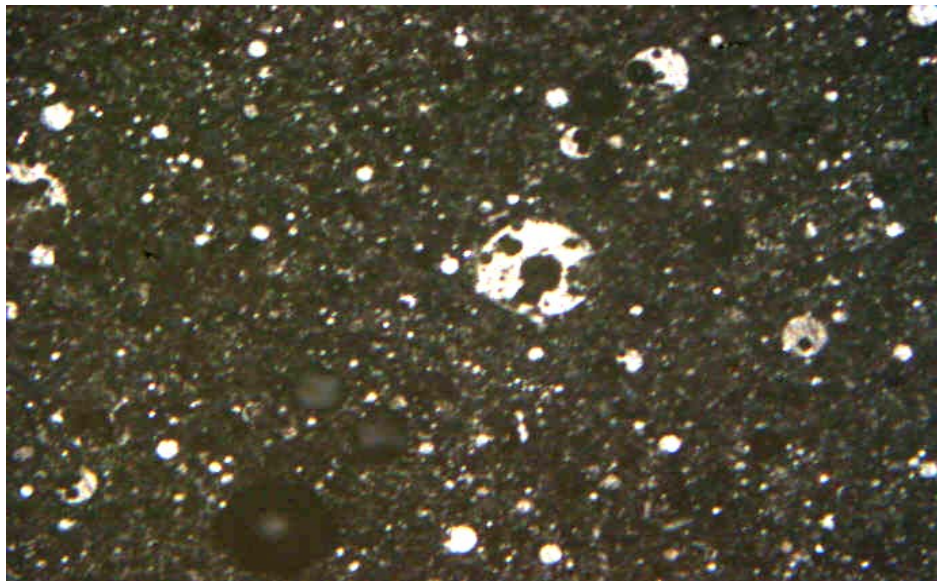
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 70FA40 10M (2.5)



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอุณหภูมิของวัสดุทั้งหมด ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์ เมื่อใช้สัดส่วน 65FA60 18M (2.5)



รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายกำลังขยาย 200 เท่าของเพลสต์ที่ผ่านการอบ



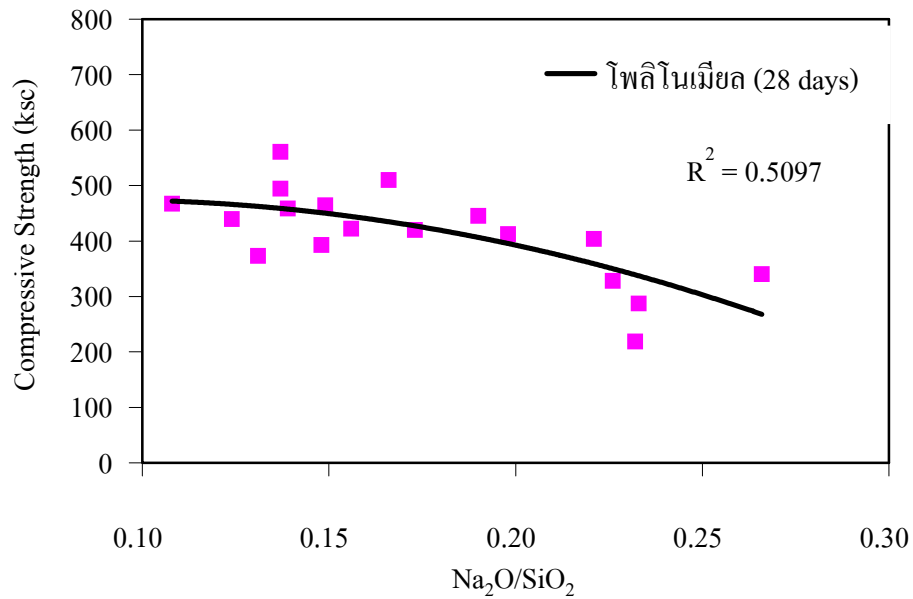
รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายกำลังขยาย 200 เท่าของเพลสต์ที่ไม่ผ่านการอบ

4.7 อิทธิพลของสัดส่วนทางเคมีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ในหัวข้อนี้เป็นการนำสัดส่วนทางเคมีโดยโมล (Molar Weight) ทั้งหมด 18 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3.5 มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน สัดส่วนทางเคมีโดยโมลที่นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกำลังอัดได้แก่ ไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$), ไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$), ซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), โมเลกุลของน้ำต่อไคโซเดียมออกไซด์ ($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ซึ่งได้แสดงตัวอย่างการคำนวณสัดส่วนดังกล่าวไว้ในภาคผนวก ง

4.7.1 อิทธิพลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

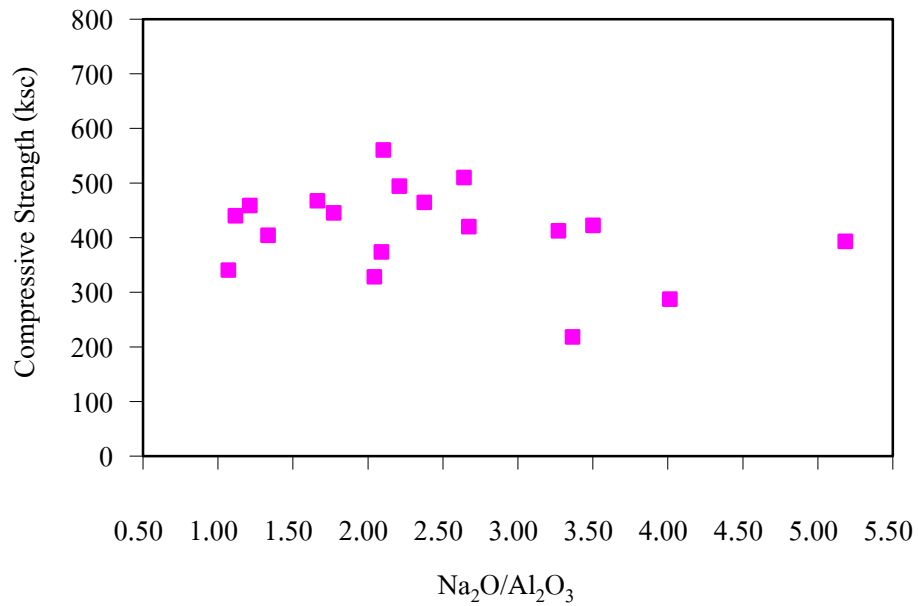
Hardjito และคณะ [24] ได้ทำการทดลองโดยแปรผันสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ในช่วงระหว่าง 0.097-0.120 พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เถ้านหินเป็นสารตั้งต้น ที่อายุ 7 วัน มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ไม่ส่งผลให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มากนัก แต่จากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยแปรผันค่าสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ อยู่ระหว่าง 0.108-0.266 ซึ่งมีช่วงที่กว้างกว่า ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ มีผลกระทบต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.37 แสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ที่มีค่าของสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ อยู่ระหว่าง 0.108-0.266 มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงเมื่อสัดส่วนดังกล่าวมีค่ามากขึ้น ซึ่งข้อสรุปนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบในรูปที่ 4.4, 4.11 และ 4.17 แต่ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบในรูปที่ 4.22 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่านอกจากสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ แล้วยังมีผลกระทบอื่น ที่ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าที่เปลี่ยนไป งานวิจัยนี้พบแนวโน้มว่า สัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ที่มากจะทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับโคโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) ที่อายุ 28 วัน

4.7.2 อิทธิพลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

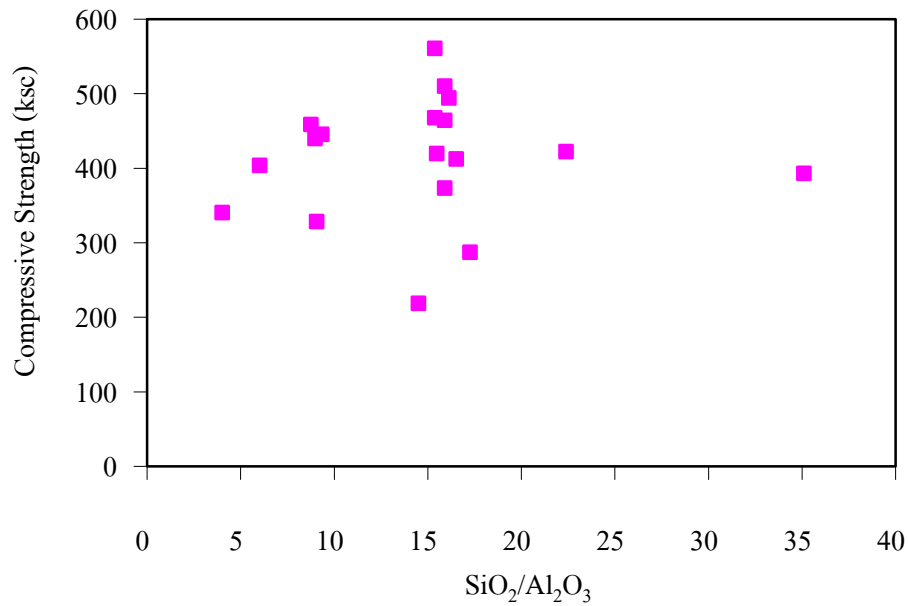
ผลกระทบของสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ที่มีค่าของสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ อยู่ระหว่าง 1.069-5.185 มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลง เมื่อสัดส่วนดังกล่าวมีค่ามากขึ้น ซึ่งข้อสรุปนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบในรูปที่ 4.5, 4.12 และ 4.18 แต่ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบในรูปที่ 4.22 ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับที่อภิปรายไว้แล้วในหัวข้อ 4.7.1 ในรูปที่ 4.22 เห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ในช่วงอายุ 3, 7 และ 14 วัน มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีอายุ 28 และ 90 วัน สัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เริ่มแสดงให้เห็นความแตกต่างของกำลังอัดได้อย่างชัดเจน จึงสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณของ Na_2O โดยการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้การพัฒนากำลังอัดในอายุปลายดีขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณของ Na_2O ให้สูงขึ้น โดยการปรับส่วนผสมอื่นจะทำให้กำลังมีค่าต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามในรูปที่ 4.37 และ 4.38 แนะนำว่าควรใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับโคโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินา ไตรออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่อายุ 28 วัน

4.7.3 อิทธิพลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

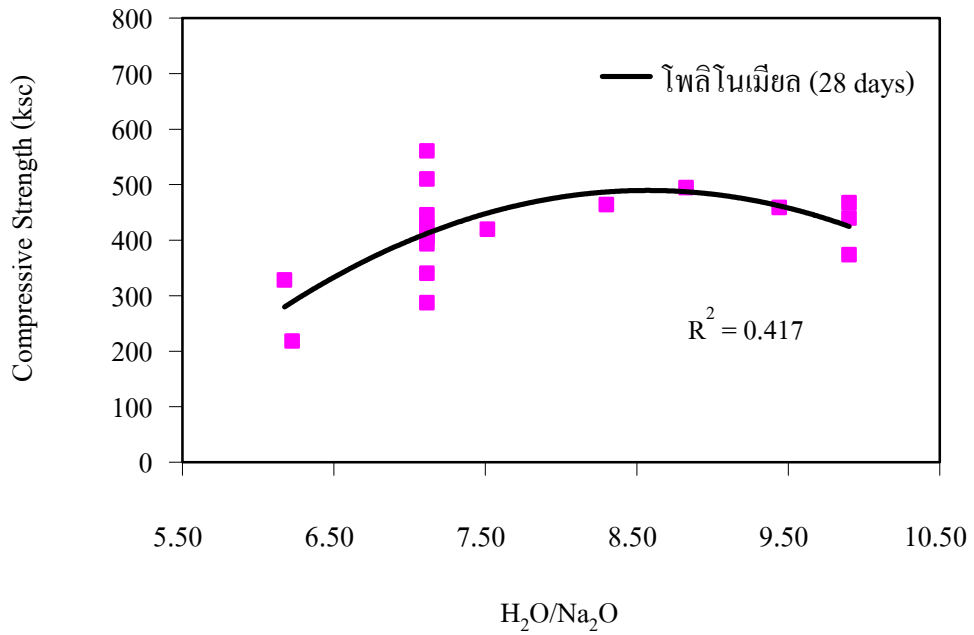
เมื่อนำค่าสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของจีโอโพลิเมอร์ทั้ง 18 ส่วนผสมมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน (ดูรูปที่ 4.39) พบว่าสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ไม่ส่งผลต่อกำลังอัดมากนัก ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดสอบในรูปที่ 4.8 อย่างไรก็ตามหากพิจารณาสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีค่าอยู่ในช่วง 15-20 ในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่ากำลังอัดมีค่าแตกต่างกันมาก เมื่อนำค่ากำลังอัดสูงสุดและต่ำสุดในช่วงสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 15-20 มาพิจารณา พบว่าค่ากำลังอัดสูงสุดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ปรากฏในรูปนี้มีค่าสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.137 และในขณะที่ค่ากำลังอัดต่ำสุดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ปรากฏในรูปนี้มีค่าสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.232 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจีโอโพลิเมอร์มีปริมาณของ Na_2O ในส่วนผสมมากทำให้กำลังอัดมีค่าน้อยลง ดังนั้นนอกจากค่าสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ แล้วค่า $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์



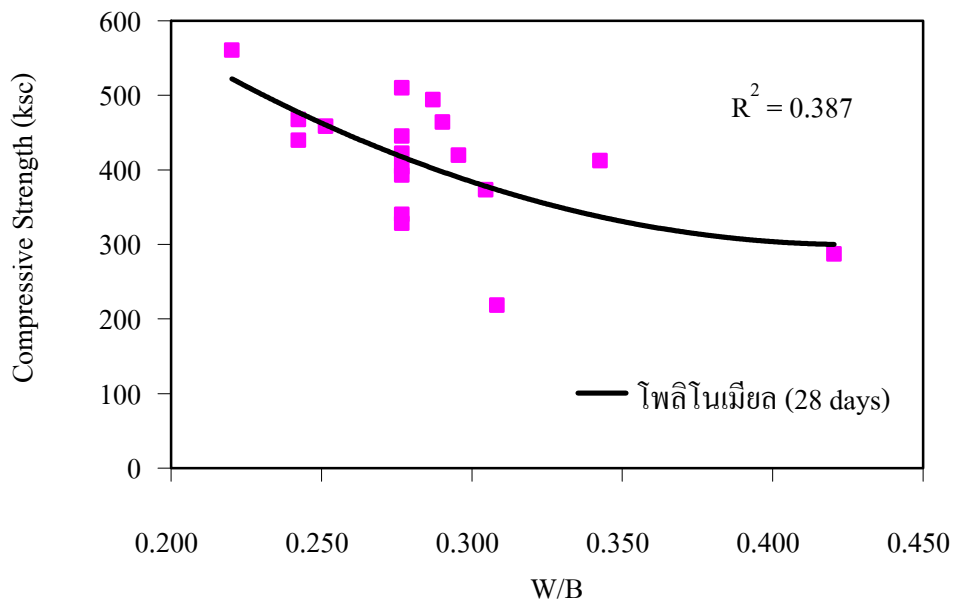
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับซิลิกอน ไดออกไซด์ต่ออลูมินา ไตรออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่อายุ 28 วัน

4.7.4 อิทธิพลของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ผลกระทบของสัดส่วน $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ที่มีค่าของสัดส่วน $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ อยู่ระหว่าง 6.225-8.299 แนวโน้มของกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนดังกล่าวมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในรูปที่ 4.16 และพบว่าถ้าสัดส่วนของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ มีค่าสูงขึ้นในช่วง 8.299-9.901 กำลังอัดมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในรูปที่ 4.24 และจากผลการศึกษาของ Hardjito และคณะ [24] พบว่าเมื่อค่าสัดส่วนของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 10-12.5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลง จึงพอสรุปได้ว่าสัดส่วนของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยสัดส่วนของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดมีค่า 8.299



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับสัดส่วนของน้ำต่อไดโซเดียมออกไซด์ (H_2O/Na_2O) ที่อายุ 28 วัน



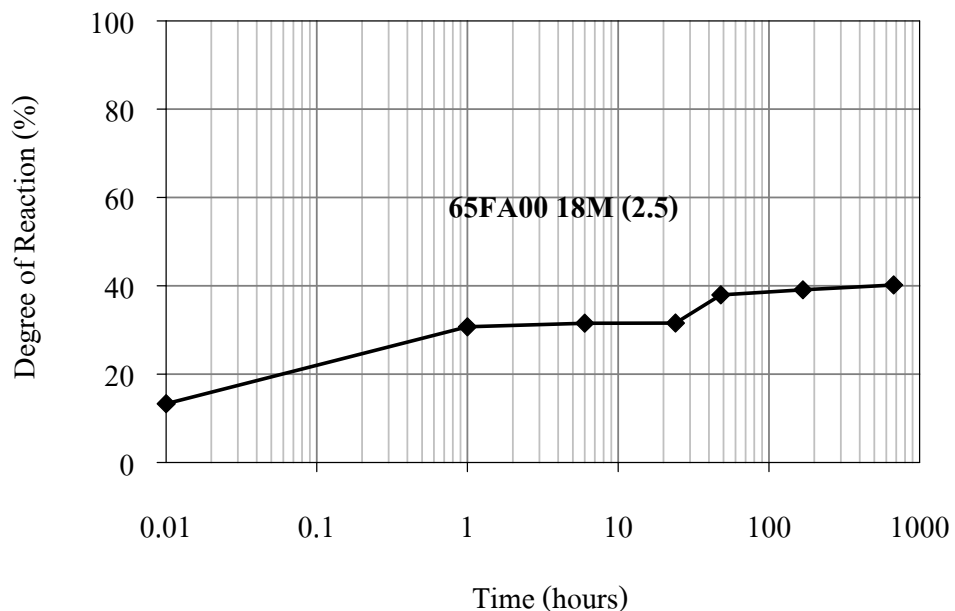
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่อายุ 28 วัน

4.7.5 อิทธิพลของ W/B ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.41 แสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ที่มีค่าของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อยู่ระหว่าง 0.220-0.420 มีแนวโน้มของกำลังอัดลดลง เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

4.8 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน โดยอาศัยหลักการทางเคมี ที่มีสมมุติฐานว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้ว จะละลายในกรดได้ง่ายกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ซึ่งการศึกษาโดยวิธีนี้ประยุกต์มาจากการศึกษาของ Ohsawa และคณะ [10] ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของเถ้าถ่านหินที่เกิดปฏิกิริยาไปแล้ว โดยใช้สารละลาย กรดพิคริก + เมทานอล + น้ำ ซึ่งการศึกษาพบว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจและมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อย (0.23-0.55%) ดีกว่าการใช้กรดไฮดรอกลอลริก (HCl) และกรดไซลิกเซลิก ในส่วนของวิธีการทดสอบได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.3.2.2 และตัวอย่างการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ค



รูปที่ 4.42 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA00 18M (2.5)

รูปที่ 4.42 แสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA00 18M (2.5) (ใช้เส้นแถบ-เปลือกไม้ล้วน เป็นสารตั้งต้น) ผลการศึกษาพบว่าที่อายุของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตั้งแต่ขณะเริ่มผสม(0 ชั่วโมง), 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Degree of Reaction) ร้อยละ 13.92, 30.70, 31.52, 31.58, 37.96, 39.10 และ 40.20 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 รูปที่ 4.42 แสดงให้เห็นว่าในขณะที่เริ่มผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในเส้นแถบ-เปลือกไม้จะได้สารจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีลักษณะชั้นเหนียวจากนั้นนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์มาทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยา พบว่าเนื่องจากจีโอโพลิเมอร์เพสต์ยังไม่แข็งตัว ดังนั้นค่าที่ทดสอบได้มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.92 ค่าที่ได้นี้นอกจากจะมาจากน้ำหนักที่สูญเสียของเส้นแถบ-เปลือกไม้ที่ทำปฏิกิริยาไปแล้ว ยังมีผลสืบเนื่องมาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ยังไม่แข็งตัวจึงละลายได้ง่าย และรวมถึงสารที่ละลายโดยกรดได้ง่าย หลังจากนั้นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เส้นแถบ-เปลือกไม้ล้วนเป็นสารตั้งต้นจะเริ่มแข็งตัวเมื่อมีอายุการบ่มที่มากขึ้น ผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน พบว่าอัตราการทำปฏิกิริยาของเส้นแถบ-เปลือกไม้มีค่าร้อยละ 40.20 ส่วนเส้นแถบ-เปลือกไม้ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยามีค่าร้อยละ 57.66

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (%)

Symbol.	Degree of Reaction (%)						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
65FA00 18M (2.5)	13.29	30.70	31.52	31.58	37.96	39.10	40.20
65FA100 18M (2.5)	23.47	36.44	41.51	55.44	61.46	63.83	65.21
55FA40 18M (2.5)	13.34	17.31	22.86	28.59	35.15	37.24	38.23
65FA40 18M (2.5)	15.57	22.93	28.86	32.14	33.31	35.36	46.25
65FA40 18M (2.5) (H)	15.57	22.93	28.86	32.14	41.25	48.73	55.25
65FA40 14M (0.5)	8.11	12.22	20.74	25.82	31.32	35.50	36.24
65FA40 14M (2.5)	15.56	18.41	21.50	28.53	32.77	33.32	36.44
65FA40 18M (2.5) 15	14.99	17.08	19.91	29.92	32.25	32.36	44.92
65FA40 18M (2.5) 60	14.98	17.85	21.44	28.26	31.04	32.70	45.85

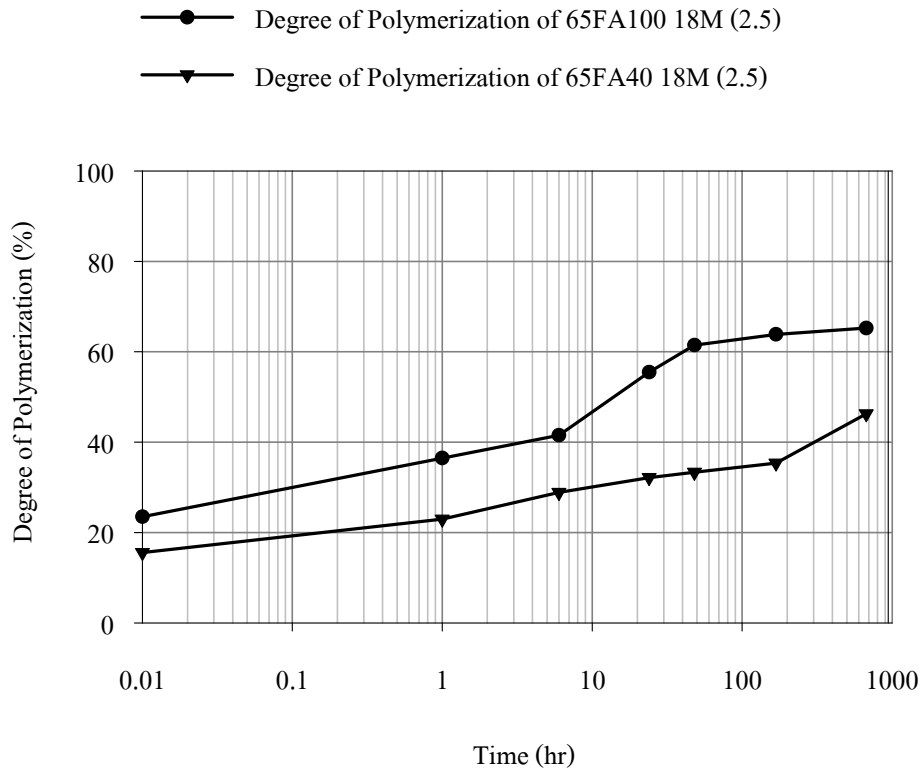
ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสม 65FA100 18M (2.5) (ใช้เถ้านหินล้วนเป็นสารตั้งต้น) พบว่าที่อายุของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตั้งแต่ขณะเริ่มผสม(0 ชั่วโมง), 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 23.47, 36.44, 41.51, 55.44, 61.46, 63.83 และ 65.21 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบของ Fernandez-Jimenez และคณะ [12] ที่ศึกษาหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้านหิน ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ และบ่มด้วยอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส พบว่าที่อายุ 1 และ 28 วัน อัตราการทำปฏิกิริยาของเถ้านหินมีค่าร้อยละ 50 และ 60 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสม 65FA00 18M (2.5) ในรูปที่ 4.42 พบว่า ในขณะที่เริ่มทำการผสมอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้านหินล้วน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 23.47 มีค่ามากกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ล้วนและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้านหินล้วนที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงถึงร้อยละ 65.21 แสดงให้เห็นว่าเถ้านหินสามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มากในช่วงอายุ 28 วันแรก

