

สมบัติเชิงกลและความทนทานของ Reactive Powder Concrete

บุรฉัตร ฉัตรวีระ^{1*} เอกพล บุญมาเลิศ³

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

และ ณิชฐ์ มากุล²

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร อนุสาวรีย์ บางเขน กรุงเทพฯ 10220

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาสมบัติทางกลและความทนทานของ reactive powder concrete (RPC) โดยทำการทดสอบกำลังอัด กำลังดึง กำลังดัด โมดูลัสยืดหยุ่น การหดตัวแบบแห้งและแบบออโตจีเนียส และความทนทานต่อซัลเฟต จากผลการทดสอบพบว่า RPC ที่มีสัดส่วนผสมของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.23 ปริมาณสารลดน้ำอย่างแรงร้อยละ 2.5 ปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 5 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 และปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ ภายใต้การบ่มด้วยวิธีออโตเคิลฟ์สามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ได้ถึง 2159 กก./ซม.² ในขณะที่อัตราการหดตัวแบบแห้งและแบบออโตจีเนียสมีค่าสูงในช่วง 56 วันแรก จากนั้นมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นคอนกรีต RPC ที่บ่มด้วยออโตเคิลฟ์มีค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตต่ำกว่า RPC ที่ผ่านบ่มด้วยน้ำ ส่วนการสูญเสียกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง RPC ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) มีการสูญเสียมากกว่าตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄)

คำสำคัญ : Reactive powder concrete (RPC) / สมบัติเชิงกล / ความทนทาน

* Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² อาจารย์ สาขาเทคโนโลยีการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

³ อดีตนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete

Burachat Chatveera^{1*} Ekkapol Boonmalert³

Thammasat University (Rangsit Campus), Klong 1, Klong Luang, Pathum Thani 12120

and Natt Makul^{2*}

Phranakhon Rajabhat University, Anusaowaree, Bangkok, Bangkok 10220

Abstract

This paper presented the study results of mechanical properties and durability of reactive powder concrete (RPC). The compressive and tensile strengths, modulus of elasticity, drying and autogenous shrinkage, and resistance to sulfate attack were tested. From the test results indicated that the RPC with having 0.23 water/cement ratio (w/c) by mass, 2.5% superplasticizer by volume, 5% silica fume by mass, 1 : 0.8 of cement-fine aggregate ratio by mass, and 4.0% steel fiber by volume under autoclave curing, can develop the 28-days compressive strength up to 2159 kg/cm². Whereas drying and autogenous shrinkage increased with a high rate during the first 56 days, after that they also decreased significantly. Further the autoclave-cured RCPs had lower expansion than that of the water-cured RCPs. For the strength loss and weight loss under sulfate attack, the RCPs that were immersed in a magnesium sulfate (MgSO₄) solution had higher losses than those of the RCPs under a sodium sulfate (Na₂SO₄) solution.

Keywords : Reactive Powder Concrete (RPC) / Mechanical Properties / Durability

* Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Lecturer, Department of Construction Technology, Faculty of Industrial Technology.

³ Former Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาที่มุ่งเป้าไปที่เทคนิคในการผลิตคอนกรีตที่มีกำลังสูงมาก (Ultra High Strength Concrete (UHSC)) ซึ่งโดยสรุปมีด้วยกัน 2 เทคนิคหลักๆ กล่าวคือ เทคนิคแรกเกี่ยวข้องกับทำให้อนุภาคที่เป็นส่วนประกอบของเพสต์ (Paste หรือ Matrix phase) เกิดการอัดแน่นสูงสุดด้วยการใช้สารลดน้ำอย่างแรงและซิลิกาฟุ่มร่วมกับมวลรวมที่มีระดับความแข็งที่สูงมาก อาทิเช่น บอกไซด์ที่ผ่านการเผา (Calcinated bauxite) หรือแกราไนต์ (Granite) [1] ส่วนเทคนิคที่สองเป็นการเป็นลัดข้อต่อของเพสต์ด้วยวัสดุจำพวกโพลีเมอร์ (Defect-free Polymer) ซึ่งจะได้เนื้อเพสต์ที่มีสามารถรับกำลังดึงได้สูงมาก (มากกว่า 1,500 กก./ซม.²) โดยเฉพาะเมื่อผสมกับอะลูมินาซีเมนต์ จนกระทั่งในช่วงปลายทศวรรษที่ 90 ได้มีงานวิจัยของ Colleparidi et al. [2-3] และ Behloul M. et al. [4] ที่คิดค้นคอนกรีตประเภท Reactive Powder concrete (RPC) ซึ่งเป็นคอนกรีตเชิงประกอบ (Composite concrete) ประเภทหนึ่งที่มี

กำลังรับแรงระดับสูง (Ultra High Strength) โดยที่มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วง 2,000 - 8,000 กก./ซม.² และความเหนียวสูง (High ductility) รวมถึงมีสมบัติทางกลอื่นๆ ในระดับสูงด้วย โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ชี้ให้เห็นถึงความสนใจในการใช้วัสดุเติมแทรกที่มีขนาดอนุภาคระดับไมโคร (Microfillers) เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของวัสดุซีเมนต์ร่วมกับประสิทธิภาพของสารลดน้ำอย่างมาก (Superplasticizer) โดยวัสดุเติมแทรกนี้จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของเพสต์จากการอัดแน่นของอนุภาค (Particle Packing Density) ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทั้งในสภาวะสดและแข็งตัวให้ดีขึ้นอย่างมาก [5-9] แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเติมแทรกและสารเคมีผสมเพิ่มนี้ยังมีราคาสูงอันจะส่งผลต่อราคาคอนกรีตที่สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตชนิดพิเศษซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับซิลิกาฟุ่มที่มีความสามารถทำปฏิกิริยาได้สูงเพื่อที่จะนำสมบัติต่างๆ มาพิจารณาเป็นแนวทางของการออกแบบต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบเคมี	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
ร้อยละ (โดยมวล)	20.34	4.95	3.26	64.78	1.43	0.45	0.17

