บทความวิจัย

ระดับการต้านทานการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ทาสีในสภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐม

บัญญัติ วารินทร์ไหล*
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ปิติศานต์ กร้ำมาตร
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 3426 1065 อีเมล: nowsurvey@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.012
รับเมื่อ 30 กรกฎาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 30 กันยายน 2563 ตอบรับเมื่อ 2 ตุลาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 18 พฤศจิกายน 2564
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระดับการต้านทานการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ทาสีในสภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐม โดยคอนกรีตมี 3 ประเภท คือ คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ใช้สีน้ำอะคริลิกสำหรับทาภายนอกเคลือบผิวคอนกรีตแล้วทดสอบความลึกคาร์บอเนชันหลังจากสัมผัสสภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐม เป็นระยะเวลา 120, 210 และ 300 วัน ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วนที่อายุ 28 วัน ส่วนการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะเดียวกันคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนทาสีน้ำอะคริลิกช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้มากถึง 78% คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ทาสีน้ำอะคริลิกช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้มากถึง 71% และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ทาสีช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้มากถึง 70% เมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทาสี สุดท้ายสามารถคำนวณอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี จากคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐมได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอเนชันตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

คำสำคัญ: คอนกรีต คาร์บอเนชัน เถ้าลอย สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี

การอ้างอิงบทความ: บัญญัติ วารินทร์ไหล และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร, "ระดับการต้านทานการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ทาสีในสภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐม," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 687–699, ก.ค.–ก.ย. 2565.

Research Article

Evaluation of Carbonation Resistance of Paint Coated Concrete in Real Environment of Nakhon Pathom Province

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.2021.11.012
Received 30 July 2020; Revised 30 September 2020; Accepted 2 October 2020; Published online: 18 November 2021
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research is to study the carbonation resistance levels of painted concrete in the real environment of Nakhon Pathom province. Three types of concrete were investigated, i.e. concrete with ordinary Portland cement (OPC), and the one with 20% and 40% fly ash in Ordinary Portland Cement (OPC). Acrylic paints were used for exterior coatings on the concrete surface. The carbonation tests were performed after 120, 210, and 300 days of exposure to the real environment of Nakhon Pathom province. The study found that the compressive strength of concrete mixed with fly ash is less than that of the OPC at the age of 28 days. The carbonation of concrete mixed with fly ash was greater than that of the type 1 Portland cement. Meanwhile, the carbonation coefficient value of the Portland cement type 1 using water-based acrylic sealer was found to decrease by 78%. The carbonation coefficient values of the acrylic coated concrete with 20% and 40% fly ash mixture decrease by 71%, and 70% respectively, in comparison with the counterpart that has never been painted. Finally, the carbonation suppression ratio of paint (Rcs) from Portland type 1 cement concrete and fly ash mixed concrete under the real environment conditions of Nakhon Pathom province can be calculated. The results can be further spplied for planning and maintenance of reinforced concrete structures exposed to the carbonation environment, as well as for avoiding future damage.

Keywords: Concrete, Carbonation, Fly Ash, Carbonation Coefficient, Carbonation Suppression Ratio of Paint

Please cite this article as: B. Warinlai and P. Krammart, "Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete in real environment of Nakhon Pathom province," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 687–699, Jul.–Sep. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุคอนกรีตมีความสำคัญกับงานก่อสร้างในการพัฒนาของประเทศเมื่อเปรียบเทียบวัสดุก่อสร้างที่ใช้งานในประเภทเดียวกัน เช่น ไม้ ซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างหลักในสมัยก่อน และปัจจุบันไม้เป็นของหายาก โดยคอนกรีตมีความคงทน แข็งแรง สามารถปรับปรุงส่วนผสมเพื่อให้ตรงกับการใช้งานได้อย่างเหมาะสม คอนกรีตจึงเป็นวัสดุที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม เช่น หิน ทรายหรือกรวด และน้ำ โดยอาจมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปเพื่อให้การใช้งานให้มีความง่าย และคงทนขึ้น คอนกรีตในปัจจุบันมีการใช้กันในงานก่อสร้างหลายชนิด เช่น อาคาร ถนน เขื่อน สะพาน อนุสาวรีย์ และงานก่อสร้างอื่นๆ โดยใช้หลักการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้ได้โครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โดยปกติอายุการใช้งานของโครงสร้างแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน โดยขึ้นอยู่กับแต่ละโครงสร้าง เช่น ขนาด สถานที่ที่โครงสร้างนั้นอยู่ และราคาของโครงสร้างนั้นๆ โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบโดยใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีต และค่าการยุบตัวของคอนกรีต แต่ถ้านำคอนกรีตไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน อายุของโครงสร้างจะไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงคอนกรีตจะมีคุณสมบัติทางกล โดยเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อม ทั้งทางกายภาพ ทางเคมี เช่น การเสื่อมสภาพของคอนกรีตอาจมีสาเหตุมาจากคลอไรด์ คาร์บอเนชัน การกัดกร่อนโดยซัลเฟต นอกจากนั้นการก่อสร้างสิ่งต่างๆ ในปัจจุบันยังต้องมีการคำนึงถึงความคงทนของโครงสร้างเป็นหลัก โดยมีการควบคุมคุณภาพของวัสดุ ขั้นตอนการก่อสร้าง และคำนึงถึงมาตรฐานการออกแบบด้านความคงทน เพื่อที่จะให้การเสื่อมสภาพของคอนกรีตลดน้อยลง อายุการใช้งานของโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น [1]

สำหรับการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชันนั้นอาจขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปัจจัยด้านความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชัน โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50–75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอเนชันสูง [2] รวมถึงชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชัน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอเนชันได้เร็วขึ้น [3], [4] นอกจากนี้ยังพบอีกว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงจะทำให้เกิดคาร์บอเนชันได้เร็วขึ้น [5], [6] ในส่วนของการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีต ยังทำให้ความสามารถเทได้ของกรีตเพิ่มขึ้นอีกด้วย [7] ลดการกัดกร่อนของซัลเฟต เพิ่มความทนทาน และกำลังอัดประลัยในระยะยาวแต่มีข้อเสียคือ มีการพัฒนากำลังอัดช้า

ในส่วนของสถานที่และสิ่งแวดล้อมจริงนั้น ผู้วิจัยใช้พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นสถานที่ที่มีการใช้รถยนต์ส่วนบุคคล รถยนต์สาธารณะสัญจรไปมาเป็นจำนวนมาก ตลอดจนเป็นพื้นที่ในเขตปริมณฑลที่มีการจราจรหนาแน่นในระดับหนึ่ง มีปริมาณการจราจรโดยเฉลี่ยประมาณ 100,000 คันต่อวัน [8] ทำให้มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงประมาณ 600 ppm ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากคาร์บอเนชันค่อนข้างมาก โดยส่งผลให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอเนชันต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ถูกใช้ในปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน จะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอเนชันเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริม โดยทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤติ

สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ก่อสร้างในเขตจังหวัดนครปฐม หรือเขตพื้นที่อื่นๆ พบว่า มีรูปแบบการก่อสร้างหลายแบบ เช่น โครงสร้างคอนกรีตที่มีการทาสี หรือโครงสร้างที่มีวัสดุเคลือบผิวไม่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยตรง ทำให้การเสื่อมสภาพของโครงสร้างเกิดความแตกต่างกันออกไป ซึ่งการทาสีโครงสร้างอาจส่งผลให้ความคงทนของโครงสร้างนั้น แตกต่างจากโครงสร้างคอนกรีตเปลือยทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญเพราะว่าความคงทนของโครงสร้างนั้นขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุในโครงสร้าง และสภาวะแวดล้อม ด้วยเหตุนี้การทาสีน่าจะส่งผลช่วยในเชิงบวกกับความคงทน

ของโครงสร้างได้ อย่างไรก็ดีพบว่า ยังไม่มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลของการทาสี หรือวัสดุเคลือบผิวต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตอย่างเพียงพอ โดยมีการศึกษาในอดีตพบว่า วัสดุเคลือบผิวบางชนิด เช่น สารที่ใช้สำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีต และสีน้ำพลาสติกสามารถลดการเกิดคาร์บอเนชันได้ระดับหนึ่ง [9] หรือวัสดุเคลือบผิวประเภทมอร์ตาร์ก็สามารถต้านทานการเกิดคาร์บอเนชันได้เช่นกัน [10] นอกจากนั้นมีการนำคอนกรีตไปเคลือบด้วยวัสดุสีอิลาสติกแล้วนำไปไว้ในสิ่งแวดล้อมจริงพบว่า สีอิลาสติกมีส่วนทำให้ค่าความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตลดลงได้ [11] รวมถึงวัสดุอิพ็อกซีที่มีการนำไปเคลือบผิวคอนกรีตก็มีส่วนช่วยต้านทานการเกิดคาร์บอเนชันได้เช่นกัน [12] โดยข้อมูลดังกล่าวมีไม่เพียงพอจะทำให้การเลือกใช้วัสดุที่จะช่วยให้ความคงทนของโครงสร้างเพิ่มขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมีผลในด้านเชิงบวก

