

การศึกษากำลังอัดของโพลิเมอร์อินทรีย์มอร์ตาร์ที่ไม่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นส่วนผสม

A Study in Compressive Strength of Inorganic Polymer Mortar without Sodium Silicate Solution

เสกสันต์ จันทไทย,¹ จักรพันธุ์ วงษ์พา^{2*}

Seksan Jantathai,¹ Jakrapan Wongpa^{2*}

Received: 20 February 2013 ; Accepted: 6 May 2013

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากำลังอัดของโพลิเมอร์อินทรีย์มอร์ตาร์ให้มีกำลังเพียงพอสำหรับใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป โดยมุ่งเน้นให้ส่วนผสมไม่ซับซ้อนและสามารถให้กำลังได้ในสภาวะปกติ โดยเลือกใช้เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุตั้งต้น ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ เพื่อให้ได้เฟสของโพลิเมอร์อินทรีย์ โดยควบคุมอัตราส่วนทรายต่อเถ้าถ่านหินให้เท่ากับ 2.75 แบ่งตัวอย่างออกเป็นสองชุดโดยชุดแรกบ่มในสภาวะปกติ ส่วนชุดที่สองบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบการพัฒนาที่กำลังอัดที่อายุ 7 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าโพลิเมอร์อินทรีย์มอร์ตาร์ที่บ่มในสภาวะปกติจะมีการพัฒนาที่กำลังอัดช้าในช่วงอายุต้น แต่ที่อายุมากขึ้นการพัฒนากำลังอัดกลับสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีกำลังมากกว่าตัวอย่างที่บ่มในเตาอบที่อายุ 60 วันขึ้นไป และพบว่าส่วนผสมโพลิเมอร์อินทรีย์ที่ไม่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตและไม่ได้บ่มในเตาอบสามารถให้กำลังอัดเพียงพอสำหรับงานคอนกรีตทั่วไป

คำสำคัญ: โพลิเมอร์อินทรีย์ กำลังอัด มอร์ตาร์

Abstract

This research aims to study the compressive strength of inorganic polymer mortar that satisfies the compressive strength requirements for normal concrete. The mix proportion was reduced in complexity so the compressive strength could be contributed in ambient condition. Fly ash was selected as the inorganic polymer-base while the sodium hydroxide solution at the concentrations of 10, 12, 14, 16, and 18 molar was used as the liquid portion in the mixture. The sand to cementitious ratio was fixed at 2.75 for all mixtures. Each mixture was separated into two groups. The first group was cured in the ambient condition whereas the second cured in an oven at the temperature of 60 degrees Celsius for 48 hours. Compressive strength of each mixture was investigated at the ages of 7, 28, 60, and 90 days, respectively. The result showed that compressive strength of ambient cured samples slightly increased at the early age, whereas the oven one developed faster. However, the ambient cured samples continuously increased through the testing period and finally moved higher than the oven one after 60 days. Moreover, all mixtures showed enough compressive strength to be used in normal concrete work although they did not contain sodium silicate solution and cured under ambient condition.

Keyword: inorganic polymer, compressive strength, mortar

¹ นิสิตปริญญาโท, ² อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150 เบอร์โทรศัพท์ 081-601-7788 Email : j.wongpa@gmail.com

¹ Master degree student, ² Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand., Corresponding author, Email: j.wongpa@gmail.com

บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมมาอย่างยาวนาน แต่จากปัญหาโลกร้อนหรือสภาวะเรือนกระจกทำให้อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ต้องมีการปรับตัวอย่างเร่งด่วน เนื่องจากอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของอุตสาหกรรมดังกล่าวอยู่ในอัตราที่สูงมาก จากงานวิจัยของ Davidovits^{1, 2} กล่าวว่าในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสู่บรรยากาศโลกประมาณ 1 ตัน เช่นกัน และจากข้อมูลในรายงานของ U.S. Geological Survey (USGS) ซึ่งเป็นหน่วยงานรัฐบาลของสหรัฐอเมริกาได้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์รวมทั้งโลกในปี 2553 อยู่ที่ประมาณ 3.36 พันล้านตัน³ และมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตลงโดยยังให้กำลังเพียงพอต่อการใช้งานจึงเป็นทางออกหนึ่ง ซึ่งยังมีงานวิจัยออกมาอย่างต่อเนื่อง⁴⁻⁶ ในขณะเดียวกัน การใช้วัสดุทางเลือกอื่นที่มีคุณสมบัติคล้ายกับคอนกรีตก็เป็นทางเลือกที่ดีเช่นเดียวกัน ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์จำนวนมาก เนื่องจากวัสดุตั้งต้นสำหรับทำจีโอโพลิเมอร์สามารถใช้ของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมได้ เช่น ถ้ำถ่านหิน ถ้ำกันเตา ถ้ำเกลือ เป็นต้น⁷ จึงนับเป็นวัสดุสีเขียวที่น่าสนใจ จีโอโพลิเมอร์เป็นชื่อที่ได้รับการจดสิทธิบัตรโดย Joseph Davidovits⁸ และจัดเป็นสารประกอบจำพวกโพลิเมอร์อินทรีย์ชนิดหนึ่ง⁹ งานวิจัยหลายชิ้นชี้ให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติทางกลคล้ายคอนกรีต^{7, 10-12} แต่ถึงอย่างนั้นการนำจีโอโพลิเมอร์มาใช้ในงานจริงยังคงเป็นไปได้ยากในปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติเมื่อยังเหลวมีความหนืดสูง¹³⁻¹⁵ ส่วนผสมหลักมีหลายชนิด และการบ่มที่ต้องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งในงานวิจัยบางชิ้นได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสม จะส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มีความหนืดสูง^{13, 16} ซึ่งทำให้การผสมส่วนผสมให้เข้ากันเป็นไปได้ยากและเป็นอุปสรรคต่อการเข้าแบบ ถึงแม้ว่าจะทำให้กำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตน้อยกว่าก็ตาม^{10, 17} อีกทั้งงานวิจัยของ Apha และคณะ ยังพบว่าค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์น้อยมาก ซึ่งอาจแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มน้ำในส่วนผสมแต่ก็ส่งผลให้กำลังอัดลดลง¹⁶ นอกจากนี้ งานวิจัยเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์หลายชิ้นข้างต้นใช้สารละลาย 2 ชนิดเป็นส่วนผสมหลัก ทำให้ส่วนผสมมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการออกแบบ อีกทั้งการพัฒนา กำลังของจีโอโพลิเมอร์เพื่อให้ได้กำลังสูงจำเป็นต้องบ่มในอุณหภูมิประมาณ 60-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง^{10, 20, 21} ปัจจัยเหล่านี้เป็นอุปสรรคในการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์เพื่อนำไปใช้ในงานจริง เนื่องจากคอนกรีตขณะสดหากมีความสามารถในการทำงาน

ได้ (workability) ต่ำ จะทำให้การเทอย่างทั่วถึงเป็นไปได้ยาก และเป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง อีกทั้งการบ่มในโรงงานเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการนั้นเป็นไปได้ไม่ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษากำลังอัดของโพลิเมอร์อินทรีย์ที่มีการปรับส่วนผสมให้มีความง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง โดยไม่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อลดความหนืดลง และบ่มในสภาวะปกติเทียบกับการบ่มในอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยมุ่งเน้นศึกษากำลังอัดว่าสามารถให้กำลังอัดเพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริงได้หรือไม่ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาวัสดุคอนกรีตทางเลือกที่สามารถใช้งานได้จริงในอนาคต ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนงานวิจัยนี้จึงใช้คำว่าโพลิเมอร์อินทรีย์ เพราะบางส่วนผสมในการศึกษานี้อาจไม่เข้าข่ายของจีโอโพลิเมอร์ตามสิทธิบัตร