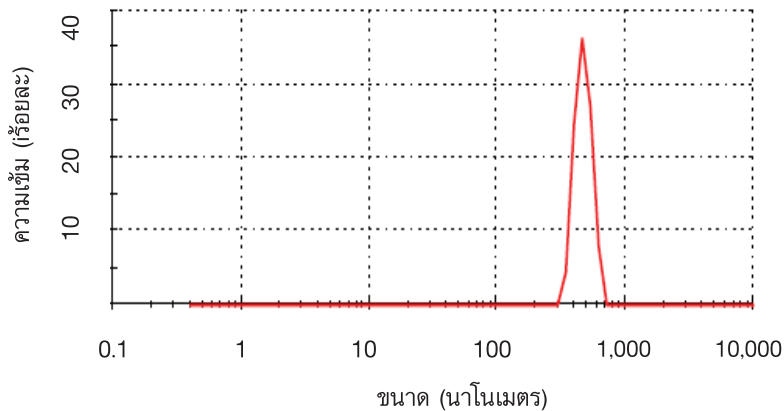
2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [10] มีองค์ประกอบเคมีดังแสดงในตารางที่ 1
2. มวลรวมละเอียด เป็นทรายแม่น้ำัดขนาดซึ่งมีขนาดอนุภาคในช่วงระหว่าง 0.15 - 0.60 มม. หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 100
3. ซิลิกาฟุ่มมีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM

C1240 [11] มีลักษณะสีเทาอมขาว ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และการกระจายขนาดคละของอนุภาคดังแสดงตามรูปที่ 1

4. สารลดน้ำอย่างมาก (Superplasticizer) ประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 [12]
5. เส้นใยเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.16 มม ยาว 13 มม รับกำลังดึงสูงสุดได้ 20,000 กก./ซม.²



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของอนุภาคซิลิกาฟูล์ม

2.2 อัตราส่วนผสมของ Reactive Powder Concrete (RPC)

อัตราส่วนผสมของ Reactive Powder Concrete (RPC) ที่นำมาทำการศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของ RPC

ปริมาณน้ำต่อ ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณสารลดน้ำ ตอปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาณซิลิกาฟูล์ม ตอปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปริมาตรเส้นใย เหล็กตอปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวล)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เส้นใยเหล็ก (กรัม)
0.23	2.5	5.0	4.0	1500	387.4

2.3 การผสมและการอัดแน่น

ตัวอย่างมอร์ตาร์ถูกผสมตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C305 [13] หลังจากผสมจึงนำมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อขนาด 5 5 5 ซม.³ และการอัดแน่นตามมาตรฐาน ASTM C109 [14] จากนั้นหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำและความชื้นและปล่อยให้ตัวอย่างแข็งตัว ทำการถอดแบบที่อายุ $24 \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มน้ำที่อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส

2.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

- 1) กำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 [15]
- 2) กำลังดึงโดยวิธี Splitting Tensile Test ตามมาตรฐาน ASTM C496 [16]
- 3) กำลังดัดตามมาตรฐาน ASTM C78 [17]
- 4) โมดูลัสยืดหยุ่นตามมาตรฐาน ASTM C469 [18]

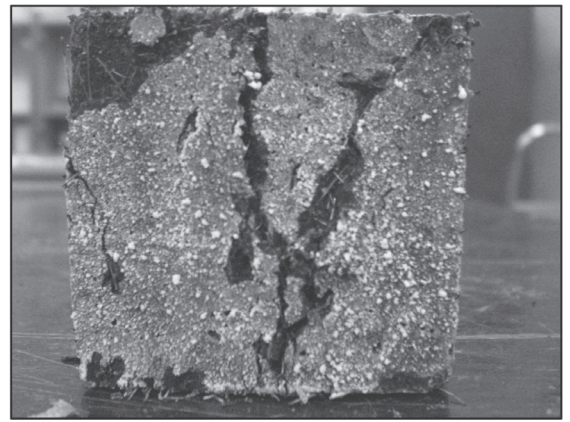
5) การหัดตัวแบบแห้งตามมาตรฐาน ASTM C596 [19]

6) การหัดตัวแบบอบโดจีเนียส โดยใช้แนวทางตามมาตรฐาน ASTM C596 [19] แต่ได้เพิ่มการหุ้มแผ่นพลาสติกตั้งแต่ตัวอย่างเริ่มมีการก่อตัวระยะเริ่มต้น (Initial setting)

7) การทดสอบความทนทานต่อซัลเฟตด้วยการเปลี่ยนแปลงความยาวตามมาตรฐาน ASTM C1012 โดยใช้ตัวอย่างขนาด 25 25 285 มม. [20] ตัวอย่างทดสอบทำการถอดแบบเมื่ออายุ $24 \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง นำก้อนตัวอย่างแช่ในน้ำปูนใสอิ่มตัวและทำการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ หากกำลังอัดที่ได้เท่ากับ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล หรือมากกว่า ทำการวัดความยาวเป็นครั้งแรกตามมาตรฐาน ASTM C490 [21] จากนั้นนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดย

น้ำหนัก โดยทำการควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายซัลเฟตให้อยู่ในช่วง 6 - 8 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาริตี (M) เป็นตัวปรับค่าความเป็นกรดต่าง ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวตั้งแต่ที่อายุ 3, 7, 28, 56 และ 90 วัน ตามลำดับ ในขณะที่การทดสอบเพื่อหาค่าการสูญเสียกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 50 50 มม. ถอดแบบที่อายุ $24 \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง และนำก้อนตัวอย่างแช่ในน้ำปูนใสอีมัตว จนกระทั่งกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ได้ต้องมีค่าเท่ากับ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาลหรือมากกว่า บันทึกค่ากำลังอัดครั้งแรก หลังจากนั้นนำ

ก้อนตัวอย่างทั้งหมดแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 3, 7, 28, 56 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อแช่ตัวอย่างในสารละลายซัลเฟตตามเวลาที่กำหนดจึงนำตัวอย่างขึ้นแล้วเช็ดผิวก้อนตัวอย่างให้แห้งและปล่อยให้แห้งในอากาศนำก้อนตัวอย่างไปทำการทดสอบกำลังอัด โดยตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแสดงภายหลังการทดสอบกำลังอัดในรูปที่ 3 ในขณะที่การทดสอบเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของตัวอย่างซึ่งแช่ในสารละลายซัลเฟตสามารถทำการทดสอบโดยใช้วิธีการและเงื่อนไขเช่นเดียวกับข้างต้น แต่เปลี่ยนจากการทดสอบกำลังอัดเป็นการชั่งน้ำหนักตัวอย่างแทน



