วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 31, ฉบับที่ 3 ก.ค.–ก.ย. 2564
The Journal of KMUTNB., Vol. 31, No. 3, Jul.–Sep. 2021

บทความวิจัย

ค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูน

บัญญัติ วารินทร์ไหล*
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ปิติศานต์ กร้ำมาตร
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 3426 1065 อีเมล: nowsurvey@hotmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.008
รับเมื่อ 21 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 17 มิถุนายน 2563 ตอบรับเมื่อ 19 มิถุนายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 24 พฤษภาคม 2564
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูน ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วนที่อายุ 28 วัน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงกับของ OPC ล้วน นอกจากนี้ คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่า OPC ล้วน ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่แช่น้ำ 91 วัน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่แช่น้ำ 28 วัน สุดท้ายพบว่า การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มาก ขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนมีค่าสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ OPC ล้วน

คำสำคัญ: คอนกรีต คลอไรด์ คาร์บอเนชัน เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด ผงหินปูน

การอ้างอิงบทความ: บัญญัติ วารินทร์ไหล และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร, "ค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 3, หน้า 438–449, ก.ค.–ก.ย. 2564.

Research Article

Slump, Compressive Strength, Chloride Penetration Resistance and Carbonation of Concrete with Partial Replacement of Cement by Fly Ash, Ground Bottom Ash, Limestone Powder

Banyut Warinlai*
Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, Thailand
Pitisan Krammart
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 3426 1065, E–mail: nowsurvey@hotmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.008
Received 21 April 2020; Revised 17 June 2020; Accepted 19 June 2020; Published online: 24 May 2021
© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to study the slump, compressive strength, chloride penetration resistance and carbonation of concrete replaced by fly ash, Ground Bottom Ash (GBA), and limestone powder in Ordinary Portland Cement (OPC). The results showed that the slump of concrete with fly ash was higher than that of OPC concrete. On the other hand, the slump value of concrete with GBA and with limestone powder was smaller when compared with that of OPC concrete. The compressive strength of concrete with fly ash and GBA was less than that of OPC concrete at 28 days. Also, the compressive strength of concrete with limestone powder was close to that of OPC concrete. Moreover, the chloride penetration resistance of the concrete made with fly ash, GBA, and limestone powder was better than that of OPC concrete. The chloride penetration resistance of the concrete moist-cured for 91 days was higher than moist-cured for 28 days. Finally, the carbonation depth of concrete with limestone powder was similar to, or slightly higher than that of OPC concrete.Notably, the carbonation depth of concrete with GBA and with GBA incorporating limestone powder was higher when compared with OPC concrete.

Keywords: Concrete, Chloride, Carbonation, Fly Ash, Ground Bottom Ash, Limestone Powder

Please cite this article as: B. Warinlai and P. Krammart, "Slump, compressive strength, chloride penetration resistance and carbonation of concrete with partial replacement of cement by fly ash, ground bottom ash, limestone powder," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 3, pp. 438–449, Jul.–Sep. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

วัสดุคอนกรีตมีการใช้ในงานก่อสร้างในปัจจุบันค่อนข้างมาก มีคุณสมบัติรับแรงอัดได้ดี หาง่าย ราคาไม่แพง นำมาประกอบเป็นโครงสร้างต่างๆ เช่น อาคาร ถนน เขื่อน โดยใช้หลักการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้ได้โครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โดยปกติอายุการใช้งานของโครงสร้างแต่ละชนิดจะไม่เท่ากันโดยขึ้นอยู่กับแต่ละโครงสร้าง เช่น ขนาด สถานที่ที่โครงสร้างนั้นอยู่ และราคาของโครงสร้างนั้นๆ โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบโดยใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตและค่าการยุบตัวของคอนกรีต แต่ถ้านำคอนกรีตไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน อายุของโครงสร้างจะไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงคอนกรีตจะมีคุณสมบัติทางกล โดยเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อม ทั้งทางกายภาพ ทางเคมี เช่น การเสื่อมสภาพของคอนกรีต อาจมีสาเหตุมาจากคลอไรด์ คาร์บอเนชัน การกัดกร่อนโดยซัลเฟต