4.8.1 ผลกระทบของอัตราส่วนเถ้านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่มีส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) พบว่าที่อายุของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตั้งแต่ขณะเริ่มผสม(0 ชั่วโมง), 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยา ร้อยละ 15.57, 22.93, 28.86, 32.14, 33.31, 35.36 และ 46.25 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ของตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) ในรูปที่ 4.43 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) มีค่าน้อยกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) ในทุกอายุการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรืออัตราการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นของตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) ซึ่งมีอัตราส่วน Si:Al เท่ากับ 2.095 ซึ่งทำให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลิไฮดรอกไซด์ซิลอกโซ (Polysialate-Siloxo; PSS) เป็นแบบสองมิติ [15] อาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างแบบโพลิไฮดรอกไซด์ซิลอกโซเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่โครงสร้างดังกล่าวมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงน้อยกว่าโครงสร้างของสารโพลิไฮดรอกไซด์ที่เป็นแบบสองมิติและมีไฮดรอกไซด์เชื่อมขวางกัน ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้จะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีอัตราส่วน Si:Al มากกว่า 3 ขึ้นไปและจากการคำนวณค่าอัตราส่วน Si:Al ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) พบว่ามีค่าเท่ากับ 8.278 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างของสารโพลิไฮดรอกไซด์ที่เป็นแบบสองมิติและมีไฮดรอกไซด์เชื่อมขวางกัน ดังรูปที่ 2.3 เกิดขึ้นช้ากว่าโครงสร้างแบบสองมิติธรรมดา เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5)

เกิดขึ้นก่อนข้างช้า แต่จะมีความแข็งแรงสูง สังเกตได้จากค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ของ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) มีค่าเท่ากับ 243, 335, 409, และ 510 กก/ซม² ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ากำลังอัด ของส่วนผสม 65FA100 18M (2.5) ที่มีค่าเท่ากับ 109, 170, 257 และ 340 กก/ซม² ตามลำดับ



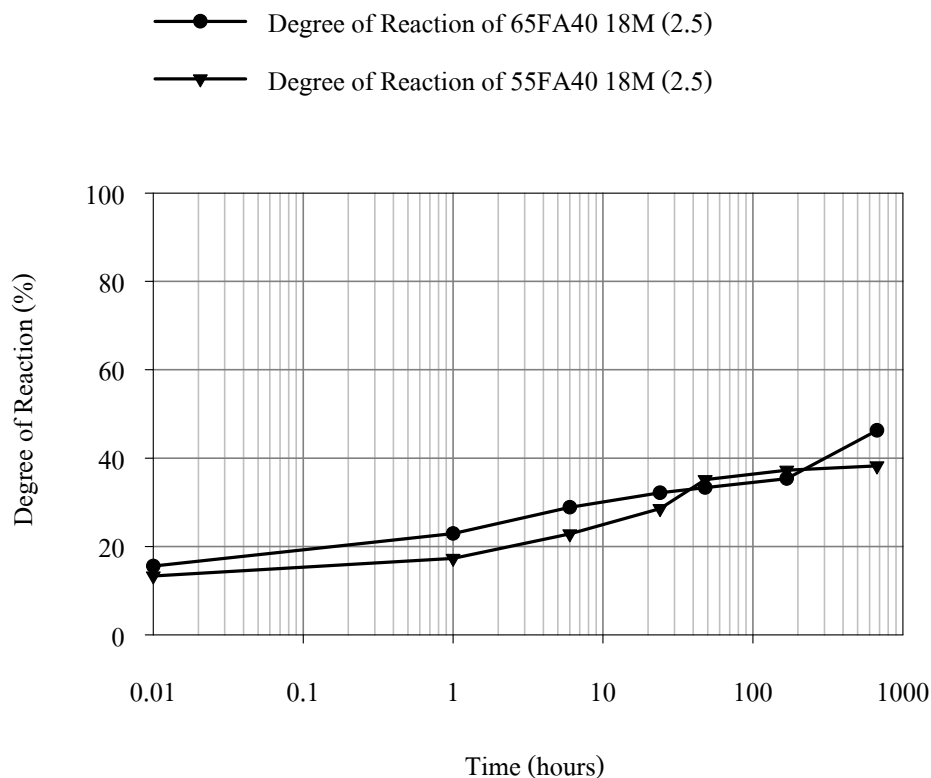
รูปที่ 4.43 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5)

4.8.2 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำหนักของสารตั้งต้นและน้ำหนักรวมต่ออัตราการ

เกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีอัตราส่วนสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด ที่แตกต่างกัน เท่ากับ ร้อยละ 55 และ 65 ซึ่งสัดส่วนทั้งสองมีปริมาณการใช้เถ้าถ่านหินในอัตราส่วน เถ้าเคลบ-เปลือกไม้ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 60:40 ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ ความเข้มข้น 18 โมลาร์ และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 การใช้ อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 55 ส่วนผสมจะต้องใช้ปริมาณของสารละลายโซเดียม ซิลิเกตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่าการใช้อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 65 จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ของตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) มีค่าเท่ากับ 0.420 ในขณะที่ตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีค่าเท่ากับ 0.277 ผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ

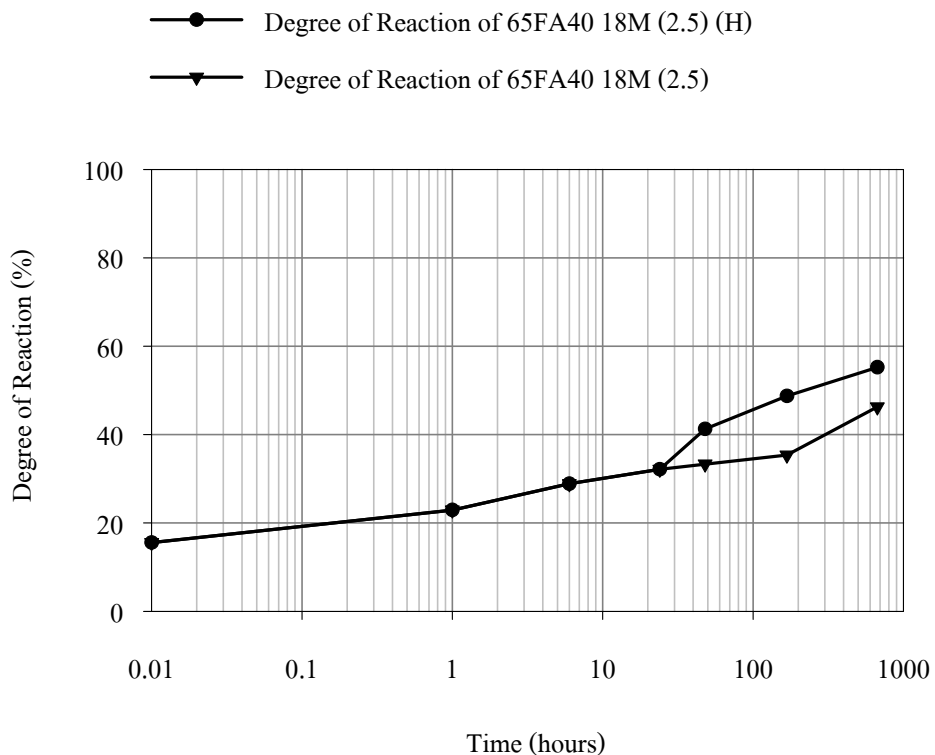
ส่วนผสมทั้งสอง ได้แสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งพบว่าที่อายุของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ตั้งแต่ขณะเริ่มผสม (0 ชั่วโมง), 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยา ร้อยละ 13.34, 17.31, 22.86, 28.59, 35.15, 37.24 และ 38.23 สำหรับตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยา ร้อยละ 15.57, 22.93, 28.86, 32.14, 33.31, 35.36 และ 46.25 สำหรับตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) ตามลำดับ รูปที่ 4.44 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มากขึ้นไม่ได้ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นซึ่งการศึกษากำลั้งถัดของสัปดาห์ทั้งสอง ซึ่งพบว่าค่ากำลั้งถัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีค่าเท่ากับ 243, 335, 409 และ 510 กก/ชม² ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่ากำลั้งถัดของตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 61, 177, 209, และ 287 กก/ชม² ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีปริมาณน้ำในส่วนผสมน้อยกว่าตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์มีความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก ดังนั้นการใช้น้ำในส่วนผสมมากทำให้โครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์อ่อนแอลง



รูปที่ 4.44 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5)

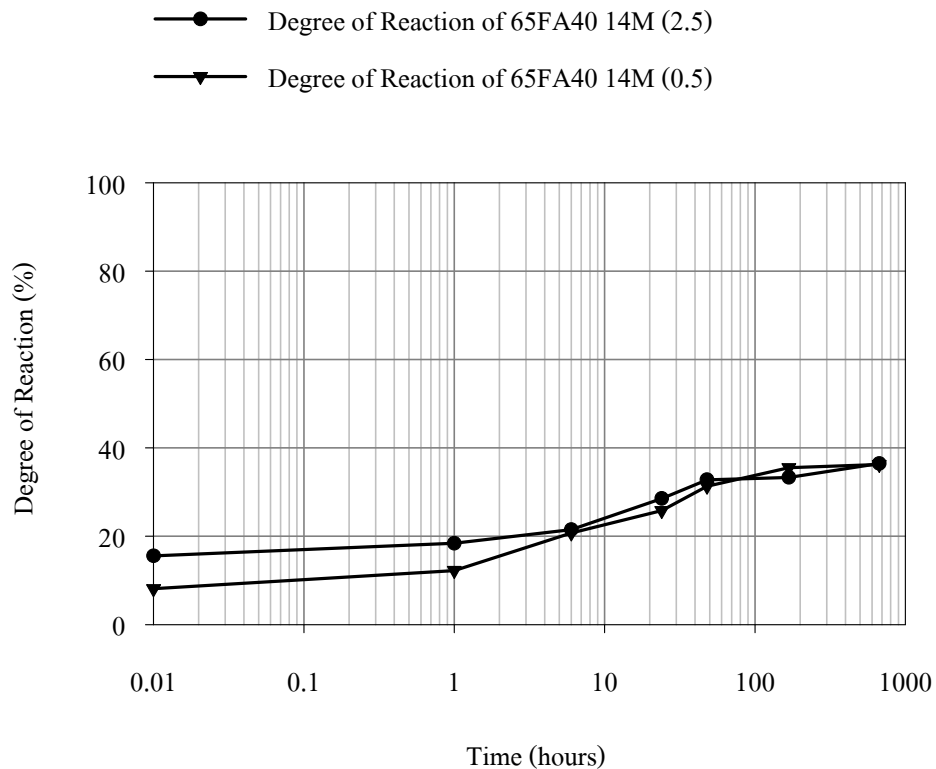
4.8.3 ผลกระทบของอุณหภูมิบ่มต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

เมื่อนำตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) หลังจากผสมเสร็จแล้ว 1 วัน บ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาบ่มที่อุณหภูมิห้อง เมื่อทำการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อายุ 1, 6, และ 27 วัน หลังจากนำตัวอย่างเข้าเตาอบ การศึกษาพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์หลังจากเข้าบ่มในเตาอบ ที่อายุ 1, 6, และ 27 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 41.25, 48.73 และ 55.25 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเพสต์ที่ไม่ได้เข้าบ่มในเตาอบ ผลการทดสอบในรูปแบบที่ 4.45 แสดงให้เห็นว่าการอบด้วยอุณหภูมิ 60 องศา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กระตุ้นให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้รวดเร็วขึ้น อาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เกิดได้รวดเร็วขึ้นเมื่อกระตุ้นด้วยความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของกำลังอัดเช่นกัน โดยพบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) เมื่อไม่ได้มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยการนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศา ค่าของกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 243, 335, 409 และ 510 กก/ซม² แต่เมื่อทำการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยการอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว ทำให้กำลังอัดในแต่ละอายุการบ่มเพิ่มสูงขึ้นเป็น 492, 492, 549 และ 560 กก/ซม² ตามลำดับ



รูปที่ 4.45 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5) (H)

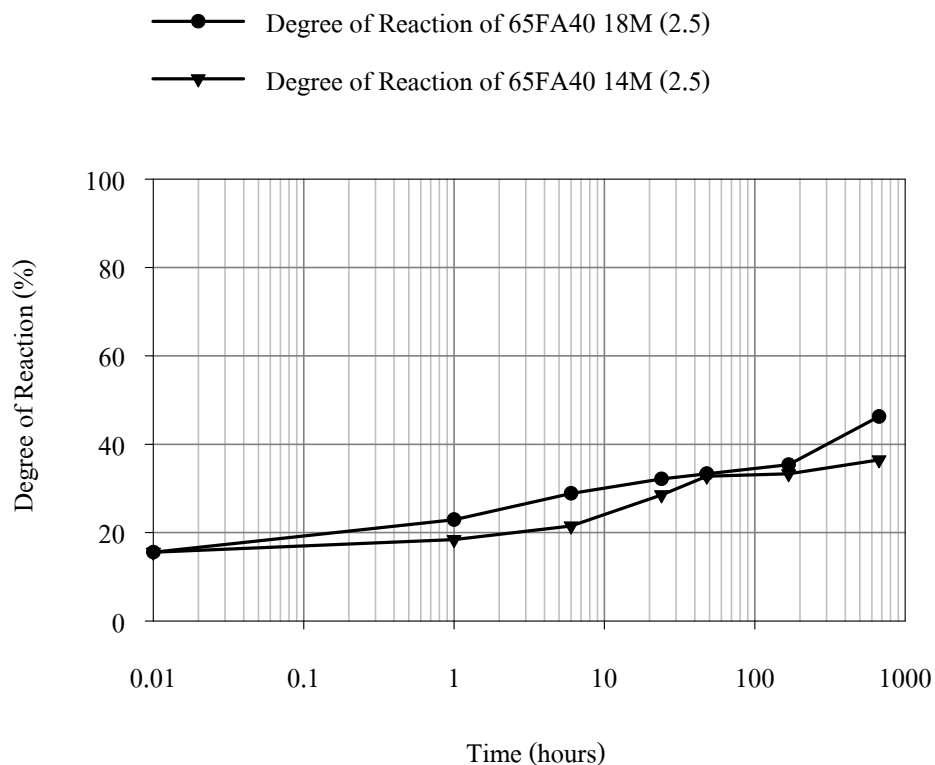
4.8.4 ผลกระทบของ $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์
 รูปที่ 4.46 แสดงผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) กับตัวอย่าง 65FA40 14M (0.5) ที่อายุตั้งแต่ขณะเริ่มผสม(0 ชั่วโมง), 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) มีค่าที่สูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 14M (0.5) ในอายุช่วง 6 ชั่วโมงแรกหลังจากเริ่มทำการผสม แต่ผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อมีอายุมากกว่า 6 ชั่วโมงไปแล้วสัดส่วนทั้งสองมีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 254, 346, 394 และ 464 กก/ซม² ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของสัดส่วน 65FA40 14M (0.5) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8, 69, 160 และ 218 กก/ซม² ตามลำดับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่มากไม่ได้ทำให้สารตั้งต้นถูกทำปฏิกิริยามากขึ้นแต่กลับทำให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แข็งแรงน้อยลง ซึ่งสังเกตได้จากค่ากำลังอัดที่ลดลง



รูปที่ 4.46 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 18M (0.5) และ 65FA40 18M (2.5)

4.8.5 ผลกระทบของความเข้มข้นของ NaOH ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ เพสต์

นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มาเปลี่ยนการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ เมื่อนำผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) ดังแสดงในรูปที่ 4.47 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 14 โมลาร์เป็น 18 โมลาร์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ทดสอบได้ในช่วงอายุตั้งแต่ขณะเริ่มผสมจนถึงอายุ 7 วัน มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่พอจีโอโพลิเมอร์มีอายุที่ 28 วัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ทดสอบได้จากการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ มีค่าร้อยละ 46.25 มีค่ามากกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ทดสอบได้จากการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ ซึ่งมีค่าเพียงร้อยละ 36.44 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มากนักในช่วงอายุ 7 วันแรก อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เริ่มส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น หลังจาก 7 วันไปแล้ว

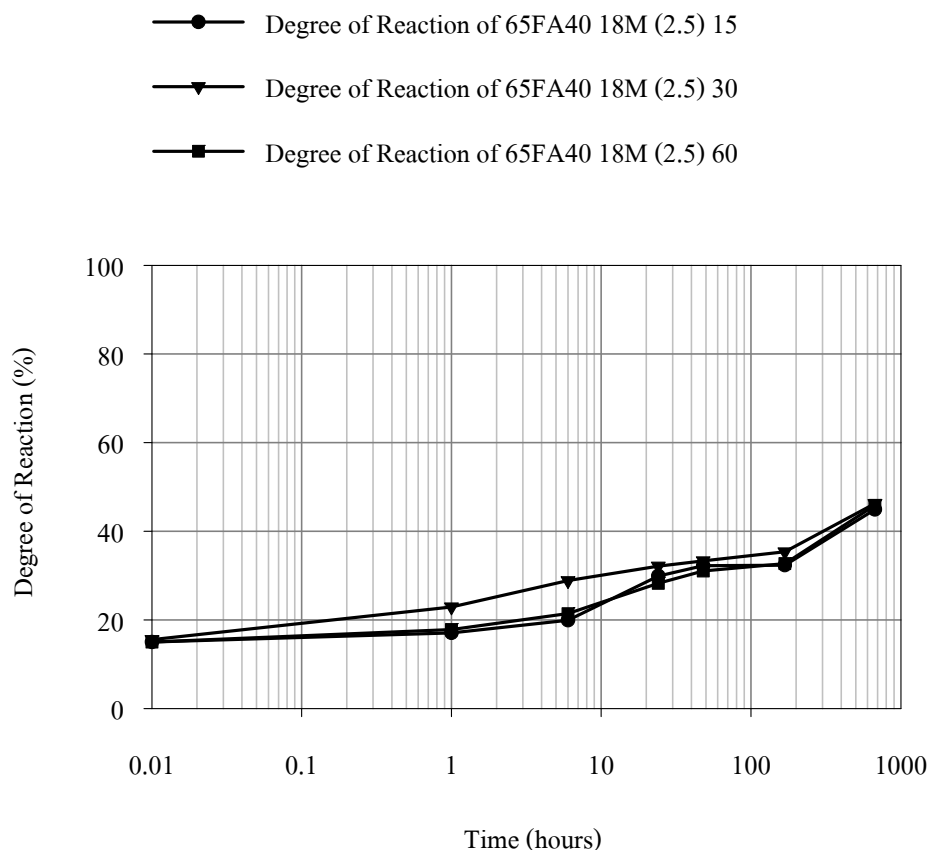


รูปที่ 4.47 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5)

ซึ่งการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษากำลั้งอัดของส่วนผสมทั้งสองโดยการศึกษาค่าตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) มีค่ากำลั้งอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 254, 346, 394, 464 และ 534 กก/ซม² ตามลำดับ สำหรับส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) มีค่ากำลั้งอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 243, 335, 409, 510 และ 624 กก/ซม² ตามลำดับ ซึ่งผลของกำลั้งอัดแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อกำลั้งอัดในอายุปลายเช่นเดียวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา

4.8.6 ผลกระทบของอุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาขณะผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

เมื่อนำตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มาศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิของวัสดุขณะผสมที่ใช้เท่ากับ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.48 และ ตารางที่ 4.9 แสดงค่าการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 4.48 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอ โพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) เมื่อควบคุมอุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาผสมจีโอ โพลิเมอร์เพสต์ เท่ากับ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส

ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่อย่างใด เพราะค่าที่ทดสอบมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก สาเหตุเพราะว่าเมื่อควบคุมอุณหภูมิของวัสดุขณะผสมนั้นจะเห็นความแตกต่างในเรื่องของความชื้นเหลวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้อย่างชัดเจน แต่พอหลังจากผสมและทำการเข้าแบบเสร็จแล้วไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิต่อ ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิลบสู่อุณหภูมิห้องจึงไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งผลของการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมทั้งสามก็ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึง ผลสรุปของการศึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนา จีโอโพลิเมอร์ ด้วยเถ้าชีวมวลและเถ้าถ่านหินต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด (S/T) ทำให้การคำนวณส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพศง่ายขึ้น การเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดให้สูงขึ้นจากร้อยละ 55 เป็นร้อยละ 60, 65 และ 70 มีผลทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพศที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 287, 412, 510 และ 560 กก/ซม² ตามลำดับ

5.1.2 การใช้เถ้าถ่านหินผสมกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 30:70, 20:80 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าอัตราส่วนของ Si:Al เท่ากับ 2.1:1, 3.1:1, 4.9:1, 8.3:1, 11.7:1 และ 18.3:1 ตามลำดับ ซึ่งทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพศที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 340, 404, 445, 510, 422 และ 393 กก/ซม² ตามลำดับ โดยสัดส่วน Si:Al เท่ากับ 8.3:1 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วน Si:Al ให้มีค่าสูงขึ้น พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลง และสังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่ผิวของจีโอโพลิเมอร์เพศ

5.1.3 การใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างสาร โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$) เท่ากับ 0.5:1, 1.5:1, 2.5:1 และ 3.5:1 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพศที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 218, 420, 464 และ 494 กก/ซม² ตามลำดับ

5.1.4 การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพศ ในช่วงอายุ 7 วันแรก แต่เมื่อจีโอโพลิเมอร์เพศมีอายุมากกว่า 7 วัน พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพศที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 18 โมลาร์ มีกำลังอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์เพศที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 14 และ 18 โมลาร์

5.1.5 การควบคุมอุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เท่ากับ 15, 30 และ 60 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ในขณะที่การบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เป็นการเร่งปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ให้เกิดได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดพัฒนาได้รวดเร็วกว่าการบ่มจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในอุณหภูมิห้อง โดยเฉพาะที่อายุ 3 วัน เช่น ตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 243 กก/ซม² เป็น 492 กก/ซม²

5.1.6 จากการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนทางเคมีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สามารถสรุปได้ดังนี้

ถ้าอัตราส่วนระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) มีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วง 0.108-0.266 ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง

การเพิ่มขึ้นของไดโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ในช่วง 1.069-5.185 ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง

การปรับค่าซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 4.026-15.906 ทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากนั้นการเพิ่มขึ้นของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในช่วง 15.906-35.109 กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง

การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนระหว่างโมเลกุลของน้ำต่อไดโซเดียมออกไซด์ ($\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$) ในช่วง 6.225-8.299 แนวโน้มของกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นการเพิ่มขึ้นของ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ในช่วง 8.299-9.901 ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทำงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปในการศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเข้ากันเป็นสารตั้งต้น ในอนาคตควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำเพสต์ไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตหรือปรับปรุงให้เป็นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างเป็นต้น

5.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของระยะเวลาก่อตัว ความสามารถในการเทได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ด้วยเถ้าชีวมวลต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Maholtra, V.M., 2002, "Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology", **ACI Concrete International**, Vol. 24, No.7, p. 22.
2. Daviddovits, J., 1984, "**Mineral Polymers and Methods of Making Them**" , USA, US Patent No. 4349386.
3. Davidovits, J., , 1991, "Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materials", **Journal of Thermal analysis**, Vol. 37, pp. 1633-1656.
4. Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T., 1999, "Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future", **Cement and Concrete Research**, Vol. 29, No. 8, pp. 1323-1329.
5. Davidovits, J., 1999, "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology", **Proceedings: 2nd International confernce on geopolymer**, France : Paris, pp. 9-40.
6. Roy, D.M., 1999, "Alkali-Activated Cements Opportunities and Challenges", **Cement and Concrete Research**, Vol. 29, No. 2, pp. 249-254.
7. Van, J., Van, D. and Lukey, G.C., 2002, "The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite-Based Geopolymers", **Chemical Engineering Journal**, Vol. 89, No. 1-3, pp. 63-73.
8. Wallah, S.E., Hardjito, D., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V., 2004, "Creep Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete", **Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology**, USA : Las Vegas, pp. 49-60.
9. Hardjito, D., Wallah, S.E. and Rangan, B.V., 2002, "Study on Engineering Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete", **Journal of the Australasian Ceramic Society**, Vol. 38, No. 1, pp. 44-47.