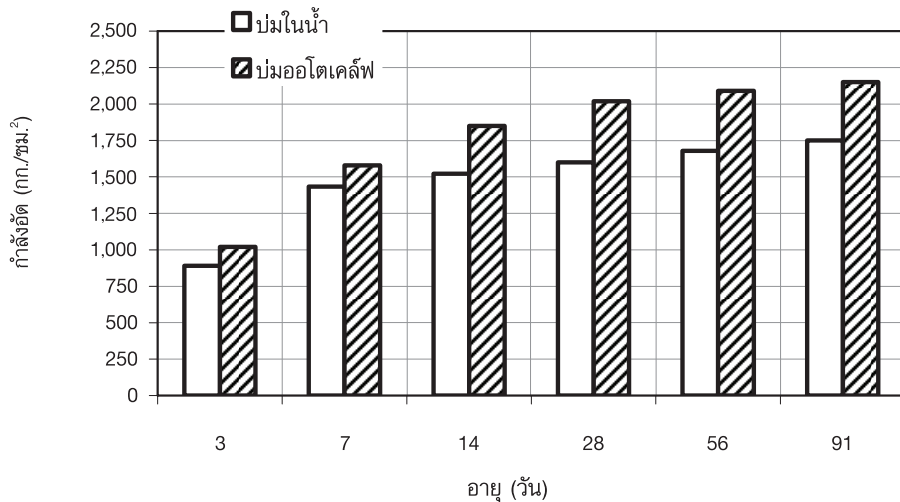
รูปที่ 3 ตัวอย่างภายหลังการทดสอบการสูญเสียกำลังอัดเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

3.1 กำลังอัด

การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซึ่งเป็น Reactive powder concrete (RPC) ชนิดหนึ่ง แสดงในรูปที่ 4 พบว่า มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.23 อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 ที่ปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงถึง 1601 กก./ซม.² ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของมอร์ตาร์ภายใต้การบ่ม 2 วิธี คือ การบ่มด้วยน้ำปูนใสที่อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และการบ่มด้วยออตเคลฟที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

ความดัน 1.7 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าการพัฒนากำลังอัดของ RPC เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งสองชนิดการบ่ม โดยที่อายุ 91 วัน RPC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1752 และ 2159 กก./ซม.² สำหรับการบ่มด้วยน้ำและออตเคลฟตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงในช่วงต้นมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและส่งผลต่ออัตราการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



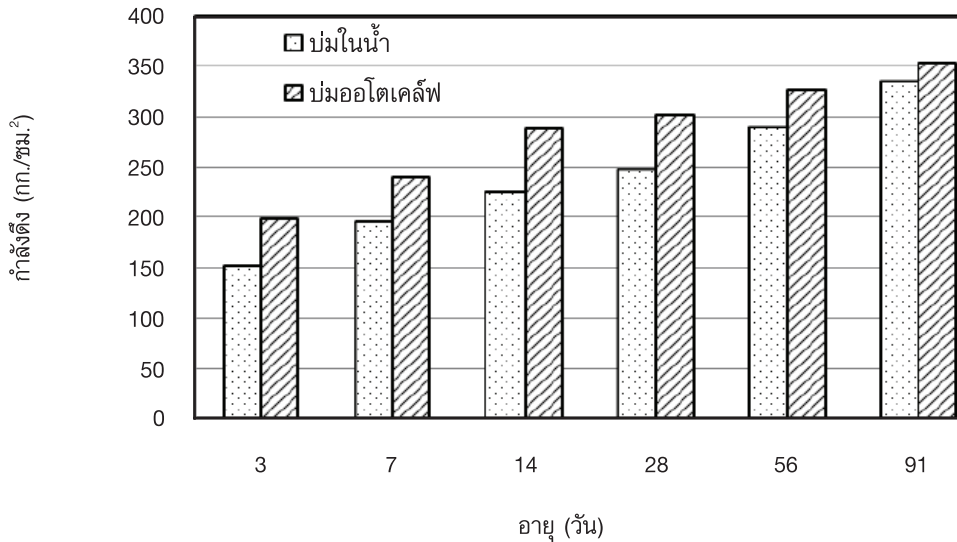
รูปที่ 4 กำลังอัดของ RPC ที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4 ภายใต้การปมด้วยน้ำและออโตเคลล์ฟ

3.2 กำลังดึง

ดังแสดงในรูปที่ 5 การพัฒนากำลังดึงแบบผ่าซีกของ RPC มีอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องภายใต้การปมด้วยน้ำและออโตเคลล์ฟเช่นเดียวกันกับการพัฒนากำลังอัด โดยที่อายุ 28 และ 91 วัน RPC มีค่ากำลังดึงอยู่ที่ 150 และ 195 กก./ซม.² และ 325 และ 350 กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นดังกล่าวมีนัยสองประการคือ การพัฒนากำลังดึงมาจากความแข็งแรงของโครงสร้างภายในที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สูง (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำโดยในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.23) และการอัดแน่นของอนุภาคจากวัสดุเติมแทรกซึ่งก็คือ ซิลิกาฟุ่ม ส่วนนัยที่สองคือ ผลจากการใช้เส้นใยเหล็กในปริมาณร้อยละ 4 เข้าไป ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงได้สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

สำหรับผลการกระทบจากวิธีการของการปมพบว่า การเพิ่มขึ้นของแรงดึงใน RPC ที่ผ่านการปมด้วย

ออโตเคลล์ฟสูงขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การปมด้วยน้ำ สาเหตุที่สำคัญมาจากการความร้อนที่สูงถึง 200 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลต่อคินเดติกส์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันตามกฎของ Arrhenius ทำให้อัตราการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังส่งผลต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกาฟุ่มซึ่งต้องใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นจึงมีมากขึ้นตามไปด้วย จากผลดังกล่าวทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทั้งสองคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีปริมาณมากขึ้น นอกจากนั้นแล้ว ความดันยังส่งผลต่อการจัดเรียงโครงสร้างในขณะที่มอร์ตาร์ยังอยู่ในสถานะที่สามารถปรับตัวได้ด้วย โดยโครงสร้างดังกล่าวจะถูกอัดให้เคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้นหรือทำให้โพรงภายในเกิดการยุบตัวลดช่องว่างลง จากผลดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นส่งผลต่อกำลังดึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



