



การพัฒนาวัสดุผสมพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดา-อีพ็อกซีเรซิน สำหรับประยุกต์ใช้เพื่องานก่อสร้างอาคาร The Development of Ordinary Portland Cement – Epoxy Resin For Building Construction Applications

บวรกิตติ เนคมานุรักษ์^{1*}, จุฬารัตน์ เอี่ยมสมย์¹, ภัทร์ สุขแสน²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 73170

² ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร 73000

*E-mail: bawornkit.nek@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

พอร์ทแลนด์ซีเมนต์ถือว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากต่อการก่อสร้างอาคาร แต่จากข้อจำกัดบางประการของพอร์ทแลนด์ซีเมนต์จึงทำให้มีแนวคิดในการนำวัสดุพอลิเมอร์เข้ามาสร้างเป็นวัสดุผสมเพื่อเพิ่มศักยภาพการใช้งานของพอร์ทแลนด์ซีเมนต์ โดยโครงการวิจัยนี้มุ่งศึกษาระบบผสมระหว่างพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดาและอีพ็อกซีเรซิน โดยที่ระบบอีพ็อกซีมีระดับการแทนที่ของอีพ็อกซีลงในซีเมนต์ 10-40 wt% กระบวนการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานจะทำภายใต้สภาวะปกติในห้องปฏิบัติการ ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้มีขนาด 50×50×50 มม.³ ถูกบ่มเป็นระยะเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน ในการศึกษาความต้านทานต่อแรงกดอัดพบว่าระบบผสมระหว่างพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดาและอีพ็อกซีเรซินในระดับการแทนที่ 40 wt% มีค่าความต้านทานต่อแรงกดอัดมากที่สุด เป็นผลมาจากสมบัติด้านความเหนียวของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมอีพ็อกซีลงในซีเมนต์ส่งผลต่อการเกิดไฮเดรชันของซีเมนต์

คำสำคัญ: พอร์ทแลนด์ซีเมนต์, อีพ็อกซี เรซิน, วัสดุผสม

Abstract

Portland cement is a very important material in building construction however it possesses limitations in some applications. Thus, the use of polymeric materials would give an important role in increasing the efficiency of Portland cement. This research aimed to study the mixture between Ordinary Portland Cement (OPC) and epoxy resin using water-soluble hardeners as curing agents. The degree of substituting epoxy in cement was varied in the range of 10 to 40 wt%. Mixing and forming process were carried out under ambient conditions in the laboratory room. The samples were form in the size of 50×50×50 mm³ and they were hydrated for 7, 14, 28 and 60 days. The compressive strength was investigated by compression test. The results showed that the mixture between Ordinary Portland Cement and 40 wt% epoxy resin gave the highest compressive strength, as a result of toughening effect of the polymer phase. Moreover, the adding of epoxy resin into cement affect the hydration of cement.

Keywords: Portland Cement, Epoxy Resin, Composite Materials



1. ที่มาและความสำคัญ

พอร์ทแลนด์ซีเมนต์ถือว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง เนื่องจากถูกนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีต โดยข้อดีของพอร์ทแลนด์ซีเมนต์ คือ มีความแข็งแรงสูง สามารถทนแรงกดอัดหรือรับน้ำหนักได้ดี ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย และดูแลรักษาง่าย แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานพอร์ทแลนด์ซีเมนต์ก็ยังคงมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายประการ เนื่องจากเป็นวัสดุประเภทเซรามิกเนื้อพื้น จึงข้อด้อยในสมบัติเชิงกลของวัสดุเซรามิก คือ มีความเปราะ หรือมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย [1] ดังนั้น เมื่อเกิดแผ่นดินไหว หรือมีถ่ายเทพลังงานในรูปของการสั่นสะเทือนจึงก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างที่ใช้วัสดุประเภทดังกล่าวได้โดยง่าย

ในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้มีความยืดหยุ่น สามารถรองรับการถ่ายเทพลังงานในปริมาณที่มากขึ้นนั้น วัสดุพอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุที่มีความความยืดหยุ่นสูง ซึ่งสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านโครงสร้าง การผลิต และสภาวะที่ใช้งาน โดยในปัจจุบันได้มีการนำพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตบางชนิด เช่น อีพอกซี มาใช้เป็นวัสดุเชื่อมติด หรือซ่อมแซมรอยแตกร้าวของงานก่อสร้างคอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์ [2-4] ทั้งนี้ในระบบที่มีการผสมอีพอกซีเรซินลงในซีเมนต์มอร์ตาร์นั้น จากงานวิจัยของ Rahman และ Islam [5] พบว่าเมื่อมีการเติมอีพอกซีเรซินในซีเมนต์มอร์ตาร์ ทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้การเติมอีพอกซีเรซินยังทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน การดูดซึมน้ำ รูพรุน และการขยายตัวทางความร้อน ของมอร์ตาร์ลดลง

การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของอีพอกซีทั่วไปจะเกิดขึ้นระหว่างเรซินและตัวเชื่อมแข็ง [6] โดยไม่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย แต่ในการผสมซีเมนต์นั้น น้ำเป็นตัวทำละลายที่สำคัญเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ [7] แต่ในปัจจุบันมีการผลิตสารตั้งต้นของอีพอกซีเรซินบางชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในตัวกลางที่เป็นน้ำได้ จึงมีความเป็นไปได้ในการนำพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตชนิดดังกล่าวเข้ามาผสมกับซีเมนต์เพื่อสร้างเป็นวัสดุชนิดใหม่เพื่อใช้ในการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีโอกาสได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือน เพื่อลดและลดความเสียหายที่เกิดขึ้น รวมทั้งสร้างโอกาสให้ผู้อาศัยสามารถออกจากอาคารปลูกสร้างในขณะเกิดภัยพิบัติได้อย่างปลอดภัย โครงการวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นและมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดาโดยใช้ตัวเชื่อมแข็งของอีพอกซีเรซินที่สามารถละลายน้ำได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่เพื่อใช้งานก่อสร้างอาคารต่อไปในอนาคต

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุ

ในงานวิจัยใช้วัสดุและสารเคมีที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ พอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดาตราอินทรีรี่ ของบริษัทปูนซีเมนต์-นครหลวง จำกัด (มหาชน) อีพอกซีเรซิน จากบริษัท อติทยา เบอร์ล่า เคมีคัลส์ จำกัด และสารเชื่อมแข็งชนิดละลายน้ำ จากบริษัทอติทยา เบอร์ล่า เคมีคัลส์ จำกัด

2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลอง ทำโดยการผสมซีเมนต์ น้ำ อีพอกซีเรซิน และสารเชื่อมแข็งชนิดละลายน้ำ เข้าด้วยกัน ด้วยการกวนด้วยมือ โดยปรับอัตราส่วนการแทนที่ของอีพอกซีเรซินในซีเมนต์เป็น 10 wt%, 20 wt%, 30 wt% และ 40 wt% ตามลำดับ ดังแสดงอัตราส่วนการผสมในตารางที่ 1 และหล่อขึ้นเป็นชิ้นงานทดสอบขนาด 50x50x50 มม.3 โดยทำการบ่มชิ้นงานภายใต้สภาวะปกติในห้องปฏิบัติการตามระยะเวลา 7 วัน, 14 วัน, 28 วัน และ 60 วัน ลำดับ โดยนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกและการเกิดเฟสอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) และทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงกดอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109-87 [8] ด้วยเครื่องทดสอบแรงกดอัด

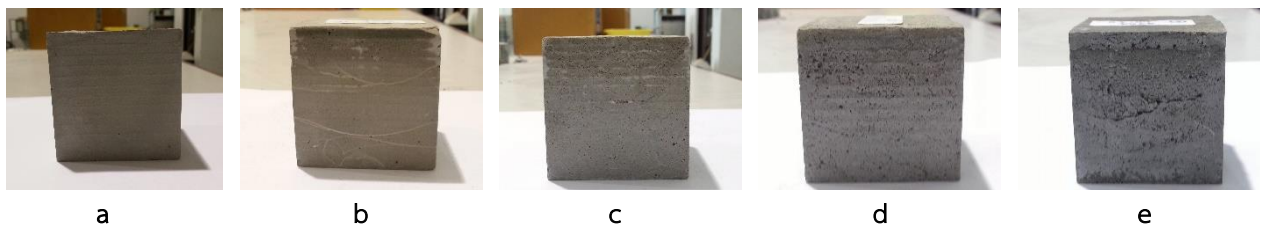
ตารางที่ 1 ตัวอย่างอัตราส่วนในการเตรียมวัสดุผสมซีเมนต์-อีพ็อกซีเรซิน