10. Ohsawa, S., Asaga, K., Goto, S. and Daimon, M., 1985, "Quantitative Determination of Fly Ash in the Hydrated Fly Ash – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ System." **Cement and Concrete Research**, Vol. 15, No.2, pp. 357-366.
11. Fernandez-Jimenez, A., de la Torre, A.G., Palomo, A., Lopez-Olmo, G., Alonso, M.M. and Aranda, M.A.G., 2006, "Quantitative Determination of Phases in the Alkaline Activation of Fly Ash. Part II: Degree of Reaction", **FUEL**, Vol. 85, October 2006, pp. 1960-1969.
12. Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Criado, M., 2004, "Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: a Descriptive Model", **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, pp. 1204-1209.
13. Lam, L., Wong, Y.L. and Poon, C.S., 2000, "Degree of Hydration and Gel/Space Ratio of High-Volume Fly Ash/Cement Systems", **Cement and Concrete Research**, Vol. 30, No. 5, pp. 747-756.
14. Hua, X. and Van Deventer, J.S.J., 1999, "The Geopolymerisation of Natural Alumino-Silicates", **Proceedings: 2nd International conference on geopolymer**, France : Paris, pp. 43-59.
15. Geopolymer'99, **International Conference and Publisher in the Proceeding of Geopolymer'99**, <http://www.geopolymer.org>, [2006 October 5].
16. Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A., 2002, "Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material", **Applied Geochemistry**, Vol. 17, No. 8, pp. 1143-1148.
17. Davidovits J., 1994, "Properties of Geopolymer Cements", **Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**, Kiev State Technical University, Vol. 1, pp. 131-149.

18. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2549, “วัสดุจีโอโพลิเมอร์”, **โยธาสาร**, ปีที่ 18, ฉบับที่ 4, กันยายน-ตุลาคม, หน้า 55-60
19. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมไฮดรอกไซด์ มอก.150-2518**, กรุงเทพฯ : 2518
20. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมซิลิเกต เหลว มอก.433-2539**, กรุงเทพฯ : 2539
21. Bakharev, T., 2004, “Durability of Geopolymer Material in Sodium and Magnesium Sulfate Solution”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, No. 6, pp. 1233-1246.
22. Abrams, D.A., 1918, “Design of Concrete Mixtures Bulletin 1” , **Structural Materials Research Laboratory**, Lewis Institute, Chicago, Revised Edition, 20 pp.
23. Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. , 2003, “The Effect of Mixture Composition and Curing Temperature on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete.”, **The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction** , Bali, Indonesia, CMT 14-CMT 18.
24. Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V., “Brief Review of Development of Geopolymer Concrete”, **American Concrete Institute**, USA : Los Vegas, 25 May 2004, pp. 1-10.
25. Songpiriyakij, S., 2548, “Effect of Temperature on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar”, **เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1**, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30-CON34.
26. Alonso, S. and Palomo, A., 2001, “Alkaline Activation of Metakaolin and Calcium Hydroxide Mixtures: Influence of Temperature Activator Concentration and Solids Ratio”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 29, No. 1-2, pp. 55-62.

27. Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V., 2006, "Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer", **Cement and Concrete Composites**, Vol. 29, No. 3, pp. 224-229.
28. Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U., 2006, "A Comparative Study of Preparations and Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer", **International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer**, 24-25 May2006, Thailand, pp. 63-71.
29. ปริญญา จินดาประเสริฐ, ถนัดกิจ ชาริรัตน์, วราภรณ์ คุณาวานากิจ และ อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ, 2548, "การศึกษาเบื้องต้นการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ", เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า INV13-INV18.
30. ปริญญา จินดาประเสริฐ, อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และ ถนัดกิจ ชาริรัตน์, 2549, "กำลังและโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผา", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11, เมษายน 2549, ภูเก็ต, หน้า MAT 043- MAT 050.
31. Chindaprasirt, P., Rattanasak, U. and Kendall, K., 2006, "Microstructure and Strength of Portland Cement Composite Containing Fly Ash and Metakaolin", **International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer**, 24-25 May2006, Thailand, pp. 262-270.
32. Chareerat, T., Lee-Anansaksiri, A. and Chindaprasirt, P., 2006, "Synthesis of High Calcium Fly Ash and Calcined Kaolin Geopolymer Mortar", **International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer**, 24-25 May2006, Thailand, pp. 327-335.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 6 โมลาร์

Determination	Test Number	
	No. 1	No. 2
Volume of Volumetric Flask, V (ml)	500	500
Weight of Volumetric Flask, A (g)	159.25	161.20
Weight of Sodium Hydroxide, B (g)	120	120
Weight of Flask + NaOH Solution, C (g)	764.55	765.37
Weight of NaOH Solution, W = C-A (g)	605.30	604.17
Density of NaOH Solution, D = W/V (g/cc)	1.211	1.208
Average Density of NaOH Solution	1.209	

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์

Determination	Test Number	
	No. 1	No. 2
Volume of Volumetric Flask, V (ml)	500	500
Weight of Volumetric Flask, A (g)	161.11	154.99
Weight of Sodium Hydroxide, B (g)	160	160
Weight of Flask + NaOH Solution, C (g)	794.81	788.02
Weight of NaOH Solution, W = C-A (g)	633.70	633.03
Density of NaOH Solution, D = W/V (g/cc)	1.267	1.266
Average Density of NaOH Solution	1.267	

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์

Determination	Test Number	
	No. 1	No. 2
Volume of Volumetric Flask, V (ml)	500	500
Weight of Volumetric Flask, A (g)	166.42	160.08
Weight of Sodium Hydroxide, B (g)	200	120
Weight of Flask + NaOH Solution, C (g)	826.92	819.58
Weight of NaOH Solution, W = C-A (g)	660.50	659.50
Density of NaOH Solution, D = W/V (g/cc)	1.321	1.319
Average Density of NaOH Solution	1.320	

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 12 โมลาร์

Determination	Test Number	
	No. 1	No. 2
Volume of Volumetric Flask, V (ml)	500	500
Weight of Volumetric Flask, A (g)	161.20	154.99
Weight of Sodium Hydroxide, B (g)	240	240
Weight of Flask + NaOH Solution, C (g)	845.82	839.55
Weight of NaOH Solution, W = C-A (g)	684.62	684.56
Density of NaOH Solution, D = W/V (g/cc)	1.369	1.369
Average Density of NaOH Solution	1.369	

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์

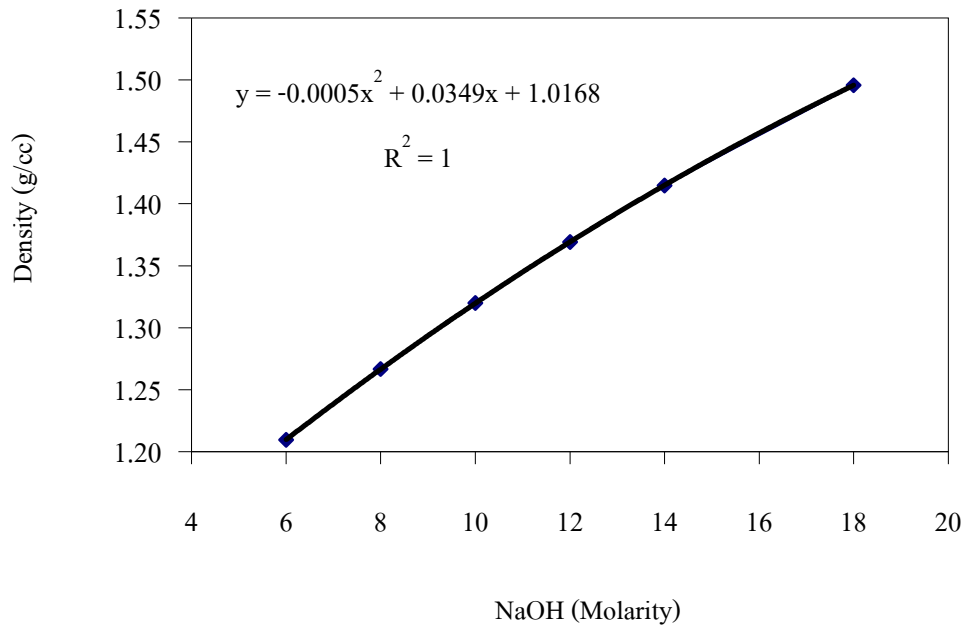
Determination	Test Number	
	No. 1	No. 2
Volume of Volumetric Flask, V (ml)	500	500
Weight of Volumetric Flask, A (g)	159.97	157.66
Weight of Sodium Hydroxide, B (g)	280	280
Weight of Flask + NaOH Solution, C (g)	867.23	865.18
Weight of NaOH Solution, W = C-A (g)	707.26	707.52
Density of NaOH Solution, D = W/V (g/cc)	1.415	1.415
Average Density of NaOH Solution	1.415	

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 18 โมลาร์

Determination	Test Number	
	No. 1	No. 2
Volume of Volumetric Flask, V (ml)	500	500
Weight of Volumetric Flask, A (g)	160.08	166.42
Weight of Sodium Hydroxide, B (g)	360	360
Weight of Flask + NaOH Solution, C (g)	908.78	913.44
Weight of NaOH Solution, W = C-A (g)	748.70	747.02
Density of NaOH Solution, D = W/V (g/cc)	1.497	1.494
Average Density of NaOH Solution	1.496	

ตารางที่ ก.7 แสดงการปรับแก้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

NaOH (Molarity)	Density (g/cc)	Density (g/cc)	Percent by Weight		Volume 500 ml.	
	Tested	Collation	Na ₂ O	H ₂ O	NaOH (g)	H ₂ O (g)
6M	1.209	1.208	19.86	80.14	120	484
8M	1.267	1.264	25.32	74.68	160	472
10M	1.320	1.316	30.40	69.60	200	458
12M	1.369	1.364	35.20	64.80	240	442
14M	1.415	1.407	39.79	60.21	280	424
18M	1.496	1.483	48.55	51.45	360	382



รูปที่ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 10M (2.5)

วันที่ผสม 17 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 11:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.06	79.71	2.05	2080	304	294
	2	2.95	6.31	85.26	2.14	2100	307	
	3	2.95	6.35	80.81	2.15	1850	271	
	4	2.95	6.27	84.45	2.13	1320	193	
	5	2.95	6.24	82.70	2.12	1680	246	
7	1	2.95	6.02	80.62	2.04	2586	378	382
	2	2.95	6.28	81.36	2.13	2550	373	
	3	2.95	6.02	80.53	2.04	2730	399	
	4	2.95	6.05	80.45	2.05	2645	387	
	5	2.95	6.07	78.79	2.06	2560	375	
14	1	2.95	6.09	79.57	2.06	3120	456	449
	2	2.95	6.25	84.18	2.12	2780	407	
	3	2.95	6.12	82.57	2.07	3240	474	
	4	2.95	6.26	82.38	2.12	3000	439	
	5	2.95	6.24	82.74	2.12	3200	468	
28	1	2.95	6.16	81.29	2.09	3480	509	498
	2	2.95	6.23	82.24	2.11	3500	512	
	3	2.95	5.94	77.94	2.01	3400	497	
	4	2.95	6.18	81.48	2.09	3380	495	
	5	2.95	6.22	81.77	2.11	3270	478	
90	1	2.95	6.11	78.96	2.07	4320	632	599
	2	2.95	6.20	77.21	2.10	4170	610	
	3	2.95	6.15	77.42	2.08	3640	533	
	4	2.95	6.27	79.75	2.13	4200	614	
	5	2.95	6.16	79.42	2.09	4130	604	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 10M (2.5) (H)

วันที่ผสม 17 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 11:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.09	77.59	2.06	2020	296	326
	2	2.95	5.93	76.42	2.01	2400	351	
	3	2.95	6.14	77.98	2.08	2400	351	
	4	2.95	6.20	79.17	2.10	3060	448	
	5	2.95	6.04	80.91	2.05	2100	307	
7	1	2.95	6.27	83.67	2.13	2480	361	359
	2	2.95	6.05	81.32	2.05	2450	358	
	3	2.95	6.23	82.77	2.11	2460	360	
	4	2.95	6.17	80.99	2.09	2470	360	
	5	2.95	6.20	81.23	2.10	2440	357	
14	1	2.95	6.17	80.70	2.09	3580	524	518
	2	2.95	6.17	80.59	2.09	3350	490	
	3	2.95	6.23	83.19	2.11	3640	533	
	4	2.95	6.18	78.34	2.09	3500	512	
	5	2.95	6.10	77.51	2.07	3620	530	
28	1	2.95	6.16	78.82	2.09	2940	430	478
	2	2.95	6.24	81.48	2.12	2500	366	
	3	2.95	6.05	80.86	2.05	3370	493	
	4	2.95	6.22	78.56	2.11	3440	503	
	5	2.95	6.13	80.41	2.08	3320	486	
90	1	2.95	6.24	76.94	2.12	5040	737	608
	2	2.95	6.12	77.60	2.07	3590	525	
	3	2.95	6.15	76.19	2.08	4530	663	
	4	2.95	6.15	78.49	2.08	3370	493	
	5	2.95	6.05	75.51	2.05	4340	635	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5)

วันที่ผสม 11 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 12:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.00	78.48	2.03	2410	353	321
	2	2.95	6.12	76.86	2.07	2060	301	
	3	2.95	6.27	82.82	2.13	2120	310	
	4	2.95	6.13	81.44	2.08	2290	335	
	5	2.95	6.13	78.68	2.08	2100	307	
7	1	2.95	6.06	79.56	2.05	2100	307	304
	2	2.95	6.04	81.59	2.05	1900	278	
	3	2.95	6.18	83.37	2.09	2100	307	
	4	2.95	5.99	78.47	2.03	2100	307	
	5	2.95	6.15	83.21	2.08	2190	320	
14	1	2.95	6.27	85.68	2.13	2540	372	365
	2	2.95	6.24	85.65	2.12	2500	366	
	3	2.95	6.22	83.23	2.11	2400	351	
	4	2.95	6.20	84.05	2.10	2502	366	
	5	2.95	6.10	81.63	2.07	2545	372	
28	1	2.95	6.20	82.21	2.10	3780	553	533
	2	2.95	6.21	85.28	2.11	4120	603	
	3	2.95	6.13	83.02	2.08	3200	468	
	4	2.95	6.26	83.57	2.12	3790	555	
	5	2.95	6.09	81.46	2.06	3800	556	
90	1	2.95	6.13	81.67	2.08	4950	724	550
	2	2.95	6.12	83.13	2.07	3610	528	
	3	2.95	6.10	77.96	2.07	3780	553	
	4	2.95	6.02	76.53	2.04	4860	711	
	5	2.95	6.04	77.11	2.05	3880	568	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5) (H)

วันที่ผสม 11 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 14:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.91	83.07	2.00	1000	146	453
	2	2.95	5.80	81.40	1.97	2440	357	
	3	2.95	6.07	84.10	2.06	3400	497	
	4	2.95	6.14	83.55	2.08	2890	423	
	5	2.95	5.89	79.64	2.00	3000	439	
7	1	2.95	5.86	77.47	1.99	2060	301	318
	2	2.95	5.96	79.26	2.02	2440	357	
	3	2.95	6.00	80.28	2.03	2760	404	
	4	2.95	6.12	80.50	2.07	1980	290	
	5	2.95	6.14	81.67	2.08	2030	297	
14	1	2.95	6.00	76.14	2.03	2350	344	350
	2	2.95	6.02	77.42	2.04	2320	339	
	3	2.95	5.95	78.71	2.02	2550	373	
	4	2.95	5.83	74.88	1.98	2276	333	
	5	2.95	6.16	79.37	2.09	2460	360	
28	1	2.95	5.90	79.97	2.00	4080	597	583
	2	2.95	6.00	79.35	2.03	3830	560	
	3	2.95	5.88	79.39	1.99	3620	530	
	4	2.95	5.85	77.85	1.98	4400	644	
	5	2.95	5.97	80.95	2.02	3210	470	
90	1	2.95	6.15	78.58	2.08	3500	512	583
	2	2.95	5.88	75.90	1.99	3770	552	
	3	2.95	6.00	78.04	2.03	4400	644	
	4	2.95	5.84	76.71	1.98	4280	626	
	5	2.95	5.90	78.39	2.00	3980	582	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (1.5)

วันที่ผสม 15 กันยายน 2549 ผสมเวลา 16:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.76	76.15	1.95	660	97	103
	2	2.95	5.98	80.53	2.03	790	116	
	3	2.95	5.80	76.13	1.97	1160	170	
	4	2.95	5.97	77.82	2.02	1000	146	
	5	2.95	5.77	78.24	1.96	660	97	
7	1	2.95	5.90	77.20	2.00	1010	148	148
	2	2.95	5.91	78.52	2.00	1910	279	
	3	2.95	6.04	78.60	2.05	1050	154	
	4	2.95	6.12	80.97	2.07	1100	161	
	5	2.95	5.86	76.18	1.99	890	130	
14	1	2.95	6.12	81.03	2.07	1500	219	233
	2	2.95	6.12	79.32	2.07	1400	205	
	3	2.95	5.80	76.30	1.97	1560	228	
	4	2.95	5.97	78.82	2.02	1910	279	
	5	2.95	5.94	76.90	2.01	1340	196	
28	1	2.95	6.37	83.12	2.16	2440	357	323
	2	2.95	6.01	78.79	2.04	2100	307	
	3	2.95	6.09	78.64	2.06	2180	319	
	4	2.95	6.01	78.14	2.04	2150	315	
	5	2.95	6.03	76.62	2.04	2160	316	
90	1	2.95	6.00	76.14	2.03	2920	427	439
	2	2.95	6.02	77.42	2.04	3180	465	
	3	2.95	5.95	78.71	2.02	2600	380	
	4	2.95	5.83	74.88	1.98	3030	443	
	5	2.95	6.16	79.37	2.09	2880	421	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5)

วันที่ผสม 17 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 16:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.06	82.80	2.05	2300	337	337
	2	2.95	6.23	83.43	2.11	2320	339	
	3	2.95	5.82	75.80	1.97	2260	331	
	4	2.95	6.24	81.21	2.12	2300	337	
	5	2.95	6.09	81.59	2.06	2350	344	
7	1	2.95	6.35	83.49	2.15	2980	436	439
	2	2.95	6.12	80.86	2.07	2750	402	
	3	2.95	6.21	80.36	2.11	3100	454	
	4	2.95	6.34	79.61	2.15	3150	461	
	5	2.95	6.24	82.90	2.12	3020	442	
14	1	2.95	6.27	83.50	2.13	3430	502	506
	2	2.95	6.13	80.40	2.08	3550	519	
	3	2.95	6.16	82.20	2.09	3460	506	
	4	2.95	6.18	81.38	2.09	3270	478	
	5	2.95	6.09	81.67	2.06	3570	522	
28	1	2.95	6.24	82.26	2.12	3940	576	572
	2	2.95	6.23	81.47	2.11	3850	563	
	3	2.95	6.30	81.98	2.14	3620	530	
	4	2.95	6.22	81.64	2.11	4150	607	
	5	2.95	6.23	83.44	2.11	4000	585	
90	1	2.95	6.25	82.28	2.12	3730	546	766
	2	2.95	5.94	76.46	2.01	5560	813	
	3	2.95	6.09	82.42	2.06	5450	797	
	4	2.95	6.00	76.45	2.03	3340	489	
	5	2.95	5.86	73.58	1.99	4700	688	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) (H)

วันที่ผสม 17 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 19:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.00	82.15	2.03	3970	581	587
	2	2.95	6.10	81.37	2.07	4240	620	
	3	2.95	6.08	80.13	2.06	2630	385	
	4	2.95	6.18	82.75	2.09	3820	559	
	5	2.95	5.99	77.84	2.03	1600	234	
7	1	2.95	6.33	83.16	2.15	4430	634	645
	2	2.95	6.23	80.86	2.11	4450	651	
	3	2.95	6.21	81.91	2.11	4410	646	
	4	2.95	6.33	84.88	2.15	4440	649	
	5	2.95	6.27	85.11	2.13	4400	644	
14	1	2.95	5.94	76.57	2.01	4110	601	616
	2	2.95	6.27	82.94	2.13	4070	595	
	3	2.95	6.00	77.93	2.03	4150	607	
	4	2.95	6.15	82.14	2.08	4180	612	
	5	2.95	5.83	77.70	1.98	4550	666	
28	1	2.95	6.23	80.97	2.11	3700	541	593
	2	2.95	6.30	85.81	2.14	4300	629	
	3	2.95	6.05	79.01	2.05	3520	515	
	4	2.95	6.05	78.96	2.05	4000	585	
	5	2.95	6.17	81.02	2.09	4200	614	
90	1	2.95	6.13	82.51	2.08	4680	685	706
	2	2.95	6.29	80.80	2.13	4670	683	
	3	2.95	6.02	77.25	2.04	5220	764	
	4	2.95	6.14	78.43	2.08	4740	693	
	5	2.95	6.18	81.67	2.09	3720	544	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 10M (2.5)

