การศึกษาผลกระทบของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดต่อการเป็นวัสดุบ่มภายในของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

A Study on the Effects of Superabsorbent Polymers (SAP) on the Internal Curing Material of Self-compacting Concrete

ศิวกร จิตร์ถาวรมณี[1,*] วิชชา สิงหวรรณุรัตน์[2] วิชนาถ พึ่งมั่น[3] ปัทมวรรณ บุญญา[4]
วีรชาติ ตั้งจิรภัทร[5] พิชชา จองวิวัฒสกุล[6] และ ภัทรพล จินดาศิริพันธ์[7]

[1,2,3,4,5] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
[6,7] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: meemiind_129@hotmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดในคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดขนาดอนุภาค 300-800 ไมครอน และมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูงสุด เท่ากับ 220 เท่าเทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด มาใช้เป็นวัสดุบ่มภายใน ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การศึกษา 3 หัวข้อ ได้แก่ วิธีการผสม ปริมาณในการผสม และการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด ทำการทดสอบกำลังอัดและการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของมอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่มีการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดมีค่าต่ำลงเมื่อมีปริมาณของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อมีการดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์แทนที่การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดให้ผลที่ดีขึ้นในด้านกำลังอัด นอกจากนี้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดสามารถรักษารอยร้าวขนาดเล็กได้สูงถึงร้อยละ 97 ภายใน 8 วัน และสามารถรักษารอยร้าวได้สมบูรณ์ ภายใน 28 วัน ภายใต้เงื่อนไขการแช่น้ำอย่างต่อเนื่องหลังจากเกิดรอยร้าว

คำสำคัญ: การบ่มภายใน, การรักษารอยร้าวด้วยตัวเอง, คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง, เถ้าก้นเตา, พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด

Abstract

This article presents the application of superabsorbent polymer (SAP) in self-compacting concrete using ground bottom ash as a cement replacement at 70% by weight of binder. In this study, SAP having particle sizes of 300-800 microns and absorption capability of 220 g/g was used as an internal curing material. Mixing method, SAP contents, and absorption capability of SAP in water and $Ca(OH)_2$ solution were determined. The compressive strength and crack-healing of mortar and concrete containing SAP were investigated. The results found that the compressive strength of mortars containing SAP was decreased with the increased SAP content. However, the use of SAP absorbed calcium hydroxide ($Ca(OH)_2$) solution gave a positive results in terms of compressive strength as compared with mortar containing SAP absorbed tap water. In addition, SAP was able to heal up to 97% of micro-cracks within 8 days and can heal the crack completely within 28 days based on analysis of water flow through the cracks under continuous immersion conditions after it being created.

Keywords: bottom ash, self-compacting concrete, internal curing, self-healing, superabsorbent polymer

1. คำนำ

ในปัจจุบันคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองถือเป็นตัวเลือกสำคัญในงานก่อสร้าง เนื่องจากมีความสามารถในการทำงานที่ดี สามารถไหลเข้าแบบได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองโดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจี้เขย่า รวมถึงช่วยพัฒนาด้านกำลังอัดด้วย เนื่องจากการลดช่องว่างและฟองอากาศภายในคอนกรีตชนิดนี้ โดยได้เริ่มมีการใช้วัสดุปอซโซลานหลากหลายประเภทในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต ซึ่งเถ้าก้นเตาถือเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ไม่ค่อยได้รับความนิยมเนื่องจากมีขนาดใหญ่ และรูพรุนที่กว้าง แต่สามารถนำมาบดละเอียดเพื่อพัฒนากำลังอัด และประสิทธิภาพของคอนกรีตได้ จนได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้มากขึ้น [1]

ปัญหาที่ตามมา และพบเจอได้บ่อยในงานก่อสร้างคอนกรีต คือ การเกิดรอยร้าว ซึ่งเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การหดตัวแบบพลาสติก, การหดตัวด้วยตัวเองของคอนกรีต, และการทรุดตัว เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหาย

ต่าง ๆ ตามมาได้ ดังนั้นคอนกรีตที่สามารถรักษารอยร้าวด้วยตัวเองได้จึงส่งผลดีต่อการช่วยป้องกันความเสียหายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในอนาคต รวมถึงเป็นการประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาได้อีกด้วย

พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด (SAP) ถือเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในงานด้านอุตสาหกรรม ด้านเทคโนโลยีการแพทย์ และด้านเกษตรกรรม [2] เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับของเหลวได้ ซึ่งจากคุณสมบัติที่น่าสนใจนี้ ทำให้เริ่มมีการประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดเข้ากับงานทางด้านวิศวกรรมมากขึ้น [3] โดยหลักการทำงานของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด คือการดูดซับของเหลวที่อยู่โดยรอบเข้ามากักเก็บไว้ภายใน และบวมตัวเป็นไฮโดรเจล (hydrogel) [4] ซึ่งกระบวนการนี้สามารถช่วยรักษารอยร้าวในระดับจุลภาค (micro cracks) ได้ แต่ในทางกลับกัน การใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดเข้ามาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีต ส่งผลกระทบอย่างมากต่อกำลังอัด เนื่องจากการบวมตัวเป็นไฮโดรเจลของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดขณะผสม และการหดตัวจากการปล่อยของเหลวออก ทำให้เกิดช่องว่าง (SAP voids) เล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่วคอนกรีต [5]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบในการประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดในคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง โดยศึกษาผลกระทบต่อกำลังอัด ผ่านการใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในมอร์ต้าร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ วิธีการผสม ปริมาณในการผสม และการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำ จากนั้นจึงคัดเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาศึกษาความสามารถในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ถูกใช้เป็นวัสดุบ่มภายในของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง โดยการแช่น้ำและติดตามผลอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 28 วัน เนื่องจากการแช่น้ำอย่างต่อเนื่อง ช่วยส่งเสริมการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองได้ดีกว่าสภาวะเปียกสลับแห้ง [6]