ระดับการแทนที่	พอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดา (กรัม)	ระบบอีพ็อกซี (กรัม)	
		อีพ็อกซีเรซิน (กรัม)	ตัวเชื่อมแข็ง (กรัม)
Cement-10% Epoxy Resin	60	3.18	3.49
Cement-20% Epoxy Resin	60	7.14	7.86
Cement-30% Epoxy Resin	60	12.2	13.4
Cement-40% Epoxy Resin	60	19.1	21.0

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะของซีเมนต์และวัสดุผสมซีเมนต์-อีพ็อกซี

ซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากระบบผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดา โดยผ่านการบ่มเป็นเวลา 60 วัน แสดงดังรูปที่ 1 โดยพบว่า การผสมอีพ็อกซีในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เนื้อซีเมนต์เพสต์มีลักษณะร่วน และมีฟองอากาศแทรกตัวอยู่มากขึ้น ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้มีลักษณะพื้นผิวขรุขระมากขึ้นจากฟองอากาศที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อซีเมนต์และบริเวณผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างซีเมนต์และวัสดุผสมซีเมนต์-อีพ็อกซีเรซิน โดยที่ a คือ ชิ้นงานตัวอย่างซีเมนต์ (Cement)

b คือ ชิ้นงานตัวอย่างวัสดุผสมซีเมนต์-10%อีพ็อกซีเรซิน (Cement-10% Epoxy Resin)

c คือ ชิ้นงานตัวอย่างวัสดุผสมซีเมนต์-20%อีพ็อกซีเรซิน (Cement-20% Epoxy Resin)

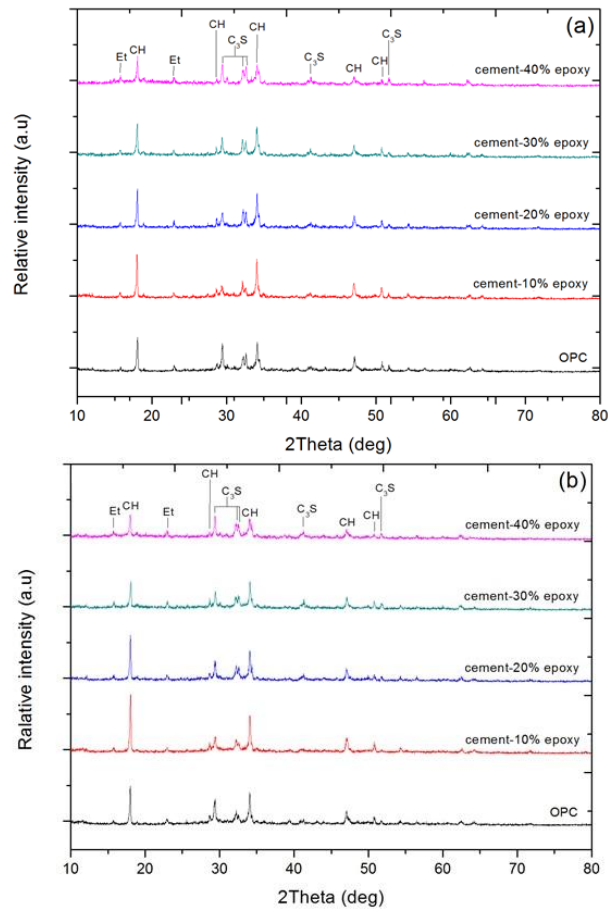
d คือ ชิ้นงานตัวอย่างวัสดุผสมซีเมนต์-30%อีพ็อกซีเรซิน (Cement-30% Epoxy Resin)

e คือ ชิ้นงานตัวอย่างวัสดุผสมซีเมนต์-40%อีพ็อกซีเรซิน (Cement-40% Epoxy Resin)

ทั้งนี้ในด้านการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ จากการสังเกตในการทดลองพบว่าสามารถเกิดขึ้นหลังจากการผสมและเทลงแม่แบบ โดยพบว่า พอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดา หรือ Ordinary Portland Cement (OPC) และระบบซีเมนต์ผสมอีพ็อกซีสามารถเกิดการก่อตัวกลายสภาพเป็นของแข็งได้เมื่อครบเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการเทหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน