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

วัสดุวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ถ้ำถ่านหินแม่เมาะเป็นสารตั้งต้นสำหรับทำตัวอย่างโพลิเมอร์อินทรีย์มอร์ตาร์ เนื่องจากถ้ำถ่านหินแม่เมาะมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ ได้แก่ อนุภาคที่มีขนาดเล็กโดยไม่ต้องคัดขนาด อนุภาคมีลักษณะกลมผิวเรียบซึ่งจะช่วยเพิ่มการไหล คุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลทำให้โพลิเมอร์อินทรีย์มีกำลังอัดสูงเมื่อเทียบกับถ้ำถ่านหินจากแหล่งอื่น^{17, 22, 23} อีกทั้งองค์ประกอบเคมีของถ้ำถ่านหินแม่เมาะมีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาของโพลิเมอร์อินทรีย์²⁴ เนื่องจากโพลิเมอร์อินทรีย์ประเภทนี้จะเป็นสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต²⁵ จึงจำเป็นต้องมีซิลิกาและอลูมินาในสารตั้งต้นค่อนข้างสูง²⁶ Table 1 ได้แสดงองค์ประกอบเคมีของถ้ำถ่านหินแม่เมาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจากตารางจะพบว่าซิลิกาและอลูมินานับเป็นองค์ประกอบหลักของถ้ำถ่านหิน รองลงมาจะเป็นออกไซด์ของแคลเซียมและเหล็กตามลำดับ ถ้ำถ่านหินแม่เมาะนำมาใช้โดยไม่ผ่านการคัดขนาดหรือบดละเอียด เพื่อจำลองสภาวะที่สะดวกต่อการนำไปใช้งานจริง

ส่วนผสมหลักอีกอย่างหนึ่งได้แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ที่มีความเข้มข้น 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์เนื่องจากมีงานวิจัยได้ข้อสรุปว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อกำลังอัดของโพลิเมอร์อินทรีย์²⁷ ซึ่งหน้าที่หลักของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คือชะละลายซิลิกาและอลูมินาในสารตั้งต้นและกระตุ้นให้พร้อมทำปฏิกิริยาสำหรับการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลใหม่²⁸⁻³⁰ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในงานวิจัยนี้เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 โดยใช้น้ำประปาเป็นตัวทำละลาย และต้องเตรียม

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไว้ล่วงหน้า เพราะจะนำมาผสมกับเถาหินที่อุณหภูมิห้อง ทราที่ใช้ผสมตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นทรายแม่น้ำ ล้างสะอาด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างตะแกรงเบอร์ 100 ทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบจากอนุภาคละเอียดที่เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 ซึ่งจะลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุซีเมนต์และมวลรวมลง

Table 1 Chemical composition of Mae Moh fly ash (by weight)

Chemical compound	Amount (%)
MgO	4.00
Al ₂ O ₃	19.56
SiO ₂	37.44
P ₂ O ₃	0.14
SO ₃	5.07
K ₂ O	2.24
CaO	16.18
TiO ₂	0.46
MnO ₂	0.11
Fe ₃ O ₃	14.62
ZnO	0.02
ZnO ₂	0.04
SrO	0.14
Average particle size (micron)	28.0

การผสม และการบ่ม และการทดสอบตัวอย่าง
งานวิจัยชิ้นนี้ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร ผสมด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ทุกส่วนผสม สัดส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดแสดงใน Table 2 หลังจากผสมตัวอย่างเรียบร้อยแล้วจึงนำมอร์ตาร์มาเข้าแบบโดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น กระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง แล้วจึงนำไปสั่นด้วยโต๊ะสั่น

ต่ออีกเป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นปิดผิวหน้าตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหย แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากเตาอบแล้วจึงถอดแบบออก ส่วนชุดที่สองปล่อยให้แห้งที่สภาวะปกติ ถอดแบบหลังจาก 48 ชั่วโมง ตัวอย่างทั้งสองชุดจะห่อด้วยพลาสติกหลังถอดแบบเพื่อรักษาความชื้นต่อไปจนกว่าจะถึงอายุทดสอบ กำลังอัดของแต่ละส่วนผสมจะทดสอบที่อายุ 7 28 60 และ 90 วัน โดยใช้ค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง

Table 2 Mix proportions of inorganic polymeric mortar (by total weight of 1000 g.)

