การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งและสภาวะจริง

บัญญัติ วารินทร์ไหล[1*] และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2]

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มม. โดยการบ่มน้ำ 28 วัน หลังจากครบเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างคอนกรีตไปสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2 สภาวะ คือ นำคอนกรีตเข้าตู้เร่งปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นเป็นเวลา 90 วัน และนำไปไว้ในสภาพแวดล้อมที่สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถนนเพชรเกษม กิโลเมตรที่ 52 อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม เป็นเวลา 90 180 และ 270 วัน ผลการศึกษาพบว่า การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่ง ซึ่งมีการสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้มข้นมากกว่า มีค่ามากกว่าสภาวะจริงที่สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้มข้นน้อยกว่า นอกจากนี้สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สุดท้ายสามารถทำนายความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะจริงจากความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งได้

คำสำคัญ : คอนกรีต, คาร์บอเนชั่น, สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น, สภาวะจริง, สภาวะเร่ง

---

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[*] ผู้ติดต่อ, อีเมล์: nowsurvey@hotmail.com รับเมื่อ 31 ตุลาคม 2560 ตอบรับเมื่อ 6 กุมภาพันธ์ 2561

Accelerated and Real Carbonation Situations of Concrete

Banyut Warinlai [1*] and Pitisan Krammart[2]

Abstract

This research aims to study the carbonation of concrete partially replaced fly ash, ground granulated blast-furnace slag (GGBS) and limestone powder in ordinary Portland cement (OPC). The concrete 100 x 100 x 100 mm specimens were used in this study. The concrete samples were cured in water for 28 days, and then exposed to carbon dioxide. Concrete specimens were divided in two parts. The first part was exposed to carbonation in carbonation catalyst chamber for 90 days. The second one was placed in the atmosphere exposed to carbon dioxide at kilometer No.52 on Phetkasem Road, Muang district, Nakhon Pathom Province for 90, 180 and 270 days. The results indicated that the carbonation of concrete with fly ash and concrete with GGBS was significantly higher than that of OPC concrete, while the carbonation of concrete with limestone powder was close to that of OPC concrete. Furthermore, the carbonation of concrete in carbonation catalyst chamber, having more carbon dioxide, was greater than that of concrete in atmosphere exposed. In addition, the carbonation coefficient of concrete with fly ash and concrete with GGBS was higher than that of OPC concrete, while the carbonation coefficient of concrete with limestone powder was nearly the same when compared to that with OPC concrete. Finally, the carbonation depth of concrete exposed to carbon dioxide in the real situation can predict from the depth of carbonation of concrete in accelerated situation.

Keywords: Concrete, Carbonation, Carbonation coefficient, Real situation, Accelerated situation

[1] Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhonpathom Rajabhat University.

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi.

[*] Corresponding author, E-mail: nowsurvey@hotmail.com Received 31 October 2017, Accepted 6 February 2018

1. บทนำ

หลักการออกแบบโครงสร้างที่ดี คือการออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบโดยใช้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต และค่าการยุบตัวของคอนกรีต แต่ถ้านำคอนกรีตไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน อายุของโครงสร้างจะไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง คอนกรีตอาจเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชั่น การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต และการเสื่อมสภาพจากคลอไรด์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในส่วนของคาร์บอเนชั่นที่เกิดในคอนกรีตมีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในเขตที่มีการจราจรหนาแน่น จะสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตดังสมการ $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ซึ่งทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้

