

การศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของ

จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย

Study of Influence of Accelerated Curing with electric oven on the
compressive strength Fly ash-Based Geopolymer Mortar

นายสันติ ประมูลมาก

นายสรารุช แก้วล้อมทรัพย์

นางสาวรำไพพรรณ ปั่นศิลป์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีการศึกษา 2561

1-61CE017

ใบรับรองโครงการ

| | | |
|--------------|--|----------------|
| ชื่อหัวข้อ | การศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ถั่วลันเตา | |
| ชื่อนักศึกษา | นายสันติ | ประมูลมาก |
| | นายสรารุช | แก้วล้อมทรัพย์ |
| | นางสาวรำไพพรรณ | ปั้นศิลป์ |
| คณะ | วิศวกรรมศาสตร์ | |
| ภาควิชา | วิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง | |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม อนุมัติให้โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา
โครงการวิศวกรรมโยธา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพจิตร ภาวัน)
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง

.....
(อาจารย์ สุรพันธ์ สันติยานนท์)
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

| | |
|------------------|--|
| หัวข้อ | การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | อาจารย์ สุรพันธ์ สันติยานนท์ |
| หลักสูตร | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| ภาควิชา | วิศวกรรมโยธาและการพัฒนาเมือง |
| คณะ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| ปีการศึกษา | 2561 |

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการบ่มเร่งกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยด้วยพลังงานความร้อนและศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดจากการบ่ม จีโอโพลิเมอร์ด้วยเตาอบไฟฟ้า กับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่บ่มด้วยวิธีธรรมชาติ ที่อายุตัวอย่าง 1,3,7,28 วัน โดยมีปัจจัยที่ควบคุมไว้ดังนี้ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้บ่ม ระยะเวลาก่อนบ่ม สมบัติอื่นๆ ที่ศึกษาได้แก่ ความต้องการน้ำ ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบพบว่าความต้องการน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ เนื่องมาจากการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ต้องใช้สารละลายต่าง 2 ชนิด (Na_2SiO_3 และ NaOH) เพื่อทำละลายซึ่งในสารละลายดังกล่าวมีน้ำส่วนผสมอยู่ด้วย

การบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วันให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 92.1 กม./ตร.ซม. คิดเป็นร้อยละ 80 ของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่บ่มด้วยวิธีธรรมชาติเป็นเวลา 7 วัน และพบว่าหากบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยเตาอบไฟฟ้าไว้เป็นระยะเวลา 28 วัน จะพบว่าตัวอย่างแห้งแล้ว แตกร้าวซึ่งเป็นเหตุให้กำลังตก

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์, เถ้าลอย, กำลังอัด

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้จะประสบความสำเร็จไม่ได้หากมิได้รับความอนุเคราะห์จากคุณสี วิศวกรประจำ
แพลนปุนทรานกอินทรี เป็นผู้อนุเคราะห์เกล้าเพื่อใช้ในโครงการ อาจารย์พนธ์พันธ์ เพชรศรีทอง
อาจารย์ประจำวิทยาลัยเทคนิคสมุทรสาคร เป็นผู้เอื้อเฟื้อเครื่องร่อนทราย และขอขอบพระคุณ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สุรพันธ์ สันติยานนท์ ซึ่งได้กรุณาให้ข้อเสนอ แนะนำในการวิจัย รวมทั้ง
บิดา-มารดาผู้ให้กำเนิด บรรดาเพื่อนทุกท่านที่เป็นแรงใจแรงกระตุ้นและให้ความร่วมมือมาตลอด

| | |
|----------------|----------------|
| นายสันติ | ประมุขมาก |
| นายสรารุช | แก้วล้อมทรัพย์ |
| นางสาวราไพพรรณ | ปิ่นศิลป์ |

ผู้จัดทำโครงการ

วันที่ เดือน พฤษภาคม พ.ศ.2562

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | ก |
| กิตติกรรมประกาศ | ข |
| สารบัญ | ค |
| สารบัญ(ต่อ) | ง |
| สารบัญ(ต่อ) | จ |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ช |
| บทที่ 1.บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 1 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2.ทฤษฎีและโครงการที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)..... | 4 |
| 2.1.2 วัสดุแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกต | 4 |
| 2.1.3 สารละลายต่างที่ใช้กระตุ้นปฏิกิริยา | 5 |
| 2.1.4 กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์..... | 5 |
| 2.2 โครงการที่เกี่ยวข้อง..... | 8 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| 2.2.1 การศึกษาการชะงักผ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถาถ่านหิน | 8 |
| 2.2.2 ผลของต่างและอุณหภูมิในบ่มที่มีต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ 8 | 8 |
| จากของการเสียในอุตสาหกรรมเซรามิค | 8 |
| 2.2.3 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาถ่านหิน | 8 |
| บทที่ 3.วิธีการดำเนินงาน | 9 |
| 3.1 แผนโครงการ | 9 |
| 3.2 วัสดุอุปกรณ์..... | 10 |
| 3.2.1 เถ้าลอย | 10 |
| 3.2.2 สารละลายต่างกระตุ้นปฏิกิริยา | 10 |
| 3.2.3 ทราบ..... | 11 |
| 3.3.4 ปูนซีเมนต์..... | 11 |
| 3.3 การทดสอบพื้นฐานของวัสดุ..... | 11 |
| 3.3.1 องค์ประกอบทางเคมี..... | 11 |
| 3.4 อัตราส่วนผสม | 11 |
| 3.6 คุณสมบัติของในสภาวะสด | 12 |
| 3.6.1 ค่าการไหลแผ่ (มอร์ตาร์)..... | 12 |
| 3.6.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (เพสต์) | 13 |
| 3.7 อิทธิพลของอุณหภูมิบ่มและกรรมวิธีการบ่มที่มีต่อการพัฒนากำลังอัด | 14 |
| 3.7.1 การเตรียมตัวอย่าง..... | 14 |
| 3.7.2 การบ่มเพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อการพัฒนากำลังอัด | 14 |
| 3.7.3 กำลังอัด..... | 15 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4.ผลการวิจัย | 16 |
| 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเก้าอี้ลอย | 16 |
| 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี..... | 16 |
| 4.2 คุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ในสภาวะสด | 18 |
| 4.2.1 การไหลแผ่ | 18 |
| 4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัว..... | 20 |
| 4.3 กำลังอัด | 20 |
| บทที่ 5.สรุปผลการศึกษา | 23 |
| 5.1 สรุปผลโครงการ..... | 23 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 24 |
| ภาคผนวก ก..... | 28 |
| ภาคผนวก ข..... | 29 |
| ภาคผนวก ค..... | 34 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แผนภาพแบบจำลองกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์..... | 7 |
| 2.2 แผนภาพอย่างง่ายของการเกิดจีโอโพลิเมอร์..... | 7 |
| 3.1 กระบวนการวิจัย..... | 9 |
| 3.2 ถ้ำลอย..... | 10 |
| 3.3 NaOH ลักษณะเป็นเกร็ด | 10 |
| 3.4 ทราเยมน้ำคละขนาด | 11 |
| 3.5 โต๊ะการไหล | 13 |
| 3.6 เซ็มไวแคต | 13 |
| 4.1 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ตามไหลมาตรฐาน | 19 |
| 4.2 กำลั้งอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มในอากาศ..... | 21 |
| 4.3 กำลั้งอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มในอากาศและจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มในเตา บ่มความร้อน..... | 21 |
| 4.4 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทดสอบกำลั้งอัด | 22 |

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|---|------|
| 3.1 อัตราส่วนผสม..... | 11 |
| 3.2 จำนวนตัวอย่าง..... | 15 |
| 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะ..... | 17 |
| 4.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยองที่นำมาใช้กับ เถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618..... | 17 |
| 4.3 ร้อยละของการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์..... | 18 |
| 4.4 อัตราส่วนผสม..... | 19 |
| 4.5 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย..... | 20 |
| 5.1 เปรียบเทียบราคาต่อหน่วย..... | 23 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างพื้นฐานที่นิยมใช้กันมากในประเทศไทย โดยคอนกรีตมีปูนซีเมนต์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญซึ่งเมื่อผสมกับน้ำจะแปลงสภาพเป็นสารเชื่อมประสานมวลรวมเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Gas) ถึง ปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมดดังนั้นจึงมีความพยายามในการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการพัฒนาคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานปริมาณสูง (High Volume Pozzolan Concrete) และปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เลยอย่างกว้างขวางที่มีสมบัติเป็นสารซีเมนต์ดังกล่าวเรียกว่าจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานทำจากสารปอซโซลานที่มีองค์ประกอบ ซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาลิไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate Solution) และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนสามารถก่อตัวและแข็งตัวให้กำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กันได้แก่ ใถ้าลอย และดินขาวเผา (ปริญญา, 2549)