Symbol*	Fly ash (g)	NaOH solution		Sand (g)
		Amount (g)	Concentration	
10M	235	118	10M	647
12M	235	118	12M	647
14M	235	118	14M	647
16M	235	118	16M	647
18M	235	118	18M	647

* "A" or "O" would be followed the symbol to represent "ambient cured" and "oven cured", respectively

ผลการทดลอง และวิจารณ์

จากการศึกษาในส่วนของการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างแต่ละชุดพบว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเวลา 48 ชั่วโมง มีการพัฒนากำลังอัดที่ช่วงต้นได้อย่างรวดเร็ว โดยที่อายุ 7 วัน มีกำลังอัดสูงมากกว่าร้อยละ 70 ของกำลังอัดที่ 28 วัน ซึ่งหลังจากนั้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังแสดงใน Figure 1

Figure 2 แสดงการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างที่ไม่ได้บ่มในเตาอบ พบว่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน มีค่าเพียงประมาณร้อยละ 15 – 50 ของกำลังอัดที่ 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นของตัวอย่างที่ไม่ได้บ่มด้วยเตาอบเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่การพัฒนาดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดอายุการทดสอบ

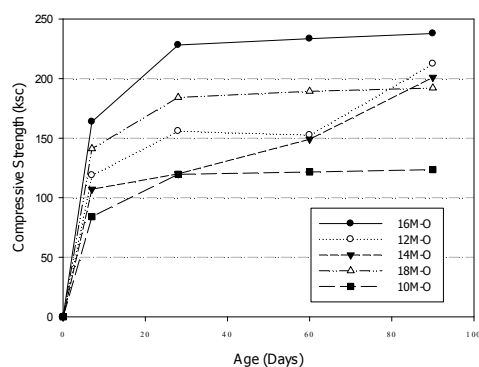


Figure 1 Compressive strength development of the oven cured samples

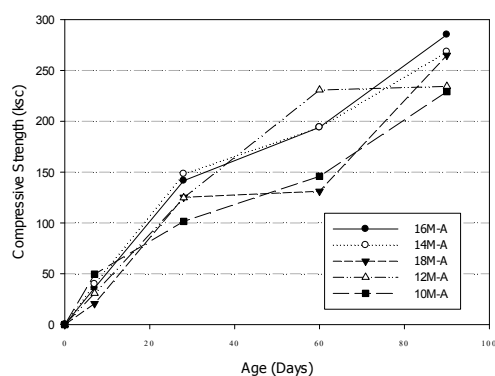


Figure 2 Compressive strength development of the ambient cured samples

เมื่อเปรียบเทียบ Figure 1 และ Figure 2 พบว่า ลักษณะของการพัฒนากำลังอัดแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งๆที่เป็นส่วนผสมเดียวกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าสภาวะการบ่มมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของโพลิเมอร์อนินทรีย์อย่างชัดเจน โดยเฉพาะช่วงอายุต้น และเมื่อนำค่ากำลังอัดของทั้งสองชุดมาเปรียบเทียบกันที่ช่วงอายุต้น (7 วัน) ดังที่แสดงใน Figure 3 และหากเปรียบเทียบกันที่อายุปลาย (90 วัน) จะได้ดัง Figure 4 ซึ่งเห็นว่าที่อายุต้น กำลังอัดของโพลิเมอร์อนินทรีย์มอร์ตาร์ของชุดที่ไม่บ่มจะให้กำลังที่ต่ำมาก ซึ่งค่าสูงสุดอยู่ที่ 49.6 กก/ซม² ในขณะที่ชุดที่บ่มในเตาอบให้กำลังสูงถึง 163.8 กก/ซม² แต่ที่อายุ 90 วัน กำลังอัดของชุดที่บ่มในสภาวะปกติกลับสูงกว่าชุดที่บ่มในเตาอบทุกส่วนผสม โดยกำลังอัดที่ได้เท่ากับ 229.27 234.40 268.40 285.20 และ 264.90 กก/ซม² สำหรับส่วนผสมที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 12 14 16 และ 18 โมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานคอนกรีตทั่วไป