นอกจากนี้ในปัจจุบันปัญหาที่ประเทศต่างๆ ทั่วโลกกำลังเผชิญอยู่ คือภาวะเรือนกระจก ซึ่งมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ ทำให้มีผลกระทบ ต่อภาวะโลกร้อนค่อนข้างมาก โดยประเทศไทยก็มีแนวโน้มปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นมากตามทิศทางการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมของประเทศ ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ โดยเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งหมดทั่วโลกเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ [1] ดังนั้นหากมีการผลิตปูนซีเมนต์ลดน้อยลงก็จะเป็นวิธีหนึ่งซึ่งลดก๊าซเรือนกระจกลงได้ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาต่างหาวิธีการลดการใช้ปูนซีเมนต์ นั่นก็คือการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ โดยมีการนำเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ซึ่งจัดเป็นวัสดุผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลและความคงทนของวัสดุประสานในระยะยาวได้ [2] อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน เพื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุประสานให้แน่ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ผสมร่วมในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตที่เผชิญตามสภาพแวดล้อมต่างๆ จากผลการวิจัยในอดีตพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น จากผลงานวิจัยในอดีตของ Roy et al [3] พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชั่น โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 ถึง 75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นสูง ส่วนในกรณีของ Khunthongkeaw et al [4] และ Atis et al [5] พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชั่น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ Fattuhi [6] ยังพบอีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงจะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นได้เร็วขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การนำเอาเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานร่วมด้วยผงหินปูน มาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนผสมในคอนกรีตที่เสื่อมสภาพจากสาเหตุของคาร์บอเนชั่น เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตดังกล่าวให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ตลอดจนหาความสัมพันธ์ของความลึกคาร์บอเนชั่นที่ได้จากสภาวะเร่งและสภาวะจริงให้มีความสอดคล้องกันเพื่อใช้ในทำนายความลึกคาร์บอเนชั่นที่เกิดขึ้นให้เหมาะสมกับการออกแบบในสถานที่ที่โครงสร้างได้รับผลกระทบในด้านความคงทนเกี่ยวกับคาร์บอเนชั่นต่อไป

2. ระเบียบวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุประสานซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน (ขนาดความละเอียดอนุภาคเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร) เป็นวัสดุประสานใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนมวลรวมใช้หินและทรายแม่น้ำสำหรับน้ำใช้น้ำประปา

2.2 วิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย 1) สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสานที่ใช้ ซึ่งได้แก่ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ความถ่วงจำเพาะ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ และ 2) การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน โดยความละเอียดโดยวิธีเบลนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 [7] ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [8] และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคใช้วิธี scanning electronic microscope (SEM) ส่วนองค์ประกอบทางเคมีใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

2.2.2 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต

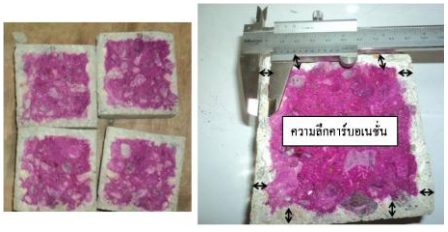
ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่ง โดยอบตัวอย่างคอนกรีตในตู้เร่งการเกิดคาร์บอเนชั่น และศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะจริง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก) การเตรียมตัวอย่างและการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่ง

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มม. เพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 856 [9] ตัวอย่างคอนกรีตหลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง ทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตในแบบโดยถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างไปบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากบ่มครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างดังกล่าวไปอบในตู้เร่งการเกิดคาร์บอเนชั่นดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีอุณหภูมิ 30 ± 5 °C โดยควบคุมก๊าซ

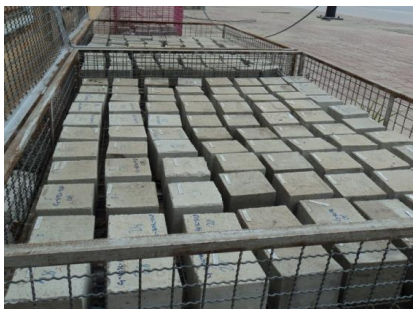
คาร์บอนไดออกไซด์ให้ถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ถึง 55 โดยระยะเวลาที่ตัวอย่างเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 90 วัน เมื่อครบอายุที่กำหนดนำไปทดสอบหาความลึกการเกิดคาร์บอเนชั่น มีขั้นตอนการทดสอบ โดยผ่าตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ที่ตัวอย่าง ซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอเนชั่น แต่ในส่วนที่เกิดคาร์บอเนชั่นตัวอย่างจะไม่มีสี ใช้เวอร์เนียร์วัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง (บริเวณที่เกิดคาร์บอเนชั่น) ทั้งหมด 8 ตำแหน่งต่อคอนกรีตแต่ละซีกดังแสดงในรูปที่ 2 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยความลึกคาร์-บอเนชั่น