วันที่ผสม 15 กันยายน 2549 ผสมเวลา 18:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.15	82.20	2.08	1990	291	280
	2	2.95	6.20	82.01	2.10	1820	266	
	3	2.95	6.23	83.65	2.11	2440	357	
	4	2.95	6.03	81.15	2.04	2350	344	
	5	2.95	6.10	81.17	2.07	1930	282	
7	1	2.95	5.86	76.64	1.99	2570	376	364
	2	2.95	6.00	79.94	2.03	2170	317	
	3	2.95	5.97	80.82	2.02	2610	382	
	4	2.95	6.30	85.38	2.14	1400	205	
	5	2.95	5.88	75.39	1.99	2590	379	
14	1	2.95	6.00	80.37	2.03	2460	360	438
	2	2.95	6.13	80.39	2.08	2430	356	
	3	2.95	6.00	81.02	2.03	3100	454	
	4	2.95	6.16	82.75	2.09	3120	456	
	5	2.95	6.14	81.89	2.08	2770	405	
28	1	2.95	6.02	80.62	2.04	3100	454	448
	2	2.95	6.28	81.36	2.13	2950	432	
	3	2.95	6.02	80.53	2.04	4130	604	
	4	2.95	6.05	80.45	2.05	3730	546	
	5	2.95	6.07	78.79	2.06	3140	459	
90	1	2.95	6.16	80.55	2.09	3670	537	563
	2	2.95	6.09	78.73	2.06	4350	636	
	3	2.95	6.07	77.02	2.06	3100	454	
	4	2.95	6.12	81.69	2.07	3530	516	
	5	2.95	6.27	79.40	2.13	3830	560	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 10M (2.5) (H)

วันที่ผสม 15 กันยายน 2549 ผสมเวลา 18:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.25	83.37	2.12	3810	557	537
	2	2.95	6.23	82.24	2.11	3560	521	
	3	2.95	6.21	83.78	2.11	2560	375	
	4	2.95	6.10	83.55	2.07	3880	568	
	5	2.95	6.16	84.70	2.09	3420	500	
7	1	2.95	6.30	86.19	2.14	2800	410	528
	2	2.95	6.18	85.60	2.09	4150	607	
	3	2.95	6.28	80.38	2.13	3460	506	
	4	2.95	6.32	85.40	2.14	3480	509	
	5	2.95	6.21	83.83	2.11	3350	490	
14	1	2.95	6.23	84.77	2.11	2280	334	523
	2	2.95	6.06	83.16	2.05	2490	364	
	3	2.95	6.17	81.68	2.09	3900	571	
	4	2.95	6.14	84.26	2.08	3670	537	
	5	2.95	6.13	82.04	2.08	3160	462	
28	1	2.95	5.98	78.09	2.03	4000	585	565
	2	2.95	6.15	85.90	2.08	3540	518	
	3	2.95	6.03	79.98	2.04	4460	653	
	4	2.95	6.24	85.11	2.12	3180	465	
	5	2.95	6.34	84.94	2.15	4050	593	
90	1	2.95	6.18	82.79	2.09	3000	439	580
	2	2.95	6.02	80.25	2.04	4180	612	
	3	2.95	6.22	81.45	2.11	4080	597	
	4	2.95	6.19	80.43	2.10	3280	480	
	5	2.95	6.17	81.24	2.09	3640	533	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ ส่วนผสม 70FA40 18M (2.5)

วันที่ผสม 27 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 16:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.70	74.58	1.93	3000	439	441
	2	2.95	5.86	77.55	1.99	2800	410	
	3	2.95	5.68	76.22	1.93	1850	271	
	4	2.95	5.91	80.83	2.00	3240	474	
	5	2.95	5.75	77.34	1.95	3020	442	
7	1	2.95	6.13	83.21	2.08	3030	443	476
	2	2.95	6.24	84.39	2.12	3370	493	
	3	2.95	5.98	82.91	2.03	3520	515	
	4	2.95	5.98	82.23	2.03	2320	339	
	5	2.95	5.73	77.10	1.94	3100	454	
14	1	2.95	5.96	82.51	2.02	3000	439	528
	2	2.95	5.98	78.88	2.03	3240	474	
	3	2.95	6.00	83.43	2.03	3850	563	
	4	2.95	6.19	85.92	2.10	3730	546	
	5	2.95	6.02	83.15	2.04	3610	528	
28	1	2.95	6.27	83.50	2.13	3680	538	538
	2	2.95	6.13	80.40	2.08	3784	554	
	3	2.95	6.16	82.20	2.09	3600	527	
	4	2.95	6.18	81.38	2.09	3640	533	
	5	2.95	6.09	81.67	2.06	3670	537	
90	1	2.95	6.00	80.17	2.03	4500	658	608
	2	2.95	6.00	80.95	2.03	3970	581	
	3	2.95	5.90	78.65	2.00	4160	609	
	4	2.95	5.90	81.06	2.00	3880	568	
	5	2.95	6.04	80.64	2.05	4280	626	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 18M (2.5) (H)

วันที่ผสม 27 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 17:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.00	81.88	2.03	4800	702	673
	2	2.95	5.91	77.30	2.00	4780	699	
	3	2.95	5.99	79.18	2.03	4780	699	
	4	2.95	5.85	76.34	1.98	3940	576	
	5	2.95	6.18	81.29	2.09	4700	688	
7	1	2.95	5.64	75.72	1.91	4730	692	714
	2	2.95	6.07	81.51	2.06	4860	711	
	3	2.95	6.00	83.36	2.03	5050	739	
	4	2.95	6.02	82.19	2.04	1300	190	
	5	2.95	6.29	81.10	2.13	2660	389	
14	1	2.95	6.18	79.93	2.09	4480	655	657
	2	2.95	5.99	78.83	2.03	4940	723	
	3	2.95	5.92	81.55	2.01	4170	610	
	4	2.95	5.84	78.27	1.98	4050	593	
	5	2.95	6.08	79.51	2.06	4820	705	
28	1	2.95	6.23	80.97	2.11	4590	672	670
	2	2.95	6.30	85.81	2.14	4570	669	
	3	2.95	6.05	79.01	2.05	4580	670	
	4	2.95	6.05	78.96	2.05	4500	658	
	5	2.95	6.17	81.02	2.09	4640	679	
90	1	2.95	6.02	79.89	2.04	5030	736	651
	2	2.95	5.97	79.62	2.02	3800	556	
	3	2.95	6.28	83.21	2.13	4520	661	
	4	2.95	6.23	81.76	2.11	4260	623	
	5	2.95	6.16	81.69	2.09	4000	585	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ ส่วนผสม 70FA60 10M (2.5)

วันที่ผสม 15 กันยายน 2549 ผสมเวลา 21:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.96	80.86	2.02	2040	298	296
	2	2.95	6.06	83.70	2.05	2190	320	
	3	2.95	6.20	83.77	2.10	2040	298	
	4	2.95	6.20	87.45	2.10	1960	287	
	5	2.95	6.16	83.24	2.09	1880	275	
7	1	2.95	6.03	63.89	2.04	2430	356	401
	2	2.95	6.10	86.96	2.07	3260	477	
	3	2.95	6.02	83.73	2.04	2510	367	
	4	2.95	6.14	83.14	2.08	2750	402	
	5	2.95	6.14	82.91	2.08	2310	338	
14	1	2.95	6.10	84.41	2.07	1700	249	415
	2	2.95	5.86	77.46	1.99	1970	288	
	3	2.95	6.07	80.67	2.06	2930	429	
	4	2.95	6.03	79.78	2.04	2860	418	
	5	2.95	6.14	84.51	2.08	2720	398	
28	1	2.95	6.14	85.54	2.08	3450	505	435
	2	2.95	6.05	81.27	2.05	2430	356	
	3	2.95	6.14	81.43	2.08	2380	348	
	4	2.95	6.11	80.86	2.07	2650	388	
	5	2.95	6.27	81.86	2.13	2820	413	
90	1	2.95	6.15	78.68	2.08	3750	549	462
	2	2.95	6.14	79.45	2.08	1900	278	
	3	2.95	6.03	77.19	2.04	3300	483	
	4	2.95	6.16	79.65	2.09	2780	407	
	5	2.95	6.17	78.10	2.09	2800	410	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (2.5) (H)

วันที่ผสม 15 กันยายน 2549 ผสมเวลา 20:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.15	83.09	2.08	2980	436	458
	2	2.95	5.96	80.89	2.02	3170	464	
	3	2.95	6.07	81.47	2.06	3380	495	
	4	2.95	6.27	87.46	2.13	3000	439	
	5	2.95	5.98	82.72	2.03	1680	246	
7	1	2.95	6.10	84.00	2.07	3440	503	509
	2	2.95	6.14	82.32	2.08	3330	487	
	3	2.95	6.12	84.30	2.07	2130	312	
	4	2.95	5.71	76.34	1.94	2430	356	
	5	2.95	6.18	84.84	2.09	3670	537	
14	1	2.95	6.27	85.68	2.13	1790	262	360
	2	2.95	6.24	85.65	2.12	2520	369	
	3	2.95	6.22	83.23	2.11	2220	325	
	4	2.95	6.20	84.05	2.10	1780	260	
	5	2.95	6.10	81.63	2.07	2650	388	
28	1	2.95	6.25	84.08	2.12	3080	451	423
	2	2.95	6.33	82.89	2.15	2300	337	
	3	2.95	6.21	82.97	2.11	3000	439	
	4	2.95	6.27	83.34	2.13	2230	326	
	5	2.95	5.97	76.84	2.02	2600	380	
90	1	2.95	6.12	78.53	2.07	2920	427	384
	2	2.95	6.00	78.52	2.03	1500	219	
	3	2.95	6.17	80.30	2.09	2200	322	
	4	2.95	6.14	78.60	2.08	2680	392	
	5	2.95	5.90	74.94	2.00	2700	395	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (1.5) (H)

วันที่ผสม 15 กันยายน 2549 ผสมเวลา 23:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.09	82.57	2.06	3050	446	440
	2	2.95	6.13	84.57	2.08	2160	316	
	3	2.95	6.16	83.81	2.09	3200	468	
	4	2.95	6.14	85.37	2.08	2780	407	
	5	2.95	6.20	85.99	2.10	2530	370	
7	1	2.95	6.15	84.63	2.08	2360	345	335
	2	2.95	6.06	81.57	2.05	1920	281	
	3	2.95	6.10	84.64	2.07	1810	265	
	4	2.95	6.34	85.36	2.15	2460	360	
	5	2.95	6.07	81.33	2.06	2040	298	
14	1	2.95	6.14	84.05	2.08	1580	231	327
	2	2.95	6.11	82.14	2.07	2010	294	
	3	2.95	6.00	87.07	2.03	1440	211	
	4	2.95	6.27	83.81	2.13	2120	310	
	5	2.95	6.10	80.33	2.07	2580	377	
28	1	2.95	6.27	82.23	2.13	2430	356	466
	2	2.95	6.14	80.40	2.08	3330	487	
	3	2.95	6.20	82.84	2.10	3150	461	
	4	2.95	6.29	82.62	2.13	3080	451	
	5	2.95	6.22	80.33	2.11	2280	334	
90	1	2.95	6.13	80.19	2.08	2600	380	455
	2	2.95	5.90	76.07	2.00	1400	205	
	3	2.95	6.01	76.74	2.04	2810	411	
	4	2.95	6.16	80.30	2.09	3920	574	
	5	2.95	6.05	75.94	2.05	1640	240	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ ส่วนผสม 65FA60 18M (2.5)

วันที่ผสม 16 กันยายน 2549 ผสมเวลา 15:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.18	83.24	2.09	1100	161	168
	2	2.95	6.30	84.50	2.14	1150	168	
	3	2.95	5.90	80.14	2.00	1170	171	
	4	2.95	5.83	78.37	1.98	1180	173	
	5	2.95	6.10	82.32	2.07	910	133	
7	1	2.95	5.85	78.24	1.98	1360	199	223
	2	2.95	6.15	83.19	2.08	1440	211	
	3	2.95	5.98	82.91	2.03	1700	249	
	4	2.95	6.15	83.00	2.08	1520	222	
	5	2.95	6.14	81.51	2.08	1600	234	
14	1	2.95	6.15	82.65	2.08	1940	284	306
	2	2.95	6.21	85.19	2.11	2250	329	
	3	2.95	6.26	80.42	2.12	1330	195	
	4	2.95	6.19	82.64	2.10	2090	306	
	5	2.95	6.30	81.62	2.14	1420	208	
28	1	2.95	6.32	84.57	2.14	3680	538	386
	2	2.95	6.10	82.76	2.07	2600	380	
	3	2.95	6.08	79.50	2.06	2680	392	
	4	2.95	6.13	79.58	2.08	2680	392	
	5	2.95	6.25	81.91	2.12	2580	377	
90	1	2.95	5.92	78.55	2.01	2930	429	400
	2	2.95	6.10	80.26	2.07	1540	225	
	3	2.95	6.22	82.81	2.11	2540	372	
	4	2.95	6.30	81.47	2.14	1660	243	
	5	2.95	6.18	78.98	2.09	1220	178	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (2.5) (H)

วันที่ผสม 16 กันยายน 2549 ผสมเวลา 14:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.27	83.67	2.13	2970	435	313
	2	2.95	6.05	81.32	2.05	2330	341	
	3	2.95	6.23	82.77	2.11	2040	298	
	4	2.95	6.17	80.99	2.09	1540	225	
	5	2.95	6.20	81.23	2.10	2040	298	
7	1	2.95	6.10	80.07	2.07	1560	228	336
	2	2.95	6.05	82.56	2.05	2220	325	
	3	2.95	6.10	82.05	2.07	2160	316	
	4	2.95	6.18	83.71	2.09	2500	366	
	5	2.95	6.21	83.03	2.11	1600	234	
14	1	2.95	6.35	83.49	2.15	2010	294	314
	2	2.95	6.12	80.86	2.07	1940	284	
	3	2.95	6.21	80.36	2.11	2080	304	
	4	2.95	6.34	79.61	2.15	2300	337	
	5	2.95	6.24	82.90	2.12	2410	353	
28	1	2.95	6.30	82.00	2.14	2110	309	471
	2	2.95	6.21	82.69	2.11	3550	519	
	3	2.95	6.27	83.49	2.13	2420	354	
	4	2.95	6.42	86.42	2.18	3100	454	
	5	2.95	6.13	80.58	2.08	3000	439	
90	1	2.95	6.10	81.05	2.07	1740	255	356
	2	2.95	5.98	75.30	2.03	2020	296	
	3	2.95	6.04	78.29	2.05	2460	360	
	4	2.95	6.27	80.45	2.13	1540	225	
	5	2.95	6.07	80.20	2.06	2810	411	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 10M (2.5)

วันที่ผสม 10 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 14:45 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.97	76.74	2.02	1696	248	239
	2	2.95	5.97	76.90	2.02	1688	247	
	3	2.95	6.06	78.05	2.05	1688	247	
	4	2.95	6.00	76.53	2.03	1484	217	
	5	2.95	5.74	73.69	1.95	1612	236	
7	1	2.95	6.15	78.86	2.08	1788	262	332
	2	2.95	6.06	78.10	2.05	2276	333	
	3	2.95	5.95	77.05	2.02	2400	351	
	4	2.95	6.05	78.53	2.05	2124	311	
	5	2.95	6.17	80.09	2.09	1960	287	
14	1	2.95	6.27	79.69	2.13	2240	328	353
	2	2.95	6.23	80.01	2.11	1640	240	
	3	2.95	6.27	80.12	2.13	2450	358	
	4	2.95	6.24	80.28	2.12	2420	354	
	5	2.95	6.18	78.86	2.09	2550	373	
28	1	2.95	6.14	78.90	2.08	2650	388	373
	2	2.95	6.20	79.00	2.10	2600	380	
	3	2.95	6.13	79.25	2.08	1940	284	
	4	2.95	6.19	80.18	2.10	2520	369	
	5	2.95	6.18	78.85	2.09	2440	357	
90	1	2.95	6.20	78.06	2.10	3100	454	433
	2	2.95	6.13	77.83	2.08	3770	552	
	3	2.95	6.27	80.24	2.13	2300	337	
	4	2.95	6.17	79.46	2.09	2900	424	
	5	2.95	6.15	78.98	2.08	2880	421	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 10M (2.5) (H)

วันที่ผสม 10 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 15:40 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.05	77.75	2.05	2190	320	337
	2	2.95	6.17	79.64	2.09	2220	325	
	3	2.95	6.14	79.84	2.08	2490	364	
	4	2.95	6.17	79.14	2.09	2880	421	
	5	2.95	6.24	80.08	2.12	1500	219	
7	1	2.95	6.16	77.91	2.09	2500	366	390
	2	2.95	6.16	79.55	2.09	2700	395	
	3	2.95	6.21	79.93	2.11	2720	398	
	4	2.95	6.03	77.81	2.04	2960	433	
	5	2.95	6.10	79.05	2.07	2740	401	
14	1	2.95	6.12	78.16	2.07	3160	462	387
	2	2.95	6.18	78.65	2.09	2540	372	
	3	2.95	6.27	79.36	2.13	2500	366	
	4	2.95	6.19	78.78	2.10	2800	410	
	5	2.95	6.21	78.83	2.11	2730	399	
28	1	2.95	6.09	78.51	2.06	2900	424	412
	2	2.95	6.14	78.52	2.08	1900	278	
	3	2.95	6.00	75.64	2.03	2800	410	
	4	2.95	6.13	77.59	2.08	1650	241	
	5	2.95	6.12	78.87	2.07	2750	402	
90	1	2.95	6.10	77.42	2.07	3300	483	532
	2	2.95	6.11	76.63	2.07	3800	556	
	3	2.95	6.24	78.65	2.12	3040	445	
	4	2.95	6.16	77.95	2.09	3800	556	
	5	2.95	6.28	81.48	2.13	4400	644	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5)

วันที่ผสม 10 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 16:15 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.19	80.71	2.10	1800	263	254
	2	2.95	6.18	80.83	2.09	1760	258	
	3	2.95	6.17	82.22	2.09	1672	245	
	4	2.95	6.22	80.79	2.11	2160	316	
	5	2.95	6.27	82.00	2.13	1720	252	
7	1	2.95	6.16	80.03	2.09	2350	344	346
	2	2.95	6.10	78.94	2.07	2300	337	
	3	2.95	6.07	80.21	2.06	2610	382	
	4	2.95	6.20	81.13	2.10	2200	322	
	5	2.95	6.17	81.26	2.09	2000	293	
14	1	2.95	6.16	80.38	2.09	2700	395	394
	2	2.95	6.28	81.30	2.13	2650	388	
	3	2.95	6.20	81.52	2.10	2590	379	
	4	2.95	6.31	82.94	2.14	2720	398	
	5	2.95	6.22	80.91	2.11	2800	410	
28	1	2.95	6.20	80.92	2.10	3180	465	464
	2	2.95	6.18	80.64	2.09	3170	464	
	3	2.95	6.23	81.47	2.11	3200	468	
	4	2.95	6.16	80.68	2.09	3140	459	
	5	2.95	6.20	81.44	2.10	2920	427	
90	1	2.95	6.07	78.99	2.06	4200	614	534
	2	2.95	6.04	78.20	2.05	3800	556	
	3	2.95	6.21	81.42	2.11	3800	556	
	4	2.95	6.04	78.33	2.05	4500	658	
	5	2.95	6.06	78.20	2.05	3350	490	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.20 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5) (H)

วันที่ผสม 10 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 17:15 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.24	80.99	2.12	2600	380	414
	2	2.95	6.20	80.94	2.10	2960	433	
	3	2.95	6.16	80.59	2.09	2700	395	
	4	2.95	6.15	80.04	2.08	3050	446	
7	1	2.95	6.10	78.90	2.07	2600	380	400
	2	2.95	6.05	77.13	2.05	2750	402	
	3	2.95	6.14	81.05	2.08	2650	388	
	4	2.95	6.06	79.63	2.05	1620	237	
	5	2.95	6.16	79.73	2.09	2940	430	
14	1	2.95	6.21	80.13	2.11	2550	373	427
	2	2.95	6.21	80.32	2.11	2800	410	
	3	2.95	6.20	79.34	2.10	3400	497	
	4	2.95	6.34	83.17	2.15	1150	168	
	5	2.95	6.20	79.07	2.10	3040	445	
28	1	2.95	6.20	80.89	2.10	2430	356	426
	2	2.95	6.18	79.64	2.09	2930	429	
	3	2.95	5.98	76.85	2.03	3100	454	
	4	2.95	6.26	79.20	2.12	2700	395	
	5	2.95	6.18	81.00	2.09	2180	319	
90	1	2.95	6.07	78.37	2.06	3200	468	614
	2	2.95	6.06	77.94	2.05	4280	626	
	3	2.95	6.02	77.07	2.04	3500	512	
	4	2.95	6.08	78.00	2.06	4300	629	
	5	2.95	6.07	77.84	2.06	4000	585	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.21 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (1.5)

วันที่ผสม 11 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 9:45 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.05	79.96	2.05	1020	149	139
	2	2.95	5.92	78.17	2.01	960	140	
	3	2.95	6.14	80.96	2.08	892	131	
	4	2.95	6.14	80.94	2.08	1016	149	
	5	2.95	6.18	80.28	2.09	864	126	
7	1	2.95	6.18	80.76	2.09	1436	210	276
	2	2.95	6.10	80.04	2.07	1880	275	
	3	2.95	6.09	79.54	2.06	1808	265	
	4	2.95	6.13	81.57	2.08	1936	283	
	5	2.95	5.99	82.20	2.03	1912	280	
14	1	2.95	6.30	81.86	2.14	2460	360	328
	2	2.95	6.16	80.83	2.09	2160	316	
	3	2.95	6.20	81.30	2.10	2240	328	
	4	2.95	6.15	82.14	2.08	2200	322	
	5	2.95	6.24	82.44	2.12	2150	315	
28	1	2.95	6.24	82.18	2.12	2940	430	420
	2	2.95	6.10	79.92	2.07	1800	263	
	3	2.95	6.07	79.62	2.06	2400	351	
	4	2.95	6.10	82.31	2.07	2820	413	
	5	2.95	6.14	81.36	2.08	2846	416	
90	1	2.95	6.08	80.75	2.06	3740	547	497
	2	2.95	6.06	81.42	2.05	2200	322	
	3	2.95	6.10	79.83	2.07	3280	480	
	4	2.95	6.05	79.14	2.05	3180	465	
	5	2.95	6.00	77.53	2.03	4000	585	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.22 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5) (H)

วันที่ผสม 11 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 10:40 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.20	80.24	2.10	2520	369	383
	2	2.95	6.15	79.01	2.08	2440	357	
	3	2.95	6.24	83.29	2.12	2760	404	
	4	2.95	6.10	78.84	2.07	2764	404	
	5	2.95	6.08	78.93	2.06	1160	170	
7	1	2.95	6.11	79.80	2.07	3080	451	456
	2	2.95	6.23	82.04	2.11	3292	482	
	3	2.95	6.10	79.24	2.07	3092	452	
	4	2.95	6.04	80.74	2.05	3048	446	
	5	2.95	6.12	79.80	2.07	3062	448	
14	1	2.95	6.18	79.34	2.09	2900	424	456
	2	2.95	6.20	79.52	2.10	3000	439	
	3	2.95	6.20	81.12	2.10	2940	430	
	4	2.95	6.26	81.64	2.12	3400	497	
	5	2.95	6.15	79.88	2.08	3120	456	
28	1	2.95	6.18	77.72	2.09	3110	455	447
	2	2.95	6.16	81.89	2.09	3060	448	
	3	2.95	6.16	81.77	2.09	3120	456	
	4	2.95	6.13	81.40	2.08	2920	427	
	5	2.95	6.18	79.91	2.09	2090	306	
90	1	2.95	6.04	78.36	2.05	2980	436	540
	2	2.95	6.13	79.15	2.08	3800	556	
	3	2.95	5.98	77.77	2.03	3580	524	
	4	2.95	6.06	77.94	2.05	3700	541	
	5	2.95	6.02	78.37	2.04	3680	538	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.23 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5)