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยอิออนของคลอไรด์เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้วถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการเคลื่อนตัวของอิออนของคลอไรด์ที่เข้าไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลา สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานโครงสร้าง ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันอาจจะเกิดปัญหากัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างกัน สำหรับคาร์บอเนชันก็เช่นกันเป็นสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตสูญเสียความเป็นด่างจนถึงระดับวิกฤต ทำให้เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดสนิม เป็นหตุให้เกิดการแตกร้าวและวิบัติในที่สุด

เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนจัดเป็นวัสดุผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาวได้ [1] อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานของเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูน เพื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุประสานให้แน่ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ผสมร่วมในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตที่เผชิญตามสภาพแวดล้อมต่างๆ จากการสืบค้นงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีผลต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากซัลเฟตและคลอไรด์ได้ดี [2] นอกจากนี้พบว่า อัตราการเกิดคาร์บอเนชันในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปัจจัยด้านความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชัน โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50–75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอเนชันสูง [3] รวมถึงชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชัน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอเนชันได้เร็วขึ้น [4], [5] นอกจากนี้ยังพบอีกว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงจะทำให้เกิดคาร์บอเนชันได้เร็วขึ้น [6] ในส่วนของการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีต ยังทำให้ความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้นอีกด้วย [7] ลดการกัดกร่อนของซัลเฟต เพิ่มความทนทานและกำลังอัดประลัยในระยะยาว แต่มีข้อเสีย คือ มีการพัฒนากำลังอัดช้า

ในขณะที่ผงหินปูนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมสารปอซโซลานหลายชนิด โดยการวิจัยที่ผ่านมาไม่ว่าจะต่างประเทศหรือในประเทศไทยนั้น การนำเอาวัสดุดังกล่าวไม่ว่าจะเป็นเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียดหรือผงหินปูน มาใช้นั้นจะเป็นการนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน หรือเป็นส่วนหนึ่งของส่วนผสมคอนกรีตนั้น หรือถ้าแทนร่วมกันก็ไม่เกินสองชนิดของวัสดุดังกล่าวเพื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ ซึ่งถือว่ายังมีการนำมาใช้น้อย จึงทำให้คุณสมบัติบางประการของคอนกรีต

ด้อยลง ดังนั้น หากสามารถพัฒนาวัสดุดังกล่าวมาใช้ร่วมกันอาจเป็นสองหรือสามชนิด นอกเหนือจากการใช้เพียงชนิดเดียวดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งหากใช้วัสดุเหล่านี้อย่างเหมาะสมหรือนำมาใช้ร่วมกันก็น่าจะมีแนวโน้มที่สามารถพัฒนาหรือปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของคอนกรีตให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่อไป โดยเฉพาะด้านความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่คอนกรีตต้องเผชิญ

การวิจัยครั้งนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่การนำเอากากอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย รวมทั้งเถ้าก้นเตาบดละเอียด ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ร่วมด้วยผงหินปูน มาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนผสมในคอนกรีตที่ต้องเผชิญการเสื่อมสภาพจากคลอไรด์และคาร์บอเนชัน ตลอดจนคุณสมบัติด้านกำลังและการยุบตัว เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตดังกล่าวให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นต่อไป และเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบเพื่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลและในเมืองต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุประสานซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้เถ้าลอย (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ) เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน (ขนาดเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร) เป็นวัสดุประสานเพิ่มแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมวลรวมใช้หิน และทรายแม่น้ำ ส่วนน้ำใช้น้ำประปา

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย 1) สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ความถ่วงจำเพาะ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี 2) สมบัติของซีเมนต์และคอนกรีต ซึ่งได้แก่ ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และ 3) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน โดยความละเอียดโดยวิธีเบลนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 [8] ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [9] และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคใช้วิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) โดยในส่วนองค์ประกอบทางเคมีนั้น ใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