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใถ้าลอยในสภาวะสด
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิโดยรอบตัวอย่างต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใถ้าลอย
3. ศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใถ้าลอยกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 1,3,7 และ 28 วัน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ในการวิจัยได้มีการใช้แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้วลอย สารละลายต่างที่นำมาใช้เพื่อกระตุ้นปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ (M) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่ประกอบไปด้วยร้อยละโดยมวลของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ น้ำ (H_2O) เท่ากับ 9.58, 28.75 และ 61.67 ตามลำดับ แล้วบ่มด้วยวิธี 2 วิธีได้แก่ บ่มที่อุณหภูมิห้องและ บ่มด้วยเตาอบความร้อน เพื่อทดสอบกำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้วลอย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

โครงการนี้มุ่งหวังที่จะได้ทราบถึง ผลของระยะเวลาก่อนบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้วยอุณหภูมิห้อง และพลังงานความร้อน โดยแสดงผลในเชิงเปรียบเทียบผลของกำลังอัด

บทที่ 2

ทฤษฎีและโครงการที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของจีโอโพลิเมอร์ วัสดุพอลิซิลิเกต สารละลายต่าง กลไกของการเกิดปฏิกิริยา จะนำเสนอในบทนี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) 3 มิติ หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นาน ในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Dr. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ “จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและรับกำลังได้” โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้ จะมีความแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง (สายสุนีย์ จำรัส, 2554)

2.1.2 วัสดุแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกต

วัสดุหรือวัตถุดิบแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate Source) ที่นำมาใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีธาตุซิลิคอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ในปริมาณสูง ซึ่งธาตุดังกล่าววงไว้ต่อการเกิดปฏิกิริยาและอยู่ในรูปอสัณฐาน วัสดุที่นำมาใช้เหล่านี้มีทั้งส่วนที่เป็นแร่ธาตุธรรมชาติ เช่น ดินขาว (Kaolinite) ดินเหนียวชนิดต่างๆ (Clays) และ แร่ไมก้า (Micas) เป็นต้น ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้มีองค์ประกอบเคมีที่ประกอบด้วย Si, Al และ O หรืออาจเป็นวัสดุผลพลอยได้ เช่น เถ้าลอย (Fly ash) กากตะกรัน (Slag) เถ้าแกลบ (Rice Usk ash) และอื่นๆ รวมถึงการนำแร่ธาตุธรรมชาติมาผสมกับวัสดุผลพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม เช่น จีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากดินขาวผสมเถ้าลอย และดินขาวผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น วัสดุดังกล่าวอาจผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การบด หรือ การเผา เพื่อเพิ่มความสามารถของวัสดุในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน หรืออาจ

นำมาใช้โดยที่วัสดุเหล่านั้นไม่ได้ผ่านกระบวนการใดเลย เช่น ดินขาว และเถ้าลอย เป็นต้น โดยการเลือกวัสดุแหล่ง Si และ Al ที่จะนำมาสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณ ราคา และประเภทของการนำจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตได้ไปประยุกต์ใช้ (สายสุนีย์ จำรัส, 2554)

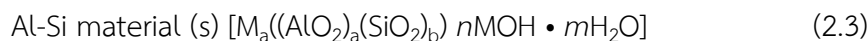
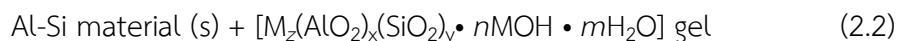
2.1.3 สารละลายต่างที่ใช้กระตุ้นปฏิกิริยา

สารละลายต่างที่ใช้กระตุ้นการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ เนื่องจากกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerisation) เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะต่างของซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะออกมาจากวัสดุแหล่งกำเนิด สารละลายต่างที่ใช้กระตุ้นปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เป็นสารละลายที่ได้จากโลหะต่างที่ละลายน้ำได้ โดยทั่วไปโลหะต่างดังกล่าว ได้แก่ โซเดียม (Na^{2+}) และโพแทสเซียม (K^+) ซึ่งไอออนเหล่านี้ทำให้ประจุของสารประกอบเกิดความสมดุล และมีบทบาทในการเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย สารละลายดังกล่าวมี 2 ประเภท คือ สารละลายต่างไฮดรอกไซด์ (Alkaline Hydroxide) และสารละลายโลหะต่างซิลิเกต (Alkali-metal Silicate) โดยสารละลายต่างที่นิยมใช้ ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือโพแทสเซียมซิลิเกต (K_2SiO_3) โดยสารละลายไฮดรอกไซด์เป็นตัวช่วยชะซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ออกจากวัสดุ ส่วนสารละลาย Na_2SiO_3 ช่วยเติมซิลิกาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพื่อปรับอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Al_2O_3 ให้เหมาะสมต่อการเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์ (สายสุนีย์ จำรัส, 2554)

2.1.4 กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์

การเกิดจีโอโพลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ปล่อยความร้อนออกมา (Exothermic Process) และเกิดโพลิเมอร์หน่วยเล็กๆ ที่เรียกว่า “โอลิโกเมอร์” (Oligomer) “ไดเมอร์” (Dimer) หรือ “ไตรเมอร์” (Trimer) ซึ่งทำให้เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างสามมิติ

รูปแบบปฏิกิริยาของการเกิดจีโอโพลิเมอร์ได้มีการเสนอไว้โดย Xu และ Vandevanter (2000) ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นระหว่างการเกิดจีโอโพลิเมอร์ของแร่ธาตุ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) แสดงดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.3

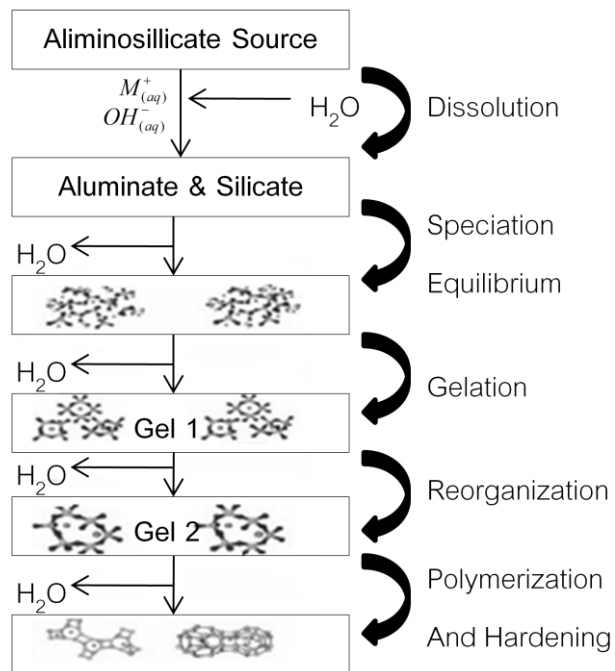


ปริมาณ Al-Si ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของวัสดุ ปริมาณการละลายของ Al-Si และความเข้มข้นของสารละลายต่าง การเกิดเจล ($M_z(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y \cdot n\text{MOH} \cdot m\text{H}_2\text{O}$) ขึ้นอยู่กับปริมาณการละลายของวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกต โดยจีโอโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างอสังฐานถูกสร้างขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาในสมการที่ 2.1 โดยระยะเวลาการก่ตัวของสารละลายอะลูมิเนียมซิลิเกตเพื่อเกิดเป็นเจลจะขึ้นอยู่กับสภาพของวัตถุดิบ (สายสุนีย์ จำรัส, 2554)