วันที่ผสม 11 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 12:50 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.06	79.78	2.05	1616	236	243
	2	2.95	5.88	77.63	1.99	1696	248	
	3	2.95	6.02	79.21	2.04	1500	219	
	4	2.95	6.01	80.68	2.04	1660	243	
	5	2.95	6.22	83.01	2.11	1820	266	
7	1	2.95	6.23	81.80	2.11	2400	351	335
	2	2.95	6.30	84.21	2.14	1950	285	
	3	2.95	6.18	83.30	2.09	2280	334	
	4	2.95	6.25	83.45	2.12	2400	351	
	5	2.95	6.24	82.87	2.12	2080	304	
14	1	2.95	6.24	82.80	2.12	2850	417	409
	2	2.95	6.35	84.60	2.15	2740	401	
	3	2.95	6.23	82.50	2.11	2635	386	
	4	2.95	6.34	84.45	2.15	2845	416	
	5	2.95	6.30	83.72	2.14	2910	426	
28	1	2.95	6.09	81.08	2.06	2720	398	510
	2	2.95	6.26	83.65	2.12	2700	395	
	3	2.95	6.21	84.58	2.11	3200	468	
	4	2.95	6.29	84.14	2.13	3650	534	
	5	2.95	6.20	83.96	2.10	3610	528	
90	1	2.95	5.98	76.75	2.03	3450	505	624
	2	2.95	6.11	80.92	2.07	4300	629	
	3	2.95	6.13	80.38	2.08	3250	475	
	4	2.95	6.05	80.52	2.05	4000	585	
	5	2.95	6.12	82.67	2.07	4500	658	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.24 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) (H)

วันที่ผสม 11 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 15:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.44	83.88	2.18	3372	493	492
	2	2.95	6.20	86.14	2.10	3420	500	
	3	2.95	6.30	83.30	2.14	2100	307	
	4	2.95	6.29	84.19	2.13	3290	481	
	5	2.95	6.22	82.61	2.11	3370	493	
7	1	2.95	6.36	85.56	2.16	1550	227	492
	2	2.95	6.40	85.93	2.17	3460	506	
	3	2.95	6.27	83.00	2.13	3400	497	
	4	2.95	6.18	81.49	2.09	3400	497	
	5	2.95	6.28	85.33	2.13	3200	468	
14	1	2.95	6.25	82.82	2.12	3750	549	549
	2	2.95	6.24	81.87	2.12	4230	619	
	3	2.95	6.23	78.52	2.11	3710	543	
	4	2.95	6.23	82.82	2.11	4100	600	
	5	2.95	6.30	83.04	2.14	3800	556	
28	1	2.95	6.27	82.14	2.13	3600	527	560
	2	2.95	6.33	82.61	2.15	2100	307	
	3	2.95	6.18	80.79	2.09	3650	534	
	4	2.95	6.29	83.28	2.13	4100	600	
	5	2.95	6.19	83.37	2.10	3950	578	
90	1	2.95	6.07	79.41	2.06	4600	673	728
	2	2.95	6.07	81.86	2.06	3660	535	
	3	2.95	6.13	84.31	2.08	5420	793	
	4	2.95	6.14	82.46	2.08	5320	778	
	5	2.95	6.08	83.36	2.06	4550	666	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.25 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 10M (2.5)

วันที่ผสม 11 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 16:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.24	81.48	2.12	1600	234	251
	2	2.95	6.39	87.69	2.17	2030	297	
	3	2.95	6.25	83.75	2.12	1740	255	
	4	2.95	6.40	85.56	2.17	1820	266	
	5	2.95	6.25	82.27	2.12	1700	249	
7	1	2.95	6.41	84.19	2.17	2620	383	423
	2	2.95	6.27	86.57	2.13	3150	461	
	3	2.95	6.26	81.84	2.12	2850	417	
	4	2.95	6.25	81.70	2.12	2940	430	
	5	2.95	6.34	83.35	2.15	2200	322	
14	1	2.95	6.39	85.74	2.17	3430	502	465
	2	2.95	6.45	82.25	2.19	3250	475	
	3	2.95	6.27	81.90	2.13	3700	541	
	4	2.95	6.27	82.77	2.13	3100	454	
	5	2.95	6.10	81.52	2.07	2700	395	
28	1	2.95	6.34	82.00	2.15	3100	454	467
	2	2.95	6.32	82.11	2.14	2120	310	
	3	2.95	6.11	83.40	2.07	3140	459	
	4	2.95	6.26	83.15	2.12	3200	468	
	5	2.95	6.26	86.33	2.12	3340	489	
90	1	2.95	6.07	82.84	2.06	4600	673	618
	2	2.95	6.10	78.08	2.07	3050	446	
	3	2.95	6.12	80.27	2.07	4180	612	
	4	2.95	6.17	80.36	2.09	3900	571	
	5	2.95	6.14	79.82	2.08	3020	442	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.26 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ ส่วนผสม 70FA40 10M (2.5) (H)

วันที่ผสม 11 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 17:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.17	81.89	2.09	3920	574	499
	2	2.95	6.26	81.47	2.12	3160	462	
	3	2.95	6.28	80.92	2.13	1900	278	
	4	2.95	6.26	80.71	2.12	3150	461	
	5	2.95	6.20	78.88	2.10	1550	227	
7	1	2.95	6.25	84.13	2.12	3460	506	474
	2	2.95	6.30	81.99	2.14	3060	448	
	3	2.95	6.30	82.48	2.14	3000	439	
	4	2.95	6.17	82.80	2.09	3450	505	
	5	2.95	6.22	85.44	2.11	2200	322	
14	1	2.95	6.29	82.24	2.13	3850	563	562
	2	2.95	6.27	83.09	2.13	2200	322	
	3	2.95	6.35	82.99	2.15	3600	527	
	4	2.95	6.16	80.25	2.09	2260	331	
	5	2.95	6.42	85.01	2.18	4070	595	
28	1	2.95	6.17	80.45	2.09	2140	313	578
	2	2.95	6.26	81.06	2.12	2860	418	
	3	2.95	6.23	81.36	2.11	2840	416	
	4	2.95	6.27	81.38	2.13	3900	571	
	5	2.95	6.22	84.85	2.11	4000	585	
90	1	2.95	6.17	83.92	2.09	3580	524	600
	2	2.95	6.17	79.78	2.09	4440	650	
	3	2.95	6.21	80.34	2.11	2080	304	
	4	2.95	6.23	77.60	2.11	1320	193	
	5	2.95	6.14	81.18	2.08	4280	626	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.27 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 18M (2.5)

วันที่ผสม 18 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 10:10 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.43	86.26	2.18	2600	380	368
	2	2.95	6.35	85.40	2.15	2410	353	
	3	2.95	6.31	84.39	2.14	2480	363	
	4	2.95	6.38	83.87	2.16	2580	377	
	5	2.95	6.27	83.47	2.13	1600	234	
7	1	2.95	6.18	83.63	2.09	3200	468	414
	2	2.95	6.32	82.95	2.14	2000	293	
	3	2.95	6.27	83.09	2.13	2820	413	
	4	2.95	6.42	82.71	2.18	2600	380	
	5	2.95	6.26	83.59	2.12	2700	395	
14	1	2.95	6.30	85.03	2.14	3900	571	528
	2	2.95	6.39	85.31	2.17	3150	461	
	3	2.95	6.29	83.67	2.13	2960	433	
	4	2.95	6.39	86.13	2.17	3850	563	
	5	2.95	6.18	83.56	2.09	3530	516	
28	1	2.95	6.30	64.72	2.14	3460	506	560
	2	2.95	6.16	83.52	2.09	3040	445	
	3	2.95	6.37	83.69	2.16	3820	559	
	4	2.95	6.21	81.29	2.11	3880	568	
	5	2.95	6.35	85.50	2.15	4160	609	
90	1	2.95	6.18	78.81	2.09	4280	626	690
	2	2.95	6.20	83.15	2.10	5000	732	
	3	2.95	6.19	80.44	2.10	4480	655	
	4	2.95	6.18	82.40	2.09	3380	495	
	5	2.95	6.09	82.10	2.06	5110	748	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.28 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 18M (2.5) (H)

วันที่ผสม 18 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 14:20 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.33	83.12	2.15	2980	436	450
	2	2.95	6.28	84.77	2.13	3040	445	
	3	2.95	6.33	85.00	2.15	2500	366	
	4	2.95	6.10	81.99	2.07	3200	468	
	5	2.95	6.20	81.33	2.10	2620	383	
7	1	2.95	6.03	80.76	2.04	2840	416	447
	2	2.95	6.16	80.63	2.09	3460	506	
	3	2.95	6.14	79.58	2.08	3150	461	
	4	2.95	6.19	81.44	2.10	3700	541	
	5	2.95	6.31	81.63	2.14	3170	464	
14	1	2.95	6.23	81.94	2.11	2960	433	452
	2	2.95	6.30	84.27	2.14	3350	490	
	3	2.95	6.30	84.28	2.14	3060	448	
	4	2.95	6.25	85.05	2.12	2980	436	
	5	2.95	6.22	84.00	2.11	3100	454	
28	1	2.95	6.11	79.99	2.07	2420	354	583
	2	2.95	6.30	84.88	2.14	2000	293	
	3	2.95	6.18	81.31	2.09	3280	480	
	4	2.95	6.15	83.16	2.08	3750	549	
	5	2.95	6.30	83.85	2.14	4220	617	
90	1	2.95	6.14	82.78	2.08	4050	593	669
	2	2.95	6.12	83.87	2.07	4780	699	
	3	2.95	6.07	80.29	2.06	5780	846	
	4	2.95	6.45	84.69	2.19	4800	702	
	5	2.95	6.45	82.97	2.19	4130	604	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.29 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (2.5)

วันที่ผสม 18 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 13:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.44	83.69	2.18	1520	222	257
	2	2.95	6.20	82.57	2.10	1720	252	
	3	2.95	6.05	79.77	2.05	1580	231	
	4	2.95	6.37	85.84	2.16	1920	281	
	5	2.95	6.42	86.09	2.18	1800	263	
7	1	2.95	6.30	84.35	2.14	2330	341	363
	2	2.95	6.31	83.95	2.14	1620	237	
	3	2.95	6.26	84.76	2.12	2320	339	
	4	2.95	6.30	85.09	2.14	2800	410	
	5	2.95	6.30	83.13	2.14	1550	227	
14	1	2.95	6.40	83.75	2.17	1700	249	415
	2	2.95	6.30	86.41	2.14	3000	439	
	3	2.95	6.29	83.69	2.13	2730	399	
	4	2.95	6.23	82.63	2.11	2000	293	
	5	2.95	6.27	82.57	2.13	2780	407	
28	1	2.95	6.34	85.09	2.15	2970	435	440
	2	2.95	6.32	81.95	2.14	2290	335	
	3	2.95	6.27	82.23	2.13	2440	357	
	4	2.95	6.25	81.17	2.12	3040	445	
	5	2.95	6.30	82.83	2.14	1580	231	
90	1	2.95	6.20	81.80	2.10	2350	344	332
	2	2.95	6.30	82.31	2.14	2250	329	
	3	2.95	6.34	83.72	2.15	2200	322	
	4	2.95	6.31	84.15	2.14	1900	278	
	5	2.95	6.37	79.37	2.16	1220	178	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.30 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (2.5) (H)

วันที่ผสม 18 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 13:40 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.45	84.15	2.19	1730	253	450
	2	2.95	6.35	87.20	2.15	3400	497	
	3	2.95	6.43	83.89	2.18	2250	329	
	4	2.95	6.32	85.00	2.14	2130	312	
	5	2.95	6.40	83.97	2.17	2750	402	
7	1	2.95	6.30	84.06	2.14	1730	253	466
	2	2.95	6.30	85.76	2.14	2900	424	
	3	2.95	6.34	83.43	2.15	2360	345	
	4	2.95	6.38	82.31	2.16	2480	363	
	5	2.95	6.21	82.15	2.11	3470	508	
14	1	2.95	6.30	85.33	2.14	3050	446	474
	2	2.95	6.25	83.30	2.12	1960	287	
	3	2.95	6.40	88.18	2.17	1420	208	
	4	2.95	6.40	88.79	2.17	3760	550	
	5	2.95	6.20	80.29	2.10	2900	424	
28	1	2.95	6.33	83.16	2.15	3510	514	504
	2	2.95	6.23	80.86	2.11	3380	495	
	3	2.95	6.21	81.91	2.11	1180	173	
	4	2.95	6.33	84.88	2.15	2000	293	
	5	2.95	6.27	85.11	2.13	1900	278	
90	1	2.95	6.44	80.92	2.18	2330	341	540
	2	2.95	6.34	84.16	2.15	3680	538	
	3	2.95	6.43	82.61	2.18	2420	354	
	4	2.95	6.22	80.14	2.11	1420	208	
	5	2.95	6.31	81.81	2.14	3700	541	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.31 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (1.5)

วันที่ผสม 18 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 15:45 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.24	83.54	2.12	1650	241	240
	2	2.95	6.43	84.41	2.18	1552	227	
	3	2.95	6.30	82.53	2.14	1800	263	
	4	2.95	6.20	84.69	2.10	1550	227	
	5	2.95	6.12	83.31	2.07	2000	293	
7	1	2.95	6.36	85.87	2.16	900	132	384
	2	2.95	6.30	82.77	2.14	2520	369	
	3	2.95	6.35	86.04	2.15	2700	395	
	4	2.95	6.44	87.72	2.18	1220	178	
	5	2.95	6.21	81.35	2.11	2650	388	
14	1	2.95	6.27	83.86	2.13	3210	470	444
	2	2.95	6.22	84.87	2.11	2600	380	
	3	2.95	6.10	81.35	2.07	2150	315	
	4	2.95	6.16	83.79	2.09	3300	483	
	5	2.95	6.13	78.74	2.08	2050	300	
28	1	2.95	6.13	80.50	2.08	3040	445	459
	2	2.95	6.20	80.01	2.10	2450	358	
	3	2.95	6.16	82.49	2.09	2470	361	
	4	2.95	6.20	83.73	2.10	2430	356	
	5	2.95	6.17	81.68	2.09	3230	473	
90	1	2.95	6.31	81.21	2.14	3320	486	466
	2	2.95	6.20	80.10	2.10	3440	503	
	3	2.95	6.38	81.32	2.16	1680	246	
	4	2.95	6.36	80.40	2.16	2620	383	
	5	2.95	6.46	80.01	2.19	2800	410	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.32 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (1.5) (H)

วันที่ผสม 18 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 16:45 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.10	82.20	2.07	2040	298	323
	2	2.95	6.20	83.61	2.10	1770	259	
	3	2.95	6.30	84.73	2.14	1200	176	
	4	2.95	6.26	85.65	2.12	2220	325	
	5	2.95	6.22	83.65	2.11	2370	347	
7	1	2.95	6.25	82.24	2.12	1400	212	377
	2	2.95	6.27	83.91	2.13	2800	410	
	3	2.95	6.10	81.12	2.07	2400	351	
	4	2.95	6.25	83.35	2.12	1900	278	
	5	2.95	6.45	84.55	2.19	2520	369	
14	1	2.95	6.24	83.20	2.12	3140	459	437
	2	2.95	6.35	82.01	2.15	1260	184	
	3	2.95	6.22	84.10	2.11	2700	395	
	4	2.95	6.12	82.39	2.07	3120	456	
	5	2.95	6.12	77.67	2.07	2350	344	
28	1	2.95	6.25	84.74	2.12	1000	146	451
	2	2.95	6.28	82.78	2.13	2100	307	
	3	2.95	6.18	79.74	2.09	2200	322	
	4	2.95	6.20	81.48	2.10	3020	442	
	5	2.95	6.14	83.53	2.08	3140	459	
90	1	2.95	6.22	80.53	2.11	2780	407	423
	2	2.95	6.10	81.68	2.07	2280	334	
	3	2.95	6.09	85.25	2.06	1760	258	
	4	2.95	6.25	82.26	2.12	2100	307	
	5	2.95	6.24	82.20	2.12	3000	439	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.33 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (2.5)

วันที่ผสม 24 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 15:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.87	77.95	1.99	1300	190	231
	2	2.95	5.72	82.38	1.94	1650	241	
	3	2.95	6.16	84.42	2.09	1572	230	
	4	2.95	6.14	81.75	2.08	1464	214	
	5	2.95	5.76	79.82	1.95	1624	238	
7	1	2.95	6.23	85.17	2.11	2020	296	303
	2	2.95	6.04	80.63	2.05	2160	316	
	3	2.95	5.89	78.64	2.00	1980	290	
	4	2.95	6.10	82.05	2.07	2080	304	
	5	2.95	6.14	81.39	2.08	2100	307	
14	1	2.95	6.06	82.43	2.05	2260	331	361
	2	2.95	5.90	79.36	2.00	2400	351	
	3	2.95	5.81	77.63	1.97	2740	401	
	4	2.95	5.89	80.67	2.00	3290	481	
	5	2.95	5.94	83.04	2.01	2000	293	
28	1	2.95	6.18	83.69	2.09	1780	260	445
	2	2.95	6.21	86.49	2.11	3300	483	
	3	2.95	6.13	84.91	2.08	2430	356	
	4	2.95	6.00	82.93	2.03	2830	414	
	5	2.95	5.94	79.56	2.01	3000	439	
90	1	2.95	5.91	79.62	2.00	3720	544	540
	2	2.95	6.22	82.85	2.11	3840	562	
	3	2.95	5.60	73.50	1.90	3680	538	
	4	2.95	5.81	76.16	1.97	3610	528	
	5	2.95	5.76	75.39	1.95	3620	530	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.34 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (2.5) (H)

วันที่ผสม 24 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 17:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.16	85.71	2.09	1472	215	524
	2	2.95	6.00	84.48	2.03	2000	293	
	3	2.95	6.12	85.34	2.07	3560	521	
	4	2.95	5.74	78.53	1.95	3720	544	
	5	2.95	6.20	86.70	2.10	3472	508	
7	1	2.95	6.19	85.04	2.10	3240	474	523
	2	2.95	6.14	83.06	2.08	3120	456	
	3	2.95	6.20	84.70	2.10	3630	531	
	4	2.95	6.14	85.19	2.08	3050	446	
	5	2.95	6.27	80.64	2.13	3850	563	
14	1	2.95	6.15	84.86	2.08	2820	413	567
	2	2.95	6.10	85.32	2.07	3660	535	
	3	2.95	6.14	84.23	2.08	2910	426	
	4	2.95	6.14	86.73	2.08	4180	612	
	5	2.95	6.00	80.61	2.03	3790	555	
28	1	2.95	6.16	85.11	2.09	2630	385	555
	2	2.95	5.98	82.53	2.03	2200	322	
	3	2.95	6.04	83.01	2.05	2100	307	
	4	2.95	6.17	85.05	2.09	4040	591	
	5	2.95	5.66	77.61	1.92	3550	519	
90	1	2.95	6.10	81.96	2.07	2470	361	426
	2	2.95	6.20	81.76	2.10	2560	375	
	3	2.95	6.17	82.59	2.09	3160	462	
	4	2.95	6.24	86.84	2.12	2660	389	
	5	2.95	6.13	81.25	2.08	3280	480	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.35 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (1.5)

วันที่ผสม 1 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 11:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.97	79.95	2.02	490	72	71
	2	2.95	6.30	83.36	2.14	516	75	
	3	2.95	5.37	69.67	1.82	480	70	
	4	2.95	5.74	76.92	1.95	422	62	
	5	2.95	6.13	80.64	2.08	460	67	
7	1	2.95	6.20	82.23	2.10	1900	278	256
	2	2.95	6.18	81.92	2.09	1660	243	
	3	2.95	6.13	83.43	2.08	1832	268	
	4	2.95	6.22	84.01	2.11	1612	236	
	5	2.95	6.04	80.26	2.05	1740	255	
14	1	2.95	6.10	81.15	2.07	1560	228	310
	2	2.95	5.90	81.06	2.00	2230	326	
	3	2.95	6.17	80.30	2.09	1600	234	
	4	2.95	6.17	78.76	2.09	1450	212	
	5	2.95	6.12	85.32	2.07	2530	370	
28	1	2.95	6.15	80.59	2.08	2600	380	328
	2	2.95	6.16	84.48	2.09	2400	351	
	3	2.95	6.04	81.88	2.05	1800	263	
	4	2.95	6.17	83.91	2.09	2200	322	
	5	2.95	5.90	81.03	2.00	2130	312	
90	1	2.95	6.14	80.93	2.08	2320	339	370
	2	2.95	5.97	79.71	2.02	2860	418	
	3	2.95	5.93	80.47	2.01	2400	351	
	4	2.95	6.13	82.04	2.08	1780	260	
	5	2.95	6.14	79.46	2.08	1450	212	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.36 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (1.5) (H)

วันที่ผสม 1 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 12:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.30	85.13	2.14	1210	177	185
	2	2.95	6.17	81.82	2.09	1420	208	
	3	2.95	6.14	82.83	2.08	1166	171	
	4	2.95	6.07	81.17	2.06	772	113	
	5	2.95	6.20	82.77	2.10	1524	223	
7	1	2.95	6.22	83.26	2.11	1636	239	449
	2	2.95	6.12	81.75	2.07	2964	434	
	3	2.95	6.23	83.59	2.11	2556	374	
	4	2.95	6.15	81.88	2.08	3012	441	
	5	2.95	6.05	82.19	2.05	3224	472	
14	1	2.95	6.22	82.20	2.11	1500	219	277
	2	2.95	6.20	82.90	2.10	870	127	
	3	2.95	6.30	84.94	2.14	1600	234	
	4	2.95	6.17	80.98	2.09	1280	187	
	5	2.95	6.09	81.35	2.06	2580	377	
28	1	2.95	6.17	82.47	2.09	1800	263	511
	2	2.95	6.10	82.79	2.07	1700	249	
	3	2.95	6.20	84.54	2.10	3600	527	
	4	2.95	6.17	82.24	2.09	3180	465	
	5	2.95	6.26	84.40	2.12	3700	541	
90	1	2.95	6.10	81.94	2.07	3000	439	489
	2	2.95	5.85	75.36	1.98	3520	515	
	3	2.95	6.10	79.42	2.07	3500	512	
	4	2.95	6.15	82.32	2.08	1800	263	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.37 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA80 18M (2.5)