รูปที่ 1 ตู้เร่งการเกิดคาร์บอเนชั่น



รูปที่ 2 การวัดความลึกคาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต

ข) การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะจริง ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มม. เพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะธรรมชาติจริง โดยตัวอย่างคอนกรีตหลังจากหล่อลงแบบ ทำการบ่มตัวอย่างในแบบ โดยถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างไปบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปวางไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สัมผัส (ถนนเพชรเกษม กิโลเมตรที่ 52 อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม) ดังแสดงในรูปที่ 3 แล้วทิ้งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 90 180 และ 270 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบหาความลึกคาร์บอเนชั่น



รูปที่ 3 การนำตัวอย่างคอนกรีตไปวางสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ถนนเพชรเกษม กม.ที่ 52 อ.เมือง จ.นครปฐม)

2.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบหาค่าการเกิดคาร์บอเนชั่น มีทั้งหมด 15 สัดส่วนผสม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ตลอดการศึกษา รายละเอียดได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

Sample	Mix Proportions (kg/m^3)						
	Cement	Fly Ash	Slag	Lime stone Powder	Sand	Rock	Water
C	332	-	-	-	970	1080	182
C-20FA	266	67	-	-	970	1080	182
C-40FA	200	133	-	-	970	1080	182
C-30SL	233	-	100	-	970	1080	182
C-50SL	166	-	166	-	970	1080	182
C-5LP	316	-	-	17	970	1080	182
C-10LP	299	-	-	34	970	1080	182
C-15FA-5LP	266	50	-	17	970	1080	182
C-35FA-5LP	200	117	-	17	970	1080	182
C-10FA-10LP	266	34	-	34	970	1080	182
C-30FA-10LP	200	100	-	34	970	1080	182
C-25SL-5LP	233	-	83	17	970	1080	182
C-45SL-5LP	166	-	150	17	970	1080	182
C-20SL-10LP	233	-	67	34	970	1080	182
C-40SL-10LP	166	-	133	34	970	1080	182

หมายเหตุ C หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 FA หมายถึง เถ้าลอย SL หมายถึง ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และ LP หมายถึง ผงหินปูน

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

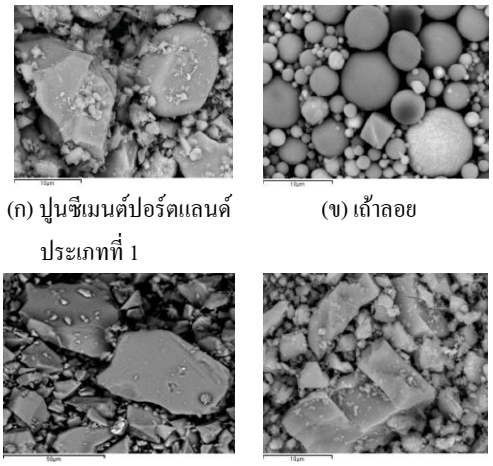
3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา ได้ผลการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนรูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยวิธี SEM ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ซึ่งเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างลักษณะของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าลอย กล่าวคือ ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่ ในขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและผิวค่อนข้างเรียบแต่มีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน ส่วนอนุภาคของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีลักษณะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายขนาดปนกันอยู่ สำหรับผงหินปูนนั้นมี

ลักษณะของอนุภาคเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระไม่เรียบโดยมี อนุภาคที่เล็กกว่า ลักษณะคล้ายกับกรณีของปูนซีเมนต์แต่มีขนาดของ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้