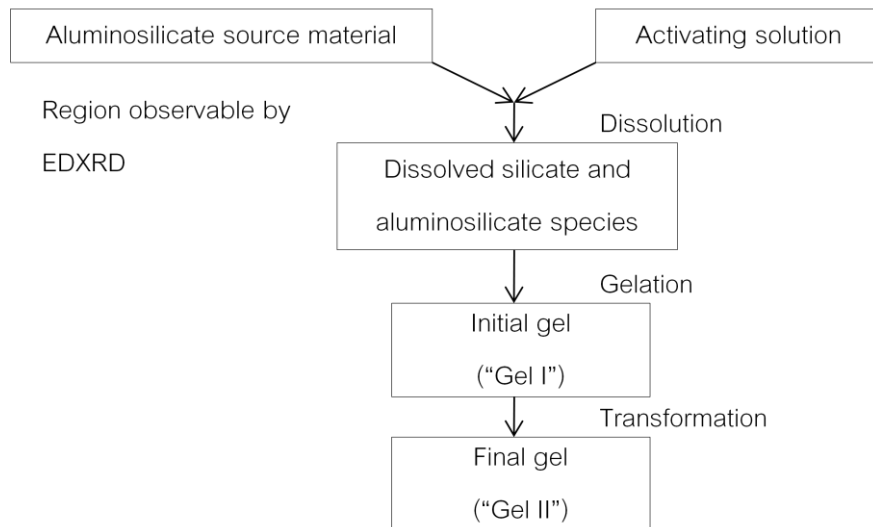
กระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์เกี่ยวข้องกับกลไกต่างๆ หลายกลไก ที่สามารถสรุปเป็นขั้นตอน ได้ดังนี้

1. อะตอมซิลิคอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ที่ผิววัสดุแหล่งกำเนิดละลายออกมาโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของต่างเกิดเป็นอะลูมินา (AlO_4) และซิลิเกต (SiO_4) ในสารละลาย
2. ไอออนของสารเริ่ม (Precursor) รวมตัวกันเกิดเป็นเจลโมโนเมอร์ (Monomer)
3. เกิดกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งเป็นการรวมตัวแบบควบแน่น (Polycondensation) ของโมโนเมอร์ และการเกิดเป็นโครงสร้างโพลิเมอร์ (Polymer)

มีโครงงานจำนวนหนึ่งที่ยอธิบายกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ในรูปแบบของแผนภาพดังแสดงในภาพที่ 2.7 และ 2.8



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแบบจำลองกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์(Duxson, 2007b)



ภาพที่ 2.2 แผนภาพอย่างง่ายของการเกิดจีโอโพลิเมอร์ (Provis and van Deventer, 2007)

2.2 โครงการที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยและพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ในปัจจุบันเป็นการวิจัยเพื่อมุ่งเน้นให้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่จะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมักจะศึกษาถึงอัตราส่วนผสมและกรรมวิธีการบ่มเร่งกำลังอัด เพื่อให้ได้มาซึ่งประโยชน์สูงสุดและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

2.2.1 การศึกษาการชะละลายผ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถาถ่านหิน

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และคณะ(2549) ศึกษาพบว่า การชะละลายของเถาถ่านหินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการชะ โดยที่สารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลางคือ 10 โมลาร์และระยะเวลาในการชะ 10 นาที ให้ผลกำลังอัดสูงที่สุด

2.2.2 ผลของต่างและอุณหภูมิในบ่มที่มีต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์

จากการเสียบในอุตสาหกรรมเซรามิก

จิรนนท์ พันโท และคณะ(2559) ศึกษาพบว่า อัตราส่วนของก้อนจีโอโพลิเมอร์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ ก้อนจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมโซเดียม-ไฮดรอกไซด์มีค่าสูงสุด ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 และ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.3 โดยก้อนจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าก้อนจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

2.2.3 ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาถ่านหิน

ณัฐพัชร์ ผาติไตรวัฒน์ และคณะ (2560) ศึกษาผลของอุณหภูมิบ่มและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มี ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาถ่านหิน โดยเตรียมจีโอโพลิเมอร์จากเถาถ่านหินแม่เมาะ โซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมเพื่อ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ทำการบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (25°C) 30°C 65°C และ 90°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบ่มต่อเนื่องในอากาศจนถึงอายุทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิบ่มไม่เกิน 65°C ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้นและมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิบ่มสูงถึง 90°C

บทที่ 3

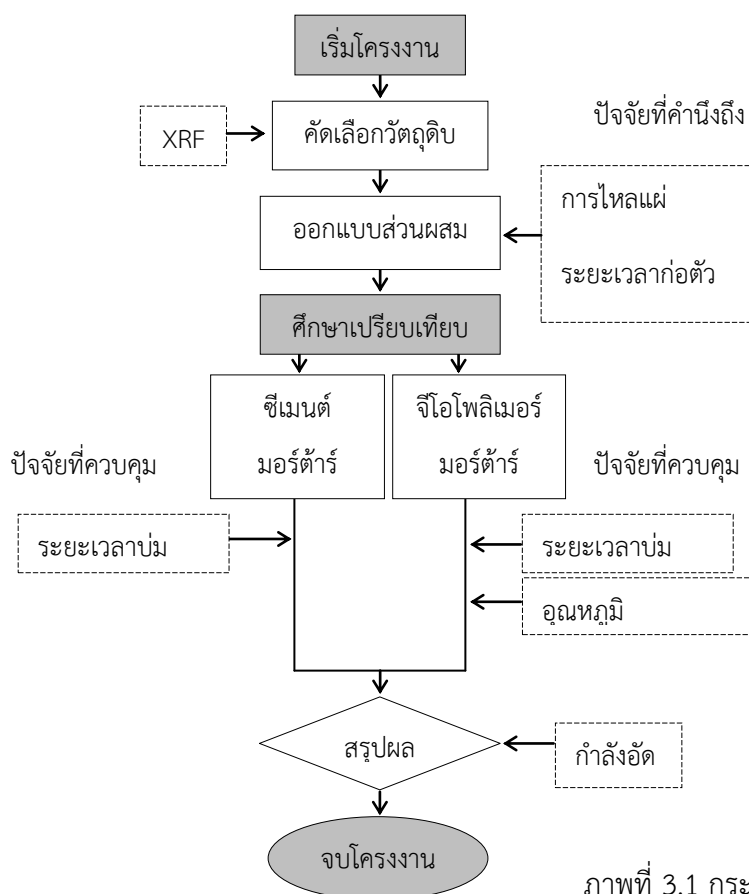
วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินการต่างๆ ที่ได้วางแผนในโครงการครั้งนี้ ซึ่งจะมีเนื้อหาเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

- แผนโครงการ
- การจัดหาวัสดุอุปกรณ์
- อัตราส่วนผสม
- การทดสอบคุณสมบัติในสถานะสด
- การศึกษาอิทธิพลของกรรมวิธีการบ่มที่มีต่อกำลังอัด

3.1 แผนโครงการ

กำหนดแผนโครงการเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยสรุปได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 กระบวนการวิจัย 1

3.2 วัสดุอุปกรณ์

3.2.1 ฝ้าลอย

ฝ้าลอยที่นำมาใช้เป็นวัสดุผงแห้ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ฝ้าลอย นำมาจากโรงงานไฟฟ้าถ่านหิน อำเภอ แม่เมาะจังหวัดลำปาง



ภาพที่ 3.2 ฝ้าลอย

3.2.2 สารละลายต่างกระตุ้นปฏิกิริยา

ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ต้องมีสารละลายต่างเข้ามาช่วยให้เกิดปฏิกิริยาซึ่งในวิจัยเลือกสารละลายต่างที่มาใช้ในโครงการดังนี้

3.2.2.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เตรียมโดยใช้ NaOH ของแข็งที่มีลักษณะเป็นเกร็ดชนิดเกรดการค้า ละลายกับน้ำเพื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายให้มีค่า 10 โมลาร์ ทำได้โดยการละลาย NaOH 400 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร



ภาพที่ 3.3 NaOH ลักษณะเป็นเกร็ด

3.2.2.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

ประกอบด้วยร้อยละโดยมวลของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) 9.58 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) 28.75 และน้ำ (H_2O) 61.67