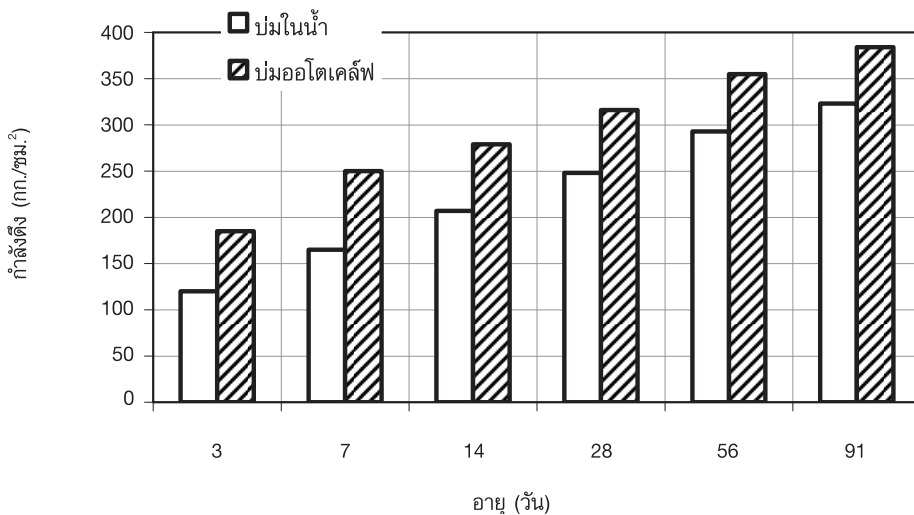
รูปที่ 5 กำลังดึงของ RPC ที่มีปริมาตรเส้นใยเหล็กร้อยละ 4 ภายใต้การบ่มด้วยน้ำและอโตเคลล์ฟ

3.3 กำลังดัด

การพัฒนา กำลังดัดของ RPC แสดงในรูปที่ 6 พบว่า ค่ากำลังดัดของ RPC ซึ่งผ่านการบ่มด้วยน้ำที่อายุ 28 และ 91 วัน มีค่า 207 และ 323 กก./ซม.² ตามลำดับ ในขณะที่ RPC ซึ่งผ่านการบ่มด้วย ออโตเคลล์ฟที่อายุ 28 และ 91 วัน มีค่า 316 และ 385 กก./ซม.² ตามลำดับ หรือ การบ่มด้วยออโตเคลล์ฟมีผลต่อกำลังดัดที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการบ่มด้วยน้ำ โดยที่อายุ 28 และ 91 วัน มีค่าร้อยละ 27.4 และ 18.9 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นดังกล่าว มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังอัด ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันคือ

การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต

แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่า ค่าความแตกต่างของกำลังดัดของ RPC ที่อายุมากขึ้นมีค่าลดลง ซึ่งแสดงนัยในสองประการคือ การบ่มด้วยออโตเคลล์ฟมีผลในการเพิ่มกำลังดัดในช่วงต้นเป็นหลัก ในขณะที่การบ่มด้วยน้ำ กำลังดัดของ RPC มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งการบ่มด้วยออโตเคลล์ฟมีผลต่อการแตกร้าวของภายในโครงสร้างโดยเฉพาะที่ระดับไมโคร (Micro-cracking) ซึ่งจะมีผลต่อกำลังรับแรงในระยะยาวที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การบ่มด้วยน้ำอย่างต่อเนื่อง

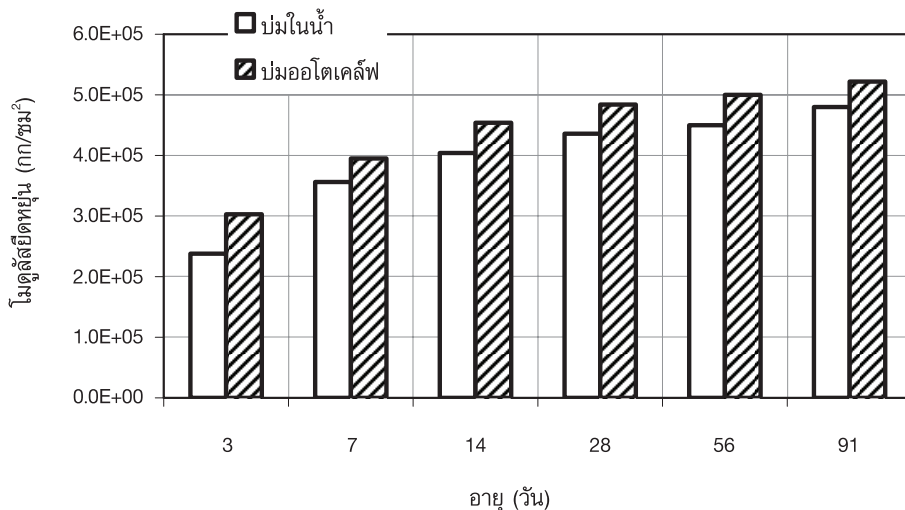


รูปที่ 6 กำลังดัดของ RPC ที่มีปริมาตรเส้นใยเหล็กร้อยละ 4 ภายใต้การบ่มด้วยน้ำและอโตเคลล์ฟ

3.4 โมดูลัสยืดหยุ่น

จากในรูปที่ 7 พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น โดย RPC ที่บ่มด้วยน้ำมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วง 2.3 X 10⁵ กก./ชม.² (ที่อายุ 3 วัน) ถึง 4.8 X 10⁵ กก./ชม.² (ที่อายุ 91 วัน) ในขณะที่ RPC ซึ่งบ่มอโตเคล็ฟมีค่าในช่วง 3.0 X 10⁵ กก./ชม.² (ที่อายุ 3 วัน) ถึง 5.2 X 10⁵ กก./ชม.² (ที่อายุ 91 วัน)

การเพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นผลมาจากการบ่มด้วยน้ำช่วยทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิคสมบูรณยิ่งขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต อีกทั้งความดันระดับสูงช่วยในการอัดแน่นของโครงสร้างภายใน ซึ่งจะเห็นได้จากการบ่มด้วยอโตเคล็ฟมีผลทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 13.6 เมื่อเปรียบเทียบกับบ่มด้วยน้ำ