จากที่กล่าวมาการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีต และระดับความต้านทานการเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ทาสีในสภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐม เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลการป้องกันการเกิดคาร์บอเนชันในคอนกรีต ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐม ตลอดจนข้อมูลดังกล่าวยังสามารถประเมินอายุการใช้งาน และวางแผนบำรุงรักษาที่เหมาะสมโครงสร้างที่มีการทาสีได้ด้วยในอนาคตต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุประสานซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอย มวลรวมใช้หิน ทรายแม่น้ำ ส่วนน้ำใช้น้ำประปา สีอะคริลิกทาภายนอกเกรดอัลตราพรีเมียม โดยมีคุณสมบัติป้องกันการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อม ต่อต้านการเกาะตัวของฝุ่นละอองบนฟิล์มสี ป้องกันเชื้อรา ตะไคร่น้ำ ลักษณะเป็นฟิล์มสีเนียน และทนต่อการขัดถู ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อที่จะทำให้สีแห้ง สำหรับวัสดุเคลือบผิวจะใช้อะคริลิกชนิดยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อแสงแดด ป้องกันการรั่วซึม และแก้ปัญหารอยแตกร้าวของคอนกรีตได้ ใช้เวลาประมาณ 1–2 ชั่วโมง เพื่อที่จะทำให้วัสดุเคลือบผิวแห้ง

2.2 วิธีการศึกษา

2.2.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

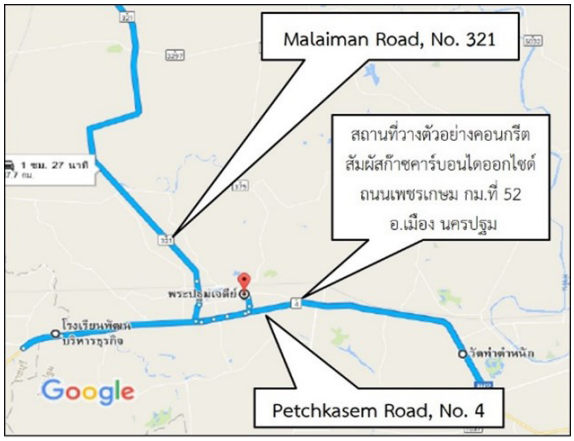
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ความละเอียดโดยวิธีเบลนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 [13] ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [14] และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคใช้วิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) โดยในส่วนองค์ประกอบทางเคมีนั้น ใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

2.2.2 สมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

สำหรับสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานจะทำการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881-116 [15] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 × 100 × 100 มม. จำนวน 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบ 1 วัน ทำการบ่มน้ำจนถึงเวลาทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน

2.2.3 การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีต

การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วยการทดสอบหาความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีต โดยมีการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100 × 100 × 100 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C856 [16] ทำการทาสีผิวของตัวอย่างทดสอบ 1 ด้าน เพื่อไว้ใช้ในการทดสอบหาความลึกคาร์บอเนชัน ก่อนทาต้องทำความสะอาดผิวที่จะทาให้สะอาด จากนั้นทาสีรองพื้นก่อน 1 รอบ แล้วค่อยทาสีจริงทับอีก 1 รอบ แล้วปล่อยให้แห้งโดยสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ ซึ่งขั้นตอนทาสีนั้น จะทำตามมาตรฐานการทาสีภายนอกทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM D 6237 [17] ส่วนอีก 5 ด้าน ที่เหลือทำการเคลือบผิวด้วยวัสดุเคลือบผิว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชัน โดยตารางที่ 1 แสดงอายุของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาที่ทำการทาสีและเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทำการทดสอบ ภายหลังจากการเตรียมตัวอย่างแล้วก็จะนำตัวอย่างทดสอบไปไว้ในสภาวะแวดล้อมจริง ณ กิโลเมตรที่ 52 ถนนมาลัยแมน



รูปที่ 1 ตำแหน่งสถานที่วางตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสสิ่งแวดล้อมจริง ถนนเพชรเกษม กม. 52 อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม

จังหวัดนครปฐม ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยสภาวะแวดล้อมจริงมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 690–700 ppm ความชื้นสัมพัทธ์ 55–60% อุณหภูมิ 30–35 องศาเซลเซียส [18], [19] เมื่อก้อนคอนกรีตอยู่ในสภาวะแวดล้อมจริงครบตามอายุ 120, 210 และ 300 วัน จึงนำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชัน โดยการทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชัน ทำโดยการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก โดยใช้เส้นเหล็กวางบนผิวคอนกรีตด้านที่จะผ่าซีกกับเครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ทำการให้แรงกดจนตัวอย่างคอนกรีตเกิดการผ่าซีกออกเป็น 2 ซีก จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ที่ตัวอย่างคอนกรีตซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วง ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยคอนกรีตที่เกิดสีม่วงจะไม่เกิดคาร์บอเนชัน แต่ในส่วนที่เกิดคาร์บอเนชันตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสี [20] จากนั้นใช้เวอร์เนียร์วัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง (บริเวณที่เกิดคาร์บอเนชัน) ทั้งหมด 8 ตำแหน่งต่อคอนกรีตแต่ละซีก ดังแสดงในรูปที่ 3 แล้วนำมาหารหาค่าเฉลี่ยความลึกคาร์บอเนชัน

จากรูปที่ 4 แสดงการเคลือบผิวตัวอย่างด้านที่ไม่ต้องการให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชัน จะดำเนินการภายหลังจากทาสีเสร็จเรียบร้อย ซึ่งมีขั้นตอนและระยะเวลา

รูปที่ 2 การผ่าตัวอย่างคอนกรีตออกเป็น 2 ซีก แล้วฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

รูปที่ 3 การวัดความลึกคาร์บอเนชันของตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบการเกิดคาร์บอเนชัน

ในการดำเนินการดังแสดงในตารางที่ 1 โดยในการทดสอบนี้จะทำการศึกษาความคงทนของตัวอย่างทดสอบดังนี้ คือ คอนกรีตเปลือย และคอนกรีตทาสี โดยตารางที่ 1 แสดงอายุของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาที่ทำการฉาบปูน ทาสี และเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทำการทดสอบ

ตารางที่ 1 อายุของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาที่ทำการทาสีและเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทำการทดสอบ

ขั้นตอน	ระยะเวลาอายุคอนกรีต (วัน)
การถอดแบบ	1 วัน
การบ่มในน้ำ	ตั้งแต่ถอดแบบจนถึง 2 วัน ในบ่อบ่ม (หลังจาก 2 วัน ตัวอย่างจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมปกติ)
การทาสี	อายุ 21 วัน
การเคลือบผิวด้านที่ไม่มีสี	อายุ 23 ถึง 24 วัน
นำตัวอย่างทดสอบไปไว้ในสภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐม	อายุ 28 วัน

2.3 ส่วนผสมของเพสต์และคอนกรีตที่ใช้

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหาค่าความลึกคาร์บอเนชันดังแสดงในตารางที่ 2 โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 โดยน้ำหนักตลอดการศึกษา

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาการเกิดคาร์บอเนชัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 โดยน้ำหนัก

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ส่วนผสมของคอนกรีต (กก./ม^3)			
			เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC0.45	489	-	845	1230	220
2	CC0.45-20FA	391	98	845	1230	220
3	CC0.45-40FA	293	196	845	1230	220
4	CC0.55	428	-	845	1230	235
5	CC0.55-20FA	342	86	845	1230	235
6	CC0.55-40FA	356	172	845	1230	235
7	CC-0.65	384	-	845	1230	250
8	CC0.65-20FA	307	77	845	1230	250
9	CC0.65-20FA	230	254	845	1230	250

หมายเหตุ: CC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และ CC0.45-20FA หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

3. ผลการวิจัย

3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

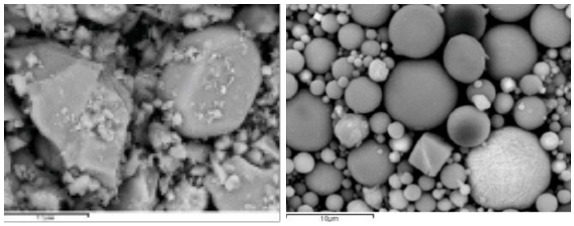
จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา ได้ผลการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนรูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังของอนุภาค โดยวิธี SEM (Scanning Electron Microscope) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าลอย กล่าวคือ ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่ ในขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและผิวค่อนข้างเรียบ แต่มีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน [21]

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย
SiO_2	19.50	35.71
Al_2O_3	4.97	20.44
Fe_2O_3	3.78	15.54
CaO	65.38	16.52
MgO	1.08	2.00
SO_3	2.16	4.26
Na_2O	0.22	1.15
K_2O	0.47	2.41
LOI	2.27	0.49
Free lime	1.00	1.71
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,250	2,867
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.21