วันที่ผสม 24 กันยายน 2549 ผสมเวลา 22:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.24	83.39	2.12	880	129	134
	2	2.95	6.25	85.32	2.12	940	138	
	3	2.95	6.26	86.77	2.12	910	133	
	4	2.95	6.05	83.37	2.05	890	130	
	5	2.95	6.33	85.13	2.15	960	140	
7	1	2.95	5.96	81.97	2.02	2170	317	203
	2	2.95	5.96	83.15	2.02	2490	364	
	3	2.95	6.03	83.81	2.04	1480	217	
	4	2.95	5.76	77.89	1.95	1260	184	
	5	2.95	5.97	82.38	2.02	1420	208	
14	1	2.95	6.03	81.87	2.04	2170	317	306
	2	2.95	6.13	82.04	2.08	2040	298	
	3	2.95	6.10	81.99	2.07	2100	307	
	4	2.95	6.25	87.06	2.12	2120	310	
	5	2.95	6.08	81.99	2.06	2020	296	
28	1	2.95	5.91	79.10	2.00	2560	375	404
	2	2.95	6.06	82.23	2.05	3320	486	
	3	2.95	5.94	79.57	2.01	2630	385	
	4	2.95	5.94	80.04	2.01	3090	452	
	5	2.95	6.12	84.75	2.07	2280	334	
90	1	2.95	5.76	76.82	1.95	2900	424	426
	2	2.95	6.09	84.76	2.06	2950	432	
	3	2.95	6.01	81.46	2.04	2300	337	
	4	2.95	6.05	81.14	2.05	2600	380	
	5	2.95	5.98	80.91	2.03	3200	468	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.38 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ ส่วนผสม 65FA100 18M (2.5)

วันที่ผสม 24 กันยายน 2549 ผสมเวลา 22:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.94	82.73	2.01	732	107	109
	2	2.95	5.90	85.82	2.00	680	99	
	3	2.95	6.00	83.82	2.03	588	86	
	4	2.95	6.00	86.37	2.03	768	112	
	5	2.95	5.81	83.03	1.97	788	115	
7	1	2.95	5.90	81.47	2.00	760	111	170
	2	2.95	5.45	76.46	1.85	560	82	
	3	2.95	5.64	79.26	1.91	1140	167	
	4	2.95	5.80	79.64	1.97	1120	164	
	5	2.95	5.81	83.96	1.97	1220	178	
14	1	2.95	5.98	83.65	2.03	1820	266	257
	2	2.95	6.04	84.03	2.05	1780	260	
	3	2.95	5.90	81.61	2.00	1770	259	
	4	2.95	6.03	82.88	2.04	1680	246	
	5	2.95	6.04	82.39	2.05	1740	255	
28	1	2.95	5.83	82.82	1.98	3540	518	340
	2	2.95	5.82	78.42	1.97	2210	323	
	3	2.95	5.76	78.91	1.95	1430	209	
	4	2.95	5.93	81.41	2.01	2180	319	
	5	2.95	5.92	80.88	2.01	2590	379	
90	1	2.95	5.82	80.75	1.97	2350	344	353
	2	2.95	5.78	79.51	1.96	2700	395	
	3	2.95	5.87	80.94	1.99	1700	249	
	4	2.95	5.73	78.93	1.94	2260	331	
	5	2.95	5.85	83.02	1.98	2350	344	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.39 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 60FA40 18M (2.5)

วันที่ผสม 24 กันยายน 2549 ผสมเวลา 23:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.91	78.95	2.00	826	121	130
	2	2.95	5.98	77.16	2.03	966	141	
	3	2.95	6.00	79.15	2.03	1112	163	
	4	2.95	6.07	77.75	2.06	866	127	
	5	2.95	5.86	77.06	1.99	888	130	
7	1	2.95	6.29	79.97	2.13	1460	214	219
	2	2.95	6.26	79.46	2.12	1560	228	
	3	2.95	6.39	82.30	2.17	1510	221	
	4	2.95	6.17	74.89	2.09	1450	212	
14	1	2.95	6.00	78.41	2.03	1950	285	291
	2	2.95	6.18	80.44	2.09	1960	287	
	3	2.95	6.08	79.65	2.06	1630	238	
	4	2.95	5.85	78.97	1.98	2020	296	
	5	2.95	5.94	79.66	2.01	2030	297	
28	1	2.95	6.27	22.19	2.13	2930	429	412
	2	2.95	5.93	77.90	2.01	2720	398	
	3	2.95	5.92	78.83	2.01	3300	483	
	4	2.95	5.90	75.99	2.00	2720	398	
	5	2.95	6.05	79.38	2.05	2900	424	
90	1	2.95	5.99	79.66	2.03	2500	366	471
	2	2.95	6.05	76.00	2.05	2900	424	
	3	2.95	6.05	76.85	2.05	3400	497	
	4	2.95	6.05	76.80	2.05	3350	490	
	5	2.95	6.14	79.65	2.08	2880	421	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.40 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 55FA40 18M (2.5)

วันที่ผสม 24 กันยายน 2549 ผสมเวลา 23:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.97	74.76	2.02	378	55	61
	2	2.95	5.94	76.11	2.01	434	63	
	3	2.95	5.64	71.56	1.91	414	61	
	4	2.95	5.98	71.50	2.03	456	67	
	5	2.95	5.87	72.68	1.99	396	58	
7	1	2.95	5.90	72.65	2.00	720	105	177
	2	2.95	5.80	75.50	1.97	920	135	
	3	2.95	6.06	78.68	2.05	1160	170	
	4	2.95	6.01	77.92	2.04	1310	192	
	5	2.95	6.77	74.41	2.29	1160	170	
14	1	2.95	6.00	77.21	2.03	1510	221	209
	2	2.95	6.11	78.93	2.07	1400	205	
	3	2.95	5.80	72.35	1.97	1620	237	
	4	2.95	6.15	78.78	2.08	1320	193	
	5	2.95	5.83	75.85	1.98	1480	217	
28	1	2.95	5.80	76.08	1.97	2230	326	287
	2	2.95	5.94	73.84	2.01	1870	274	
	3	2.95	5.92	77.47	2.01	2220	325	
	4	2.95	5.99	77.40	2.03	2080	304	
	5	2.95	6.05	78.39	2.05	1680	246	
90	1	2.95	5.91	72.11	2.00	2580	377	345
	2	2.95	6.05	74.18	2.05	2140	313	
	3	2.95	5.99	75.57	2.03	2340	342	
	4	2.95	5.77	71.39	1.96	2380	348	
	5	2.95	5.99	72.82	2.03	1740	255	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.41 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (0.5)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 0:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.98	78.34	2.03	66	10	8
	2	2.95	5.67	71.18	1.92	26	4	
	3	2.95	6.04	79.03	2.05	84	12	
	4	2.95	5.99	71.86	2.03	44	6	
	5	2.95	6.05	76.72	2.05	30	4	
7	1	2.95	6.22	80.68	2.11	440	64	69
	2	2.95	6.00	77.32	2.03	436	64	
	3	2.95	6.05	76.08	2.05	544	80	
	4	2.95	6.09	73.47	2.06	302	44	
	5	2.95	6.26	79.35	2.12	564	83	
14	1	2.95	6.00	80.05	2.03	1130	165	160
	2	2.95	6.23	83.89	2.11	1050	154	
	3	2.95	6.16	80.54	2.09	980	143	
	4	2.95	6.06	78.95	2.05	1200	176	
	5	2.95	6.23	80.18	2.11	1120	164	
28	1	2.95	6.29	79.83	2.13	1500	219	218
	2	2.95	6.16	79.64	2.09	1680	246	
	3	2.95	6.12	77.00	2.07	1340	196	
	4	2.95	5.97	75.91	2.02	1000	146	
	5	2.95	6.18	80.08	2.09	1450	212	
90	1	2.95	5.94	75.08	2.01	1240	181	225
	2	2.95	6.13	74.84	2.08	1640	240	
	3	2.95	6.10	77.69	2.07	580	85	
	4	2.95	5.94	76.77	2.01	1740	255	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.42 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (3.5)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 0:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.97	78.03	2.02	1896	277	263
	2	2.95	6.03	78.83	2.04	1900	278	
	3	2.95	5.83	78.83	1.98	1620	237	
	4	2.95	6.14	81.91	2.08	1780	260	
	5	2.95	6.02	79.11	2.04	1360	199	
7	1	2.95	6.24	80.49	2.12	2540	372	373
	2	2.95	6.20	80.78	2.10	2300	337	
	3	2.95	6.14	80.34	2.08	1960	287	
	4	2.95	6.30	81.18	2.14	2940	430	
	5	2.95	6.20	82.02	2.10	2800	410	
14	1	2.95	6.20	83.76	2.10	2750	402	431
	2	2.95	5.98	76.06	2.03	1960	287	
	3	2.95	6.30	80.68	2.14	3140	459	
	4	2.95	6.16	82.81	2.09	2100	307	
	5	2.95	6.10	78.17	2.07	2950	432	
28	1	2.95	6.02	77.42	2.04	2900	424	495
	2	2.95	6.17	80.25	2.09	3640	533	
	3	2.95	6.05	77.18	2.05	3200	468	
	4	2.95	6.22	82.12	2.11	3360	492	
	5	2.95	6.08	77.84	2.06	3320	486	
90	1	2.95	6.26	78.84	2.12	3530	516	516
	2	2.95	6.14	78.08	2.08	3680	538	
	3	2.95	6.09	81.00	2.06	3200	468	
	4	2.95	6.25	77.48	2.12	3700	541	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.43 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ ส่วนผสม 65FA40 18M (1SP)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 1:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.86	78.68	1.99	1880	275	283
	2	2.95	6.09	80.83	2.06	1748	256	
	3	2.95	5.78	76.33	1.96	1940	284	
	4	2.95	6.07	83.42	2.06	2088	305	
	5	2.95	6.05	81.24	2.05	2004	293	
7	1	2.95	6.11	81.77	2.07	3020	442	422
	2	2.95	6.14	88.85	2.08	3060	448	
	3	2.95	6.10	81.63	2.07	2810	411	
	4	2.95	6.11	83.52	2.07	2690	394	
	5	2.95	6.00	80.34	2.03	2840	416	
14	1	2.95	6.13	82.40	2.08	3800	556	519
	2	2.95	6.06	81.82	2.05	3400	497	
	3	2.95	6.05	74.83	2.05	2300	337	
	4	2.95	6.10	81.35	2.07	3450	505	
	5	2.95	6.25	82.52	2.12	1700	249	
28	1	2.95	6.13	80.40	2.08	4130	604	578
	2	2.95	6.25	81.33	2.12	3900	571	
	3	2.95	6.15	83.76	2.08	4590	672	
	4	2.95	6.10	78.50	2.07	3460	506	
	5	2.95	6.07	80.50	2.06	3830	560	
90	1	2.95	6.12	79.35	2.07	4500	658	634
	2	2.95	6.09	78.87	2.06	4200	614	
	3	2.95	6.20	81.96	2.10	4460	653	
	4	2.95	5.78	76.06	1.96	4160	609	
	5	2.95	6.17	83.48	2.09	3215	470	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.44 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2SP)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 1:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.03	82.41	2.04	1936	283	285
	2	2.95	6.13	80.20	2.08	1772	259	
	3	2.95	6.15	85.16	2.08	2044	299	
	4	2.95	5.99	80.83	2.03	2048	300	
	5	2.95	6.01	80.38	2.04	1616	236	
7	1	2.95	5.94	81.60	2.01	2910	426	432
	2	2.95	6.05	83.11	2.05	2950	432	
	3	2.95	6.09	82.58	2.06	2640	386	
	4	2.95	5.84	80.44	1.98	2990	437	
	5	2.95	6.27	83.92	2.13	2480	363	
14	1	2.95	6.08	79.72	2.06	3610	528	526
	2	2.95	6.13	79.70	2.08	3604	527	
	3	2.95	5.95	82.00	2.02	3580	524	
	4	2.95	6.26	84.11	2.12	3600	527	
	5	2.95	6.27	81.11	2.13	2700	395	
28	1	2.95	6.00	82.70	2.03	4020	588	619
	2	2.95	6.06	80.60	2.05	4570	669	
	3	2.95	6.05	82.37	2.05	3610	528	
	4	2.95	6.20	84.08	2.10	3460	506	
	5	2.95	5.92	81.17	2.01	4100	600	
90	1	2.95	6.27	81.79	2.13	4500	658	680
	2	2.95	5.93	77.68	2.01	4820	705	
	3	2.95	6.00	81.11	2.03	4620	676	
	4	2.95	6.16	81.01	2.09	4650	680	
	5	2.95	6.16	82.41	2.09	4550	666	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.45 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (3SP)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 2:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.06	80.73	2.05	1664	243	261
	2	2.95	5.98	79.59	2.03	1720	252	
	3	2.95	6.13	79.73	2.08	1896	277	
	4	2.95	5.88	76.10	1.99	1852	271	
	5	2.95	5.80	77.07	1.97	1176	172	
7	1	2.95	6.00	79.77	2.03	2910	426	405
	2	2.95	5.94	77.82	2.01	2060	301	
	3	2.95	5.87	79.75	1.99	2720	398	
	4	2.95	5.92	79.91	2.01	2680	392	
	5	2.95	6.03	79.82	2.04	2060	301	
14	1	2.95	5.72	76.36	1.94	3400	497	493
	2	2.95	6.35	87.03	2.15	3380	495	
	3	2.95	6.21	81.83	2.11	2650	388	
	4	2.95	6.23	83.62	2.11	3330	487	
	5	2.95	6.25	82.82	2.12	2800	410	
28	1	2.95	5.84	76.06	1.98	3160	462	541
	2	2.95	5.98	77.74	2.03	4020	588	
	3	2.95	6.30	81.16	2.14	3620	530	
	4	2.95	6.10	78.73	2.07	3450	505	
	5	2.95	6.00	76.32	2.03	2500	366	
90	1	2.95	6.02	76.66	2.04	4080	597	589
	2	2.95	5.96	76.67	2.02	3750	549	
	3	2.95	5.97	75.55	2.02	4400	644	
	4	2.95	6.08	76.96	2.06	3140	459	
	5	2.95	5.91	75.01	2.00	3880	568	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.46 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (4SP)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 2:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.07	74.22	2.06	1652	242	248
	2	2.95	6.06	77.93	2.05	1520	222	
	3	2.95	5.83	79.00	1.98	1824	267	
	4	2.95	6.03	79.92	2.04	1360	199	
	5	2.95	5.90	77.86	2.00	1780	260	
7	1	2.95	6.04	80.36	2.05	2280	334	331
	2	2.95	6.20	81.02	2.10	2140	313	
	3	2.95	6.17	82.38	2.09	2310	338	
	4	2.95	6.02	80.38	2.04	2280	334	
	5	2.95	6.20	82.04	2.10	2300	337	
14	1	2.95	6.23	82.54	2.11	2610	382	393
	2	2.95	5.87	77.00	1.99	2650	388	
	3	2.95	6.04	81.78	2.05	2780	407	
	4	2.95	6.22	82.07	2.11	2710	396	
	5	2.95	6.15	78.96	2.08	2160	316	
28	1	2.95	6.09	78.77	2.06	4020	588	488
	2	2.95	6.24	80.32	2.12	3000	439	
	3	2.95	5.81	77.40	1.97	2780	407	
	4	2.95	5.96	77.18	2.02	3400	497	
	5	2.95	5.60	72.23	1.90	3600	527	
90	1	2.95	5.91	76.99	2.00	3520	515	544
	2	2.95	6.18	78.31	2.09	3140	459	
	3	2.95	5.93	78.73	2.01	3930	575	
	4	2.95	6.08	80.39	2.06	3700	541	
	5	2.95	6.16	79.62	2.09	3720	544	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.47 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (1W)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 3:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.97	81.91	2.02	1692	248	244
	2	2.95	6.04	80.97	2.05	1988	291	
	3	2.95	6.05	81.71	2.05	1732	253	
	4	2.95	6.00	82.06	2.03	1660	243	
	5	2.95	6.05	80.39	2.05	1600	234	
7	1	2.95	6.04	79.79	2.05	2180	319	338
	2	2.95	6.05	79.21	2.05	2450	358	
	3	2.95	6.11	81.98	2.07	1800	263	
	4	2.95	6.22	83.98	2.11	2040	298	
	5	2.95	6.25	82.97	2.12	2580	377	
14	1	2.95	6.18	80.34	2.09	3050	446	474
	2	2.95	6.27	82.00	2.13	3280	480	
	3	2.95	6.27	82.87	2.13	3500	512	
	4	2.95	6.18	85.97	2.09	3180	465	
	5	2.95	6.09	82.02	2.06	3200	468	
28	1	2.95	6.06	81.42	2.05	3530	516	548
	2	2.95	5.98	79.32	2.03	4160	609	
	3	2.95	6.08	84.18	2.06	4260	623	
	4	2.95	6.13	83.56	2.08	3750	549	
	5	2.95	6.04	79.87	2.05	3540	518	
90	1	2.95	5.91	79.59	2.00	3900	571	582
	2	2.95	6.14	80.50	2.08	3980	582	
	3	2.95	5.91	77.76	2.00	4000	585	
	4	2.95	5.99	80.03	2.03	3700	541	
	5	2.95	5.93	77.09	2.01	4320	632	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.48 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2W)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 3:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.98	79.29	2.03	1720	252	255
	2	2.95	6.05	81.26	2.05	1812	265	
	3	2.95	6.07	80.21	2.06	1872	274	
	4	2.95	5.99	81.94	2.03	1616	236	
	5	2.95	5.97	79.50	2.02	1704	249	
7	1	2.95	6.18	82.92	2.09	1500	219	370
	2	2.95	6.00	81.06	2.03	2630	385	
	3	2.95	6.18	82.23	2.09	2540	372	
	4	2.95	6.06	83.01	2.05	2500	366	
	5	2.95	5.98	77.72	2.03	2440	357	
14	1	2.95	5.89	76.75	2.00	3500	512	486
	2	2.95	6.27	86.42	2.13	3480	509	
	3	2.95	6.13	81.19	2.08	2020	296	
	4	2.95	6.29	82.56	2.13	2980	436	
28	1	2.95	6.13	83.54	2.08	3350	490	541
	2	2.95	6.00	77.77	2.03	2880	421	
	3	2.95	6.00	87.45	2.03	4100	600	
	4	2.95	6.03	77.61	2.04	3580	524	
	5	2.95	5.84	77.74	1.98	3760	550	
90	1	2.95	5.83	74.97	1.98	3800	556	562
	2	2.95	6.13	82.94	2.08	3980	582	
	3	2.95	6.00	78.75	2.03	3740	547	
	4	2.95	6.25	81.55	2.12	3900	571	
	5	2.95	5.95	76.16	2.02	3798	556	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.49 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (3W)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 4:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.00	80.09	2.03	1524	223	252
	2	2.95	6.00	79.75	2.03	1784	261	
	3	2.95	5.90	79.80	2.00	1660	243	
	4	2.95	5.87	77.89	1.99	1864	273	
	5	2.95	6.08	80.27	2.06	1768	259	
7	1	2.95	6.04	81.00	2.05	2420	354	335
	2	2.95	5.96	77.63	2.02	2360	345	
	3	2.95	5.95	77.03	2.02	1750	256	
	4	2.95	6.17	82.32	2.09	2170	317	
	5	2.95	6.10	80.91	2.07	2200	322	
14	1	2.95	5.75	75.63	1.95	2730	399	438
	2	2.95	6.16	81.85	2.09	3020	442	
	3	2.95	6.18	83.45	2.09	2430	356	
	4	2.95	5.91	80.25	2.00	2780	407	
	5	2.95	6.27	82.58	2.13	3180	465	
28	1	2.95	6.10	78.92	2.07	3420	500	502
	2	2.95	6.24	81.34	2.12	2820	413	
	3	2.95	6.09	82.70	2.06	4220	617	
	4	2.95	6.22	81.68	2.11	3820	559	
	5	2.95	6.07	76.74	2.06	3060	448	
90	1	2.95	6.10	76.43	2.07	3620	530	539
	2	2.95	6.14	78.43	2.08	3780	553	
	3	2.95	6.07	78.56	2.06	3750	549	
	4	2.95	5.88	78.15	1.99	3580	524	
	5	2.95	5.86	74.50	1.99	3690	540	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.50 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (4W)

วันที่ผสม 25 กันยายน 2549 ผสมเวลา 4:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.12	80.31	2.07	1740	255	250
	2	2.95	6.12	78.31	2.07	1710	250	
	3	2.95	5.94	76.01	2.01	1872	274	
	4	2.95	6.17	90.83	2.09	1620	237	
	5	2.95	6.13	78.16	2.08	1590	233	
7	1	2.95	6.26	82.47	2.12	2150	315	357
	2	2.95	6.24	81.18	2.12	1710	250	
	3	2.95	6.30	79.68	2.14	2400	351	
	4	2.95	6.21	79.76	2.11	2780	407	
	5	2.95	6.13	78.05	2.08	1580	231	
14	1	2.95	6.07	78.11	2.06	2160	316	342
	2	2.95	6.30	81.74	2.14	1520	222	
	3	2.95	6.06	76.38	2.05	2540	372	
	4	2.95	6.29	82.24	2.13	2300	337	
	5	2.95	6.27	81.57	2.13	2360	345	
28	1	2.95	6.07	75.69	2.06	3280	480	521
	2	2.95	6.27	78.11	2.13	3640	533	
	3	2.95	6.01	78.78	2.04	2580	377	
	4	2.95	5.90	74.87	2.00	4280	626	
	5	2.95	6.18	78.50	2.09	3760	550	
90	1	2.95	5.73	75.50	1.94	3040	445	533
	2	2.95	6.07	75.81	2.06	3520	515	
	3	2.95	6.15	77.94	2.08	3420	500	
	4	2.95	6.19	77.37	2.10	3740	547	
	5	2.95	6.29	79.01	2.13	3900	571	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.51 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA30 18M (2.5)

วันที่ผสม 22 ธันวาคม 2549 ผสมเวลา 13:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.07	79.41	2.06	1540	225	232
	2	2.95	6.14	80.87	2.08	1510	221	
	3	2.95	6.20	82.34	2.10	1560	228	
	4	2.95	6.37	87.17	2.16	1620	237	
	5	2.95	5.94	80.70	2.01	1700	249	
7	1	2.95	6.10	80.15	2.07	2150	315	299
	2	2.95	6.05	81.42	2.05	2000	293	
	3	2.95	6.03	78.98	2.04	1996	292	
	4	2.95	6.01	79.68	2.04	2050	300	
	5	2.95	6.07	79.46	2.06	2030	297	
14	1	2.95	6.20	81.98	2.10	2750	402	379
	2	2.95	6.23	80.14	2.11	2190	320	
	3	2.95	6.32	84.06	2.14	2640	386	
	4	2.95	6.20	82.23	2.10	2670	391	
	5	2.95	6.22	79.03	2.11	2690	394	
28	1	2.95	6.18	81.54	2.09	2960	433	422
	2	2.95	5.96	77.67	2.02	3090	452	
	3	2.95	6.19	83.47	2.10	2920	427	
	4	2.95	6.19	78.65	2.10	2800	410	
	5	2.95	6.13	78.75	2.08	2650	388	

90

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.52 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA20 18M (2.5)