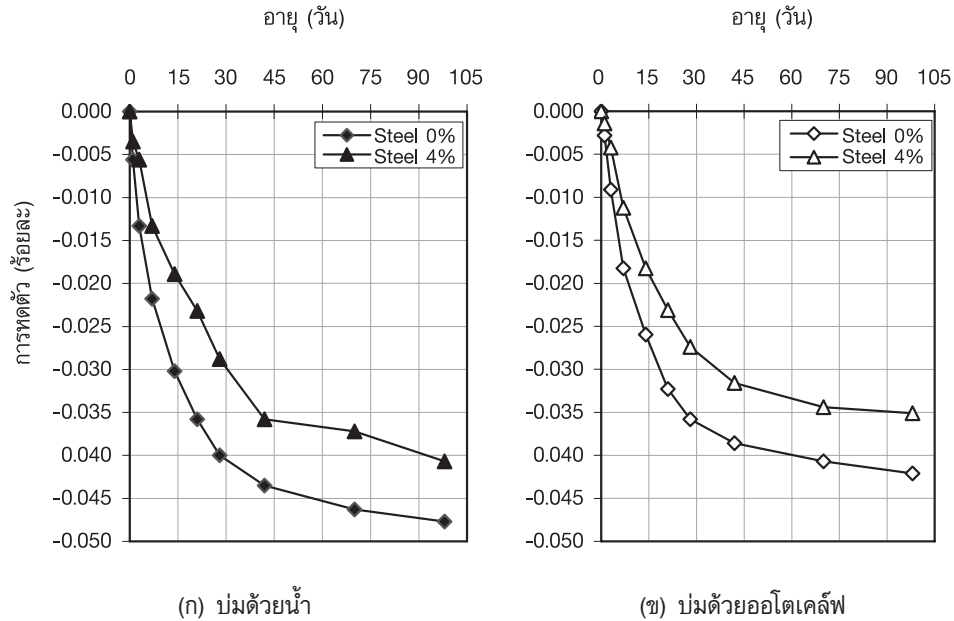
รูปที่ 7 โมดูลัสยืดหยุ่นของ RPC ที่มีปริมาตรเส้นใยเหล็กร้อยละ 4 ภายใต้การบ่มด้วยน้ำและอโตเคล็ฟ

3.5 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเป็นการหดตัวที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียน้ำหรือความชื้น (Moisture) ซึ่งประกอบด้วยน้ำอิสระ (Free water) และน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและอยู่ในสภาวะอากาศที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated water) ออกสู่ภายนอกและเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible) โดยผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบแห้งของ RPC แสดงดังรูปที่ 8 พบว่า แนวโน้มของการหดตัวแบบแห้งของ RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยน้ำและอโตเคล็ฟมีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ อัตราการหดตัวแบบแห้งมีค่าสูงในช่วง 56 วันแรก จากนั้นมีอัตราที่ลดลงตามลำดับจนถึงอายุ 180 วัน ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงต้นความชื้นที่บริเวณผิวของตัวอย่างสามารถเคลื่อนที่ออกได้ง่ายจึงส่งผลต่อการหดตัวที่มากขึ้น

ในขณะที่ในช่วงหลังความชื้นภายในเคลื่อนที่ออกมาได้ยากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นที่บริเวณผิวนอก ประกอบกับโครงสร้างภายในมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นตามอายุเพิ่มขึ้นจึงช่วยในการปิดกั้นความชื้นที่จะเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกได้ดีขึ้น

จากรูปเดียวกันจะเห็นได้ว่า การหดตัวแบบแห้งของ RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยอโตเคล็ฟมีค่าต่ำกว่าการบ่มด้วยน้ำ เนื่องจากความทึบที่ลดลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของ RPC ซึ่งบ่มด้วยอโตเคล็ฟทำให้ความชื้นจากภายในที่จะออกสู่ภายนอกมีปริมาณน้อยกว่า ประกอบการอัดแน่นมีส่วนทำให้โครงสร้างภายในที่มีโพรงคาพิวลาไรชนิดไม่ต่อเนื่องมีปริมาณมากกว่าจึงยิ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกของความชื้นเป็นไปได้ยากกว่า



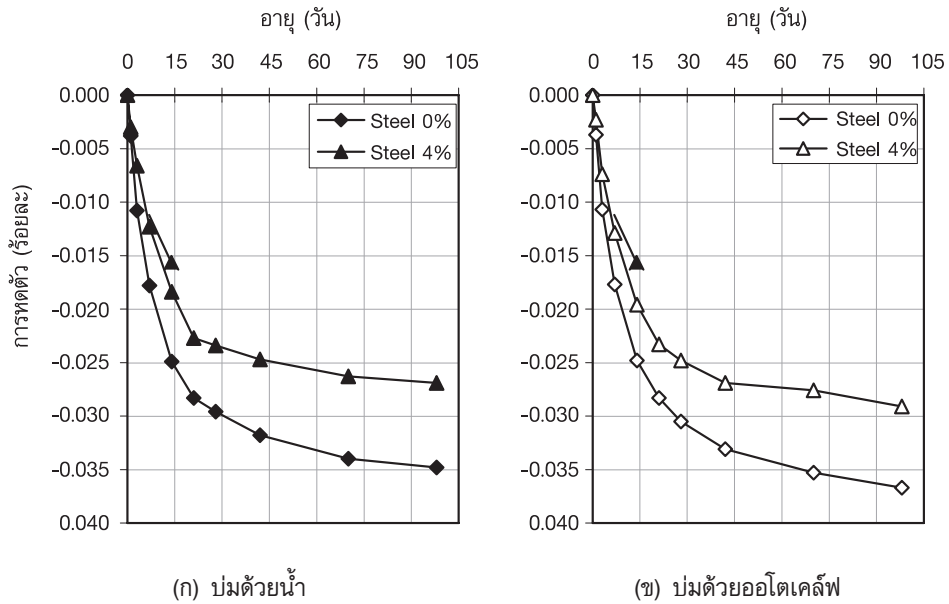
รูปที่ 8 การหดตัวแบบแห้งของ RPC ที่มีปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4