2.2.2 สมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

สำหรับสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน ประกอบด้วยค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143 [10] และ BS 1881-116 [11] ตามลำดับ ในส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตใช้ตัวอย่างขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร^3 จำนวน 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบ 1 วัน ทำการบ่มน้ำจนถึงเวลาทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน

2.2.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

1) การเตรียมแท่งตัวอย่างคอนกรีต

หล่อแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร หลังจากแกะแบบแล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำ 28 และ 91 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มให้นำออกมาเช็ดผิวคอนกรีตแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วตัดด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร

2) การเตรียมสารละลาย

สารละลายที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ตาร์ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความข้มข้น 0.3 โมลาร์ สำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เตรียมโดยใช้โซดียมคลอไรด์ 30 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัม ละลายในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 1,000 กรัม เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์

การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบ

เร่งของคอนกรีต (Rapid Chloride Permeability Test) ทดสอบตามมาตฐาน ASTM C 1202 [12] ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการประเมินความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร โดยมีหลักในการทดสอบ คือ ป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันคงที่ 60 VDC ระหว่างผิวหน้าทั้งสอง ทำการวัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างในการทดสอบในหน่วยของมิลลิแอมแปร์ ไว้ตลอดระยะเวลา 6 ชั่วโมง และอินทิเกรตเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นค่าแอมแปร์ - วินาที (Ampere - Second) ให้หน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb) ดังสมการที่ (1) [12]

$$Q = 900\ (I_0 + 2\ I_{60} + \ldots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (1)$$

โดยที่ Q คือ ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีต มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulomb)

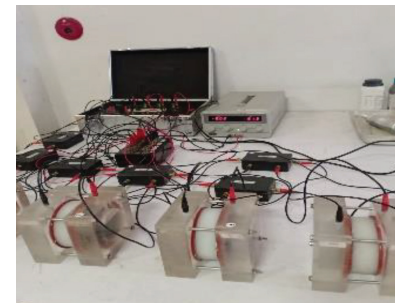
I_0 คือ แรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็น (Amperes) ทันทีหลังจากที่เกิดแรงดันไฟฟ้า

I_t คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์แต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

ซึ่งจำนวนคูลอมบ์ที่วัดได้สามารถใช้จำแนกคอนกรีตตามระดับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับการแทรกซึมคลอไรด์ พิจารณาจากผลประจุไฟฟ้าการเคลื่อนผ่าน (ASTM C 1202)

จำนวนประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่าน (คูลอมป์)	ระดับการแทรกซึมคลอไรด์
มากกว่า 4,000	สูง
2,000 ถึง 4,000	ปานกลาง
1,000 ถึง 2,000	ต่ำ
100 ถึง 1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่มีผล



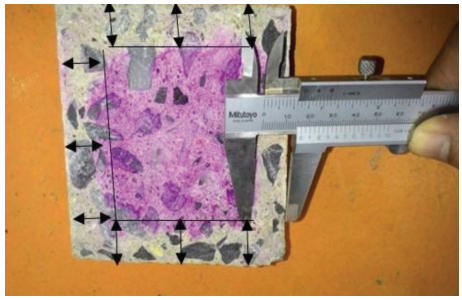
รูปที่ 1 เครื่องมือทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

2.2.4 การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีต

การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109-07 [13] และ ASTM C 856-04 [14] โดยตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร^3 หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน หลังจากบ่มตามระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างดังกล่าว ไปอบในตู้เร่งการเกิดคาร์บอเนชัน (อุณหภูมิ 30±5 องศาเซลเซียส) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ถึง 55 โดยระยะเวลาที่ตัวอย่างเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 วัน และ 91 วัน เมื่อครบอายุที่กำหนด นำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชัน โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ที่ตัวอย่าง ซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอเนชัน แต่ในส่วนที่เกิดคาร์บอเนชันตัวอย่างคอนกรีต จะไม่มีสีใช้เวอร์เนียร์วัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง (บริเวณที่เกิดคาร์บอเนชัน) ทั้งหมด 8 ตำแหน่งต่อตัวอย่างแต่ละซีก ดังแสดงในรูปที่ 2 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยค่าความลึกคาร์บอเนชัน