วันที่ผสม 22 ธันวาคม 2549 ผสมเวลา 13:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.07	80.67	2.06	1525	223	196
	2	2.95	6.13	79.00	2.08	1525	223	
	3	2.95	6.17	80.85	2.09	1265	185	
	4	2.95	6.31	82.09	2.14	1120	164	
	5	2.95	6.20	79.47	2.10	1275	187	
7	1	2.95	6.02	80.45	2.04	1875	274	257
	2	2.95	5.98	78.25	2.03	1775	260	
	3	2.95	6.24	85.60	2.12	1890	277	
	4	2.95	6.12	82.35	2.07	1642	240	
	5	2.95	6.04	80.10	2.05	1598	234	
14	1	2.95	6.30	82.93	2.14	2730	399	331
	2	2.95	6.29	79.61	2.13	1890	277	
	3	2.95	6.16	80.66	2.09	2450	358	
	4	2.95	6.22	81.45	2.11	2210	323	
	5	2.95	6.21	78.86	2.11	2030	297	
28	1	2.95	6.03	77.46	2.04	2550	373	393
	2	2.95	6.19	81.00	2.10	2630	385	
	3	2.95	6.14	79.38	2.08	2820	413	
	4	2.95	6.14	81.25	2.08	2820	413	
	5	2.95	6.13	78.01	2.08	2610	382	

90

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.53 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 10M (2.5)

วันที่ผสม 14 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 16:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.76	77.61	1.95	1430	209	290
	2	2.95	5.85	80.28	1.98	2180	319	
	3	2.95	5.89	81.55	2.00	1970	288	
	4	2.95	6.13	82.32	2.08	1800	263	
7	1	2.95	6.21	82.98	2.11	1700	249	376
	2	2.95	6.36	84.42	2.16	2680	392	
	3	2.95	6.25	85.42	2.12	2530	370	
	4	2.95	6.18	83.18	2.09	2500	366	
14	1	2.95	6.17	80.77	2.09	2820	413	389
	2	2.95	6.13	83.69	2.08	2150	315	
	3	2.95	6.12	81.58	2.07	2330	341	
	4	2.95	6.10	85.46	2.07	2830	414	
28	1	2.95	6.16	83.19	2.09	2660	389	413
	2	2.95	6.09	81.69	2.06	3260	477	
	3	2.95	6.07	82.11	2.06	1900	278	
	4	2.95	5.97	80.52	2.02	2550	373	
90	1	2.95	5.98	81.32	2.03	3900	571	545
	2	2.95	5.89	80.23	2.00	3740	547	
	3	2.95	6.30	81.86	2.14	3860	565	
	4	2.95	6.20	82.33	2.10	3640	533	
	5	2.95	6.16	80.74	2.09	3500	512	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.54 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 10M (2.5) (H)

วันที่ผสม 14 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 16:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.05	81.95	2.05	2700	395	445
	2	2.95	6.05	82.13	2.05	1950	285	
	3	2.95	6.22	82.26	2.11	3160	462	
	4	2.95	6.14	83.16	2.08	3270	478	
7	1	2.95	6.00	79.77	2.03	2030	297	401
	2	2.95	6.14	83.12	2.08	2410	353	
	3	2.95	6.13	84.91	2.08	3110	455	
	4	2.95	6.10	83.97	2.07	2700	395	
14	1	2.95	6.18	82.05	2.09	3280	480	462
	2	2.95	6.17	84.06	2.09	3200	468	
	3	2.95	6.08	83.79	2.06	3000	439	
	4	2.95	6.35	81.63	2.15	1750	256	
28	1	2.95	6.14	82.21	2.08	3600	527	496
	2	2.95	5.93	79.40	2.01	3260	477	
	3	2.95	6.20	83.94	2.10	2480	363	
	4	2.95	5.96	79.08	2.02	3310	484	
90	1	2.95	6.15	80.50	2.08	5120	749	535
	2	2.95	6.14	81.61	2.08	3600	527	
	3	2.95	6.05	79.40	2.05	4420	647	
	4	2.95	6.20	80.73	2.10	3680	538	
	5	2.95	6.20	81.15	2.10	3680	538	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.55 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5)

วันที่ผสม 14 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 9:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.10	81.26	2.07	2480	363	344
	2	2.95	6.11	80.48	2.07	2040	298	
	3	2.95	6.20	83.77	2.10	2530	370	
	4	2.95	6.10	83.05	2.07	2360	345	
	5	2.95	6.13	83.17	2.08	2340	342	
7	1	2.95	6.03	79.96	2.04	1740	255	366
	2	2.95	5.99	81.11	2.03	2560	375	
	3	2.95	6.09	82.20	2.06	2300	337	
	4	2.95	6.07	80.25	2.06	2330	341	
	5	2.95	6.07	84.66	2.06	2810	411	
14	1	2.95	6.30	85.24	2.14	2880	421	439
	2	2.95	6.14	87.19	2.08	3180	465	
	3	2.95	5.96	81.61	2.02	2950	432	
	4	2.95	6.06	83.84	2.05	2900	424	
	5	2.95	5.92	81.72	2.01	3100	454	
28	1	2.95	6.01	81.32	2.04	3800	556	544
	2	2.95	6.00	81.83	2.03	3980	582	
	3	2.95	6.05	81.81	2.05	3350	490	
	4	2.95	6.20	81.89	2.10	4050	593	
	5	2.95	5.95	78.83	2.02	3400	497	
90	1	2.95	5.80	77.22	1.97	5170	756	691
	2	2.95	6.14	82.19	2.08	2520	369	
	3	2.95	6.10	81.43	2.07	4560	667	
	4	2.95	6.19	81.56	2.10	4930	721	
	5	2.95	6.03	79.24	2.04	4240	620	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.56 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA60 14M (2.5) (H)

วันที่ผสม 10 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 13:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.11	82.25	2.07	3210	470	508
	2	2.95	6.06	83.01	2.05	2740	401	
	3	2.95	6.13	82.07	2.08	3600	527	
	4	2.95	6.10	84.93	2.07	3600	527	
	5	2.95	6.05	82.42	2.05	4400	644	
7	1	2.95	5.94	88.43	2.01	3440	503	451
	2	2.95	6.13	83.34	2.08	3060	448	
	3	2.95	6.03	83.33	2.04	2980	436	
	4	2.95	6.14	83.25	2.08	3260	477	
	5	2.95	6.14	82.10	2.08	2680	392	
14	1	2.95	5.89	78.99	2.00	3470	508	496
	2	2.95	6.09	82.73	2.06	3370	493	
	3	2.95	6.24	84.41	2.12	3400	497	
	4	2.95	6.11	83.24	2.07	3330	487	
	5	2.95	6.19	80.95	2.10	3390	496	
28	1	2.95	6.15	85.65	2.08	4910	718	724
	2	2.95	6.07	82.52	2.06	2330	341	
	3	2.95	6.03	82.69	2.04	3800	556	
	4	2.95	6.03	82.65	2.04	5370	786	
	5	2.95	6.17	83.62	2.09	4560	667	
90	1	2.95	5.83	76.59	1.98	5430	794	745
	2	2.95	6.20	84.09	2.10	3790	555	
	3	2.95	6.04	81.58	2.05	4880	714	
	4	2.95	6.22	84.95	2.11	3970	581	
	5	2.95	5.97	78.84	2.02	4970	727	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.57 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5)

วันที่ผสม 10 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 14:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.14	81.75	2.08	1880	275	260
	2	2.95	6.06	81.51	2.05	1350	198	
	3	2.95	6.00	79.12	2.03	1780	260	
	4	2.95	6.20	84.52	2.10	1780	260	
	5	2.95	6.14	82.62	2.08	1670	244	
7	1	2.95	6.21	82.18	2.11	2790	408	338
	2	2.95	6.40	87.11	2.17	1990	291	
	3	2.95	6.11	87.06	2.07	2010	294	
	4	2.95	6.37	87.46	2.16	2450	358	
	5	2.95	6.33	83.16	2.15	2300	337	
14	1	2.95	6.16	81.98	2.09	3000	439	488
	2	2.95	6.03	83.51	2.04	3610	528	
	3	2.95	5.87	80.17	1.99	3400	497	
	4	2.95	6.07	80.37	2.06	3360	492	
	5	2.95	5.91	80.25	2.00	3300	483	
28	1	2.95	6.14	81.01	2.08	3500	512	504
	2	2.95	5.95	80.46	2.02	3560	521	
	3	2.95	5.93	79.57	2.01	3380	495	
	4	2.95	6.11	80.53	2.07	3270	478	
	5	2.95	6.07	81.39	2.06	3500	512	
90	1	2.95	6.25	83.40	2.12	4200	614	570
	2	2.95	6.13	78.66	2.08	4280	626	
	3	2.95	6.17	79.43	2.09	2900	424	
	4	2.95	6.08	82.44	2.06	3400	497	
	5	2.95	6.03	82.09	2.04	3700	541	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.58 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (1.5) (H)

วันที่ผสม 17 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 13:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.90	78.02	2.00	3600	527	500
	2	2.95	5.88	76.79	1.99	3120	456	
	3	2.95	5.88	78.61	1.99	3870	566	
	4	2.95	5.97	78.04	2.02	3070	449	
	5	2.95	6.00	82.73	2.03	2170	317	
7	1	2.95	6.01	79.88	2.04	3710	543	550
	2	2.95	6.01	83.52	2.04	3890	569	
	3	2.95	6.14	82.43	2.08	4160	609	
	4	2.95	6.17	83.66	2.09	3480	509	
	5	2.95	5.52	76.60	1.87	3570	522	
14	1	2.95	6.07	81.66	2.06	3800	556	606
	2	2.95	6.14	80.88	2.08	4390	642	
	3	2.95	6.06	79.66	2.05	4270	625	
	4	2.95	5.97	83.10	2.02	3320	486	
	5	2.95	6.20	81.10	2.10	4100	600	
28	1	2.95	6.17	83.72	2.09	3760	550	552
	2	2.95	6.05	83.12	2.05	2720	398	
	3	2.95	6.14	83.17	2.08	3380	495	
	4	2.95	6.10	82.63	2.07	3670	537	
	5	2.95	6.15	82.03	2.08	4270	625	
90	1	2.95	6.07	79.39	2.06	3660	535	584
	2	2.95	6.10	76.95	2.07	3860	565	
	3	2.95	6.09	81.38	2.06	3940	576	
	4	2.95	5.88	79.10	1.99	4920	720	
	5	2.95	6.09	79.10	2.06	4500	658	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.59 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5)

วันที่ผสม 17 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 15:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.20	82.29	2.10	2630	385	355
	2	2.95	6.19	86.16	2.10	2730	399	
	3	2.95	6.27	85.56	2.13	2180	319	
	4	2.95	6.31	85.91	2.14	2270	332	
	5	2.95	6.01	80.13	2.04	2330	341	
7	1	2.95	6.16	80.38	2.09	3140	459	462
	2	2.95	6.28	81.30	2.13	3010	440	
	3	2.95	6.20	81.52	2.10	3580	524	
	4	2.95	6.31	82.94	2.14	3020	442	
	5	2.95	6.22	80.91	2.11	3050	446	
14	1	2.95	6.26	87.51	2.12	4000	585	550
	2	2.95	6.27	84.97	2.13	3510	514	
	3	2.95	5.92	80.37	2.01	3600	527	
	4	2.95	5.83	78.78	1.98	3870	566	
	5	2.95	6.30	84.36	2.14	3800	556	
28	1	2.95	6.07	82.66	2.06	4180	612	616
	2	2.95	6.18	82.88	2.09	4100	600	
	3	2.95	6.22	85.34	2.11	4600	673	
	4	2.95	5.99	83.39	2.03	3960	579	
	5	2.95	6.10	84.73	2.07	3540	518	
90	1	2.95	6.17	82.17	2.09	5860	857	718
	2	2.95	5.98	80.21	2.03	6400	936	
	3	2.95	6.18	83.28	2.09	5000	732	
	4	2.95	6.20	83.44	2.10	4720	691	
	5	2.95	6.30	84.10	2.14	5000	732	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.60 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) (H)

วันที่ผสม 17 สิงหาคม 2549 ผสมเวลา 16:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.27	87.13	2.13	4180	612	614
	2	2.95	6.11	80.80	2.07	4200	614	
	3	2.95	6.20	85.84	2.10	4160	609	
	4	2.95	6.02	83.91	2.04	4240	620	
	5	2.95	6.04	82.23	2.05	2080	304	
7	1	2.95	6.20	81.80	2.10	4790	701	675
	2	2.95	6.30	82.31	2.14	4480	655	
	3	2.95	6.34	83.72	2.15	4870	713	
	4	2.95	6.31	84.15	2.14	4420	647	
	5	2.95	6.37	79.37	2.16	4500	658	
14	1	2.95	6.20	81.16	2.10	4770	698	694
	2	2.95	6.04	82.13	2.05	4940	723	
	3	2.95	5.84	80.14	1.98	4680	685	
	4	2.95	6.14	80.77	2.08	4750	695	
	5	2.95	5.94	81.85	2.01	4570	669	
28	1	2.95	6.00	78.36	2.03	3440	503	713
	2	2.95	6.08	83.08	2.06	4940	723	
	3	2.95	6.10	82.98	2.07	3400	497	
	4	2.95	6.15	80.40	2.08	4870	713	
	5	2.95	6.14	85.29	2.08	4820	705	
90	1	2.95	6.20	81.80	2.10	5040	737	759
	2	2.95	6.17	80.47	2.09	4620	676	
	3	2.95	5.97	77.55	2.02	5600	819	
	4	2.95	6.00	82.30	2.03	5500	805	
	5	2.95	5.97	79.12	2.02	4460	653	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.61 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 10M (2.5)

วันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2549 ผสมเวลา 19:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.96	82.06	2.02	2760	404	383
	2	2.95	6.07	82.95	2.06	2780	407	
	3	2.95	5.98	81.77	2.03	2400	351	
	4	2.95	5.84	79.98	1.98	2520	369	
7	1	2.95	6.29	86.29	2.13	2440	357	356
	2	2.95	6.11	81.86	2.07	2470	361	
	3	2.95	6.20	87.87	2.10	2350	344	
	4	2.95	5.93	81.64	2.01	2480	363	
14	1	2.95	6.02	80.77	2.04	3410	499	469
	2	2.95	6.36	86.36	2.16	2920	427	
	3	2.95	5.88	82.03	1.99	3320	486	
	4	2.95	5.75	75.65	1.95	3180	465	
28	1	2.95	6.07	79.41	2.06	3190	467	479
	2	2.95	6.07	81.86	2.06	3420	500	
	3	2.95	6.13	84.31	2.08	3010	440	
	4	2.95	6.14	82.46	2.08	3570	522	
	5	2.95	6.24	81.87	2.12	3180	465	
90	1	2.95	5.90	79.96	2.00	2400	351	539
	2	2.95	6.00	78.70	2.03	3630	531	
	3	2.95	6.16	83.07	2.09	4050	593	
	4	2.95	6.05	79.30	2.05	2400	351	
	5	2.95	5.95	78.30	2.02	3380	495	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.62 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 10M (2.5) (H)

วันที่ผสม 15 กันยายน 2549 ผสมเวลา 19:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.10	82.59	2.07	3450	505	667
	2	2.95	5.96	82.21	2.02	4990	730	
	3	2.95	5.99	84.11	2.03	4930	721	
	4	2.95	5.55	77.90	1.88	4860	711	
7	1	2.95	6.34	87.74	2.15	2370	347	631
	2	2.95	6.19	86.87	2.10	4260	623	
	3	2.95	6.30	88.43	2.14	4540	664	
	4	2.95	6.90	80.88	2.34	4140	606	
14	1	2.95	6.26	83.66	2.12	3530	516	539
	2	2.95	6.37	81.40	2.16	2010	294	
	3	2.95	5.86	80.77	1.99	4060	594	
	4	2.95	6.35	86.84	2.15	3460	506	
28	1	2.95	6.34	2.00	2.15	3860	565	550
	2	2.95	6.32	82.11	2.14	3570	522	
	3	2.95	6.11	83.40	2.07	3960	579	
	4	2.95	6.26	83.15	2.12	3730	546	
	5	2.95	6.26	86.33	2.12	3680	538	
90	1	2.95	6.10	84.08	2.07	3610	528	535
	2	2.95	6.00	80.16	2.03	3570	522	
	3	2.95	6.06	79.04	2.05	3630	531	
	4	2.95	6.07	82.42	2.06	3820	559	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.63 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 18M (2.5)

วันที่ผสม 25 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 11:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.38	90.65	2.16	2740	401	403
	2	2.95	6.30	89.94	2.14	2880	421	
	3	2.95	6.40	88.45	2.17	1900	278	
	4	2.95	6.06	83.16	2.05	2640	386	
7	1	2.95	6.31	88.41	2.14	3400	497	511
	2	2.95	6.18	86.94	2.09	3500	512	
	3	2.95	6.46	89.63	2.19	3240	474	
	4	2.95	6.21	89.00	2.11	3820	559	
14	1	2.95	6.30	86.97	2.14	4450	651	619
	2	2.95	6.13	85.52	2.08	3600	527	
	3	2.95	6.27	87.58	2.13	3950	578	
	4	2.95	6.20	88.17	2.10	4300	629	
28	1	2.95	6.45	81.48	2.19	3950	578	609
	2	2.95	6.45	87.74	2.19	4550	666	
	3	2.95	6.25	87.26	2.12	3860	565	
	4	2.95	6.49	86.01	2.20	4300	629	
90	1	2.95	6.33	90.18	2.15	5690	832	784
	2	2.95	6.28	87.30	2.13	4700	688	
	3	2.95	6.18	85.29	2.09	5900	863	
	4	2.95	6.12	86.76	2.07	5040	737	
	5	2.95	6.30	89.62	2.14	4800	702	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.64 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA40 18M (2.5)

วันที่ผสม 25 กรกฎาคม 2549 ผสมเวลา 11:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.07	87.05	2.06	4500	658	604
	2	2.95	6.20	87.03	2.10	4350	636	
	3	2.95	6.30	87.77	2.14	3810	557	
	4	2.95	6.27	86.04	2.13	3850	563	
7	1	2.95	6.20	85.70	2.10	3670	537	592
	2	2.95	6.20	85.25	2.10	4550	666	
	3	2.95	6.33	90.90	2.15	3780	553	
	4	2.95	6.15	87.25	2.08	4180	612	
14	1	2.95	6.18	86.78	2.09	2000	293	706
	2	2.95	6.05	85.78	2.05	4650	680	
	3	2.95	6.10	85.61	2.07	4730	692	
	4	2.95	6.17	86.10	2.09	5100	746	
28	1	2.95	6.37	88.67	2.16	5720	837	771
	2	2.95	6.28	88.40	2.13	5210	762	
	3	2.95	6.17	86.61	2.09	4930	721	
	4	2.95	6.24	86.95	2.12	5230	765	
90	1	2.95	6.21	91.14	2.11	5500	805	842
	2	2.95	6.25	87.77	2.12	5600	819	
	3	2.95	6.20	86.17	2.10	6340	928	
	4	2.95	6.35	88.40	2.15	3840	562	
	5	2.95	6.30	81.33	2.14	5590	818	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.65 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ ส่วนผสม 70FA60 10M (2.5)

วันที่ผสม 15 กันยายน 2549 ผสมเวลา 21:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.30	85.24	2.14	1890	276	367
	2	2.95	6.14	87.19	2.08	2650	388	
	3	2.95	5.96	81.61	2.02	2350	344	
	4	2.95	6.06	83.84	2.05	2640	386	
	5	2.95	5.92	81.72	2.01	2380	348	
7	1	2.95	6.09	85.62	2.06	1760	258	339
	2	2.95	6.09	81.17	2.06	2030	297	
	3	2.95	6.40	88.13	2.17	2640	386	
	4	2.95	6.30	86.98	2.14	2280	334	
	5	2.95	6.01	89.08	2.04	1400	205	
14	1	2.95	6.30	86.65	2.14	2750	402	377
	2	2.95	6.40	79.57	2.17	1580	231	
	3	2.95	6.02	80.27	2.04	1610	236	
	4	2.95	6.03	82.11	2.04	2450	358	
	5	2.95	6.07	83.86	2.06	2520	369	
28	1	2.95	6.02	79.67	2.04	3300	483	490
	2	2.95	6.37	84.86	2.16	3650	534	
	3	2.95	6.11	85.85	2.07	3400	497	
	4	2.95	6.19	85.99	2.10	3040	445	
90	1	2.95	6.26	84.98	2.12	3450	505	444
	2	2.95	6.26	82.81	2.12	2680	392	
	3	2.95	6.24	80.94	2.12	2880	421	
	4	2.95	6.17	79.87	2.09	3120	456	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.66 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (2.5) (H)
วันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2549 ผสมเวลา 21:50 น.
อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.35	84.08	2.15	1770	259	419
	2	2.95	6.04	84.45	2.05	3100	454	
	3	2.95	6.18	85.42	2.09	2460	360	
	4	2.95	6.14	83.26	2.08	3040	445	
7	1	2.95	6.15	81.03	2.08	2640	386	351
	2	2.95	6.02	84.07	2.04	2660	389	
	3	2.95	6.20	82.83	2.10	2210	323	
	4	2.95	6.19	84.10	2.10	2080	304	
14	1	2.95	6.27	84.73	2.13	2660	389	336
	2	2.95	6.22	85.27	2.11	1010	148	
	3	2.95	6.30	80.12	2.14	2200	322	
	4	2.95	6.23	81.99	2.11	2020	296	
28	1	2.95	6.53	88.92	2.21	3480	509	515
	2	2.95	6.01	79.75	2.04	3560	521	
	3	2.95	6.35	86.73	2.15	2240	328	
	4	2.95	6.17	85.76	2.09	3520	515	
90	1	2.95	6.10	83.21	2.07	2880	421	392
	2	2.95	5.74	68.44	1.95	2710	396	
	3	2.95	6.23	81.88	2.11	2720	398	
	4	2.95	6.00	83.62	2.03	2420	354	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.67 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ ส่วนผสม 70FA60 10M (1.5)

วันที่ผสม 16 กันยายน 2549 ผสมเวลา 0:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.12	80.30	2.07	1370	200	257
	2	2.95	6.18	84.06	2.09	1390	203	
	3	2.95	6.06	84.21	2.05	1700	249	
	4	2.95	6.18	80.10	2.09	1570	230	
	5	2.95	6.27	85.25	2.13	1990	291	
7	1	2.95	6.06	84.82	2.05	1580	231	359
	2	2.95	6.20	85.16	2.10	2590	379	
	3	2.95	6.25	79.37	2.12	890	130	
	4	2.95	6.10	83.60	2.07	2180	319	
	5	2.95	6.44	87.84	2.18	2590	379	
14	1	2.95	6.15	82.82	2.08	1330	195	261
	2	2.95	6.05	79.85	2.05	1810	265	
	3	2.95	6.38	86.14	2.16	1630	238	
	4	2.95	6.06	80.66	2.05	1030	151	
	5	2.95	6.14	83.71	2.08	1910	279	
28	1	2.95	6.21	85.84	2.11	2340	342	386
	2	2.95	6.20	83.10	2.10	2700	395	
	3	2.95	6.21	83.45	2.11	2600	380	
	4	2.95	6.20	83.82	2.10	2900	424	
	5	2.95	6.16	81.80	2.09	2050	300	
90	1	2.95	6.00	78.08	2.03	1980	290	365
	2	2.95	5.97	79.67	2.02	2300	337	
	3	2.95	6.10	81.12	2.07	2700	395	
	4	2.95	6.13	80.69	2.08	2460	360	
	5	2.95	6.10	78.17	2.07	2520	369	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.68 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 70FA60 10M (1.5) (H)
วันที่ผสม 16 กันยายน 2549 ผสมเวลา 0:15 น.
อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.20	83.62	2.10	2190	320	341
	2	2.95	6.04	81.99	2.05	2590	379	
	3	2.95	6.05	82.87	2.05	2280	334	
	4	2.95	6.36	85.99	2.16	2160	316	
	5	2.95	6.11	85.00	2.07	2420	354	
7	1	2.95	6.21	82.18	2.11	2240	328	339
	2	2.95	6.40	87.11	2.17	2260	331	
	3	2.95	6.11	87.06	2.07	2440	357	
	4	2.95	6.37	87.46	2.16	2440	357	
	5	2.95	6.33	83.16	2.15	2200	322	
14	1	2.95	6.30	77.37	2.14	1570	230	313
	2	2.95	6.01	82.13	2.04	2240	328	
	3	2.95	6.13	76.38	2.08	2060	301	
	4	2.95	6.22	83.51	2.11	1560	228	
	5	2.95	6.34	83.11	2.15	2110	309	
28	1	2.95	6.16	84.09	2.09	2750	402	445
	2	2.95	6.02	82.54	2.04	2260	331	
	3	2.95	6.37	85.43	2.16	2380	348	
	4	2.95	6.33	87.36	2.15	3300	483	
	5	2.95	5.97	82.26	2.02	3070	449	
90	1	2.95	6.06	76.67	2.05	2780	407	402
	2	2.95	6.16	82.42	2.09	2580	377	
	3	2.95	6.27	82.90	2.13	2620	383	
	4	2.95	5.97	79.32	2.02	2080	304	
	5	2.95	6.20	79.48	2.10	3020	442	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.69 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (2.5)