3.6 การหดตัวแบบอโตจีเนียส

การหดตัวแบบอโตจีเนียสของ RPC เป็นผลมาจากการลดลงของความดันในช่องว่างคาปิลลารี เนื่องจากน้ำในช่องว่างคาปิลลารีถูกดูดซึมไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิก โดยน้ำในโพรงคาปิลลารีถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ถูกเรียกว่า Self-desiccation ซึ่งเป็นสาเหตุของการหดตัวแบบอโตจีเนียส โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การหดตัวชนิดนี้ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

และวิธีการปรม

ผลการทดสอบการหดตัวอโตจีเนียสของ RPC แสดงในรูปที่ 9 พบว่า แนวโน้มของการหดตัวของ RPC มีลักษณะเดียวกันกับการหดตัวแบบแห้ง โดยมีค่าสูงในช่วง 56 วันแรก จากนั้นการหดตัวมีอัตราที่ลดลงตามลำดับ นอกจากนี้การปรมด้วยวิธีออโตเคลฟมีการหดตัวที่มากกว่า RPC ที่ปรมด้วยน้ำ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาที่สูงจากความร้อนที่ใส่เข้าไปทำให้ความชื้นภายในโพรงถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกว่าที่อุณหภูมิปกติ



รูปที่ 9 การหดตัวแบบบอโตจีเนียสของ RPC ภายใต้การบ่มด้วยน้ำและอโตะเคลล์

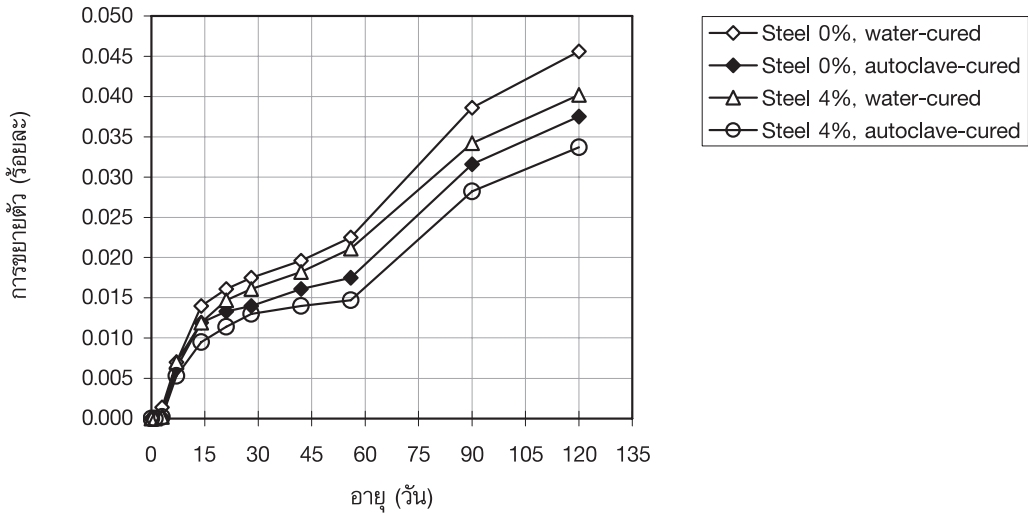
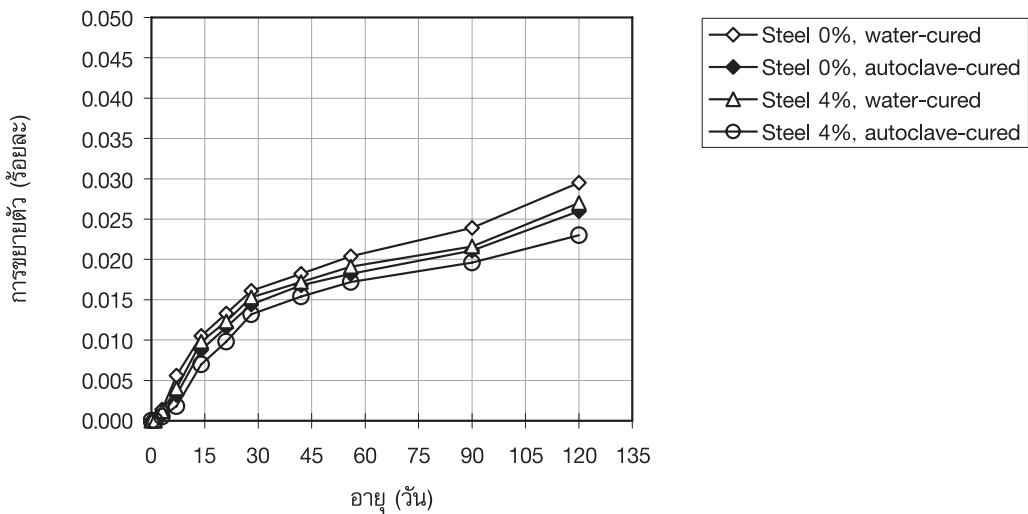
3.7 ความต้านทานต่อซัลเฟต

3.7.1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต

ผลการทดสอบความต้านทานภายใต้การกระทำของสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ของ RPC โดยทำการควบคุมความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายซัลเฟตในช่วงค่า 6 ถึง 8 ด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โดยความสามารถในการต้านทานภายใต้การกระทำของสารละลายซัลเฟตสามารถวัดในรูปของการขยายตัวเชิงเส้น (Linear expansion) แสดงในรูปที่ 10 พบว่า ค่าการขยายตัวของตัวอย่างทั้งการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (รูปที่ 10 (ก)) และแมกนีเซียมซัลเฟต (รูปที่ 10 (ข)) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีอัตรา

การเพิ่มขึ้นที่สูงในช่วงหลังจาก 60 วัน เนื่องจากในช่วงแรกแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณน้อยและส่วนใหญ่ถูกกักอยู่กับโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟตมีน้อยลง นอกจากนั้นตัวอย่างซึ่งแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตยังมีค่าสูงกว่าตัวอย่างซึ่งแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

เมื่อพิจารณาค่าการขยายตัวของ RPC พบว่า RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยอโตะเคลล์มีค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตน้อยกว่า RPC ที่บ่มด้วยน้ำ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างภายในมีความทึบสูงกว่าทำให้ไอออนของซัลเฟตเคลื่อนที่จากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ภายในได้ยากกว่า RPC ที่บ่มด้วยน้ำ