2.3 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหาค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย ความสามารถในการต้านทานคลอไรด์และการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีต โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดย



รูปที่ 2 การวัดความลึกคาร์บอเนชันของตัวอย่างคอนกรีต

น้ำหนัก ตลอดการศึกษา

3. ผลการทดลอง

3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา ได้ผลการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงใน

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการยุบตัว กำลังอัดประลัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ลัดส่วนผสม	ส่วนผสมของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)							หมายเหตุ
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	น้ำ (SSD)	
CC	395	-	-	-	795	964	214	ทดสอบคาร์บอเนชัน
CC-20FA	316	79	-	-	759	964	214	
CC-40FA	237	158	-	-	759	964	214	
CC-20BA	316	-	79	-	759	964	214	ทดสอบคาร์บอเนชัน
CC-30BA	277	-	118	-	759	964	214	ทดสอบคาร์บอเนชัน
CC-5LP	375	-	-	20	759	964	214	ทดสอบคาร์บอเนชัน
CC-10LP	356	-	-	39	759	964	214	ทดสอบคาร์บอเนชัน
CC-15FA-5LP	316	59	-	20	759	964	214	
CC-35FA-5LP	237	138	-	20	759	964	214	
CC-10FA-10LP	316	39	-	40	759	964	214	
CC-30FA-10LP	237	119	-	39	759	964	214	
CC-15BA-5LP	316	-	59	20	759	964	214	ทดสอบคาร์บอเนชัน
CC-25BA-5LP	277	-	98	39	759	964	214	ทดสอบคาร์บอเนชัน
CC-10BA-10LP	316	-	39	20	759	964	214	ทดสอบคาร์บอเนชัน
CC-20BA-10LP	277	-	79	20	759	964	214	ทดสอบคาร์บอเนชัน

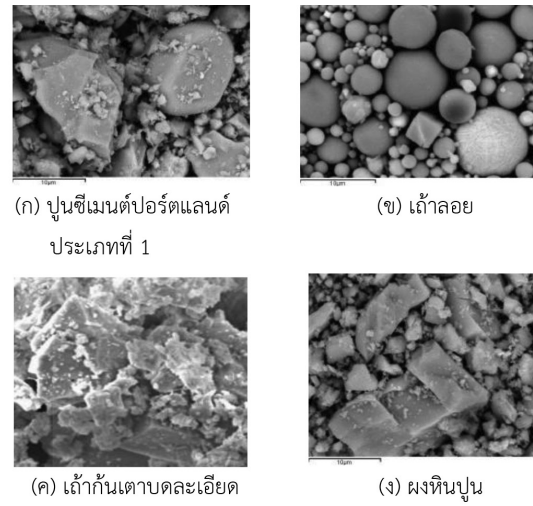
หมายเหตุ: 1. สัดส่วนผสมที่ทดสอบการเกิดคาร์บอเนชันมีทั้งหมด 9 สัดส่วนผสม ดังตารางข้างต้นช่องหมายเหตุ ส่วนการทดสอบการยุบตัว กำลังอัดประลัย ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ทดสอบทุกสัดส่วนผสม

2. CC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน CC-20FA หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 CC-5LP หมายถึง คอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ CC-20BA หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 เป็นต้น