3.3 โครงสร้างผลึกและเฟสของซีเมนต์และวัสดุผสมซีเมนต์-อีพ็อกซี

จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของชิ้นงานตัวอย่างซีเมนต์และวัสดุผสมซีเมนต์-อีพ็อกซีเรซิน ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน และ 60 วัน ด้วยเทคนิค XRD ได้ผลการตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 XRD Patterns ของ Ordinary Portland Cement (OPC), Cement-10% Epoxy Resin, Cement-20% Epoxy Resin, Cement-30% Epoxy Resin และ Cement-40% Epoxy Resin ที่มีระยะเวลาการบ่ม (a) 7 วัน และ (b) 60 วัน

รูปที่ 2 แสดง XRD patterns ของ OPC, Cement-10% Epoxy Resin, Cement-20% Epoxy Resin, Cement-30% Epoxy Resin และ Cement-40% Epoxy Resin พบว่าที่ตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 18.08° , 28.69° , 34.11° , 47.14° และ 50.79° เป็นตำแหน่งพิกที่แสดงถึงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (สัญลักษณ์ CH ในรูปที่ 2) ตาม JCPDS 061-0441 [9] ตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 29.41° , 29.43° , 31.87° , 32.39° , 41.39° และ 51.06° เป็นตำแหน่งพิกที่แสดงถึงไตรแคลเซียมซิลิเกต (สัญลักษณ์ C_3S ในรูปที่ 2) ตาม JCPDS 061-0406 [10] และตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 15.79° และ 22.95° เป็นตำแหน่งพิกที่แสดงถึงเอ็ทริงไกต์ (สัญลักษณ์ Et ในรูปที่ 2) ตาม JCPDS 9-414 [11] นอกจากตำแหน่งของพิกดังกล่าวแล้ว อีกหนึ่งผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งไม่สามารถเห็นตำแหน่งพิกได้ชัดเจน เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความเป็น semi-crystalline ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการศึกษาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อย่างชัดเจนด้วยเทคนิค X-ray Diffraction

จากรูปที่ 2 (a) และ (b) พบว่า XRD patterns ของ OPC และ Cement-10% Epoxy Resin, Cement-20% Epoxy Resin, Cement-30% Epoxy Resin และ Cement-40% Epoxy Resin มีความคล้ายคลึงกัน ทั้งนี้เมื่อระดับการแทนที่ของอีพ็อกซีที่เป็น 10 wt% ความเข้มของพิกตำแหน่ง 2-Theta ที่ 18.08° ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบ OPC แต่เมื่อระดับการแทนที่ของอีพ็อกซีมากกว่า 10 wt% ความเข้มของพิกแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับการแทนที่ของอีพ็อกซี 10 wt% ความเข้มของพิกตำแหน่ง 2-Theta ที่ 31.87° และ 32.39° ของไตรแคลเซียมซิลิเกตมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อระดับการแทนที่ของ