Chemical composition (%)	Cement	Fly Ash	Slag	Limestone Powder
SiO_2	19.50	35.71	34.06	0.45
Al_2O_3	4.97	20.44	16.27	0.05
Fe_2O_3	3.78	15.54	1.70	0.03
CaO	65.38	16.52	36.05	55.20
MgO	1.08	2.00	7.38	0.34
SO_3	2.16	4.26	2.16	<0.01
Na_2O	0.22	1.15	0.21	<0.01
K_2O	0.47	2.41	1.09	0.01
LOI	2.27	0.49	1.44	43.12
Free lime	1.00	1.71	-	-
Blaine Air Permeability (cm^2/g)	3,250	2,867	4,600	5,210
Specific Gravity	3.12	2.21	2.96	2.69



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ข) เถ้าลอย

(ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ง) ผงหินปูน

รูปที่ 4 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานโดยวิธี SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

3.2 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต

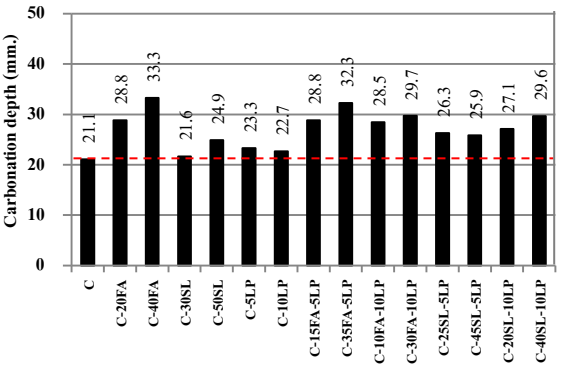
การศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งและสภาวะจริง รายละเอียดได้แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สภาวะของคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งและสภาวะจริง

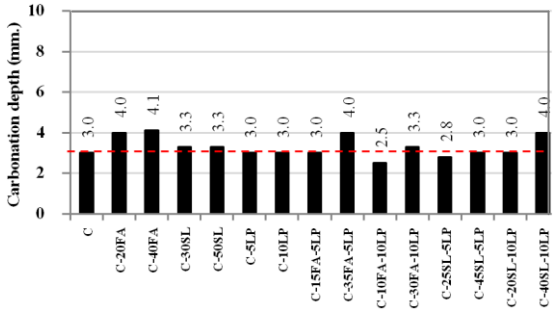
Factor	Situation	
	Accelerated	Real
Temparature (°C)	30	32
Rerative Humidity (%)	50	55
Carbondioxide concentration (ppm)	40,000	680

ผลของการเกิดคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งและสภาวะจริงของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แสดงดังรูปที่ 5 ถึง 8 โดยรูปที่ 5 แสดงการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 90 วัน ส่วนรูปที่ 6 ถึง 8 แสดงการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะจริงที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 90 180 และ 270 วัน ตามลำดับ พบว่า การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอย (ทั้งสภาวะเร่งและสภาวะจริง) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานได้ลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จึงทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นเร็วขึ้น ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่ไม่มากเท่ากับของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีคุณสมบัติเป็นทั้งวัสดุซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน จึงทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ไม่มากเท่ากับการใช้เถ้าลอย จึงทำให้การเกิดคาร์บอเนชั่นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอย [10] นอกจากนี้การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มมีค่าน้อยกว่า (โดยเฉพาะในสภาวะจริง) เมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ซึ่งเป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอก-ไซด์พร้อมทั้งผงหินปูนเป็นวัสดุเติมเต็มทำให้ผงหินปูนเข้าไปอุดช่องว่าง ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมเข้าไปได้ยากขึ้น สำหรับกรณีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนและผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ในสภาวะเร่งที่อายุ 90 วันนั้น การเกิดคาร์บอเนชั่นยังคงมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนและผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ในสภาวะจริงที่อายุ 90 วัน มีแนวโน้มว่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นกรณีแทนที่เถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มาก เมื่ออายุมากขึ้นเป็น 180 และ 270 วัน พบว่าการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตทั้งผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ก็คงยังให้ค่าที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