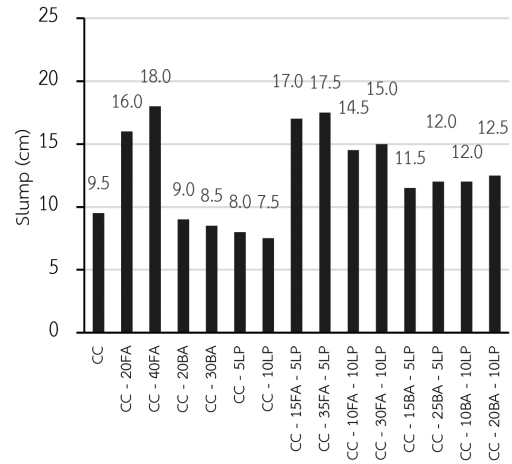
ตารางที่ 3 ส่วนรูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังของอนุภาคโดยวิธี SEM (Scanning Electron Microscope) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าลอย กล่าวคือ ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่ ในขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมละผิวค่อนข้างเรียบ แต่มีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน สำหรับผงหินปูนและเถ้าก้นเตาบดละเอียดนั้น มีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระไม่เรียบคล้ายกับกรณีของปูนซีเมนต์แต่มีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน
SiO_2	19.50	35.71	41.35	0.45
Al_2O_3	4.97	20.44	20.11	0.05
Fe_2O_3	3.78	15.54	13.24	0.03
CaO	65.38	16.52	16.65	55.20
MgO	1.08	2.00	2.37	0.34
SO_3	2.16	4.26	2.68	<0.01
Na_2O	0.22	1.15	0.29	<0.01
K_2O	0.47	2.41	2.51	0.01
LOI	2.27	0.49	-	43.12
Free lime	1.00	1.71	-	-
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,250	2,867	-	5,210
ความถ่วงจำเพาะ	20.04	-	16.34	-
ร้อยละที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325	3.12	2.21	2.65	2.69


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ข) เถ้าลอย (ค) เถ้าก้นเตาบดละเอียด (ง) ผงหินปูน

รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานโดยวิธี SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

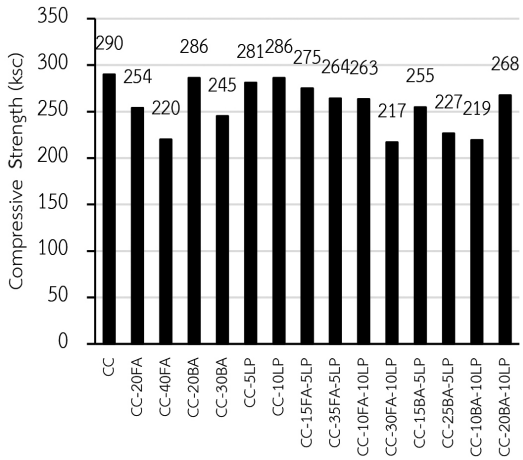


รูปที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

3.2 สมบัติของซีเมนต์และคอนกรีต

3.2.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ผลการศึกษาค่าการยุบตัวของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้ เนื่องจากอนุภาคที่มีลักษณะกลมซึ่งช่วยในการไหลลื่นส่งผลให้มีค่าการยุบตัวมากขึ้น ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าการยุบตัวน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ถึงแม้เมื่อทำการแทนที่ด้วยปริมาณที่มากขึ้นก็ตาม ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากขนาดอนุภาค



รูปที่ 5 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ที่ละเอียดของเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนที่ละเอียดกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่า ซึ่งการใช้ปริมาณน้ำที่เท่าเดิมย่อมทำให้ค่าการยุบตัวลดลง [15] นอกจากนี้พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีแนวโน้มใกล้เคียงและมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคที่เล็กของเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่ช่วยในการหล่อลื่นให้คอนกรีตเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนและคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนให้ค่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยเถ้าลอย และเถ้าก้นเตาบดละเอียดเพียงอย่างเดียว เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

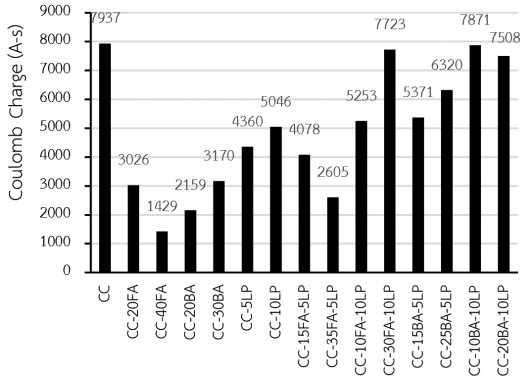
3.2.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