3.2.3 ทราย

ทรายแม่น้ำละเอียด (Graded Standard Sand) ตามมาตรฐาน ASTM C778 (ASTM, 100 Barr Harbor Drive) ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface-Dry)



ภาพที่ 3.4 ทรายแม่น้ำละเอียด

3.3.4 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.3 การทดสอบพื้นฐานของวัสดุ

3.3.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย โดยวิธีการ X-Ray Fluorescence Spectrometry

3.4 อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้วลอยแสดงได้ดัง ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสม

| ชุดตัวอย่าง มอร์ตาร์ | อัตราส่วนโดยน้ำหนัก | | | น้ำหนัก (กรัม) | | | |
|-------------------------|---------------------|-------|------------------|----------------|---------------------|---------------------------|------|
| | FA/AS | NS/NH | ทราย/ วัสดุผง | ทราย | แก้วลอย/ ซีเมนต์ | Na_2SiO_3 | NaOH |
| จีโอโพลิเมอร์ | 3.0 | 0.5 | 2.75 | 825 | 300 | 35 | 65 |
| ซีเมนต์ | - | - | 2.75 | 825 | 300 | - | - |

หมายเหตุ:

สัญลักษณ์ของชุดตัวอย่างสามารถอธิบายได้ดังนี้

- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแก้วลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS)
- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH (NS/NH)

3.6 คุณสมบัติของในสถานะสด

การผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้วลอยที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติในสถานะสดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผสมแก้วลอย ททราย และสารละลาย NaOH ให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวในหม้อผสมด้วยความเร็วของใบพาย 285 ± 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

2) เทสารละลาย Na_2SiO_3 ลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 1 นาที

3) เทน้ำ ลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 1 นาที

4) นำจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมเสร็จซึ่งอยู่ในสถานะสดไปทดสอบการไหลผ่าน ระยะเวลา การ ก่อตัว

แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.6.1 ค่าการไหลผ่าน (มอร์ตาร์)

เนื่องจากร้อยละการไหลผ่านตามมาตรฐานบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่ทำให้ส่วนผสมอยู่ในสถานะไหลเข้าแบบได้ ในโครงการนี้จึงทดสอบการไหลผ่านด้วยวิธีโต๊ะการไหล (Flow Table) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ศึกษาความชื้นเหลว (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 (ASTM V.04.01, 2001) สำหรับสัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบการไหลผ่านแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.1 และถ้าค่าร้อยละการไหลผ่านของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ของตัวอย่างแต่ละชุดไม่อยู่ในมาตรฐาน ASTM C 109 (ASTM V.04.01, 2001) กำหนด (ร้อยละ 110 ± 5) ให้ค่อยๆ เติมน้ำพิเศษ (Extra Water) ลงไปผสมเพิ่มจนค่าร้อยละการไหลผ่านของตัวอย่างอยู่ในมาตรฐานกำหนด โดยปริมาณน้ำพิเศษที่ผสมเพิ่มลงไปคิดเป็นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง



ภาพที่ 3.5 โตะการไหล

3.6.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (เพสต์)

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวต้องระบุปริมาณน้ำพิเศษด้วยการทดสอบความชื้นเหลวปกติที่ต้องเติมลงไปทำโดยการใช้เข็มไวแคทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร น้ำหนัก 300 กรัม ปล่อยให้จมลงในซีเมนต์เพสต์ 10 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) ด้วยเข็มไวแคทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C191-92 (ASTM, 100 Barr Harbor Drive)



ภาพที่ 3.6 เข็มไวแคต

3.7 อิทธิพลของอุณหภูมิบ่มและกรรมวิธีการบ่มที่มีต่อการพัฒนากำลังอัด

การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมและกรรมวิธีการบ่มแสดงได้ดังนี้

3.7.1 การเตรียมตัวอย่าง

ขั้นตอนการผสมและจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพและกำลังอัดมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) ผสมแก้าลอย ทราย และสารละลาย NaOH ให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวในหม้อผสมด้วยความเร็วของใบพาย 285 ± 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

2) เทสารละลาย Na_2SiO_3 ลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 1 นาที

3) เทน้ำ ลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 1 นาที

4) เทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จลงในแบบหล่อ รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร

5) นำไปสั่นด้วยเครื่องสั่น เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกำจัดฟองอากาศหรือรูพรุนที่อยู่ภายในเนื้อมอร์ตาร์

6) ปิดผิวหน้าตัวอย่าง โดยการห่อหุ้มแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกัน การระเหยของน้ำระหว่างการทำปฏิกิริยา

3.7.2 การบ่มเพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อการพัฒนากำลังอัด

บ่มอุณหภูมิห้องและบ่มเตาอบ เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 24 ชม. โดยระยะเวลาในการบ่ม 1,3,7,28 วัน ที่อุณหภูมิ 40°C 60°C และ 80°C ตามลำดับ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่เหมาะสมในการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง แสดงจำนวนตัวอย่างดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่าง

| มอร์ตาร์ตัวอย่าง | อุณหภูมิ | ระยะบ่ม (วัน) | | | |
|-----------------------|--------------|---------------|-----|-----|-----|
| | | 1 | 3 | 7 | 28 |
| ซีเมนต์/จีโอโพลิเมอร์ | อุณหภูมิห้อง | 6x2 | 6x2 | 6x2 | 6x2 |
| จีโอโพลิเมอร์ | 30 °C | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | 60 °C | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | 80 °C | 6 | 6 | 6 | 6 |
| รวม | | 120 | | | |

3.7.3 กำลังอัด

เมื่อบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังแสดงสภาวะการบ่มแล้วจะนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C 109 (ASTM V.04.01, 2001) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการทำวิจัยครั้งนี้ซึ่งมีเนื้อหาเรียงลำดับดังต่อไปนี้

- คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย
- คุณสมบัติในสถานะสดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยและซีเมนต์มอร์ตาร์
- กำลังของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มความร้อนในเชิงเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย

การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์พบว่าความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปริมาณของ Si/Ai ในเถ้าลอย ในโครงการนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยแสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องมือ X-ray Fluorescence (XRF) ที่อุณหภูมิ 900 °C พบว่าเถ้าลอยมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 36.44 รองลงมา ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 16.35 และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 20.48 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และมาเปลี่ยนเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 618 (ASTM, 100 Barr Harbor Drive) พบว่าเป็นเถ้าลอย Class F

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะ

| องค์ประกอบทางเคมี | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|---|------------------|
| Silicon Dioxide (SiO ₂) | 36.44 |
| Calcium Oxide (CaO) | 16.35 |
| Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃) | 20.48 |
| Sulfur Trioxide (SO ₃) | 3.35 |
| Iron Oxide (Fe ₂ O ₃) | 15.76 |
| Magnesium Oxide (MgO) | 3.55 |
| Potassium Oxide (K ₂ O) | 2.25 |
| Sodium Oxide (Na ₂ O) | 0.98 |

ตารางที่ 4.2

เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยแม่เมาะที่นำมาใช้กับ

เถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618

| องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพ | เถ้าลอยแม่เมาะ | ประเภทของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618 | |
|--|----------------|---------------------------------------|------|
| | | F | C |
| ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์และเหล็กออกไซด์ (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃), ร้อยละต่ำสุด | 72.68 | 70.0 | 50.0 |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์(SO ₃), ร้อยละสูงสุด | 3.35 | 5.0 | 5.0 |

4.2 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในสภาวะสด

ผลศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในสภาวะสด ประกอบด้วย การไหลแผ่ และระยะเวลาการก่อตัว