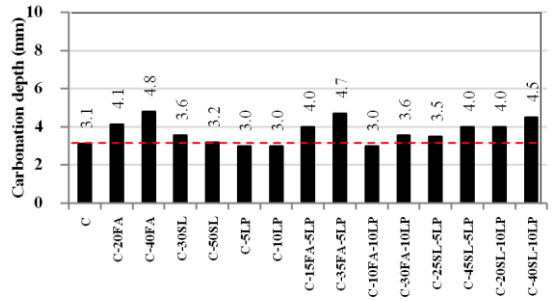
จากค่าการเกิดคาร์บอเนชั่นสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งและธรรมชาติจริงได้ดังรูปที่ 9 โดยมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน



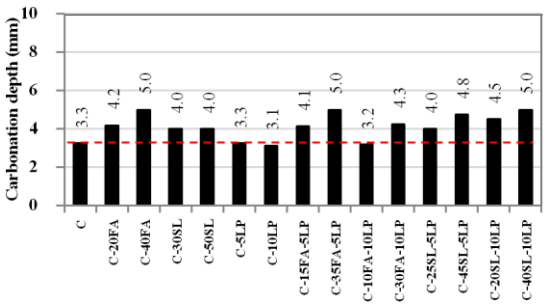
รูปที่ 5 ความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 90 วัน (ในสภาวะเร่ง)



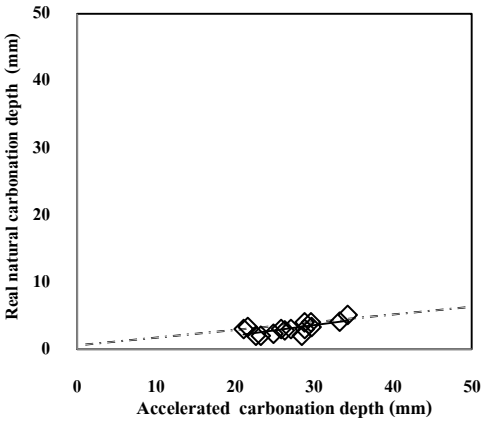
รูปที่ 6 ความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ระยะ เวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 90 วัน (ในสภาวะจริง)



รูปที่ 7 ความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 180 วัน (ในสภาวะจริง)



รูปที่ 8 ความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 270 วัน (ในสภาวะจริง)



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งและสภาวะจริง

อย่างไรก็ตามจากอายุของคอนกรีตที่ทดสอบและความลึกคาร์บอเนชั่นที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นได้จากสมการที่ (1) [3]

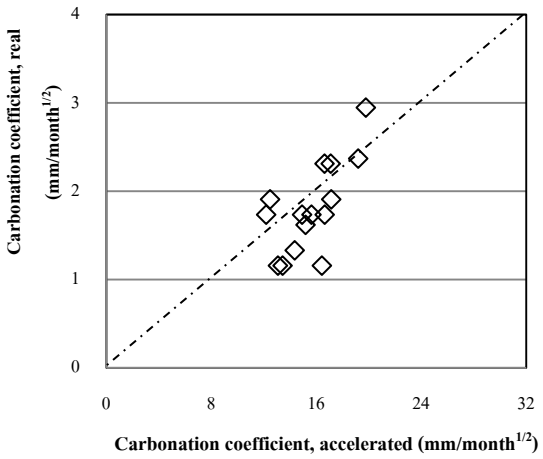
$$d = k\sqrt{t} \qquad (1)$$

โดยที่ d คือค่าความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.), t คือ อายุของคอนกรีตที่ทดสอบ (เดือน) และ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น (มม./เดือน$^{1/2}$)

ตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งและสภาวะจริง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งมีค่ามากกว่าของสภาวะจริง ทั้งนี้เพราะความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่างกัน (ในสภาวะเร่ง 40,000 ppm และในสภาวะจริง 680 ppm) ซึ่งสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งและสภาวะจริงได้ดังรูปที่ 10