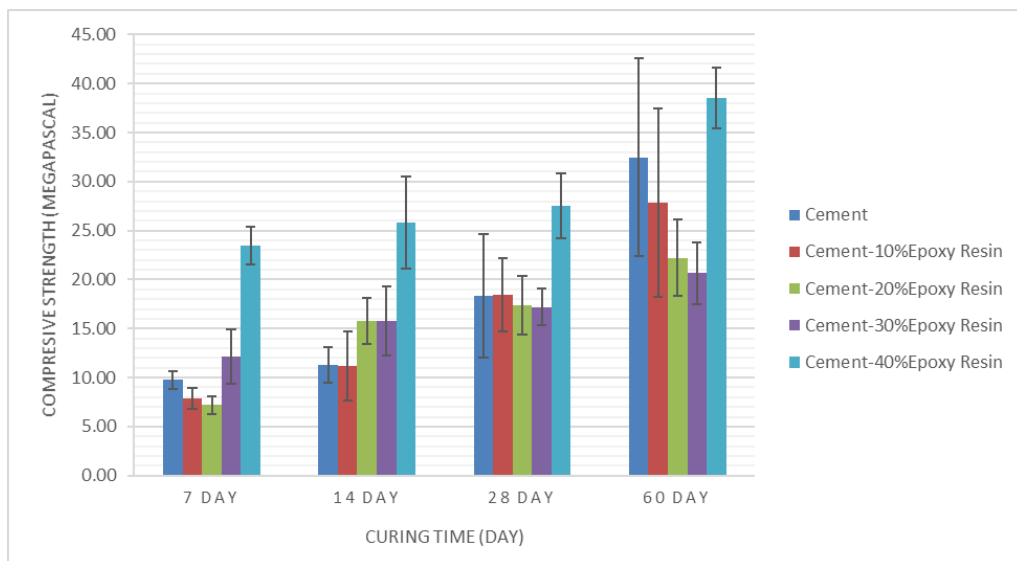


อีพ็อกซีมากกว่า 10 wt% ความเข้มของพีคไครสตัลเคลเซียมซิลิเกตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มของพีคดังกล่าวสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนใน XRD patterns ของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะเวลาการบ่ม 60 วัน

การเปลี่ยนแปลงความเข้มของพีคดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อระดับการแทนที่ของอีพ็อกซีเพิ่มขึ้นมากกว่า 10 wt% ซีเมนต์เฟสจะมีปริมาณเฟสเคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงและมีปริมาณเฟสไครสตัลเคลเซียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟสที่เกิดขึ้น คาดว่าเกิดจากการแทนที่ของอีพ็อกซีที่มากขึ้นจะส่งผลให้ระบบซีเมนต์เกิดไฮเดรชันได้น้อยลงหรือเกิดได้ยากขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของเฟสอีพ็อกซีในเฟสของซีเมนต์เฟสไปขัดขวางการเชื่อมต่อของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ โดยสังเกตได้จากลักษณะชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุผสมซีเมนต์-อีพ็อกซีเรซิน มีลักษณะร่วน และมีฟองอากาศ รวมทั้งในขณะการหล่อขึ้นรูปและการบ่มพบว่ามีน้ำแยกตัวอยู่บนผิวหน้า ซึ่งน้ำที่แยกตัวอยู่ที่ผิวหน้านี้อาจทำให้น้ำในระบบซีเมนต์ที่ใช้สำหรับการเกิดไฮเดรชันมีน้อยลง

3.3 สมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงกดอัด

การทดสอบความต้านทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานตัวอย่างเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109-87^[21] โดยทำการทดสอบชิ้นงานพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดา และชิ้นงานซีเมนต์ผสมอีพ็อกซีเรซิน ที่ระดับการแทนที่ของอีพ็อกซีเรซินในซีเมนต์ 10, 20, 30 และ 40 wt% อย่างละ 7 ชิ้นงาน และสำหรับทดสอบความต้านทานต่อแรงกดอัดของซีเมนต์ในงานวิศวกรรมโยธา ค่าที่ได้จะมีการกระจายตัวของข้อมูลในช่วงกว้าง เนื่องจากวัสดุมีความเปราะสูงและโครงสร้างภายในไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการหาค่าเฉลี่ยของชิ้นงานตัวอย่าง จะต้องนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาพิจารณาร่วมด้วย ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานตัวอย่างซีเมนต์และอีพ็อกซีผสมซีเมนต์ที่ระดับการแทนที่ของอีพ็อกซีต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการบ่มต่างกัน

สำหรับชิ้นงานตัวอย่างจากระบบพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดา และระบบที่มีการผสมระหว่างซีเมนต์และอีพ็อกซีเรซิน พบว่าระยะเวลาการบ่มมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานตัวอย่างมีแนวโน้มของค่าความต้านทานต่อแรงอัดสูงขึ้น ในทุก ๆ อัตราส่วนของการแทนที่อีพ็อกซีเรซินลงในซีเมนต์ ซึ่งเป็นเพราะเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นและมี



ความสามารถต้านทานแรงกดอัดได้สูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของระดับการแทนที่ของอีพ็อกซีเรซินต่อความทนทานต่อแรงกดอัด โดยพิจารณาค่าเฉลี่ยร่วมกับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าที่ระดับการเติมการแทนที่ของระบบอีพ็อกซีไม่เกิน 30 wt% ค่าความต้านทานต่อแรงกดอัดในแต่ละระยะเวลาการบ่มค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ที่ระดับการแทนที่ของระบบอีพ็อกซี 40 wt% ในระยะเวลาการบ่ม 60 วัน มีค่าความต้านทานแรงกดอัดที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงการส่งผลที่ดีของอีพ็อกซีเรซินต่อค่าความต้านทานต่อแรงกดอัด โดยจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกดอัดของอีพ็อกซีเรซินพบว่า มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยมากกว่า 40 MPa ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างมากที่ระดับการแทนที่ของระบบอีพ็อกซี 40 wt% นั้นเอง