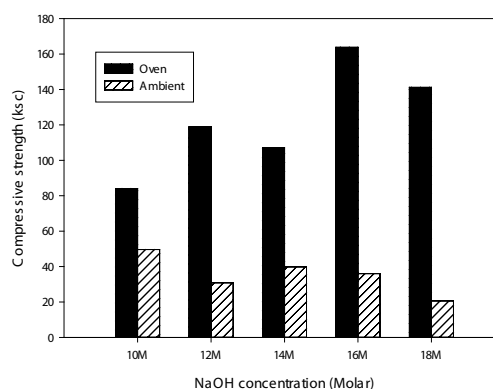


Figure 3 Compressive strength comparison between each curing condition for all concentration at the ages of 7 days

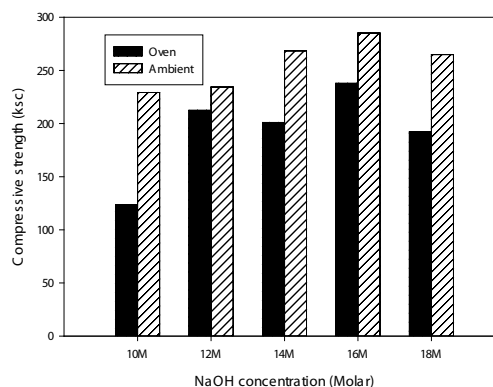


Figure 4 Compressive strength comparison between each curing condition for all concentration at the ages of 90 days

สาเหตุที่ทำให้กำลังอัดช่วงอายุปลายของโพลิเมอร์อนินทรีย์ชุดที่บ่มในสภาวะปกติกลับให้กำลังได้สูงกว่าชุดที่บ่มในเตาอบอาจอธิบายได้ด้วยภาพถ่ายอิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (Scanning Electron Microscopy, SEM) ดังแสดงใน Figure 5 และ Figure 6 ซึ่งเป็นภาพถ่ายกำลังขยาย 1000 เท่าของตัวอย่างที่บ่มในเตาอบและในสภาวะปกติ ตามลำดับ โดยเลือกส่วนผสมที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 16 โมลาร์ อายุมากกว่า 90 วัน เนื่องจากมีกำลังอัดสูงที่สุด

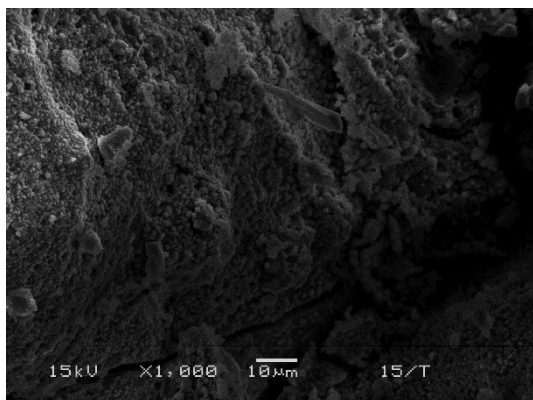


Figure 5 SEM image of 16M-mixture at the ages of 90 days (cured in oven)

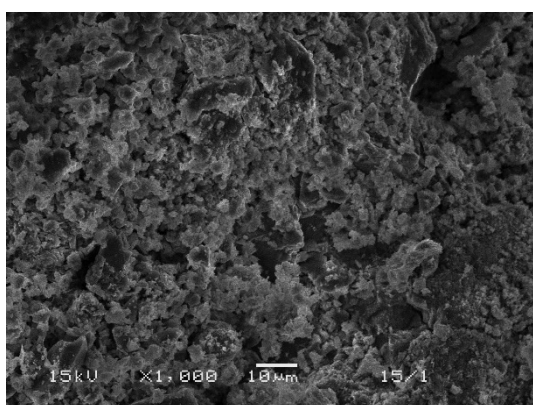


Figure 6 SEM image of 16M-mixture at the ages of 90 days (cured in ambient)