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ วัสดุที่ใช้ในการผสมมอร์ต้าร์ และวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมมอร์ต้าร์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C150 [7]

2. มวลรวมละเอียด โดยใช้เป็นทรายแม่น้ำ ซึ่งนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 และค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 และผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 และค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ในอัตราส่วน 70:30 เพื่อช่วยให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด

3. เถ้าก้นเตาบดละเอียด (Ground Bottom Ash) จากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง นำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 50 และบดด้วยเครื่องบดวัสดุปอซโซลานจนมีขนาดอนุภาคค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 1±0.5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C430 [8] เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุปอซโซลานก่อนการนำไปใช้

4. สารลดน้ำพิเศษ ประเภทพอลิคาร์บอกซิเลต (polycarboxylate)

5. พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด (SAP) ประเภทโซเดียมพอลิอะคริเลต (Sodium Polyacrylate)

6. สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่มีความเข้มข้น 1 และ 2 โมลาร์

2.1.2 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเหมือนกับวัสดุที่ใช้ในการผสมมอร์ต้าร์ในหัวข้อ 2.1.1 แต่มีการปรับปรุงขนาดคละของมวลรวมละเอียด และมีการเพิ่มมวลรวมหยาบเข้าไป ดังนี้

1. มวลรวมละเอียด โดยใช้เป็นทรายแม่น้ำ ซึ่งนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

2. มวลรวมหยาบ โดยใช้เป็นหินประเภทแกรนิต ซึ่งมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 9.5 มม. โดยนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 3/8 นิ้ว และค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

2.2 พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการเป็นวัสดุบ่มภายในของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดประเภทโซเดียมพอลิอะคริเลต ซึ่งมีขนาดอนุภาค 300-800 ไมครอน โดยนำมาทดสอบหาค่าการดูดซับด้วยวิธี tea-bag method [9] พบว่า พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดประเภทโซเดียมพอลิอะคริเลต มีความสามารถในการดูดซับน้ำประปาได้สูงสุด เท่ากับ 220 เท่า เทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด ที่เวลา 10 นาทีหลังการเริ่มดูดซับ

สำหรับการทดสอบหาค่าการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด พบว่า สามารถดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 และ 2 โมลาร์ ได้เท่ากับ 43 และ 26 เท่าเทียบกับน้ำหนักของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด ที่เวลา 1 นาทีหลังการเริ่มดูดซับ โดยหลังจากนั้น สารละลายเริ่มมีการตกตะกอน ทำให้ความสามารถในการดูดซับของพอลิเมอร์ลดลงตามระยะเวลา เนื่องจากความสามารถในการดูดซับของพอลิเมอร์ลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายที่ได้รับ [10] ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดในครั้งนี้ ได้กำหนดปริมาณการดูดซับน้ำและสารละลายของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดไว้ที่ 25 เท่าโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด สำหรับการศึกษามอร์ต้าร์ พิจารณาจากความสามารถสูงสุดในการดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 และ 2 โมลาร์ และกำหนด 15 เท่าโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด สำหรับการศึกษาคอนกรีต เนื่องจากการใช้ปริมาณการดูดซับน้ำและสารละลายเช่นเดียวกับการทดสอบของมอร์ต้าร์ ส่งผลให้ค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตสูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้

2.3 วิธีการผสมตัวอย่างทดสอบ

2.3.1 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบมอร์ต้าร์ออกเป็น 3 หัวข้อ เพื่อศึกษาอิทธิพลของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่มีต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ได้แก่ วิธีการผสม ปริมาณการผสม และการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำ โดยใช้

อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด เท่ากับ 1:2.75 โดยมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 70 ของน้ำหนักวัสดุประสานทุกส่วนผสม ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.27 ในการศึกษาหัวข้อวิธีการผสม และปริมาณการผสม สำหรับการศึกษาหัวข้อการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.52 ควบคุมอัตราการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 หลังจากการผสม ทำการเทลงแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. และทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 [11] ในส่วนหัวข้อปริมาณการผสม ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ปริมาณร้อยละ 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และกำหนดร้อยละ 6 โดยน้ำหนักซีเมนต์สำหรับการศึกษาหัวข้อวิธีการผสม และหัวข้อการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำ โดยแสดงรายละเอียดส่วนผสมมอร์ต้าร์สำหรับหัวข้อวิธีการผสม ปริมาณการผสม และการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำ ไว้ในตารางที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต นิยมผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดเข้ากับส่วนผสมแบบแห้ง (Dry SAP) หรือแบบแช่น้ำอิ่มตัว (Pre-soaked SAP) แต่การผสมทั้ง 2 แบบนี้มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยการผสมแบบแห้งทำโดยผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดแบบแห้งพร้อมกับวัสดุประสานและมวลรวมละเอียด ก่อนใส่น้ำ และน้ำพิเศษสำหรับการดูดซับของพอลิเมอร์ [6] ส่วนการผสมแบบแช่น้ำอิ่มตัวทำโดยให้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดได้ดูดซับน้ำพิเศษจนบวมตัว ก่อนนำไปผสมเข้ากับวัสดุประสาน มวลรวมละเอียด และน้ำ [12] ซึ่งทั้ง 2 วิธีก่อให้เกิดช่องว่างหลังการหดตัวของพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ตามการบวมตัวของอนุภาคพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงกับกำลังอัด [13] จึงได้ดัดแปลงเป็นวิธีการผสมแบบใหม่ คือ การผสมแบบแช่น้ำอิ่มตัวแล้วนำไปปั่น (Slurry SAP) โดยนำพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดไปดูดซับน้ำพิเศษก่อน คล้ายกับวิธีแช่น้ำอิ่มตัว แล้วนำมาปั่น เพื่อลดขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่เกิดการบวมตัวเป็นไฮโดรเจล ซึ่งช่วยลดขนาดช่องว่างที่เกิดขึ้น และส่งผลกระทบต่อกำลังอัดน้อยลง โดยควบคุมปริมาณของพอลิเมอร์ให้เท่ากันที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของซีเมนต์

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ในหัวข้อการศึกษาวิธีการผสม

ชนิดตัวอย่าง	ซีเมนต์ (g)	เถ้าก้นเตาบดละเอียด (g)	ทรายละเอียด (g)	น้ำ (g)	SAP (g)	วิธีการผสม
M6PS	222	518	2035	200	13.3	แบบแช่น้ำอิ่มตัว
M6DS	222	518	2035	200	13.3	แบบแห้ง
M6SS	222	518	2035	200	13.3	แบบแช่น้ำอิ่มตัวแล้วนำไปปั่น

หัวข้อการศึกษาถัดมาคือปริมาณการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีต ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของคอนกรีต จึงต้องการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดในปริมาณที่มากพอสำหรับการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยตัวเอง ได้แก่ ร้อยละ 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ โดยกำหนดวิธีการผสมให้เหมือนกัน คือ การผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดแบบแช่น้ำอิ่มตัว

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ในหัวข้อการศึกษาปริมาณการผสม

ชนิดตัวอย่าง	ซีเมนต์ (g)	เถ้าก้นเตาบดละเอียด (g)	ทรายละเอียด (g)	น้ำ (g)	SAP (%cement mass)	SAP (g)
M6PS	222	518	2035	200	6	13.3
M8PS	222	518	2035	200	8	17.8
M10PS	222	518	2035	200	10	22.2

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดในปริมาณมากเป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีต ส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังอัด [13] จึงต้องการศึกษาหัวข้อสุดท้าย คือ การศึกษาการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำ โดยสารละลายที่เลือกศึกษา คือ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งของปฏิกิริยาไฮเดรชัน สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานให้เกิดเร็วขึ้นได้ โดยนำไปสู่การช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต จึงได้เลือกสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 และ 2 โมลาร์ มาใช้สำหรับการศึกษาการดูดซับของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดในครั้งนี้

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์หัวข้อการศึกษาการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำ

ชนิดตัวอย่าง	ซีเมนต์ (g)	เถ้าก้นเตาบดละเอียด (g)	ทรายละเอียด (g)	น้ำ (g)	SAP (g)	สารละลายที่ใช้ในการดูดซับ
M6PS	222	518	2035	385	13.3	น้ำประปา
M6PS1Ca	222	518	2035	385	13.3	$Ca(OH)_2$ 1 โมลาร์
M6PS2Ca	222	518	2035	385	13.3	$Ca(OH)_2$ 2 โมลาร์

2.3.2 ส่วนผสมของคอนกรีต

ภายหลังการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มแล้ว ได้ทำการเลือกวิธีการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่เหมาะสมที่สุด เพื่อมาประยุกต์ใช้กับส่วนผสมของคอนกรีตควบคุม หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความสามารถในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเอง โดยส่วนผสมของคอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้ ได้มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 70 ของน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.27 [14] สำหรับปริมาณน้ำพิเศษและสารละลายพิเศษในการดูดซับของพอลิเมอร์ ใช้เท่ากับ 15 เท่าโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด โดยมีรายละเอียดของวัสดุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของคอนกรีต

ซีเมนต์ (kg/m^3)	เถ้าก้นเตาบดละเอียด (kg/m^3)	ทราย (kg/m^3)	หิน (kg/m^3)	น้ำ (kg/m^3)
180	420	904	722	162

จากการศึกษาอิทธิพลของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่มีต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ พบว่า การผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดด้วยวิธีแช่น้ำอิ่มตัว (Pre-soaked SAP) โดยนำไปดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ และใช้ปริมาณพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพด้านกำลังอัดสูงสุด ดังนั้นในการศึกษาความสามารถของการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด จึงได้ทำการเปรียบเทียบคอนกรีตควบคุม คอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ดูดซับน้ำ และคอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด และสารละลายที่ใช้ในการดูดซับ

ชนิดตัวอย่าง	SAP (%cement mass)	สารละลายที่ใช้ในการดูดซับ*
CT	-	-
S1	6	น้ำประปา
S2	6	$Ca(OH)_2$ 1 โมลาร์