จากรูปที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (อัตราส่วนน้ำต่อปูนวัสดุประสานเท่ากับ 0.55) โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำที่อายุ 28 วัน พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้ เนื่องจากการผสมด้วยเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้อยรวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้า ส่วนเมื่อผสมด้วยผงหินปูนส่งผลให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงและใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อผสมผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง และผงหินปูนมีอนุภาคที่ค่อนข้างละเอียดจึงเป็นการช่วยในการเติมเต็มในช่องว่างของคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดประลัยมีค่าใกล้เคียงหรือลดลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการผสมกรณี 3 วัสดุประสานก็ให้ผลในแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วย 2 วัสดุประสานเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

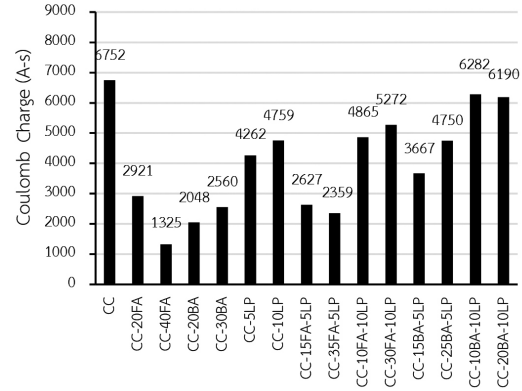
3.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

สำหรับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยได้ทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำที่อายุ 28 วัน และ 91 วัน เมื่อครบอายุการบ่มแล้ว นำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบค่าประจุไฟฟ้าที่วิ่งผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีต จากนั้นนำค่าที่ได้มาเทียบกับค่าตามมาตฐาน ASTM C 1202 โดยค่าจำนวนประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านมีค่ามากกว่า 4,000 คูลอมบ์ ถือว่าการแทรกซึมคลอไรด์ผ่านคอนกรีตมีค่าสูง ถ้าอยู่ในช่วง 2,000–4,000 คูลอมบ์ อยู่ในระดับปานกลาง และ 1,000–2,000 คูลอมบ์ อยู่ในระดับที่ต่ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีต โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบของชนิดวัสดุประสานที่มีต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตพบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าระดับการซึมผ่านที่น้อยกว่า (มีค่าปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านน้อยกว่า) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้ เพราะปฏิกิริยาปอซโซลาน และผลของความละเอียดของวัสดุดังกล่าวช่วยในการเติมเต็มช่องว่างใน



รูปที่ 6 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง คอนกรีต (บ่มน้ำ 28 วัน)



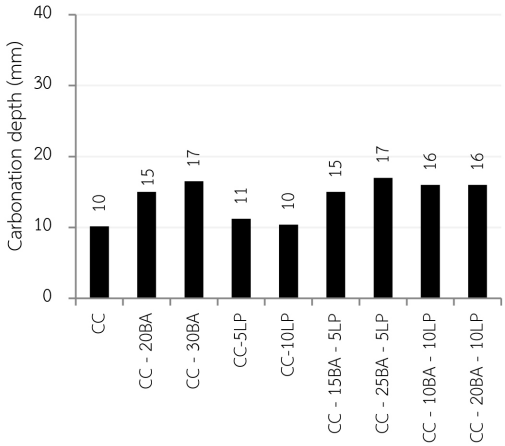
รูปที่ 7 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง คอนกรีต (บ่มน้ำ 91 วัน)