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผสมระหว่างพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดาและอีพ็อกซีเรซิน โดยที่ระบบอีพ็อกซีใช้ตัวเชื่อมแข็งที่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งมีระดับการแทนที่ของอีพ็อกซี 10, 20, 30 และ 40 wt% และมีระยะเวลาการบ่มที่ 7, 14, 28 และ 60 วัน จากการทดสอบพบว่าชิ้นงานซีเมนต์ผสมอีพ็อกซีเรซิน มีเนื้อซีเมนต์ที่ร่วน และมีฟองอากาศ ทำให้มีลักษณะพื้นผิวชิ้นงานที่ไม่เรียบ นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นน้ำแยกตัวอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานระหว่างการบ่มชิ้นงาน ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าระบบผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและพอร์ทแลนด์ซีเมนต์แบบธรรมดาที่ระดับการแทนที่ของอีพ็อกซีที่มากขึ้นส่งผลให้ระบบซีเมนต์เกิดไฮเดรชันได้น้อยลง ทั้งนี้ในด้านความต้านทานต่อแรงกดอัดพบว่าที่ระดับการแทนที่ของระบบอีพ็อกซี 40 wt% ที่เวลาการบ่ม 60 วัน มีความต้านทานแรงกดอัดสูงชันอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับงานก่อสร้างต่อไปได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่พิจารณาอนุมัติเงินทุนวิจัยสำหรับการทำงานวิจัยในครั้งนี้ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบสมบัติเชิงกล ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างผลึก สารเคมี อุปกรณ์ต่าง ๆ และอำนวยความสะดวกด้านสถานที่ในการทำงานวิจัย และบริษัท อติดยา เบอร์ล่า เคมีคัลส์ จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์ด้านสารเคมี สำหรับการวิจัยครั้งนี้

บรรณานุกรม

- [1] William D. Callister, Jr., 2548, “วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน-Materials Science and Engineering,” แปลและเรียบเรียงโดย สุวันชัย พงษ์กิจสุวรรณ และคณะ. กรุงเทพฯ: ท็อป.
- [2] “อีพ็อกซีเรซิน ซ่อมคอนกรีต และปูน,” <http://www.pantipmarket.com/items/10973008> [20 สิงหาคม 2014].
- [3] “PC epoxy kit,” <http://www.polymer-coating.com/th/product/th/pek.php> [20 สิงหาคม 2014].
- [4] “Chemicals for concrete,” <http://www.roccothai.co.th/s0102/index.php?pgid=index> [20 สิงหาคม 2014].
- [5] M. M. Rahman, Islam, M. A., 2012, “Effect of epoxy resin on the intrinsic properties of masonry mortars,” Iranian Polymer Journal, Vol.21, 621-629.
- [6] “Epoxy Resins and Hardeners,” <http://www.westsystem.com/ss/epoxy-resins-and-hardeners> [2 กรกฎาคม 2016].



- [7] “How Concrete is Made,” <http://www.cement.org/cement-concrete-basics/how-concrete-is-made> [2 กรกฎาคม 2016].
- [8] “American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens),” Annual Book of ASTM Standards, 1988, Vol. 04.01.
- [9] “XRD database of $\text{Ca}(\text{OH})_2$,” http://rruff.info/repository/sample_child_record_powder/by_minerals/Portlandite_R070210-1_Powder_DIF_File_8084.txt [1 พฤษภาคม 2558].
- [10] Bergold, S.T., Neunhoeffler, F.G., Neubauer, J., 2013, “Quantitative analysis of C–S–H in hydrating alite pastes by in-situ XRD,” Cement and Concrete Research, Vol. 53, 119–126.
- [11] “XRD database of ettringite,” http://rruff.info/repository/sample_child_record_powder/by_minerals/Ettringite_R070208-9_Powder_DIF_File_11772.txt [1 พฤษภาคม 2558].