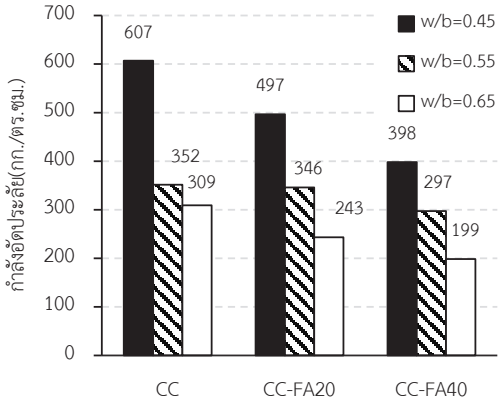
3.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

จากรูปที่ 6 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65) โดยตัวอย่างคอนกรีตมีอายุ 28 วัน พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ข) เถ้าลอย

รูปที่ 5 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน โดยวิธี SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า



รูปที่ 6 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการผสมด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้า นอกจากนี้พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเช่นกัน โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีกำลังอัดประลัยมากกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงส่งผลทำให้เนื้อคอนกรีตมีฟองอากาศเยอะเป็นเหตุให้คอนกรีตมีความพรุนมากจึงทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตลดลง

3.3 การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีต

จากการทดสอบความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตในครั้งนี้ ได้พิจารณาถึงผลกระทบต่อความลึกคาร์บอเนชัน 3 ประการ คือ 1) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 2) ผลกระทบจากวัสดุประสาน และ 3) ผลกระทบจากการทาสีเคลือบผิวคอนกรีต โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของอายุของคอนกรีตและความลึกการเกิดคาร์บอเนชันของตัวอย่างคอนกรีต ได้ดังสมการที่ (1) [22], [23]

$$d = k\sqrt{t} \tag{1}$$

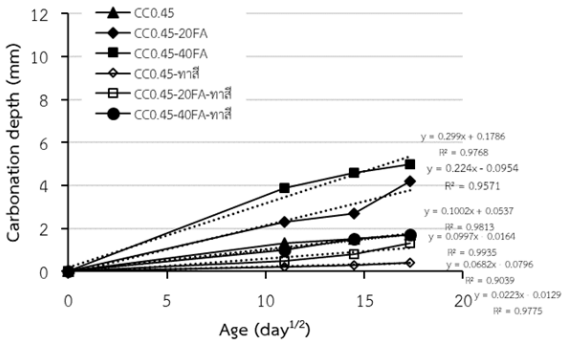
โดยที่ d คือ ค่าความลึกการเกิดคาร์บอเนชัน (มม.) t คือ เวลาอายุของคอนกรีต (วัน) และ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน (มม./ วัน$^{1/2}$) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

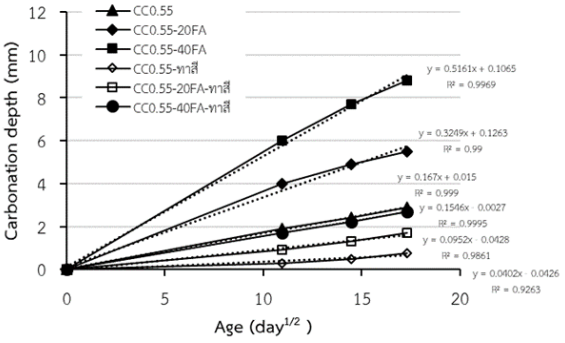
จากรูปที่ 7 ถึง 9 แสดงความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ โดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจริงจังหวัดนครปฐมที่อายุ 120, 210 และ 300 วัน พบว่า ความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.65 มากกว่าของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55 และ 0.45 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากมีการใช้น้ำในส่วนผสมมากกว่าทำให้เนื้อคอนกรีตมีโพรงและรูพรุนมาก ส่งผลทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตของ Fattuhi [5], บัญญัติ และปิติศานต์ [24]

3.3.2 ผลกระทบจากวัสดุประสาน

จากรูปที่ 7 ถึง 9 แสดงความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 โดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจริงจังหวัดนครปฐมที่อายุ 120, 210 และ 300 วัน พบว่า ความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอย (ไม่ทาสี) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลง และการทำปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสารตั้งต้น ซึ่งทั้งสองกรณีต่างก็มีส่วนทำให้ลดปริมาณแคลเซียม