คอนกรีต จึงส่งผลให้ระดับการซึมผ่านน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้ยังพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีของการผสมด้วยเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตาบดละเอียดเพียงอย่างเดียว ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่อายุ 91 วัน จะมีค่าระดับการซึมผ่านที่น้อยกว่าคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ทั้งนี้ เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตที่อายุมากขึ้นจะมีความทึบน้ำและแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน จะมีการแทรกซึมของประจุไฟฟ้าที่ต่ำกว่าคอนกรีตโดยทั่วไปก็ตามที่อายุ 91 วัน คอนกรีตผสมส่วนใหญ่ดังกล่าวยังคงมีแนวโน้มค่าการแทรกซึมของประจุไฟฟ้าในเกณฑ์ที่สูงเมื่อเทียบกับเกณฑ์ตามมาตรฐานในตารางที่ 1

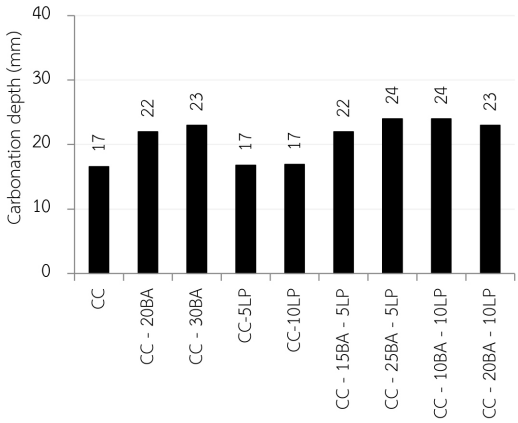
ในขณะเดียวกันถ้าพิจารณาระดับการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM 1202 ดังตารางที่ 1 พบว่ามีระดับการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ที่ระดับต่ำถึงปานกลาง ส่วนคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีระดับการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ที่ระดับสูง

3.3 การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีต

รูปที่ 8 แสดงความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน และ 91 วัน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน ก่อนเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่า ความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาบดละเอียด (ทั้งระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน และ 91 วัน) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้ เนื่องจากเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลง และการทำปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสารตั้งต้น ซึ่งทั้งสองกรณีต่างก็มีส่วนทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) [16] จึงทำให้ความลึกคาร์บอเนชันมากขึ้น ส่วนความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะอนุภาคของผงหินปูนที่เล็กเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในเพสต์ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปได้ยากขึ้น จึงทำให้ความลึกคาร์บอเนชันน้อยลง สำหรับกรณีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร่วมด้วยผงหินปูน และผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมด้วยผงหินปูน การเกิดคาร์บอเนชันมีทิศทางเดียวกันกับการผสมด้วยเถ้าลอย ผสมเถ้าก้นเตาบด

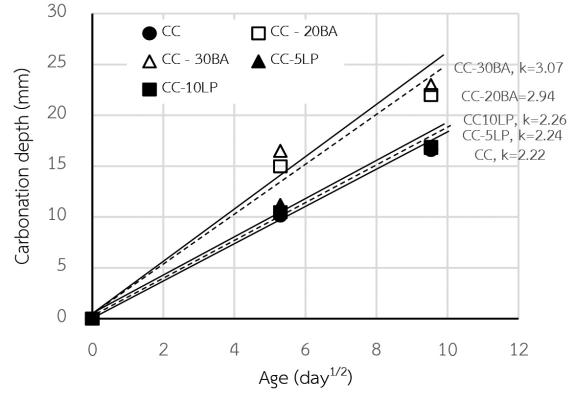


(ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน

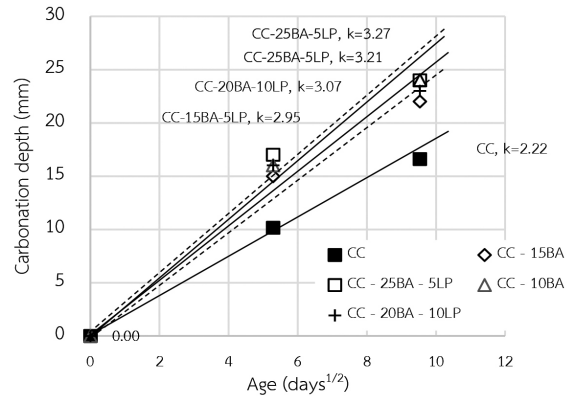


(ข) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

รูปที่ 8 การเกิดคาร์บอเนชันของตัวอย่างคอนกรีต



(ก) กรณีวัสดุประสาน 2 ชนิด



(ข) กรณีวัสดุประสาน 3 ชนิด

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชันและอายุ (วัน$^{1/2}$) ของคอนกรีต