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งและสภาวะจริง

Sample	Carbonation coefficient in accelerated situation (mm/ month$^{1/2}$)	Carbonation coefficient in real situation (mm/ month$^{1/2}$)
C	12.2	1.7
C-20FA	16.6	2.3
C-40FA	19.2	2.4
C-30SL	12.5	1.9
C-50SL	14.4	1.9
C-5LP	13.4	1.7
C-10LP	13.1	1.7
C-15FA-5LP	16.7	1.7
C-35FA-5LP	18.7	2.3
C-10FA-10LP	16.4	1.4
C-30FA-10LP	17.1	1.9
C-25SL-5LP	15.2	1.6
C-45SL-5LP	14.9	1.7
C-20SL-10LP	15.6	1.7
C-40SL-10LP	17.1	2.3

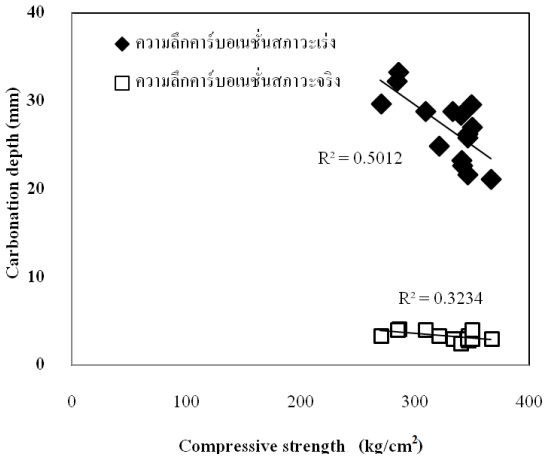


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งและสภาวะจริง

ในส่วนการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มม. ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [11] โดยตัวอย่างคอนกรีตหลังจากหล่อลงแบบ ทำการบ่มตัวอย่างในแบบ ถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำก้อนคอนกรีตไปบ่มน้ำ 28 วัน รอจนครบอายุที่กำหนด จึงนำไปทำการทดสอบกำลังอัดประลัย พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าผกผันกับความลึกคาร์บอเนชั่นทั้งในสภาวะเร่งและสภาวะจริงดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 11

ตารางที่ 5 ความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งและสภาวะจริงกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่บ่มน้ำอายุ 28 วัน

Sample	Carbonation depth in accelerated situation at 90 days (mm)	Carbonation depth in real situation at 90 days (mm)	Compressive Strength at 28 day (kg/cm^2)
C	21.1	3.0	367
C-20FA	28.8	4.0	309
C-40FA	33.3	4.1	286
C-30SL	21.6	3.3	346
C-50SL	24.9	3.3	321
C-5LP	23.3	3.0	340
C-10LP	22.7	3.0	341
C-15FA-5LP	28.8	3.0	333
C-35FA-5LP	32.3	4.0	284
C-10FA-10LP	28.5	2.5	340
C-30FA-10LP	29.7	3.3	270
C-25SL-5LP	26.3	2.8	346
C-45SL-5LP	25.9	3.0	346
C-20SL-10LP	27.1	3.0	350
C-40SL-10LP	29.6	4.0	349



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งและสภาวะจริงกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

3.3 การทำนายความลึกคาร์บอเนชั่น

จากความลึกคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งและสภาวะจริง พบว่าความลึกคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งมีค่ามากกว่าของในสภาวะจริง ซึ่งเป็นไปได้ว่าถ้านำข้อมูลทั้งสองสภาวะที่ศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นมาหาความสัมพันธ์เพื่อที่ทำนายความลึกคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งและสภาวะจริงให้มีความสอดคล้องกันนั้น หรือนำข้อมูลความลึกคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งไปหาความสัมพันธ์ให้ได้ความลึกคาร์บอเนชั่นในสภาวะจริง สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2) [4]