(ก) เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)(ข) เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)

รูปที่ 10 การขยายตัวของ RPC

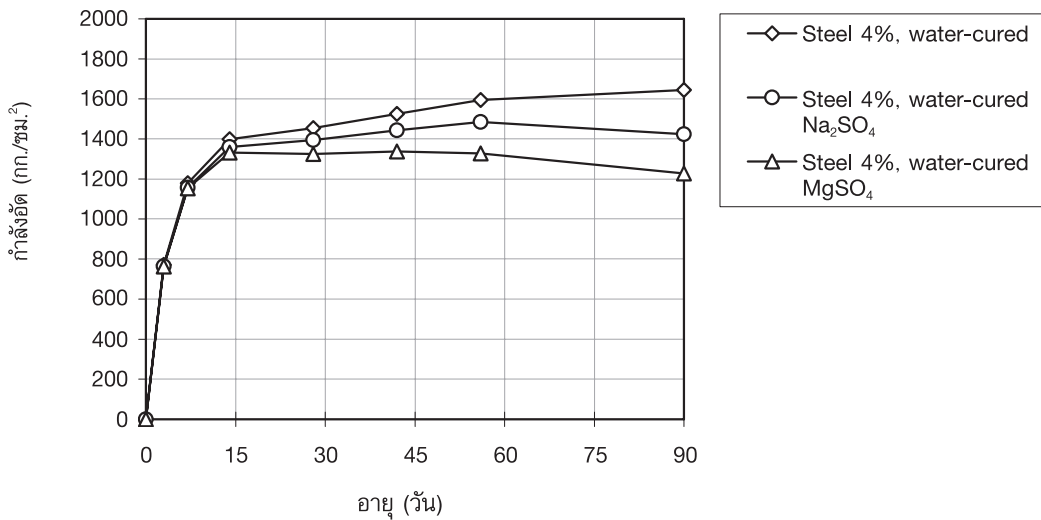
3.7.2 การสูญเสียกำลังอัดและน้ำหนักเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

การพัฒนากำลังอัดของ RPC ซึ่งแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตแสดงในรูปที่ 11 พบว่า RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยน้ำและไฮดรอกไซด์ฟมี การพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 28 วันแรกของการแช่ในสารละลายดังกล่าว ในขณะที่ในช่วงหลังจาก

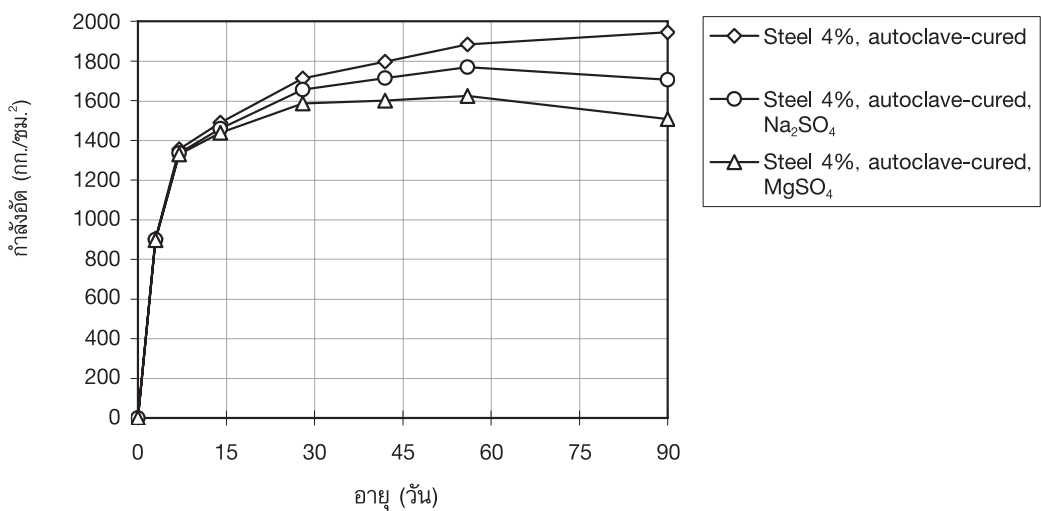
อายุ 28 วัน ไปจนถึง 90 วัน ตัวอย่าง RPC (รูปที่ 11 (ก)) ที่บ่มด้วยน้ำและสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีอัตราการพัฒนากำลังอัดที่ลดลง ส่วนตัวอย่าง RPC ซึ่งแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีกำลังอัดที่ลดลงเล็กน้อย ส่วน RPC ซึ่งผ่านการบ่มด้วยวิธีไฮดรอกไซด์ฟมี (รูปที่ 11 (ข)) เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 56 วัน มีกำลังอัดที่ลดลง ซึ่งหมายถึงมีกำลังอัดที่

สูญเสียไปบางส่วนเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะได้ยิปซัมและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายลดลงจึงเกิดความไม่เสถียรภาพของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและเอ็ทริงไกท์ นอกจากนี้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายซิลิกอน ได้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งไม่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่เมื่อผสมซิลิกาฟุ่มใน RPC ซิลิกาฟุ่มทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งเป็นการลด

ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ลดสารตั้งต้นที่จะทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟตลง นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดที่สูงขึ้นหมายถึง ความพรุนที่ลดลงตามไปด้วย จึงยังส่งผลทำให้ไอออนของซัลเฟตเข้าไปทำลายโครงสร้างภายในลดลง และยังช่วยลดผลกระทบดังกล่าวได้มากขึ้นเมื่อ RPC ถูกบ่มด้วยอโตเคลฟ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าการนำน้ำหนักที่สูญเสียไปของ RPC เมื่อเปรียบเทียบผลของการบ่มด้วยน้ำและอโตเคลฟ ดังแสดงในรูปที่ 12