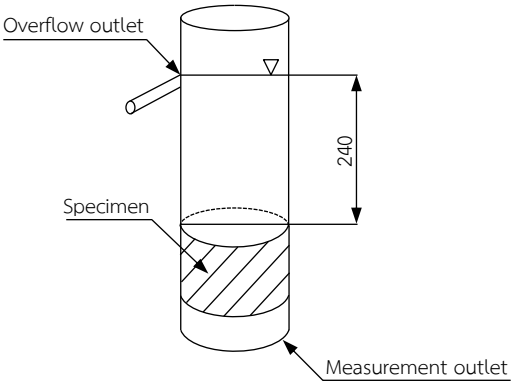
*ใช้ปริมาณการดูดซับ 15 เท่าโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด

ในส่วนของคอนกรีตทดสอบ ทำการผสมซีเมนต์ เถ้าก้นเตาบดละเอียด มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดให้เข้ากันก่อน จากนั้นใส่พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ได้ทำการดูดซับของเหลวหรือสารละลายแล้วตามวิธีแช่น้ำอิ่มตัว (Pre-soaked SAP) แล้วทำการผสมให้เกิดการกระจายตัวของพอลิเมอร์เท่า ๆ กัน ก่อนใส่น้ำตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่กำหนดไว้ โดยใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตสดให้อยู่ภายในช่วง 650-750 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C1611 [15] หลังการผสม เทคอนกรีตในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 [16] ต่อไป

รูปที่ 1 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการสร้างรอยร้าว

2.4 การสร้างรอยร้าว

ก่อนการทดสอบความสามารถในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเอง นำคอนกรีตมาตัดแบ่งให้ได้ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. แล้วนำตัวอย่างใส่ในท่อ PVC เพื่อทำการกดสร้างรอยร้าว โดยทำการยึดตัวอย่างทดสอบกับแผ่นเหล็กทั้ง 2 ข้าง แล้วถ่ายน้ำหนักผ่านไม้อัดเพื่อควบคุมขนาดความกว้างของรอยร้าวให้เท่ากับ 0.2±0.1 มม. ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ดังรูปที่ 1 คอนกรีตที่เกิดรอยร้าวถูกแช่น้ำอย่างต่อเนื่องจนถึงวันทดสอบความสามารถในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเอง



รูปที่ 2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าว

รูปที่ 3 การทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าว

2.5 การทดสอบความสามารถในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเอง

นำตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดรอยร้าวและถูกแช่น้ำอย่างต่อเนื่อง ขึ้นมาทดสอบทุกวันที่ 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 และ 28 รวมทั้งหมด 8 ครั้ง โดยนำตัวอย่างออกจากท่อ PVC หลังจากสร้างรอยร้าว และใช้ท่อยางสวมแทนที่ จากนั้นนำตัวอย่างที่อยู่ในท่อยางต่อเข้ากับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าว โดยควบคุมความดันน้ำ (pressure head) ให้คงที่ที่ระดับความสูง 240 มม. เหนือพื้นผิวด้านบนของตัวอย่างทดสอบ ดังรูปที่ 2 แล้วทำการวัดอัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าว โดยติดตั้งอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3 และทำการทดสอบ ซึ่งน้ำที่ไหลผ่านรอยร้าวจะไหลลงสู่บีกเกอร์ที่รองไว้ด้านล่าง จากนั้นนำค่าที่วัดได้หาร้อยละการปิดรอยร้าว ดังแสดงในสมการที่ (1) เพื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของคอนกรีตควบคุม, คอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับน้ำ และคอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์

$$P = \frac{f_0 - f_i}{f_0} \times 100 \qquad (1)$$

โดย P คือ ร้อยละการปิดรอยร้าว (%), f_0 คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวก่อนการแช่น้ำต่อเนื่อง และ f_i คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวเมื่อวัดที่วันใด ๆ

3. ผลการทดสอบ

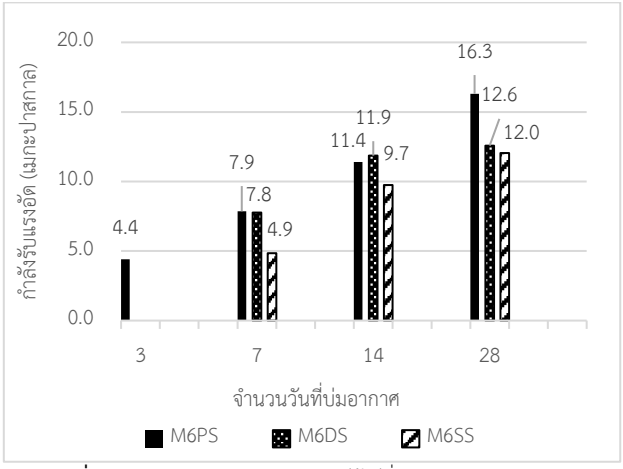
3.1 กำลังอัดของมอร์ต้าร์

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ในหัวข้อการศึกษาวิธีการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า การผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดด้วยวิธีแช่น้ำอิ่มตัว (Pre-soaked SAP) สามารถพัฒนากำลังอัดที่ช่วงอายุ 28 วันแรกได้สูงที่สุด รองลงมาคือวิธีการผสมแบบแห้ง และแบบแช่น้ำอิ่มตัวแล้วนำไปปั่น โดยมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 16.3, 12.6 และ 12.0 เมกะปาสกาล ตามลำดับ โดยการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดแบบแห้ง และแบบแช่น้ำอิ่มตัวแล้วนำไปปั่น ที่ปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ส่งผลให้มอร์ต้าร์ยังไม่แข็งตัวในช่วงอายุ 3 วันแรก แต่สามารถพัฒนากำลังอัดที่ช่วงอายุ 28 วันแรกได้ใกล้เคียงกัน