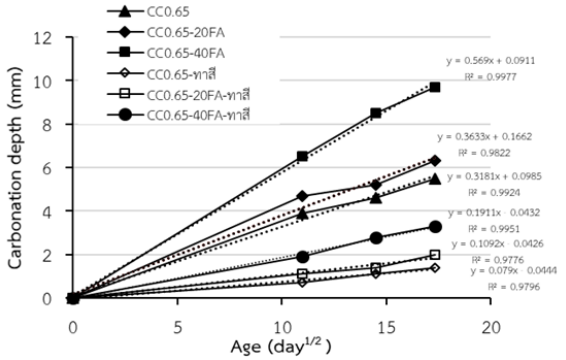


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชันและอายุของคอนกรีต (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชันและอายุของคอนกรีต (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55)

ไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) [25] จึงทำให้ความลึกคาร์บอเนชันมากขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้กำลังอัดประลัยลดลง (ที่อายุ 28 วัน) ดังแสดงในรูปที่ 6 จึงทำให้ความคงทนของคอนกรีตต่ำลง ส่งผลให้ความลึกคาร์บอเนชันมากขึ้น [3] แต่อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยผสมในคอนกรีตก็จะมีส่วนทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ทึบน้ำมากขึ้น โดยอาจจะส่งผลให้คาร์บอเนชันลดน้อยลง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ต้องอาศัยการบ่มคอนกรีตที่ดี การทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่สมบูรณ์ และปริมาณการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เหมาะสม ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ว่าการใช้เถ้าลอยผสมในคอนกรีตอาจมีทั้งผลดีและผลเสียต่อการเกิดคาร์บอเนชัน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชันและอายุของคอนกรีต (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65)

3.3.3 ผลกระทบจากการทาสีเคลือบผิวคอนกรีต

จากรูปที่ 7 ถึง 9 แสดงความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตล้วน คอนกรีตทาสีที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ โดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐมที่อายุ 120, 210 และ 300 วัน พบว่าความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทาสี และความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนทาสี โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของอายุของคอนกรีต และความลึกการเกิดคาร์บอเนชันของตัวอย่างคอนกรีต ได้ดังตารางที่ 4 จากตารางดังกล่าวเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันของคอนกรีตแต่ละสัดส่วนจะได้มาจากความชันของกราฟแต่ละเส้น ซึ่งจากการทดลองนี้จะให้เส้นกราฟเริ่มออกจากเวลาเริ่มต้นที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐม นั่นก็คือจุด 0 และแสดงผลออกมาเป็นค่าเฉลี่ยแนวโน้ม จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน ดังแสดงในรูปที่ 7 ถึง 9

จากรูปที่ 7 ถึง 9 และตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน (k) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนทาสี และคอนกรีตผสม

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน (k) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งที่ทาสีและไม่ทาสี)

สัดส่วนผสม	ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน, k (มม./วัน$^{1/2}$)
CC0.45	0.100
CC0.45-20FA	0.224
CC0.45-40FA	0.299
CC0.45-ทาสี	0.022
CC045-20FA-ทาสี	0.068
CC0.45-40FA-ทาสี	0.098
CC0.55	0.167
CC0.55-20FA	0.325
CC0.55-40FA	0.516
CC0.55-ทาสี	0.040
CC0.55-20FA-ทาสี	0.095
CC0.55-40FA-ทาสี	0.155
CC0.65	0.318
CC0.65-20FA	0.363
CC0.65-40FA	0.569
CC0.65-ทาสี	0.079
CC0.65-20FA-ทาสี	0.109
CC0.65-40FA-ทาสี	0.191

เถ้าลอยทาสี โดยรูปดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชันและอายุ (วัน$^{1/2}$) จากข้อมูลทั้งหมดพบว่าคอนกรีตทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทาสี และค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันของคอนกรีตปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนทาสี ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของสีที่เคลือบผิวคอนกรีตไว้โดยฟิล์มบางๆ ของสีจะมีส่วนช่วยป้องกันการทำลายของสภาวะแวดล้อมภายนอกมาสู่เนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชันน้อยลง [9], [11]

นอกจากนี้ยังพบว่า คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนทาสีช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้มากถึง 78% เมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทาสี (พิจารณาทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยใช้เปอร์เซ็นต์มากสุด) ในส่วนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ทาสีช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้มากถึง 71% เมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทาสี (พิจารณาทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยใช้เปอร์เซ็นต์มากสุด) สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ทาสีช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้มากถึง 70% เมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทาสี (พิจารณาทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยใช้เปอร์เซ็นต์มากสุด)