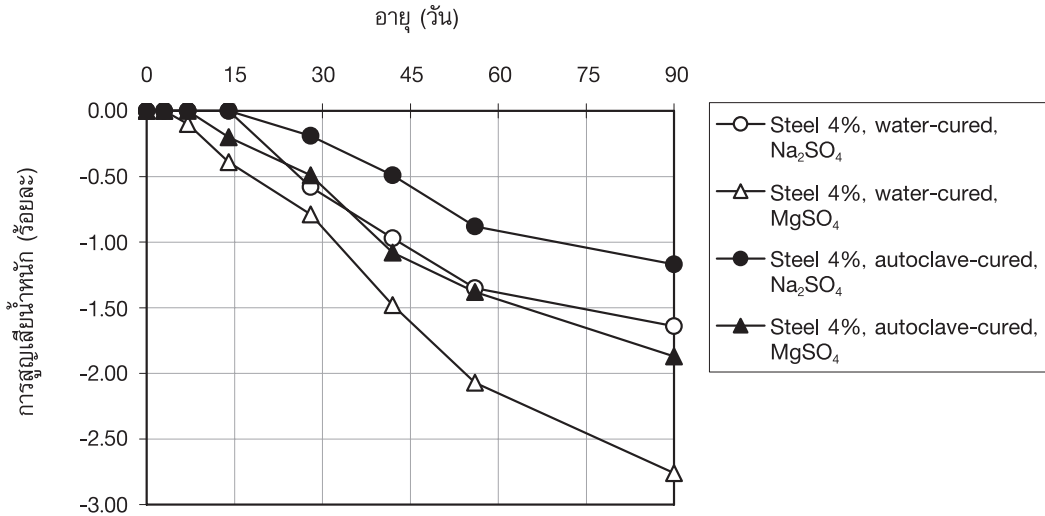


(ก) RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยน้ำ



(ข) RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยอโตเคลฟ

รูปที่ 11 การพัฒนากำลังอัดของ RPC ภายใต้การบ่มด้วยน้ำและอโตเคลฟเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ 12 การสูญเสียน้ำหนักของ RPC ภายใต้การบ่มด้วยน้ำและอโตเคลฟเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

4. สรุปผล

4.1 Reactive Powder Concrete (RPC) ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 2.5 ปริมาณซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 0.8 และปริมาณเส้นใยเหล็กร้อยละ 4.0 โดยปริมาตรปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดถึง 1,601 กก/ซม² โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของ RPC ภายใต้การบ่มด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และบ่มด้วยอโตเคลฟที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1.7 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำมาบ่มต่อในน้ำจนครบอายุทดสอบ พบว่า การพัฒนากำลังอัดของ RPC เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งสองวิธีการบ่ม โดยที่อายุ 91 วัน RPC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1752 และ 2159 กก/ซม² สำหรับการบ่มด้วยน้ำและบ่มด้วยอโตเคลฟตามลำดับ

4.2 ค่าการหดตัวแบบแห้งและแบบอโตเจเนียสของ RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยน้ำและอโตเคลฟมีอัตราค่าสูงในช่วง 56 วันแรก จากนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง

4.3 RPC ที่ผ่านการบ่มด้วยอโตเคลฟมีค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตน้อยกว่า RPC ที่บ่มด้วยน้ำ ในขณะที่การสูญเสียกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักของ RPC ที่แช่ใน

สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าสูงกว่าตัวอย่างซึ่งแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตทั้งสองวิธีการบ่ม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาเลขที่ RDG5350003 บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนวิจัยเพิ่มเติมและการทดสอบหาลงค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุงานวิจัย สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

1. Collepari S., L. Coppola, R. Troli e M. Collepari, 1997, "Mechanical, properties of modified reactive powder concrete", *Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on "Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete"*, SP-173, pp. 1-21.
2. Collepari S., S.Monosi, G. Pignoloni, R. Troli and M. Collepari, 2000, "Modified reactive powder concrete with artificial aggregate", *Proceedings of Sixth CANMET/ACI International Conference on*

Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Nice, France, 10-13 October 2000, pp. 447-459.

3. Coppola L., R. Troli, A. Borsoi, P. Zaffaroni and M. Collepardi, 1997, "Influence of superplasticizer type on the compressive strength of RPM", *Proceedings of Fifth CANMET/ACI International Conference on "Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete"*, Roma, 7-10 October, SP 173, pp. 512-536.

4. Behloul M., Bernieer G., and Cheyrezezy M., 1996, "Tensile behavior of reactive powder concrete (RPC)", *4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, Paris, pp. 1343-1349.

5. Richard, P. and Cheyrezy, M.H., 1994, "Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, Concrete Technology: Past, Present, and Future", *Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium*, ACI SP-144, S. Francisco, pp. 507-518. Editor: P.K. Mehta.

6. Coppola L., T. Cerulli, R. Troli, and M. Collepardi, 1996, "The influence of raw materials on performance of reactive powder concrete", *Proceedings of International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, Florianopolis, Brasil, pp. 502-503.

7. Piere Y. Blais and Marco Couture, 1999, "Precast, prestressed pedestrian bridge-world's first reactive powder concrete structure", *PCI Journal*, September-October, pp. 61-71.

8. Jin Wen-yu, An Ming-zhe, Yan Gui-ping, and Wang Jun-min, 2004, "Study on reactive powder concrete used in sidewalk system of the Qinghai-Tibet Railway Bridge", *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, pp. 333-338.

9. Chatveera, B., Kongsaktragoon, T., and Makul, N., 2008, "Basic properties of reactive powder concrete", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 31, pp. 177-189. (In Thai)

10. American Society for Testing and Materials, 2009, "ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.01 Cement; Lime; Gypsum.

11. American Society for Testing and Materials, 2011, "ASTM C1240 Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

12. American Society for Testing and Materials, 2011, "ASTM C494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

13. American Society for Testing and Materials, 2011, "ASTM C305 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.01 Cement; Lime; Gypsum.

14. American Society for Testing and Materials, 2011, "ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

15. American Society for Testing and Materials, 2009, "ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

16. American Society for Testing and Materials,

2011, "ASTM C496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

17. American Society for Testing and Materials, 2010, "ASTM C78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

18. American Society for Testing and Materials, 2010, "ASTM C469 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete Compression", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

19. American Society for Testing and Materials, 2009, "ASTM C596 Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.01 Cement; Lime; Gypsum.

20. American Society for Testing and Materials, 2010, "ASTM C1012 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.01 Cement; Lime; Gypsum.

21. American Society for Testing and Materials, 2010, "ASTM C490 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete", *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.01 Cement; Lime; Gypsum.