ละเอียดและ/หรือผสมผงหินปูนเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุผลและสมบัติของวัสดุที่กล่าวมาแล้ว

อย่างไรก็ตาม จากอายุของและระยะการเกิดคาร์บอเนชันตัวอย่างคอนกรีต สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้จากสมการที่ (2) [17], [18]

$$d = k\sqrt{t} \qquad (2)$$

โดยที่ d คือ ค่าความลึกการเกิดคาร์บอเนชัน (มม.) t คือ เวลาอายุของคอนกรีต (วัน) และ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน (มม./ วัน$^{1/2}$)

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชันและอายุ (วัน$^{1/2}$) ของคอนกรีต เมื่อเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 วัน และ 91 วัน และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน *(k)* แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะแวดล้อมจริงได้

4. สรุป

จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน *(k)* ของคอนกรีต

สัดส่วนผสม	ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน, k (มม./วัน$^{1/2}$)
CC	2.22
CC-20BA	2.94
CC-30BA	3.07
CC-5LP	2.24
CC-10LP	2.26
CC-15BA-5LP	2.97
CC-25BA-5LP	3.27
CC-10BA-10LP	3.21
CC-20BA-10LP	3.07

ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ที่อายุ 28 วัน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ที่อายุ 28 วัน

ความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีความสามารถต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่แช่น้ำ 91 วัน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่แช่น้ำ 28 วัน

การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] P. krammart and S. Tangtermsirikul, “Sulfate resistance of mortars with limestone powder,” in *Proceedings the 3rd Annual Concrete Conference, Thailand Concrete Association,* 2010, pp. MAT 89–96 (in Thai).

[2] K. Charoenprom and W. Chalee, “Chloride penetration depth in concrete under marine exposure,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 21, no. 3, pp. 257–266, 2011 (in Thai).

[3] S.K.Roy, K.B.Poh, and D.O.Northwood, “Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies,” *Building and Environment,* vol. 34, no. 5, pp. 597–606, 1998.

[4] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, and T. Leelawat, “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 20, no. 9, pp. 744–753, 2006.

[5] C. D. Atis, “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash,” *Construction and Building Materials,* vol. 17, no. 3, pp. 147–152, 2003.

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

[7] B. Warinlai and P. krammart, “Basic properties

and carbonation of concrete replaced with different binders," *SWU Engineering Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 27–38, 2017 (in Thai).

[8] *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus*, ASTM C 204–00, 2000.

[9] *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, ASTM C 188–95, 1995.

[10] *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*, ASTM C 143/C 143M–98, 1998.

[11] *Part 108. Method of Making Test Cube from Fresh Concrete,* BS 1881, 1983.

[12] *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration,* ASTM C 1202–97, 1998.

[13] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)* 1, ASTM C 109–07, 2007.

[14] *Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete,* ASTM C 856–04, 2004.

[15] K. Tuntisukrarom, T. Choksawangnetr, P. Srihabutra, and R. Cheerarot, "Utilization of ground bottom ash in high performance concrete," *Research and Development Journal,* vol. 23, no. 1, pp. 40–47, 2012 (in Thai).

[16] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, "Strength and carbonation model of rice husk ash cement mortar with different fineness," *Journal of Materials in Civil Engineering,* vol. 22, no. 3, pp. 253–259, 2010.

[17] S. K. Roy, D. O. Northwood, and K. B. Poh, "Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building," *Construction and Building Materials,* vol.10, no. 4, pp. 267–272, 1996.

[18] L.J. Parrott, *A Review of Carbonation in Reinforced Concrete*. British: Cement Association, 1987.