วันที่ผสม 16 กันยายน 2549 ผสมเวลา 1:00 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.28	83.01	2.13	1310	192	195
	2	2.95	5.78	76.82	1.96	1340	196	
	3	2.95	6.00	81.40	2.03	1260	184	
	4	2.95	6.10	82.68	2.07	1340	196	
	5	2.95	6.21	84.37	2.11	1420	208	
7	1	2.95	6.20	85.39	2.10	1670	244	247
	2	2.95	6.33	86.93	2.15	2670	391	
	3	2.95	6.13	82.04	2.08	1700	249	
	4	2.95	6.27	85.15	2.13	1700	249	
	5	2.95	6.20	85.98	2.10	2340	342	
14	1	2.95	6.18	81.78	2.09	2920	427	326
	2	2.95	6.02	80.84	2.04	1900	278	
	3	2.95	6.04	82.78	2.05	2020	296	
	4	2.95	6.26	83.88	2.12	2460	360	
	5	2.95	5.92	82.87	2.01	2200	322	
28	1	2.95	5.94	80.04	2.01	2530	370	404
	2	2.95	5.92	78.51	2.01	3780	553	
	3	2.95	6.13	82.07	2.08	2560	375	
	4	2.95	6.21	85.65	2.11	1990	291	
	5	2.95	6.24	84.76	2.12	3200	468	
90	1	2.95	6.25	81.65	2.12	2560	375	362
	2	2.95	6.20	80.88	2.10	2160	316	
	3	2.95	6.17	80.00	2.09	2380	348	
	4	2.95	6.26	82.05	2.12	2720	398	
	5	2.95	6.09	81.97	2.06	2550	373	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.70 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (2.5) (H)

วันที่ผสม 16 กันยายน 2549 ผสมเวลา 1:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	5.89	78.99	2.00	2890	423	452
	2	2.95	6.09	82.73	2.06	3090	452	
	3	2.95	6.24	84.41	2.12	3430	501	
	4	2.95	6.11	83.24	2.07	3060	448	
	5	2.95	6.19	80.95	2.10	2980	436	
7	1	2.95	6.03	81.16	2.04	2870	420	318
	2	2.95	6.10	83.47	2.07	2100	307	
	3	2.95	6.16	83.85	2.09	2210	323	
	4	2.95	6.29	86.46	2.13	2600	380	
	5	2.95	6.21	83.02	2.11	2220	325	
14	1	2.95	6.20	81.35	2.10	2220	325	366
	2	2.95	6.10	81.85	2.07	1390	203	
	3	2.95	6.08	81.73	2.06	2680	392	
	4	2.95	6.01	81.52	2.04	2470	361	
	5	2.95	6.11	82.68	2.07	2630	385	
28	1	2.95	6.02	82.42	2.04	2800	410	376
	2	2.95	5.91	78.15	2.00	2380	348	
	3	2.95	6.20	83.15	2.10	2530	370	
	4	2.95	6.15	84.02	2.08	2580	377	
	5	2.95	6.17	84.50	2.09	4040	591	
90	1	2.95	5.87	78.04	1.99	2380	348	336
	2	2.95	5.94	79.91	2.01	2340	342	
	3	2.95	6.12	82.10	2.07	2170	317	
	4	2.95	6.04	78.89	2.05	1810	265	
	5	2.95	5.98	78.66	2.03	3080	451	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.71 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (1.5)

วันที่ผสม 16 กันยายน 2549 ผสมเวลา 2:30 น.

อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.02	80.65	2.04	420	61	66
	2	2.95	5.59	75.92	1.89	484	71	
	3	2.95	5.60	73.78	1.90	420	61	
	4	2.95	5.73	76.78	1.94	456	67	
	5	2.95	5.60	74.75	1.90	476	70	
7	1	2.95	5.91	79.32	2.00	1290	189	192
	2	2.95	5.98	81.86	2.03	1330	195	
	3	2.95	5.94	81.41	2.01	1380	202	
	4	2.95	5.87	78.57	1.99	1260	184	
	5	2.95	5.60	74.62	1.90	1290	189	
14	1	2.95	6.01	79.88	2.04	1860	272	268
	2	2.95	6.01	83.52	2.04	2380	348	
	3	2.95	6.14	82.43	2.08	1820	266	
	4	2.95	6.17	83.66	2.09	1720	252	
	5	2.95	5.52	76.60	1.87	1940	284	
28	1	2.95	6.19	84.19	2.10	2930	429	430
	2	2.95	6.23	85.11	2.11	3100	454	
	3	2.95	6.26	84.81	2.12	3120	456	
	4	2.95	6.09	83.90	2.06	2000	293	
	5	2.95	6.15	82.55	2.08	2600	380	
90	1	2.95	5.85	78.10	1.98	1960	287	264
	2	2.95	6.03	79.92	2.04	1910	279	
	3	2.95	6.04	80.24	2.05	1630	238	
	4	2.95	5.82	76.52	1.97	1640	240	
	5	2.95	5.97	78.16	2.02	1880	275	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ข.72 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่วนผสม 65FA60 18M (1.5) (H)
วันที่ผสม 16กันยายน 2549 ผสมเวลา 2:00 น.
อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

Age (days)	Specimen No.	Diameter (cm)	Height (cm)	Weight (g)	H / D Ratio	Ultimate Load (kg)	Compressive Strength (ksc)	Average (ksc)
3	1	2.95	6.21	85.20	2.11	2880	421	391
	2	2.95	6.15	82.37	2.08	2704	396	
	3	2.95	5.88	76.84	1.99	2640	386	
	4	2.95	6.18	82.77	2.09	2608	382	
	5	2.95	5.92	77.99	2.01	2540	372	
7	1	2.95	6.17	82.71	2.09	2680	392	393
	2	2.95	6.00	81.06	2.03	2170	317	
	3	2.95	6.28	83.43	2.13	2700	395	
	4	2.95	6.06	83.25	2.05	2090	306	
	5	2.95	5.64	78.21	1.91	2680	392	
14	1	2.95	6.24	81.62	2.12	2300	337	232
	2	2.95	5.91	78.78	2.00	1690	247	
	3	2.95	6.01	76.93	2.04	1720	252	
	4	2.95	6.03	80.73	2.04	1500	219	
	5	2.95	5.93	76.01	2.01	1430	209	
28	1	2.95	6.29	84.51	2.13	2260	331	530
	2	2.95	5.91	80.00	2.00	3740	547	
	3	2.95	5.98	79.75	2.03	4020	588	
	4	2.95	5.65	75.10	1.92	2500	366	
	5	2.95	6.17	79.00	2.09	2280	334	
90	1	2.95	6.17	79.00	2.09	2280	334	422
	2	2.95	6.07	80.32	2.06	3120	456	
	3	2.95	5.81	77.19	1.97	2620	383	
	4	2.95	5.92	79.81	2.01	2180	319	
	5	2.95	5.76	72.92	1.95	2920	427	

*หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่มากกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน ร้อยละ 10 ไม่นำมาหาค่าเฉลี่ย

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลีเมอร์ของจีไอโพลีเมอร์เพสต์

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ส่วนผสม 65FA00 18M (2.5) วันที่ผสม 14 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 9:30 น.

ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาผลาญร้อยละ 3.72

Determination	Age of Testing						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
Weight of Paste, P (g)	0.544	0.529	0.485	0.464	0.478	0.506	0.501
Weight of Filter Paper, F (g)	0.366	0.369	0.364	0.367	0.366	0.361	0.365
Weight of Container, C (g)	147.346	153.704	153.868	158.601	150.392	146.965	161.140
Weight of Container+ Filter+ Paste, A (g) (Oven Dry at 100 °C)	148.173	154.449	154.594	159.329	151.065	147.702	161.852
Weight of Container+ Paste, B(g) (Oven Dry at 1000 °C)	147.801	154.058	154.188	158.907	150.678	147.262	161.428
The Unreacted of Solid, β $\beta = 100(B - C) / P$, (%)	83.60	66.82	66.03	65.96	59.81	58.72	57.66
Degree of Polymerization, α $\alpha = 100(1-(B-C)(1+LOI/100) / P)$, (%) (Oven Dry at 1000 °C)	13.29	30.70	31.52	31.58	37.96	39.10	40.20

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ส่วนผสม 65FA100 18M (2.5) วันที่ผสม 13 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 10:00 น.

ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาผลาญร้อยละ 0.07

Determination	Age of Testing						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
Weight of Paste, P (g)	0.504	0.445	0.524	0.472	0.494	0.497	0.504
Weight of Filter Paper, F (g)	0.359	0.368	0.362	0.361	0.365	0.367	0.367
Weight of Container, C (g)	153.966	161.128	156.522	153.457	155.971	147.348	146.967
Weight of Container+ Filter+ Paste, A (g) (Oven Dry at 100 °C)	154.729	161.796	157.227	154.032	156.572	147.958	147.545
Weight of Container+ Paste, B(g) (Oven Dry at 1000 °C)	154.351	161.411	156.828	153.667	156.161	147.527	147.142
The Unreacted of Solid, β $\beta = 100(B - C) / P$, (%)	76.48	63.51	58.45	44.53	38.51	36.14	34.76
Degree of Polymerization, α $\alpha = 100(1-(B-C)(1+LOI/100) / P)$, (%) (Oven Dry at 1000 °C)	23.47	36.44	41.51	55.44	61.46	63.83	65.21

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ส่วนผสม 55FA40 18M (2.5) วันที่ผสม 20 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 10:15 น.

ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาผลาญร้อยละ 2.26

Determination	Age of Testing						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
Weight of Paste, P (g)	0.517	0.548	0.516	0.536	0.517	0.580	0.583
Weight of Filter Paper, F (g)	0.366	0.376	0.359	0.732	0.374	0.355	0.364
Weight of Container, C (g)	153.882	141.919	150.004	139.896	157.494	153.939	151.801
Weight of Container+ Filter+ Paste, A (g) (Oven Dry at 100 °C)	154.708	142.758	150.785	140.980	158.224	154.714	152.581
Weight of Container+ Paste, B(g) (Oven Dry at 1000 °C)	154.320	142.362	150.393	140.270	157.822	154.296	152.153
The Unreacted of Solid, β $\beta = 100(B - C) / P$, (%)	84.75	80.86	75.43	69.83	63.41	61.37	60.41
Degree of Polymerization, α $\alpha = 100(1-(B-C)(1+LOI/100) / P)$, (%) (Oven Dry at 1000 °C)	13.34	17.31	22.86	28.59	35.15	37.24	38.23

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) วันที่ผสม 20 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 9:50 น.

ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาผลาญร้อยละ 2.26

Determination	Age of Testing						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
Weight of Paste, P (g)	0.540	0.549	0.508	0.526	0.502	0.482	0.516
Weight of Filter Paper, F (g)	0.364	0.362	0.365	0.361	0.374	0.343	0.355
Weight of Container, C (g)	153.702	156.523	153.976	151.800	147.558	150.007	147.568
Weight of Container+ Filter+ Paste, A (g) (Oven Dry at 100 °C)	154.507	157.321	154.774	152.524	148.293	150.704	148.221
Weight of Container+ Paste, B(g) (Oven Dry at 1000 °C)	154.147	156.937	154.329	152.148	147.885	150.311	147.839
The Unreacted of Solid, β $\beta = 100(B - C) / P$, (%)	82.56	75.36	69.57	66.36	65.21	63.22	52.57
Degree of Polymerization, α $\alpha = 100(1-(B-C)(1+LOI/100) / P)$, (%) (Oven Dry at 1000 °C)	15.57	22.93	28.86	32.14	33.31	35.36	46.25

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบหาอัตราการผลิตโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) (H) วันที่ผสม 20 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 9:50 น.
ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาผลาญร้อยละ 2.26

Determination	Age of Testing						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
Weight of Paste, P (g)	0.540	0.549	0.508	0.526	0.558	0.581	0.587
Weight of Filter Paper, F (g)	0.364	0.362	0.365	0.367	0.366	0.354	0.358
Weight of Container, C (g)	153.702	156.523	153.976	151.800	159.420	147.298	139.895
Weight of Container+ Filter+ Paste, A (g) (Oven Dry at 100 °C)	154.507	157.321	154.774	152.524	160.233	148.152	140.528
Weight of Container+ Paste, B(g) (Oven Dry at 1000 °C)	154.147	156.937	154.329	152.148	159.741	147.582	140.152
Degree of Polymerization, β $\beta = 100(P - A + C + F) / P$, (%) (Oven Dry at 100 °C)	18.22	20.65	14.67	30.86	19.82	12.83	53.03
Degree of Polymerization, α $\alpha = 100(P - A + C) / P$, (%) (Oven Dry at 1000 °C)	17.43	24.63	30.43	33.64	42.56	49.87	56.24

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบหาอัตราการผลิตโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ส่วนผสม 65FA40 14M (0.5) วันที่ผสม 21 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 9:15 น.
ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาผลาญร้อยละ 2.26

Determination	Age of Testing						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
Weight of Paste, P (g)	0.466	0.462	0.551	0.534	0.510	0.554	0.534
Weight of Filter Paper, F (g)	0.362	0.369	0.373	0.355	0.374	0.355	0.357
Weight of Container, C (g)	146.671	147.669	158.609	153.468	156.286	153.292	147.351
Weight of Container+ Filter+ Paste, A (g) (Oven Dry at 100 °C)	147.477	148.430	159.410	154.259	157.029	154.026	148.095
Weight of Container+ Paste, B(g) (Oven Dry at 1000 °C)	147.091	148.065	159.036	153.8556	156.629	153.641	147.683
Degree of Polymerization, β $\beta = 100(P - A + C + F) / P$, (%) (Oven Dry at 100 °C)	5.07	15.27	22.34	18.25	27.71	31.58	27.47
Degree of Polymerization, α $\alpha = 100(P - A + C) / P$, (%) (Oven Dry at 1000 °C)	10.14	14.16	22.49	27.46	32.84	36.92	37.65

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ส่วนผสม 65FA40 14M (2.5) วันที่ผสม 21 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 9:00 น.

ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาผลาญร้อยละ 2.26

Determination	Age of Testing						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
Weight of Paste, P (g)	0.455	0.521	0.445	0.534	0.505	0.508	0.501
Weight of Filter Paper, F (g)	0.361	0.368	0.370	0.371	0.368	0.365	0.365
Weight of Container, C (g)	150.396	161.14	155.973	155.692	149.603	158.619	153.959
Weight of Container+ Filter+ Paste, A (g) (Oven Dry at 100 °C)	151.148	161.934	156.714	156.456	150.299	159.346	154.723
Weight of Container+ Paste, B(g) (Oven Dry at 1000 °C)	150.771	161.552	156.315	156.065	149.935	158.950	154.270
Degree of Polymerization, β $\beta = 100(P - A + C + F) / P$, (%) (Oven Dry at 100 °C)	14.08	17.43	16.68	26.39	35.08	28.78	20.36
Degree of Polymerization, α $\alpha = 100(P - A + C) / P$, (%) (Oven Dry at 1000 °C)	17.43	20.22	23.24	30.12	34.26	34.80	37.85

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) 15 วันที่ผสม 28 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 8:30 น.

ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาผลาญร้อยละ 2.26

Determination	Age of Testing						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
Weight of Paste, P (g)	0.507	0.556	0.517	0.506	0.501	0.514	0.513
Weight of Filter Paper, F (g)	0.359	0.360	0.359	0.372	0.368	0.371	0.353
Weight of Container, C (g)	156.541	153.904	147.632	155.695	156.273	149.608	149.624
Weight of Container+ Filter+ Paste, A (g) (Oven Dry at 100 °C)	157.329	154.720	148.453	156.409	156.995	150.367	150.306
Weight of Container+ Paste, B(g) (Oven Dry at 1000 °C)	156.962	154.355	148.037	156.042	156.604	149.948	149.900
Degree of Polymerization, β $\beta = 100(P - A + C + F) / P$, (%) (Oven Dry at 100 °C)	15.25	17.98	10.89	32.40	29.13	24.42	35.93
Degree of Polymerization, α $\alpha = 100(P - A + C) / P$, (%) (Oven Dry at 1000 °C)	16.87	18.91	21.68	31.46	33.74	33.86	46.14

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบหาอัตราการเกิดโพลิเมอร์ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) 60 วันที่ผสม 28 พฤศจิกายน 2549 ผสมเวลา 8:00 น.
ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาผลาญร้อยละ 2.26

Determination	Age of Testing						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
Weight of Paste, P (g)	0.509	0.555	0.526	0.582	0.505	0.505	0.515
Weight of Filter Paper, F (g)	0.364	0.368	0.354	0.364	0.362	0.349	0.345
Weight of Container, C (g)	153.712	141.949	150.407	157.493	159.426	153.490	158.337
Weight of Container+ Filter+ Paste, A (g) (Oven Dry at 100 °C)	154.492	142.783	151.228	158.269	160.137	154.225	159.011
Weight of Container+ Paste, B(g) (Oven Dry at 1000 °C)	154.135	142.395	150.813	157.901	159.766	153.823	158.610
Degree of Polymerization, β $\beta = 100(P - A + C + F) / P$, (%) (Oven Dry at 100 °C)	18.11	15.96	10.96	29.24	30.78	23.80	36.07
Degree of Polymerization, α $\alpha = 100(P - A + C) / P$, (%) (Oven Dry at 1000 °C)	16.85	19.67	23.17	29.85	32.56	34.19	47.05

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างรายการคำนวณส่วนผสมและอัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของจีโอโพลิเมอร์เฟสดี
ที่ใช้สัญลักษณ์ย่อว่า 65FA40 18M (2.5) และ 65FA40 18M (4SP)

Mixed ID : 65FA40 18M (2.5)

ข้อมูลพื้นฐาน

Total Weight =	1000	g
Solid/Total Weight =	0.65	
Percent Replacement =	40	%
Add Super P (% Soild)	0.0	%
[NaSi]/[NaOH] =	2.50	
ความเข้มข้นของ NaOH	18	M
ปริมาณน้ำใน [NaSi] =	0.5136	
ความหนาแน่นของ NaOH	1.483	
ปริมาณน้ำใน [NaOH] =	51.450	%
[H ₂ O]+[NaSi]+[NaOH] =	350.00	g
[NaSi]+[NaOH] =	350.00	g

	[MW]	[RHBA]	[FA]	[NaSi]	[NaOH]	[H ₂ O]	Sum Vol.	Total	
[SiO ₂]	60.084	84.750	36.020	33.280				50.738	0.844
[Al ₂ O ₃]	101.961	0.160	20.580					5.413	0.053
[Na ₂ O]	61.979			15.360	48.550			8.695	0.140
[H ₂ O]	18.015			51.360	51.450	100		17.985	0.998

						Mixed	Rec.
[RHBA]	=	390.00	กรัม		Na ₂ O/SiO ₂	0.166	0.20 - 0.48
[Fly Ash]	=	260.00	กรัม		SiO ₂ /Al ₂ O ₃	15.906	3.30 - 4.50
[SP] or [Water]	=	0.00	กรัม		H ₂ O/Na ₂ O	7.116	10 - 25
[NaSi]	=	250.00	กรัม		Na ₂ O/Al ₂ O ₃	2.642	0.80 - 1.20
[NaOH]	=	100.00	กรัม				

W/B = 0.277

Mixed ID : 65FA40 18M (4SP)

ข้อมูลพื้นฐาน

Total Weight =	1000	g
Solid/Total Weight =	0.65	
Percent Replacement =	40	%
Add Super P (% Soild)	4.0	%
[NaSi]/[NaOH] =	2.50	
ความเข้มข้นของ NaOH	18	M
ปริมาณน้ำใน [NaSi] =	0.5136	
ความหนาแน่นของ NaOH	1.483	
ปริมาณน้ำใน [NaOH] =	51.450	%
[H ₂ O]+[NaSi]+[NaOH] =	350.00	g
[NaSi]+[NaOH] =	324.00	g

	[MW]	[RHBA]	[FA]	[NaSi]	[NaOH]	[H ₂ O]	Sum Vol.	Total	
[SiO ₂]	60.084	84.750	36.020	33.280				50.120	0.834
[Al ₂ O ₃]	101.961	0.160	20.580					5.413	0.053
[Na ₂ O]	61.979			15.360	48.550			8.049	0.130
[H ₂ O]	18.015			51.360	51.450	100		17.949	0.996

						Mixed	Rec.
[RHBA]	=	390.00	กรัม		Na ₂ O/SiO ₂	0.156	0.20 - 0.48
[Fly Ash]	=	260.00	กรัม		SiO ₂ /Al ₂ O ₃	15.712	3.30 - 4.50
[SP] or [Water]	=	26.00	กรัม		H ₂ O/Na ₂ O	7.672	10 - 25
[NaSi]	=	231.43	กรัม		Na ₂ O/Al ₂ O ₃	2.446	0.80 - 1.20
[NaOH]	=	92.57	กรัม				

W/B = 0.276

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	นายเชิรศักดิ์ กลับประสิทธิ์
วัน เดือน ปีเกิด	24 มีนาคม 2524
ประวัติการศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคฉะเชิงเทรา พ.ศ. 2545
ระดับปริญญาตรี	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2547
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	เชิรศักดิ์ กลับประสิทธิ์, สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549, “การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้า แกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการคอนกรีต ประจำปีครั้งที่ 2, ตุลาคม, อุตรธานี, หน้า MAT 53-58

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์

วันที่ 15 เดือน เมษายน พ.ศ. 2550

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) เชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์ รหัสประจำตัว 48400308
เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา โท เอก
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
อยู่บ้านเลขที่ 14 ต.รอก/ซอก - ถนน ปากคลองท่าไข่
ตำบล/แขวง หน้าเมือง อำเภอ/เขต เมือง จังหวัด ฉะเชิงเทรา
รหัสไปรษณีย์ 24000 ขอโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โดยมี รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์ ตำแหน่ง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง ผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์พอสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหิน ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28, มาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ เชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์ ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นายเชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์)

ลงชื่อ รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์ ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ พยาน
(ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ)

ลงชื่อ รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล พยาน
(รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)