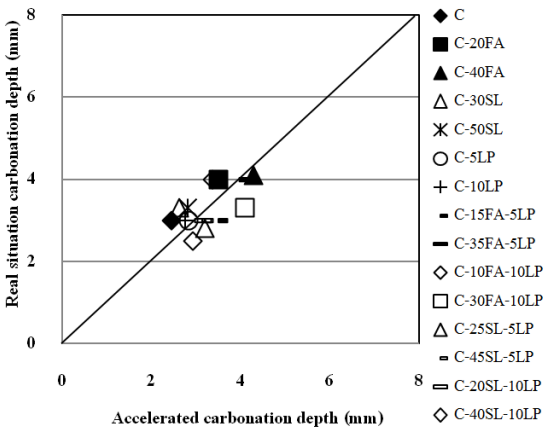
$$D_{n,t} = A.D_a.\sqrt{t} \qquad (2)$$

โดย $D_{n,t}$ คือความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมธรรมชาติ (มม.), t คือ อายุของคอนกรีตที่ทดสอบ (เดือน) D_a คือ ความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งในเวลาหนึ่งเดือน (มม.) และ A คือความสัมพันธ์ของความชันที่ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมดังสมการที่ (3) [3]

$$A = 0.22\frac{C^{0.56}}{RH} \qquad (3)$$

โดย RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมธรรมชาติ (%), C คือ ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสิ่งแวดล้อม (ppm)

จากสมการที่ (2) และ (3) สามารถทำนายความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะจริงจากความลึกคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งได้ดังรูปที่ 12 โดยสมการที่ (2) เป็นสมการหลักที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งผลที่จากสมการที่ (2) ย่อมเกิดจากปัจจัยหลายส่วนที่ทำให้ความลึกคาร์บอเนชั่นต่างกัน เช่น อัตราส่วนผสมของคอนกรีต ระดับความชื้นสัมพัทธ์และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสิ่งแวดล้อมรวมถึงระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยผลการทำนายความลึกคาร์บอเนชั่นที่ได้จากสมการที่ (2) มีความสอดคล้องกับความลึกคาร์บอเนชั่นในสภาวะจริง สามารถนำไปใช้เพื่อการออกแบบสำหรับความคงทนของคอนกรีตในอนาคตต่อไป



รูปที่ 12 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งและในสภาวะจริง

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้ 1) การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน 2) จากความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชั่นและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน พบว่า ความลึกคาร์บอเนชั่นแปรผกผันกับค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยความลึกคาร์บอเนชั่นมากกำลังอัดประลัยของคอนกรีตน้อย ถ้าความลึกคาร์บอเนชั่นน้อยกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมาก 3) สามารถทำนายความลึกคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะจริงจากความลึกคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งได้จากสมการ $D_{n,t} = A.D_a.\sqrt{t}$

5. กิตติกรรมประกาศ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] V.M. Malhotra, “Introduction: sustainable development and concrete technology”, ACI concrete International 24, 2002, pp. 22.

[2] P. Krammart and S. Tangtermsirikul, “Sulfate Resistance of Mortars with Limestone Powder”, Proceedings of the 3 Annual Concrete Conference, Thai Concrete Association, Thailand, 2007, pp. MAT 89-MAT 96. (in Thai)

[3] S.K. Roy, K.B. Poh and D.O. Northwood, “Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies”, Building and Environment 34, 1998, pp. 597-606.

[4] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul and T. Leelawat, “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete”, Construction and Building Materials 20, 2006, pp. 744-753.

[5] C.D. Atis, “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash”, Construction and Building Materials 17, 2003, pp. 147–152.

[6] N.I. Fattuhi, “Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period”, Materiaux et Constructions 19, 1986, pp. 131-136.

[7] American Society for Testing and Materials, ASTM C 204 – 00, “Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus”, Annual Book of ASTM Standards, 2000.

[8] American Society for Testing and Materials, ASTM C 188 - 95 “Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement”, Annual Book of ASTM Standards, 1995.

[9] American Society for Testing and Materials, ASTM C 856 – 04 “Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete”, Annual Book of ASTM Standards, 2004.

[10] P. Krammart and S. Jenjirapanya, “A Study on Properties of Cementitious Material Using Industrial Waste”, The Journal of Industrial Technology 12, 2016, pp.77-86.

[11] American Society for Testing and Materials, ASTM C 109 - 07 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) 1”, Annual Book of ASTM Standards, 2007.