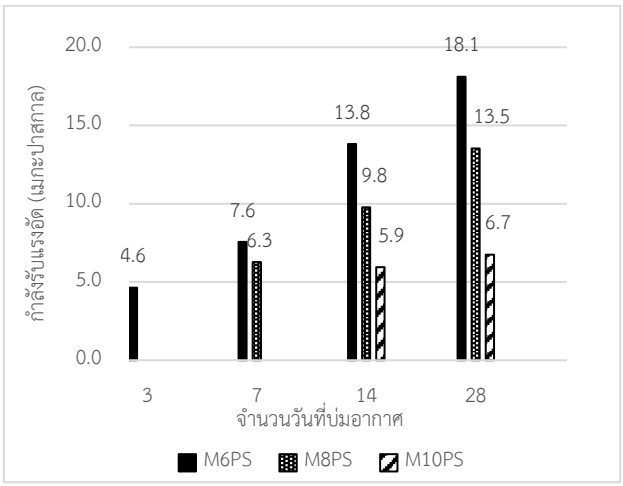
รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ในหัวข้อการศึกษาปริมาณการผสม พบว่า ในช่วงอายุ 28 วันแรก การผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ให้กำลังอัดสูงสุด รองลงมาคือ ปริมาณในการผสมร้อยละ 8 และร้อยละ 10 โดยมีค่าเท่ากับ 18.1, 13.5 และ 6.7 เมกะปาสกาล ตามลำดับ โดยการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดในปริมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ส่งผลให้มอร์ต้าร์ยังไม่แข็งตัวในช่วงอายุ 3 วันแรก และปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ส่งผลให้มอร์ต้าร์ยังไม่แข็งตัวในช่วงอายุ 7 วันแรก

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ในหัวข้อการศึกษาการดูดซับสารละลายแทนที่น้ำ พบว่า การให้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของมอร์ต้าร์ได้สูงกว่าการดูดซับน้ำประปา โดยกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ช่วงอายุ 28 วันแรก ของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำประปา สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ มีค่าเท่ากับ 5.7, 8.6 และ 6.3 เมกะปาสกาล ตามลำดับ โดยการดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด ส่งผลให้มอร์ต้าร์ยังไม่แข็งตัวที่ช่วงอายุ 7 วันแรก

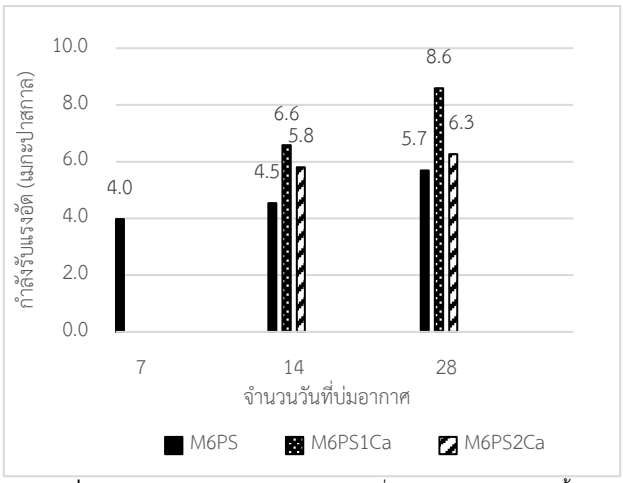
จากผลการทดสอบของมอร์ต้าร์ทั้ง 3 หัวข้อ พบว่า การผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดด้วยวิธีการผสมแบบแช่น้ำอิ่มตัว (Pre-soaked SAP) ที่ปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ และดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์แทนที่น้ำ สามารถพัฒนากำลังอัดที่ช่วงอายุ 28 วัน ได้สูงที่สุด ดังนั้น จึงได้เลือกวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดซึ่งใช้เป็นวัสดุบ่มภายในของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง



รูปที่ 4 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เปรียบเทียบวิธีการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด



รูปที่ 5 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เปรียบเทียบปริมาณการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด



รูปที่ 6 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เปรียบเทียบการดูดซับน้ำและสารละลายแทนที่น้ำของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด

3.2 ค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีต

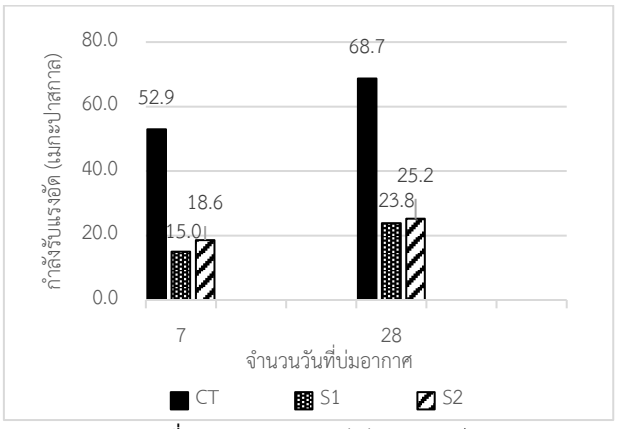
จากการทดสอบค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีต พบว่า การผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด ช่วยทำให้ค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 6 โดยเมื่อใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์แทนที่น้ำในการดูดซับของพอลิเมอร์ ช่วยลดปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer) ลงได้ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าการยุบตัวแบบแผ่ของคอนกรีต