4.2.1 การไหลแผ่

โครงการนี้จึงทำการทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้วยวิธีโต๊ะการไหล (Flow Table) ซึ่งเป็นวิธีการศึกษาความชื้นเหลว (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม) ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 (ASTM V.04.01, 2001) โดยสกัดส่วนผสมแสดงรายละเอียดไปแล้วในตารางที่ 3.1 จากผลการทดสอบ พบว่าร้อยละการไหลแผ่ของตัวอย่างทุกชุด (ที่ไม่ได้เติมน้ำพิเศษ) ไม่อยู่ในมาตรฐานที่กำหนด (ร้อยละ 110 ± 5) จึงมีการปรับปรุงค่าการไหลโดยการเติมน้ำพิเศษเพื่อให้ชุดตัวอย่างมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ 105 ถึง 115 ตามที่มาตรฐานกำหนด เริ่มจากน้ำพิเศษ 0.10 (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง) ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

| ชุดตัวอย่าง มอร์ตาร์ | ร้อยละน้ำพิเศษโดยน้ำหนักของเถ้าลอย(ร้อยละค่าการไหลแผ่) | | | | | | | |
|-------------------------|--|----|------|----|-----|------|----|----|
| | 6 | 7 | 9 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| จีโอโพลิเมอร์ | 80 | 85 | 114* | - | - | - | - | - |
| ซีเมนต์ | - | - | - | 83 | 100 | 113* | - | - |

สัญลักษณ์(*) หมายถึง ร้อยละการไหลแผ่ที่อยู่ในมาตรฐาน ASTM C 109 (ASTM V.04.01, 2001)

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำผสมเพิ่มของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์แล้วพบว่าความต้องการน้ำผสมเพิ่มของซีเมนต์มอร์ตาร์มีมากกว่า เนื่องมาจากการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ต้องใช้สารละลายต่าง 2 ชนิด (Na_2SiO_3 และ NaOH) เพื่อทำละลายซึ่งในสารละลายดังกล่าวมีน้ำส่วนผสมอยู่ด้วยโดยจึงเป็นเหตุให้อัตราความต้องการน้ำผสมเพิ่มต่ำกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ในอัตราส่วนวัสดุผงที่เท่ากัน นอกจากนั้นเมื่อนำร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ไปคำนวณประมาณน้ำให้อยู่ในรูปแบบน้ำหนักเพื่อนำไปใช้เป็นอัตราส่วนผสมในการทดสอบกำลังอัดดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนผสม

| ชุดตัวอย่าง มอร์ตาร์ | อัตราส่วนโดยน้ำหนัก | | | น้ำหนัก (กรัม) | | | | | | |
|-------------------------|---------------------|-------|------------------|----------------|---------------------|----------------------------------|------|-----|----------------------------|------|
| | FA/AS | NS/NH | ทราย/ วัสดุผง | ทราย | เถ้าลอย/ ซีเมนต์ | Na ₂ SiO ₃ | NaOH | น้ำ | น้ำใน สารละลาย ต่าง* | |
| | | | | | | | | | NS | NH |
| จีโอโพลิเมอร์ | 3 | 0.5 | 2.75 | 825 | 300 | 35 | 65 | 100 | 21.6 | 46.4 |
| ซีเมนต์ | - | - | 2.5 | 825 | 300 | - | - | 180 | - | |

หมายเหตุ:

* สัญลักษณ์ของชุดตัวอย่างสามารถอธิบายได้ดังนี้

- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS)
- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na₂SiO₃ ต่อ NaOH (NS/NH)

* น้ำหนักน้ำที่ผสมแล้วในสารละลายต่าง



ภาพที่ 4.1 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ตามไหลมาตรฐาน

4.2.2 ระยะการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะการก่อตัวในโครงการนี้ทำเป็นจีโอโพลิเมอร์เพตส์และซีเมนต์เพตส์ ทำโดยการทดสอบหาความคืบหน้าเพื่อหาอัตราส่วนน้ำผสมเพิ่ม โดยใช้การทดสอบด้วยเข็มไวแคต (Vicat Needle) ตามมาตรฐาน ASTM C191-92 (ASTM, 100 Barr Harbor Drive) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย

| ชุดตัวอย่าง เพตส์ | น้ำผสมเพิ่ม (กรัม) | ระยะเวลาการก่อตัว (นาที) | |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------|
| | | ระยะต้น | ระยะสุดท้าย |
| จีโอโพลิเมอร์ | 80 | 44 | 100 |
| ซีเมนต์ | 44 | 66 | 500 |

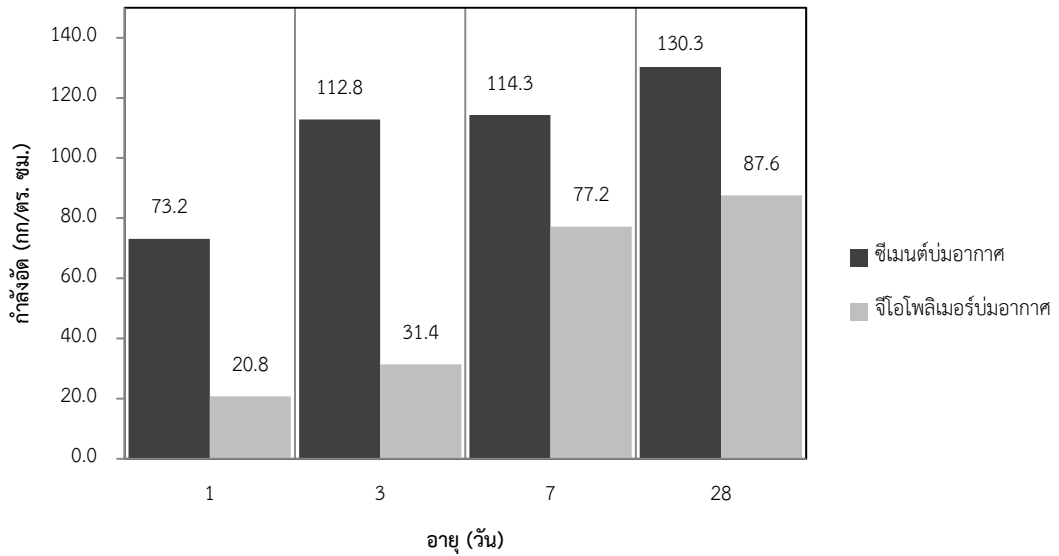
พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพตส์มีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเร็วกว่าซีเมนต์เพตส์ถึง 5 เท่า เนื่องจากผลของสารละลายต่างต่อปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation) โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีผลทำให้โครงสร้างซิลิเกตที่ได้จากการละลายของ ซิลิกา และอะลูมินาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และก่อตัวเป็นโมโนเมอร์ (Monomer) ใน 2 มิติของโพลีซิลิเกต (Si-O-Al-O (poly[silicate])) (J. Davidovits, 2008) ทำให้โครงสร้างภายในแข็งแรงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นด้วย

4.3 กำลังอัด

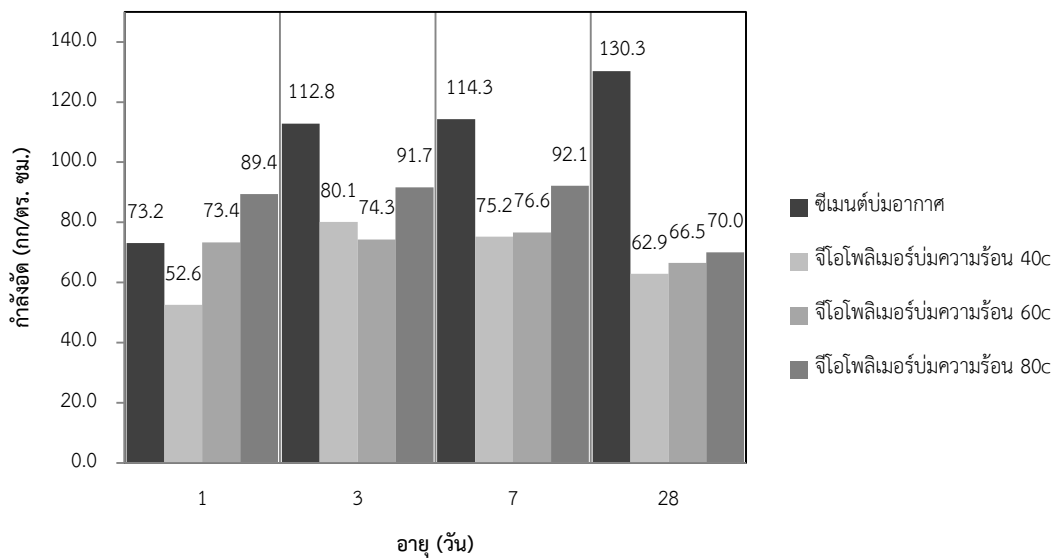
การทดสอบเปรียบเทียบกำลังอัดทำโดยการนำส่วนผสมที่แสดงดังตาราง 4.4 มาผสมและเทเข้าแบบหล่อจากนั้นปล่อยให้แข็งในแบบหล่อเป็นเวลา 24 ชม. จึงเริ่มนำไปบ่มในสภาวะต่าง ๆ กันดังนี้

- จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์บ่มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C, 60 °C, 80 °C ตามลำดับ
- จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์บ่มที่อุณหภูมิห้อง

แต่ละตัวอย่างบ่มเป็นระยะเวลา 1, 3, 7 และ 28 วัน เมื่อตัวอย่างได้อายุจึงนำมาทดสอบได้ค่ากำลังอัดแสดงดังตาราง 4.6



ภาพที่ 4.2 กําลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มในอากาศ



ภาพที่ 4.3 กําลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มในอากาศและจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มในเตาบ่มความร้อน

จากตารางแสดงค่ากำลังอัดที่สภาวะต่างๆพบว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงสุดอยู่ที่ การบ่มอากาศเป็นเวลา28วัน มีค่าเท่ากับ 87.6ksc เทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่สภาวะเดียวกัน (130.3ksc) จะพบว่ามีค่ากำลังอัดน้อยกว่าประมาณ 33%

เมื่อพิจารณาเรื่องอัตราการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีอัตราการพัฒนากำลังได้เร็วเมื่อ ผ่านการบ่มด้วยความร้อนโดยกำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ บ่มด้วยความร้อน 80c เป็นระยะเวลา7วัน ให้ค่า กำลังอัดเท่ากับ 92.1ksc แต่เมื่อให้ความร้อนเลยไปจาก7วันแล้วจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่อายุ28วันกำลัง อัดจะตกลงเนื่องมาจากตัวอย่างอยู่ในเตาอบนานเกินไปทำให้แห้งและร่วนเกินกว่าที่จะรับกำลังอัดได้ เป็นเหตุให้กำลังตก



ภาพที่ 4.4 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทดสอบกำลังอัด

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลโครงการ

จากการทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนประกอบ สรุปผลได้ดังนี้

1. การเพิ่มปริมาณน้ำสามารถทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณน้ำที่เติมเพิ่มขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH โดยน้ำหนัก
2. ระยะเวลาการก่อตัวก่อตัวเริ่มต้นของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีมีค่าเท่ากับ 44 นาทีซึ่งมีค่าเร็วกว่าซีเมนต์เฟสดีคิดเป็นร้อยละ 50
3. ระยะเวลาการก่อตัวก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีมีค่าเท่ากับ 100 นาทีซึ่งมีค่าเร็วกว่าซีเมนต์เฟสดีถึง 5 เท่าตัว
4. กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาการบ่มหากบ่มด้วยวิธีธรรมชาติโดยบ่มที่ 28 วัน ได้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 87.6 กก/ตร.ซม.
5. กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบด้วยเตาอบไฟฟ้าโดยบ่มที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 7 วัน ได้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 92.1 กก/ตร.ซม.
6. กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยสามารถเทียบเท่ากับกำลังอัดซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุเท่ากันได้หากผ่านการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1 วัน ได้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 89.4 กก/ตร.ซม. ซึ่งมีค่ามากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ที่บ่มด้วยวิธีธรรมชาติในระยะเวลาเท่ากันอยู่ประมาณร้อยละ 22
7. การบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยเตาอบไฟฟ้าโดยไม่ได้ป้องกันการสูญเสียน้ำของตัวอย่างพบว่าที่อุณหภูมิ 90°C ตัวอย่างที่มีอายุมากกว่า 1 วันกำลังอัดก็จะคงที่ไปถึงอายุ 7 วัน และกำลังอัดจะตกลงเมื่ออายุ 28 วัน กล่าวคือ กระบวนการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ต้องมีน้ำเป็นส่วนประกอบซึ่งในระยะเวลา 1 วันในเตาอบไฟฟ้าตัวอย่างได้สูญเสียน้ำไปหมดแล้วกำลังอัดจึงคงที่ไปจนมีอายุ 7 วันและจากนั้นตัวอย่างก็จะแห้งลงจนเกิดรอยร้าวภายในตัวอย่างเป็นเหตุให้กำลังอัดต่ำลงที่อายุ 28 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรควบคุมความชื้นภายในตัวอย่างให้มีอยู่ตลอดเวลาที่บ่มซึ่งอาจทำได้โดยการนำพลาสติกใสมาพันรอบตัวอย่างก่อนนำเข้าไปบ่มในเตาอบไฟฟ้า
2. ควรศึกษาผลของระยะเวลาก่อนบ่มที่มีต่อกำลังอัดโดยการนำตัวอย่างที่มีอายุเท่ากับระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเข้าไปบ่มในเตาอบไฟฟ้า
3. ควรศึกษาความทนทานต่อปัจจัยภายนอกอื่นๆเช่น การการซึมผ่านของคลอไรท์ การยึดและหดตัวด้านข้าง เป็นต้น
4. หากนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุที่ขายตามท้องตลาดกับจีโอโพลิเมอร์ดาร์ แสดงราคาต่อหน่วยได้ดังตารางที่ 5.1

ตาราง ที่ 5.1 เปรียบเทียบราคาต่อหน่วย

| วัสดุ | ราคาต่อหน่วย |
|-------------------------------|--------------|
| อิฐบล็อกซีเมนต์ | 8 |
| อิฐบล็อกซีเมนต์มวลเบา | 22 |
| อิฐบล็อกจีโอโพลิเมอร์มอร์ดาร์ | 40 , 55 |

: หมายเหตุ ราคา 40 บาท/หน่วย เมื่อเทียบอัตราส่วนโดนน้ำหนักกับอิฐบล็อกซีเมนต์

ราคา 55 บาท/หน่วย เมื่อเทียบอัตราส่วนโดยปริมาตรกับอิฐบล็อกซีเมนต์มวลเบา

จากตารางข้างต้นจะเห็นราคาอิฐบล็อกที่ทำจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ดาร์มีราคาสูงไม่คุ้มค่าแก่การนำเถ้าลอยมาแปรรูปจึงเหตุควรให้นำเถ้าลอยมาผสมทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนจะได้ผลที่ดีกว่าทางด้านกำลังอัด

บรรณานุกรม

- ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549, ถ้ำลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง), พิมพ์ครั้งที่ 3, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 119.
- สายสุนีย์ จำรัส, 2554, “คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ถ้ำลอยบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟโดยใช้เตาชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง”, วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และวิเชียน ซาลี, 2549, “การศึกษาการชะงักถ้ำถ่านหินลิกไนต์และกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำถ่านหิน”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่29 ฉบับที่4, หน้า 437 -446
- จิรนนท์ พันโท และคณะ, 2559, “ผลของต่างและอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากของเสียในอุตสาหกรรมเซรามิก”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่39 ฉบับที่4, หน้า 533 -546
- ณัฐพัชร์ ผาติไตรวัฒน์ และ วิเชียร ซาลี, 2560, “ผลของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำถ่านหิน” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่40 ฉบับที่3, หน้า 355 -364
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and van Deventer, J.S.J., “Geopolymer Technology: The Current State of The Art”, Journal of Materials Science, Vol. 42, 2007b, pp. 2917-2933.
- Provis, J.L. and van Deventer, J.S.J., “Geopolymerisation Kinetics 2: Reaction Kinetic Modelling”, Chemical Engineering Science, Vol. 62, 2007, pp.2318-2329
- Davisoivits, J., “Geopolymer Chemistry & Applications 2nd” Institut Géopolymère, France, 2008
- American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, 1993, Vol. 04.02, Philadelphia, 310-312.
- American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 83-88.

American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards,
2001, Vol. 04.01, Philadelphia, 217-219.