2.4 การคำนวณหาอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี

ในการทดลองนี้ใช้สีเป็นวัสดุในการต้านทานคาร์บอเนชันของคอนกรีต โดยใช้สมการในการคำนวณหาอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชัน ดังต่อไปนี้

$$R_{cs} = \frac{(d_p - d_0)}{d_p} \times 100\%$$

โดยที่ R_{cs} คือ อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี d_p คือ ความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ไม่ได้ทาสี และ d_o คือ ความลึกคาร์บอเนชันของคอนกรีตที่ทาสี

จากตารางที่ 5 ถึง 7 แสดงความลึกคาร์บอเนชัน และอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของคอนกรีตล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้งที่ทาสีและไม่ทาสี ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตที่อายุ 300 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่ทาสีมีความลึกคาร์บอเนชันลดลงจาก 1.70 มม. เหลือ 0.40 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่ไม่ได้ทาสี ซึ่งมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีอยู่ที่ 76% ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่ทาสีมีความลึกคาร์บอเนชันลดลงจาก 4.20 มม. เหลือ 1.30 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ไม่ได้ทาสี ซึ่งมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีอยู่ที่ 69% สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่ทาสีมีความลึกคาร์บอเนชันลดลงจาก 5.00 มม. เหลือ 1.50 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่ไม่ได้ทาสี ซึ่งมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีอยู่ที่ 66%

ตารางที่ 5 ความลึกคาร์บอเนชันและอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

สัดส่วนผสม	ความลึกคาร์บอเนชันเฉลี่ย (มม.)		
	120 วัน	210 วัน	300 วัน
CC0.45	1.30	1.50	1.70
CC0.45-ทาสี	0.20	0.30	0.40
CC0.45-20FA	2.30	2.70	4.20
CC0.45-20FA-ทาสี	0.50	0.80	1.30
CC0.45-40FA	3.90	4.60	5.00
CC0.45-40FA-ทาสี	1.00	1.30	1.70
ส่วนต่างความลึกคาร์บอเนชัน CC0.45	1.10	1.20	1.30
อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี (Rcs)	85%	80%	76%
ส่วนต่างความลึกคาร์บอเนชัน CC0.45-20FA	1.80	1.90	2.90
อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี (Rcs)	78%	70%	69%
ส่วนต่างความลึกคาร์บอเนชัน CC0.45-40FA	2.90	3.30	3.30
อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี (Rcs)	74%	67%	66%

ตารางที่ 6 ความลึกคาร์บอเนชันและอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

สัดส่วนผสม	ความลึกคาร์บอเนชันเฉลี่ย (มม.)		
	120 วัน	210 วัน	300 วัน
CC0.55	1.90	2.40	2.90
CC0.55-ทาสี	0.30	0.50	0.70
CC0.55-20FA	3.80	4.90	5.50
CC0.55-20FA-ทาสี	0.90	1.30	1.70
CC0.55-40FA	6.00	7.70	8.80
CC0.55-40FA-ทาสี	1.70	2.20	2.70
ส่วนต่างความลึกคาร์บอเนชัน CC0.55	1.60	1.90	2.20
อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี (Rcs)	84%	79%	76%
ส่วนต่างความลึกคาร์บอเนชัน CC0.55-20FA	2.90	3.60	3.80
อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี (Rcs)	76%	73%	69%
ส่วนต่างความลึกคาร์บอเนชัน CC0.55-40FA	4.30	5.50	6.10
อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี (Rcs)	72%	71%	69%

ส่วนคอนกรีตที่อายุ 300 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่ทาสีมีความลึกคาร์บอเนชันลดลงจาก 2.90 มม. เหลือ 0.70 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่ไม่ได้ทาสี ซึ่งมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีอยู่ที่ 76% ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่ทาสีมีความลึกคาร์บอเนชันลดลงจาก 5.50 มม. เหลือ 1.70 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ไม่ได้ทาสี ซึ่งมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีอยู่ที่ 69% สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่ทาสีมีความลึก

ตารางที่ 7 ความลึกคาร์บอเนชัน และอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65

สัดส่วนผสม	ความลึกคาร์บอเนชันเฉลี่ย (มม.)		
	120 วัน	210 วัน	300 วัน
CC0.65	3.90	4.60	5.50
CC0.65-ทาสี	0.70	1.10	1.40
CC0.65-20FA	4.40	5.20	6.30
CC0.65-20FA-ทาสี	1.10	1.40	2.00
CC0.65-40FA	6.50	8.50	9.70
CC0.65-40FA-ทาสี	1.90	2.80	3.30
ส่วนต่างความลึกคาร์บอเนชัน CC0.65	3.20	3.50	4.10
อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี (Rcs)	82%	76%	75%
ส่วนต่างความลึกคาร์บอเนชัน CC0.65-20FA	3.30	3.80	4.30
อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี (Rcs)	75%	73%	68%
ส่วนต่างความลึกคาร์บอเนชัน CC0.65-40FA	4.60	5.70	6.40
อัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสี (Rcs)	71%	67%	66%