จาก Figure 5 พบอนุภาคลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เกาะอยู่ที่ผิวเก่าด้านหิน ซึ่งจากงานวิจัยหลายชิ้นระบุว่าปฏิกิริยาประกอบอลูมิโนซิลิเกตที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน^{21, 24, 31} ซึ่งอนุภาคดังกล่าวจะยึดจับต่อเนื่องกันจนมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ในภาพ ซึ่งสารประกอบนี้เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดกำลังในโพลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งนั่นหมายความว่าสารประกอบดังกล่าวที่มีลักษณะเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ไม่ยึดเกาะกับเม็ดข้างเคียงอาจเป็นเพราะว่าสารละลายถูกนำไปใช้ทำปฏิกิริยาในช่วงแรกจนหมด^{7, 32} เนื่องจากโดนเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน จึงไม่สามารถสร้างพันธะต่อไปได้ การพัฒนากำลังจึงเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วงอายุต้นเท่านั้น

ขณะที่ Figure 6 แสดงให้เห็นถึงการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์กว่า อนุภาคของสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตในลักษณะที่เป็นเม็ดมีอยู่ไม่มาก ส่วนใหญ่จะจับยึดและขัดกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งกำลังที่ได้นอกจากจะได้จากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันแล้วอีกส่วนหนึ่งยังได้มาจากกำลังเชิงกลที่ได้จากการขัดกันไป

มาของกลุ่มสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตนี้ จึงทำให้กำลังอัดของโพลิเมอร์อินทรีย์มีกำลังในช่วงอายุปลายมากกว่า

เมื่อพิจารณารายละเอียดใน Figure 1 ถึง Figure 4 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 16 โมลาร์ให้กำลังอัดสูงสุดในทุกๆ ส่วนผสม และทุกๆ การบ่มถึงแม้จะมีงานวิจัยบางชิ้นได้รายงานว่าการกำลังอัดของโพลิเมอร์อินทรีย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่งานวิจัยของ Zuhua et al.³² ก็ได้รายงานว่าการความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงแม้จะช่วยเร่งการชะละลายแต่ก็จะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นคำตอบที่ว่าทำไมกำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 18 โมลาร์มีค่าไม่สูงกว่าที่ 16 โมลาร์

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าโพลิเมอร์อินทรีย์ที่ไม่ผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถให้กำลังอัดเพียงพอต่องานคอนกรีตทั่วไป และยังพบว่าการบ่มตัวอย่างโพลิเมอร์อินทรีย์จะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้กำลังอัดสูงในช่วงอายุต้นเท่านั้น แต่ในช่วงอายุปลายกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอีกไม่มาก เพราะสารละลายถูกใช้ไปจนหมดตั้งแต่ช่วงอายุต้น ทำให้การพัฒนา กำลังอัดช่วงอายุปลายลดลงอย่างมาก และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 16 โมลาร์ให้กำลังอัดของโพลิเมอร์อินทรีย์สูงที่สุด โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 285.20 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน แต่ทั้งนี้ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่นๆ ระหว่าง 12 ถึง 18 โมลาร์ โพลิเมอร์อินทรีย์ก็ยังสามารถให้กำลังอัดสูงกว่า 220 กก/ซม² โดยที่ไม่ต้องบ่มด้วยอุณหภูมิสูงเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

1. Davidovits J. Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World Resource Review*. 1994;6(2):263-78.
2. Davidovits J. Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. *Geopolymers* 2002; 28-29 October 2002; Melbourne, Australia 2002.
3. USGS. The Mineral Industries of Asia and the Pacific: U.S. Geological Survey 2012.
4. Chalee W, Sasakul T, Suwanmaneechot P, Jaturapitakkul C. Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment. *Cem Concr Compos*. 2013;37:47-53.