American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards,
100 Barr Harbor Drive ,PO Box C700,West Conshohocken, PA 19428-
2959

American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards,
100 Barr Harbor Drive ,PO Box C700,West Conshohocken, PA 19428

American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards,
100 Barr Harbor Drive ,PO Box C700,West Conshohocken, PA 19428-
2959

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม

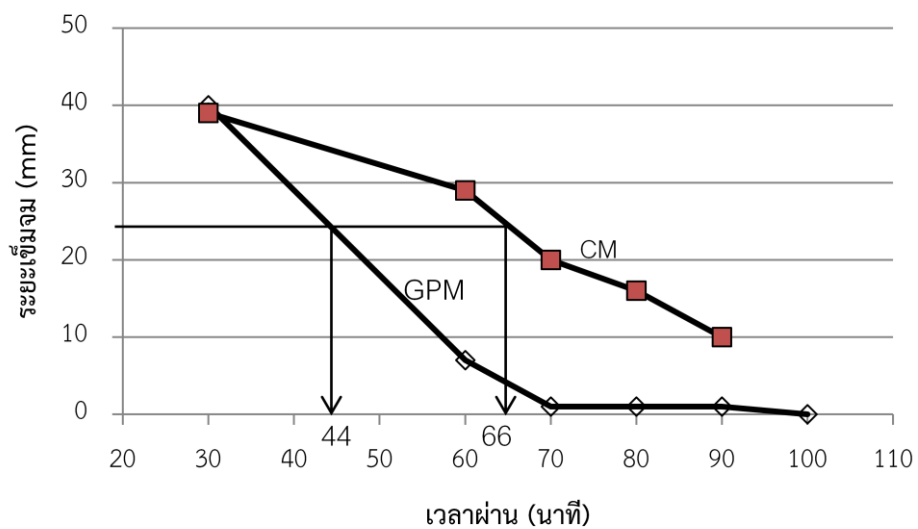
ตารางที่ ก-1 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม

ก.) จีโอโพลิเมอร์เฟส

| เวลาผ่าน (นาที) | ระยะเข็มจม (mm) |
|-----------------|-----------------|
| 30 | 40 |
| 60 | 7 |
| 70 | 1 |
| 80 | 1 |
| 90 | 1 |
| 100 | 0 |

ข.) ซีเมนต์เฟส

| เวลาผ่าน (นาที) | ระยะเข็มจม (mm) |
|-----------------|-----------------|
| 30 | 39 |
| 60 | 29 |
| 70 | 20 |
| 80 | 16 |
| 90 | 10 |
| 500 | 0 |



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบกำลังอัด

ตารางที่ ข-1 กำลังอัดเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ตาร์ ที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง

| อายุ (วันที่ กด) | ตัวอย่างที่ | น้ำหนัก | ขนาด (cm) | | แรงอัด สูงสุด (kg) | กำลังรับ แรงอัด (ksc) | ค่าเฉลี่ย |
|-----------------------|-------------|---------|-----------|------|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| | | | กว้าง | ยาว | | | |
| 1วัน (อ. 22/1/62) | 1 | 275 | 5.2 | 5.2 | 2000 | 74.0 | 73.2 |
| | 2 | 265 | 5 | 5.1 | 1700 | 66.7 | |
| | 3 | 272 | 5.1 | 5 | 1800 | 70.6 | |
| | 4 | 272 | 5 | 5.1 | 2000 | 78.4 | |
| | 5 | 260 | 5.15 | 5.15 | 1600 | 60.3 | |
| | 6 | 268 | 5.15 | 5.1 | 2000 | 76.1 | |
| 3วัน (พฤ. 24/1/62) | 1 | 273 | 5 | 5.3 | 3300 | 124.5 | 112.8 |
| | 2 | 267 | 5 | 5 | 2800 | 112.0 | |
| | 3 | 260 | 5 | 5.1 | 2600 | 102.0 | |
| | 4 | 260 | 5 | 5.1 | 2400 | 94.1 | |
| | 5 | 271 | 5 | 5.1 | 2200 | 86.3 | |
| | 6 | 267 | 5 | 5.1 | 2400 | 94.1 | |
| 7วัน (จ. 28/1/62) | 1 | 276 | 5.1 | 5 | 3000 | 117.6 | 114.3 |
| | 2 | 267 | 5 | 5 | 2800 | 112.0 | |
| | 3 | 261 | 5 | 5 | 2500 | 100.0 | |
| | 4 | 255 | 5 | 5 | 2400 | 96.0 | |
| | 5 | 261 | 5 | 5.1 | 2800 | 109.8 | |
| | 6 | 273 | 5.1 | 5 | 3000 | 117.6 | |
| 28วัน (จ. 18/1/62) | 1 | 260 | 5 | 5 | 3200 | 128.0 | 130.3 |
| | 2 | 266 | 5 | 5.1 | 3400 | 133.3 | |
| | 3 | 266 | 5 | 5 | 3200 | 128.0 | |
| | 4 | 257 | 5 | 5 | 2800 | 112.0 | |
| | 5 | 275 | 5.1 | 5.1 | 3700 | 142.3 | |
| | 6 | 256 | 5 | 5 | 3000 | 120.0 | |

ตารางที่ ข-2 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่บ่มที่อุณหภูมิตั้ง

| อายุ (วันที่ กด) | ตัวอย่างที่ | น้ำหนัก | ขนาด (cm) | | แรงอัด สูงสุด (kg) | กำลังรับ แรงอัด (ksc) | ค่าเฉลี่ย |
|------------------------|-------------|---------|-----------|-----|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| | | | กว้าง | ยาว | | | |
| 1วัน (จ. 28/1/62) | 1 | 264 | 5.1 | 5 | 500 | 19.6 | 20.8 |
| | 2 | 265 | 5 | 5 | 550 | 22.0 | |
| | 3 | 263 | 5 | 5 | 510 | 20.4 | |
| | 4 | 265 | 5.1 | 5 | 490 | 19.2 | |
| | 5 | 262 | 5 | 4.9 | 550 | 22.4 | |
| | 6 | 263 | 5 | 5.2 | 550 | 21.2 | |
| 3วัน (พ. 30/1/62) | 1 | 263 | 5 | 5.1 | 880 | 34.5 | 31.4 |
| | 2 | 277 | 5.1 | 5.2 | 800 | 30.2 | |
| | 3 | 256 | 5 | 5 | 420 | 16.8 | |
| | 4 | 261 | 5 | 5 | 800 | 32.0 | |
| | 5 | 278 | 5 | 5.1 | 720 | 28.2 | |
| | 6 | 263 | 5 | 5 | 800 | 32.0 | |
| 7วัน (อา. 3/2/62) | 1 | 267 | 5 | 5 | 2100 | 84.0 | 77.2 |
| | 2 | 279 | 5.2 | 5.1 | 2000 | 75 | |
| | 3 | 277 | 5.2 | 5.2 | 2100 | 78 | |
| | 4 | 280 | 5.1 | 5.1 | 1600 | 61.5 | |
| | 5 | 264 | 5.1 | 5 | 2000 | 78 | |
| | 6 | 263 | 5 | 5 | 1200 | 48.0 | |
| 28วัน (อา. 18/1/62) | 1 | 266 | 5.1 | 5 | 1800 | 70.6 | 87.6 |
| | 2 | 279 | 4.9 | 5.2 | 2050 | 80.5 | |
| | 3 | 268 | 5.1 | 5.2 | 2270 | 85.6 | |
| | 4 | 275 | 5 | 5 | 2280 | 91.2 | |
| | 5 | 270 | 5 | 5 | 2450 | 98.0 | |
| | 6 | 270 | 5.1 | 5.1 | 2150 | 82.7 | |