คาร์บอเนชันลดลงจาก 8.80 มม. เหลือ 2.70 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่ไม่ได้ทาสี ซึ่งมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีอยู่ที่ 69%

สำหรับคอนกรีตที่อายุ 300 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่ทาสีมีความลึกคาร์บอเนชันลดลงจาก 5.50 มม. เหลือ 1.40 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่ไม่ได้ทาสี ซึ่งมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีอยู่ที่ 75% ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่ทาสีมีความลึกคาร์บอเนชันลดลงจาก 6.30 มม. เหลือ 2.00 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ไม่ได้ทาสี ซึ่งมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีอยู่ที่ 68% สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่ทาสีมีความลึกคาร์บอเนชันลดลงจาก 9.70 มม. เหลือ 3.30 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่ไม่ได้ทาสี ซึ่งมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีอยู่ที่ 66%

จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดพบว่า คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ที่ทาสีมีอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีมากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ที่ไม่ได้ทาสี และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ทั้งที่ทาสีและไม่ได้ทาสี

4. สรุป

จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่อายุ 28 วัน

2) การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3) คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทาสีช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้มากถึง 78% เมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทาสี ในส่วนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ทาสีช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้มากถึง 71% เมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทาสี สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ทาสีช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันได้มากถึง 70% เมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทาสี

4) ด้วยวิธีการนำเสนอ สามารถคำนวณอัตราส่วนการต้านทานคาร์บอเนชันของสีจากคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐมได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอเนชันตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Petcherdchoo, "Sustainability and durability of structures," *The Journal of KMUTNB*, vol. 22, no. 1, pp. 208–214, 2012 (in Thai).

[2] 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.

[3] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, and T. Leelawat, "A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete," *Construction and Building Materials*, vol.20, pp. 744–753, 2006.

[4] C. D. Atis, "Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash," *Construction and Building Materials*, vol 17, pp. 147–152, 2003.

[5] 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.

[6] S. Hussain, D. Bhunia, and S. B. Singh, "An experimental investigation of accelerated carbonation on properties of concrete," *Engineering Journal*, vol. 20, pp. 29–38, 2016.

[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] Department of Highways. (2015, September). *Traffic Volume Retrieved*. [Online]. Available: https://www.data.go.th/dataset/item_4be8c846-a4db-4ec4-99dd-59688b9e0dea

[9] K. Attavanich and K. Maleesee, "Evaluation carbonation depth in various coating of concrete surface," in *Proceedings the 7th Annual Concrete Conference*, 2011, pp. 197–202 (in Thai).

[10] M. A. Sanjuan and C.D. Olmo, "Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating," *Building and Environment*, vol. 36, pp. 949–953, 2000.

[11] M. Sugiyama, "Long-term carbonation performance of the concrete covered with the elastic paint with heat deterioration," in *Proceedings the 5th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2016, pp. 1–8.

[12] J. B. Aguiar and C. Junior, "Carbonation of surface protected concrete," *Construction and Building Materials*, vol.49, pp. 478–483, 2013.

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

[14] *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, ASTM Standards C 188-95, 1995.

[15] *Part 108 Method of Making Test Cube from Fresh Concrete*, British Standard Institute BS 1881, 1983.

[16] *Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*, ASTM Standards C 856-04, 2004.

[17] *Standard Guide for Painting Inspectors (Concrete and Masonry Substrates)*, ASTM Standards D 6237, 2009.

[18] B. Warinlai and P. krammart, "The risk of carbonation induced corrosion of pedestrian bridge structures in community area Nakhon Pathom province," *Journal of Engineering, RMUTT*, vol. 13, no. 2, pp. 43–54, 2015 (in Thai).

[19] B. Warinlai and P. krammart, "Accelerated and real carbonation situations of concrete," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 50–62, 2018 (in Thai).

[20] RILEM Committee, "CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth," *Material and Structure*, vol. 21, pp. 453–455, 1988.

[21] 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, 2021 (in Thai).

[22] S. K. Roy, D. 0. 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, pp. 267–272, 1996.

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

[24] 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).

[25] 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, pp. 253–259, 2010.