5. Cheewaket T, Jaturapitakkul C, Chalee W. Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10year-results under marine site. *Construction and Building Materials*. 2012;37:693-8.
6. Sata V, Tangpagasit J, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cem Concr Compos*. 2012;34(1):94-100.
7. Wongpa J, Kiattikomol K, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. *Mater Design*. 2010;31(10):4748-54.
8. Davidovits J, inventor US Patent, assignee. Mineral polymers and methods of making them 1982.
9. Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of thermal analysis*. 1991; 37(8):1633-56.
10. Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*. 2004;101(6):467-72.
11. Provis JL, Yong CZ, Duxson P, van Deventer JSJ. Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2009;336(1-3):57-63.
12. Rüscher CH, Mielcarek EM, Wongpa J, Jaturapitakkul C, Jirasit F, Lohaus L. Silicate-, aluminosilicate and calciumsilicate gels for building materials: chemical and mechanical properties during ageing. *Eur J Mineral*. 2011;23(1):111-24.
13. Provis JL, van Deventer JSJ. Geopolymerisation kinetics. 1. In situ energy-dispersive X-ray diffractometry. *Chemical Engineering Science*. 2007;62(9):2309-17.
14. Rüscher CH, Mielcarek E, Lutz W, Ritzmann A, Kriven WM. Weakening of Alkali-Activated Metakaolin During Aging Investigated by the Molybdate Method and Infrared Absorption Spectroscopy. *Journal of the American Ceramic Society*. 2010;93(9):2585-90.
15. Khale D, Chaudhary R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *J Mater Sci*. 2007;42(3):729-46.
16. Sathonsaowaphak A, Chindaprasirt P, Pimraksa K. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *J Hazard Mater*. 2009;168(1): 44-50.
17. ญัฏฐ์ มากุล, บุรฉัตร ฉัตรวีระ. สมบัติของจีโอโพลิเมอร์ มอร์ตาร์เถ้าลอยภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ: อิทธิพลของแหล่งเถ้าลอยและอัตราส่วนสารละลาย โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH). *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*. 2556;36(1): 99-125.
18. Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P, Chindaprasirt P. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*. 2011;90(6):2118-24.
19. Kong DLY, Sanjayan JG, Sagoe-Crentsil K. Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. *J Mater Sci*. 2007;43(3):824-31.
20. Kong DLY, Sanjayan JG, Sagoe-Crentsil K. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*. 2007;37(12):1583-9.
21. Songpiriyakij S, Kubprasit T, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P. Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2010;24(3): 236-40.
22. รัฐพล สมณา. การศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหิน 5 แหล่งผลิต ต่อกำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ [วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท]: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2546.
23. Chindaprasirt P, Chareerat T, Hatanaka S, Cao T. High-Strength Geopolymer Using Fine High-Calcium Fly Ash. *J Mater Civ Eng*. 2010 2011/03/01;23(3): 264-70.
24. Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management*. 2009;29(2):539-43.

25. Fletcher RA, MacKenzie KJD, Nicholson CL, Shimada S. The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005;25(9):1471-7.
26. พัฒนพงศ์ ไพสิฐศรีสวัสดิ์, อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. ผลของชนิดกาฟุ่มต่อสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยกระบวนการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 2556;9(1):40-8.
27. Alonso S, Palomo A. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Materials Letters*. 2001;47:55-62.
28. Bakharev T. Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*. 2005;35(4):658-70.
29. Phair JW, van Deventer JSJ. Effect of Silicate Activator pH on The Leaching and Material Characteristics of Waste-Based Inorganic Polymers. *Minerals Engineering*. 2001;14(3):289-304.
30. ศิวานันท์ ไทยวิษณุเจริญ, อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารประกอบอะลูมิเนียมต่อการเกิดเอททริงไกต์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยกระบวนการเผาถ่านหินแบบฟลูอิดไดซ์เบด. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 2555;8(3):1-8.
31. Panias D, Giannopoulou IP, Perraki T. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2007;301(1-3):246-54.
32. Zuhua Z, Xiao Y, Huajun Z, Yue C. Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*. 2009;43(2):218-23.