ตารางที่ ข-3 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำ 40c

| อายุ (วันที่ กด) | ตัวอย่างที่ | น้ำหนัก | ขนาด (cm) | | แรงอัด สูงสุด (kg) | กำลังรับ แรงอัด (ksc) | ค่าเฉลี่ย |
|------------------------|-------------|---------|-----------|-----|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| | | | กว้าง | ยาว | | | |
| 1วัน (จ. 4/3/62) | 1 | 261 | 5.1 | 5.1 | 1470 | 56.5 | 52.6 |
| | 2 | 256 | 5.1 | 5.2 | 1360 | 51.3 | |
| | 3 | 260 | 5.2 | 5.1 | 1500 | 56.6 | |
| | 4 | 257 | 5.1 | 5 | 1320 | 51.8 | |
| | 5 | 264 | 5 | 5.2 | 1330 | 51.2 | |
| | 6 | 254 | 5.1 | 5.1 | 1250 | 48.1 | |
| 3วัน (พ. 6/3/62) | 1 | 272 | 5.2 | 5.2 | 2100 | 77.7 | 80.1 |
| | 2 | 259 | 5.1 | 5.1 | 2200 | 84.6 | |
| | 3 | 268 | 5.1 | 5.1 | 1900 | 73.0 | |
| | 4 | 256 | 5 | 5.1 | 1700 | 66.7 | |
| | 5 | 256 | 5.1 | 5.1 | 2300 | 88.4 | |
| | 6 | 257 | 5.1 | 5.1 | 2350 | 90.3 | |
| 7วัน (อา. 10/3/62) | 1 | 251 | 5 | 5.1 | 2160 | 84.7 | 75.2 |
| | 2 | 247 | 5 | 5.1 | 1900 | 74.5 | |
| | 3 | 247 | 5.1 | 5.1 | 1950 | 75.0 | |
| | 4 | 245 | 5.1 | 5.1 | 2050 | 78.8 | |
| | 5 | 246 | 5.1 | 5.1 | 1800 | 69.2 | |
| | 6 | 246 | 5.1 | 5.1 | 1800 | 69.2 | |
| 28วัน (อา. 24/3/62) | 1 | 243 | 5.1 | 5.2 | 1250 | 47.1 | 62.9 |
| | 2 | 246 | 5.1 | 5 | 1500 | 58.8 | |
| | 3 | 244 | 5.1 | 5.1 | 1700 | 65.4 | |
| | 4 | 247 | 5.1 | 5.1 | 1700 | 65.4 | |
| | 5 | 248 | 5.1 | 5.1 | 1700 | 65.4 | |
| | 6 | 249 | 5.1 | 5.1 | 1550 | 59.6 | |

ตารางที่ ข-4 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำ 60c

| อายุ (วันที่ กด) | ตัวอย่างที่ | น้ำหนัก | ขนาด (cm) | | แรงอัด สูงสุด (kg) | กำลังรับ แรงอัด (ksc) | ค่าเฉลี่ย |
|------------------------|-------------|---------|-----------|-----|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| | | | กว้าง | ยาว | | | |
| 1วัน (จ. 28/1/62) | 1 | 252 | 5.1 | 5.1 | 1750 | 67.3 | 73.4 |
| | 2 | 251 | 5 | 5 | 1800 | 72.0 | |
| | 3 | 250 | 5 | 5 | 1800 | 72.0 | |
| | 4 | 254 | 5.1 | 5.2 | 1950 | 73.5 | |
| | 5 | 257 | 5 | 5 | 2050 | 82.0 | |
| | 6 | 257 | 5 | 5.1 | 1300 | 51.0 | |
| 3วัน (พ. 30/1/62) | 1 | 250 | 5 | 5 | 2000 | 80.0 | 74.3 |
| | 2 | 247 | 5 | 5.1 | 2000 | 78.4 | |
| | 3 | 252 | 5 | 5 | 1800 | 72.0 | |
| | 4 | 240 | 5.2 | 5 | 1800 | 69.2 | |
| | 5 | 241 | 5.1 | 5.1 | 1800 | 69.2 | |
| | 6 | 237 | 4.9 | 4.9 | 1850 | 77.1 | |
| 7วัน (อา. 3/2/62) | 1 | 235 | 5 | 5.1 | 1800 | 70.6 | 76.6 |
| | 2 | 237 | 5.1 | 5.1 | 1550 | 59.6 | |
| | 3 | 236 | 5 | 5 | 2150 | 86.0 | |
| | 4 | 240 | 5 | 5 | 2050 | 82.0 | |
| | 5 | 240 | 5.15 | 5 | 2000 | 77.7 | |
| | 6 | 242 | 5 | 5 | 2100 | 84.0 | |
| 28วัน (อา. 18/1/62) | 1 | 235 | 5 | 5 | 1750 | 70.0 | 66.5 |
| | 2 | 236 | 5 | 5.1 | 1300 | 51.0 | |
| | 3 | 238 | 5 | 5.1 | 1850 | 72.5 | |
| | 4 | 241 | 5 | 5.1 | 1770 | 69.4 | |
| | 5 | 238 | 5.1 | 5.1 | 1580 | 60.7 | |
| | 6 | 238 | 5 | 5.1 | 1920 | 75.3 | |

ตารางที่ ข-5 กำลังอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่บ่มที่อุณหภูมิ 80c

| อายุ (วันที่ กด) | ตัวอย่างที่ | น้ำหนัก | ขนาด (cm) | | แรงอัด สูงสุด (kg) | กำลังรับ แรงอัด (ksc) | ค่าเฉลี่ย |
|------------------------|-------------|---------|-----------|-----|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| | | | กว้าง | ยาว | | | |
| 1วัน (จ. 28/1/62) | 1 | 244 | 5.1 | 5 | 2250 | 88.2 | 89.4 |
| | 2 | 250 | 5 | 5.2 | 2350 | 90.4 | |
| | 3 | 243 | 5.1 | 4.9 | 2000 | 80.0 | |
| | 4 | 253 | 5.1 | 5 | 2250 | 88.2 | |
| | 5 | 250 | 5.1 | 5 | 2250 | 88.2 | |
| | 6 | 242 | 5 | 4.9 | 2250 | 91.8 | |
| 3วัน (พ. 30/1/62) | 1 | 233 | 5.1 | 5 | 2250 | 88.2 | 91.7 |
| | 2 | 233 | 5 | 5 | 1300 | 52.0 | |
| | 3 | 235 | 5.1 | 5 | 2250 | 88.2 | |
| | 4 | 233 | 5 | 5 | 2550 | 102.0 | |
| | 5 | 235 | 5 | 5.1 | 2250 | 88.2 | |
| | 6 | 235 | 5 | 4.9 | 1900 | 77.6 | |
| 7วัน (อา. 3/2/62) | 1 | 236 | 5 | 5.1 | 2450 | 96.1 | 92.1 |
| | 2 | 237 | 5 | 5.1 | 2300 | 90.2 | |
| | 3 | 235 | 5 | 5.2 | 2500 | 96.2 | |
| | 4 | 247 | 5 | 5.1 | 2200 | 86.3 | |
| | 5 | 243 | 5 | 5.1 | 2350 | 92.2 | |
| | 6 | 243 | 5 | 5 | 2300 | 92.0 | |
| 28วัน (อา. 18/1/62) | 1 | 244 | 5 | 5 | 2400 | 96.0 | 70.0 |
| | 2 | 243 | 5.1 | 5.1 | 2100 | 80.7 | |
| | 3 | 242 | 5.1 | 5.1 | 1750 | 67.3 | |
| | 4 | 235 | 5 | 5 | 1800 | 72.0 | |
| | 5 | 237 | 5 | 5.1 | 1700 | 66.7 | |
| | 6 | 236 | 5 | 5.2 | 1650 | 63.5 | |

ภาคผนวก ค**ประวัติผู้ศึกษา****1. ชื่อและนามสกุล**

นายสันติ ประมูลมาก

2. ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3. ข้อมูลในการติดต่อ

86/58 ซ.วุฒากาศ 42 ถ.วุฒากาศ แขวงบางค้อ เขตจอมทอง กทม.10150

เบอร์โทร 086-415-3116 e-mail : gixgok@hotmail.com

ประวัติผู้ศึกษา

1. ชื่อและนามสกุล

นายสรารุช แก้วล้อมทรัพย์

4. ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. ข้อมูลในการติดต่อ

117 ซอย บางกระดี่ 1 แขวงสามตำ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150
เบอร์โทร 089-454-7934 e-mail : cupid_kingdom@hotmail.com

ประวัติผู้ศึกษา

1. ชื่อและนามสกุล

นางสาวรำไพพรรณ ปั้นศิลป์

2. ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3. ข้อมูลในการติดต่อ

789 , ซอย รัชดา3 แยก 18 ถนนรัชดาภิเษก, ดินแดง, ดินแดง กรุงเทพมหานคร 10400

เบอร์โทร 066-114-6288 e-mail : rampaipan.21@hotmail.com