ชนิดตัวอย่าง	ค่าการยุบตัวแบบแผ่ (cm.)	SP (%)
CT	75	1.00
S1	69	0.85
S2	70	0.40

3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

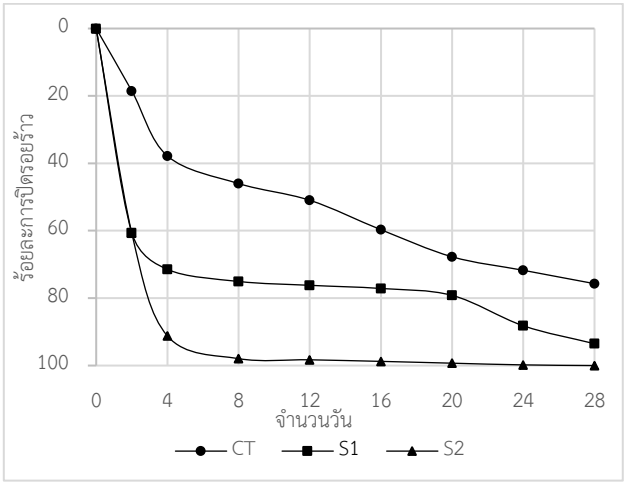
รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตควบคุม, คอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ดูดซับน้ำ และคอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ พบว่า เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดในปริมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ในคอนกรีตควบคุม ส่งผลให้กำลังอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่อใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แทนที่น้ำประปาในการดูดซับของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด สามารถช่วยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สอดคล้องกับผลการทดสอบในส่วนของมอร์ต้าร์



รูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.4 การรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด

การทดสอบการวัดอัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวของคอนกรีตตัวอย่างที่แช่น้ำต่อเนื่อง 28 วัน สามารถหาร้อยละของการปิดรอยร้าวได้ ดังรูปที่ 8 พบว่า ภายใน 2 วันแรกของการแช่น้ำอย่างต่อเนื่องของคอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดสามารถปิดรอยร้าวได้ร้อยละ 60 ในขณะที่คอนกรีตควบคุมมีอัตราการปิดรอยร้าวอยู่ที่ร้อยละ 18.5 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามจำนวนวันที่แช่น้ำ และเมื่อผ่านไป 28 วันพบว่า คอนกรีตควบคุม (ไม่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด), คอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ดูดซับน้ำ และคอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ มีร้อยละการปิดรอยร้าว เท่ากับ 75.69, 93.52 และ 100 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละการปิดรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจากแนวโน้มนี้ สามารถคาดการณ์ได้ว่าอัตราการปิดรอยร้าวของตัวอย่างทดสอบเริ่มคงที่ หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาผ่านไปภายหลัง 28 วัน



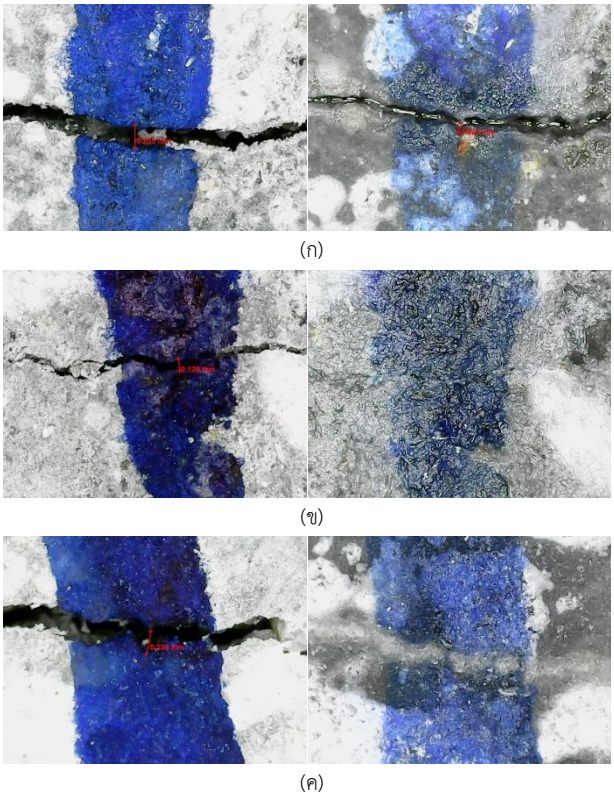
รูปที่ 8 ร้อยละการปิดรอยร้าวหลังจากแช่น้ำอย่างต่อเนื่อง

4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดสามารถเป็นวัสดุบ่มภายในได้ เพราะเป็นวัสดุที่สามารถกักเก็บความชื้นได้อย่างดี และสามารถถ่ายเทไปยังผิวสัมผัสโดยรอบได้อีกด้วย โดยนอกจากเป็นวัสดุที่ช่วยลดการเกิดการหดตัว (shrinkage) [17-18] และการต้านทานการแข็งตัวสลับละลายน้ำในคอนกรีต (freezing and thawing) [19] แล้ว ยังเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับของเหลว และบวมตัวเป็นไฮโดรเจล (hydrogel) เพื่อปกปิดรอยร้าว รวมถึงช่วยเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์อิสระที่ไม่ทำปฏิกิริยาก่อนหน้า [20] แต่ยังคงส่งผลกระทบโดยตรงกับกำลังอัดของคอนกรีตตามปริมาณที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับของเหลวหรือสารละลาย ซึ่งพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดเกิดการบวมตัวเป็นไฮโดรเจลทันทีที่สัมผัสของเหลวหรือสารละลาย (absorption) และเมื่อเวลาผ่านไป พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดมีการปล่อยของเหลวที่กักเก็บไว้ออกมาสู่บริเวณโดยรอบ (desorption) และทำให้พอลิเมอร์เกิดการหดตัวแห้งลง ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในคอนกรีตที่กระจัดกระจายขึ้น โดยเฉพาะในช่วงอายุเริ่มต้นของคอนกรีต (early age) [12,21]

ในช่วงสภาวะคอนกรีตสด (fresh concrete) เมื่อแทนที่น้ำด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า มีการใช้สารลดน้ำพิเศษลดลงเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวแบบแผ่ที่ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ดูดซับน้ำ สอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากวิธีการ

ทดสอบ tea-bag method พิจารณาจากแนวโน้มการปล่อยสารละลายออกมาภายหลังการดูดซับ พบว่า เมื่อกำหนดปริมาณของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์แทนที่น้ำสำหรับพอลิเมอร์ 25 เท่าโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ เริ่มมีการปล่อยสารละลายออกสู่ภายนอกภายหลังจากเวลาผ่านไป 5 นาที สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindasiriphan, P. และคณะ [6] เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของแคลเซียมในคอนกรีต ทำให้ความสามารถในการดูดซับของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดลดลง เพราะการจับตัวร่วมกับหมู่คาร์บอกซิลิกในสายอะคริลิคของพอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดการคายของเหลวที่เก็บไว้ ซึ่งถือเป็นการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ดี นอกจากนี้ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้ถูกคายออกมา มีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานกับวัสดุปอซโซลานได้อีกด้วย โดยการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.02 โมลาร์ ช่วยลดประสิทธิภาพการบวมตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้ช่องว่างที่เกิดขึ้นหลังจากการหดตัวของพอลิเมอร์เล็กลงกว่าเดิม [22] ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังอัดดีขึ้นกว่าคอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ดูดซับน้ำทั่วไป



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 9 ก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) รักษารอยร้าวโดยการแช่น้ำอย่างต่อเนื่อง 28 วัน ของคอนกรีตควบคุม (ก), คอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับน้ำ (ข) และคอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ค)

ภายหลังจากการทดสอบการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดผ่านการแช่น้ำอย่างต่อเนื่อง เห็นได้ชัดเจนว่า พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดมีส่วนช่วยในการรักษารอยร้าวได้ดี พิจารณาจากการลดลงของความกว้างของรอยร้าว และความสามารถในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด จากการทดสอบในรูปที่ 9 เนื่องจากการแช่น้ำอย่างต่อเนื่องเป็นปัจจัยสำคัญในการส่งเสริมการรักษารอยร้าวของพอลิเมอร์โดยพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดเกิดการบวมตัวเป็นไฮโดรเจลขึ้นมาอุดตันตามรอยร้าวที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ โดยเฉพาะตัวอย่างทดสอบที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดที่ดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีอัตราการปิดรอยร้าวสูงถึงร้อยละ 97.94 ภายใน 8 วัน และสามารถปิดรอยร้าวได้สมบูรณ์ภายใน 28 วัน เพราะนอกจากพอลิเมอร์ที่เกิดการบวมตัวเพื่อรักษารอยร้าวแล้ว ไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จากสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำ มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรักษารอยร้าวให้สมบูรณ์จากการเกิดแคลไซต์ (calcite) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) [23] อีกด้วย โดยยังมีสาเหตุอื่น ๆ ที่ช่วยรักษารอยร้าวของคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นอีก ได้แก่ การบวมตัวของซีเมนต์เพสต์, การตกตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$), การไฮเดรชันของซีเมนต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยา [4] เป็นต้น รวมถึงการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัสดุปอซโซลานอย่างเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่ในงานวิจัยนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้

5. สรุปผล

บทความนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดเป็นวัสดุบ่มภายในของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง โดยมุ่งเน้นไปที่อิทธิพลในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของคอนกรีต และการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุ 28 วันของคอนกรีต โดยมีข้อสรุปดังนี้

1. การใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดในปริมาณมาก ส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังอัดของคอนกรีต เนื่องมาจากการทิ้งช่องว่างขนาดเล็ก (SAP Voids) กระจายอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตภายหลังการคายน้ำหรือสารละลายออกสู่บริเวณโดยรอบ แต่สามารถช่วยรักษารอยร้าวขนาดเล็ก (micro cracks) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดสามารถส่งเสริมการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองได้ดี โดยภายใน 28 วันหลังการแช่น้ำอย่างต่อเนื่อง คอนกรีตที่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดสามารถปิดรอยร้าวได้อย่างสมบูรณ์ และมีประสิทธิภาพมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด

3. การดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์แทนที่น้ำช่วยลดการบวมตัวเป็นไฮโดรเจลของพอลิเมอร์ได้ ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการทำงาน (workability) รวมถึงพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้นกว่าการดูดซับน้ำ

4. การดูดซับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์แทนที่น้ำของพอลิเมอร์มีส่วนช่วยในการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองของคอนกรีต เนื่องจากไอออนของแคลเซียมที่ละลายน้ำ ช่วยเพิ่มการเกิดแคลไซต์ (calcite) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวดร่วมกับคอนกรีตในงานก่อสร้างต่าง ๆ ควรคำนึงความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังอัด และการรักษารอยร้าวด้วยตัวเองให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการ เพื่อประโยชน์

สูงสุดของการใช้วัสดุ และเพื่อเป็นการลดมลภาวะทางการก่อสร้าง ส่งเสริมให้เกิดความยั่งยืนในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโรงไฟฟ้าจังหวัดระยองที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อเถ้าก้นเตาสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการ ทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund 2565: โครงการเทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0)

เอกสารอ้างอิง

[1] Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R. (2003). Development of bottom ash as pozzolanic material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, pp.48-53.

[2] Guilherma, M.R., Aouada, F.A., Fajardo, A.R., Martins, A.F., Paulino, A.T., Davi, M.F.T., Rubira, A.F. and Muniz, E.C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, 72, pp.365-385

[3] Mignon, A., Graulus, G.-J., Snoeck, D., Martins, J., De Belie, N., Dubruel, P. and van Vlierberghe, S. (2014). pH-sensitive superabsorbent polymers: A potential candidate material for self-healing concrete. *Journal of Materials Science*, 50, pp.970-979.

[4] Lee, H.X.D., Wong, H.S. and Buenfeld, N.R. (2016). Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. *Cement & Concrete Research*, 79, pp.194-208.

[5] Liu, J., Farzadnia, N., Khayat, K.H. and Shi, C. (2021). Effects of SAP characteristics on internal curing of UHPC matrix. *Construction and Building Materials*, 280

[6] Chindasiriphan, P., Yokota, H. and Pimpakan, P. (2020). Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability. *Construction and Building Materials*, 233

[7] ASTM (2012). Standard Specification for Portland Cement. ASTM C150. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[8] ASTM (2008). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-μm (No.325) sieve. ASTM C430. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[9] Zhao, S., Jensen, O.M. and Hasholt, M.T. (2020). Measuring absorption of superabsorbent polymers in cementitious environments. *Materials and Structures*, 53(1). Pp.11.

[10] Schröfl, C., Mechtcherine, V. and Gorges, M. (2012). Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigation autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 42, pp.865-873.

[11] ASTM (2002). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. ASTM C109. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[12] Kong, X.-M. and Zhang, Z.-L. (2015). Effect of pre-soaked superabsorbent polymer on shrinkage of high-strength concrete. *Materials and Structures*, 48.

[13] Mignon, A., Snoeck, D., Dubruel, P., Van Vlierberghe, S. and De Belie, N. (2017). Crack Mitigation in Concrete: Superabsorbent Polymers as Key to Success?. *Materials*, 10(237).

[14] Kulthaweepisit, N. (2021). *Assessment of durability properties of high performance concrete made with high volume ground bottom ash and nano calcium carbonate*. M.Ed. Dissertation, King's mongkut university of technology thonburi, Thailand.

[15] ASTM (2005). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM C1611. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[16] ASTM (2014). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[17] Snoeck, D., Pel, L. and De Belie, N. (2017). The water kinetics of superabsorbent polymers during cement hydration and internal curing visualized and studied by NMR. *Scientific Reports*, 7, pp.1-14.

[18] Snoeck, D., Pel, L. and De Belie, N. (2018). Superabsorbent polymers to mitigate plastic drying shrinkage in a cement paste as studied by NMR. *Cement and Concrete Composites*, 93, pp.54-62.

[19] Mechtcherine, V., Schröfl, C., Wyrzykowski, M., Gorges, M., Cusson, D., Margeson, J., De Belie, N., Snoeck, D., Ichimiya, K., Igarashi, S.-I., Falikman, V., Friedrich, S., Bokern, J., Kara, P., Lura, P., Marciniak, A., Reinhardt, H.-W., Sippel, S., Ribeiro, A.B., Custódio, J., Ye, G., Dong, H., and Weisss, J. (2017). Effect of superabsorbent polymers (SAP) on the freeze-thaw resistance of concrete: results of a RILEM interlaboratory test. *Materials and Structures*, 50(14), pp.1-19

[20] Liu, J., Farzadnia, N. and Shi, C. (2021). Microstructural and Micromechanical characteristics of ultra-high performance concrete with superabsorbent polymer (SAP). *Cement and Concrete Research*, 149

[21] Yang, J. and Wang, F. (2019). Influence of assumed absorption capacity of superabsorbent polymers on the microstructure and performance of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 204, pp.468-478.

[22] Guo, S., Forooshani, P.K., Dai, Q., Lee, B.P., Si, R. and Wang, J. (2020). Design of pH-responsive SAP polymer for pore solution chemistry regulation and crack sealing in cementitious materials. *Composites Part B: Engineering*, 199.

[23] Park, B. and Choi, Y.C. (2018). Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and superabsorbent polymers (SAPs). *Construction and Building Materials*, 189, pp.1054-1066.