

## ปัจจัยและประสิทธิภาพของวัสดุต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

กรณีศึกษา จังหวัดนครปฐม

### Factors and Performance of Material Carbonation Resistance to Concrete

Case study : Nakhon Pathom Province

บัญญัติ วารินทร์ไหล<sup>1\*</sup> และ ปิติศานต์ กร้ามาต<sup>2</sup>

Banyut Warinlai and Pitisan Krammart

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

<sup>1</sup>Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhonpathom Rajabhat University, Nakhonpathom

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, PathumThani

\*Corresponding author: nowsurvey@hotmail.com

(Received: 19 May 2020, Revised: 31 August 2020, Accepted: 18 June 2021)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัย และประสิทธิภาพของวัสดุต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตในสภาวะแวดล้อม กรณีศึกษา จังหวัดนครปฐม โดยใช้ สี และมอร์ตาร์ปูนฉาบ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ ทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่น หลังก่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะแวดล้อมครบ 120 210 และ 300 วัน ผลศึกษาสรุปว่า ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ทาสี และคอนกรีตที่ฉาบปูน มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตเปลือย คอนกรีตที่ทาสี และคอนกรีตที่ฉาบปูนช่วยให้สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นลดลงร้อยละ 75 และ 60 ตามลำดับ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ แสดงเป็นสัมประสิทธิ์อัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่น เนื่องจากทาสี ( $\beta_{pc}$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องจากมอร์ตาร์ปูนฉาบ ( $\beta_{mc}$ ) และสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องจากสีที่ผิวมอร์ตาร์ปูนฉาบ ( $\beta_{pm}$ ) ผลลัพธ์สามารถใช้ออกแบบ วางแผนดูแลรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชั่นในจังหวัดนครปฐม โดยฉาบปูนหนา 10 มิลลิเมตร หรือใช้สีน้ำอะครีลิคสำหรับทาภายนอกเคลือบผิวคอนกรีตอีกหนึ่งชั้น

**คำสำคัญ:** คาร์บอนเนชั่น, สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น, สี, มอร์ตาร์ปูนฉาบ, สมการคณิตศาสตร์

#### Abstract

This research aims to verify the influenced factors and performances of carbonation-resistance materials for concrete. The laboratory was mainly conducted at Nakhon Pathom province. The carbonation-resistance materials investigated in this research are painting colour and plaster for carbonation resistance of concrete. The water to binder ratios were 0.45 0.55 and 0.55 respectively. Tests for the depth of carbonation after the concrete was left

in the environment were conducted at 120, 210, and 300 days. The results show that the carbonation depth of painting colour and plaster is less than bare concrete. Painting colour and plaster contributed a 75% and 60% reduction in the carbonation coefficient, respectively. Results from mathematical model analysis. Expressed as the velocity coefficient of carbocation due to paint ( $\beta_{pc}$ ), Coefficient of rate of carbonation due to plaster ( $\beta_{mc}$ ), and the coefficient of the rate of carbocation due to the colour of the plaster surface ( $\beta_{pm}$ ). The results can be used for designed and maintaining plan of reinforced concrete structures that are exposed to the carbonation environment at Nakhon Pathom Province by plastering 10 mm thick or use acrylic paint for another coat of concrete exterior.

**Keywords:** Carbonation, Carbonation coefficient, Painting colour, Plaster, The mathematical model

## 1. บทนำ

ปัจจุบัน คอนกรีตนิยมในงานก่อสร้างแต่ต้องออกแบบ แข็งแรงทนทานตลอดอายุการใช้งาน โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินการคาดหมาย ปกติวิศวกรจะคำนึงถึงกำลัง แต่คำนึงถึงสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัสค่อนข้างน้อย คอนกรีตจึงไม่คงทน โดยเฉพาะจะเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วใน สภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ทำให้สมบัติทางกล และ อายุใช้งาน ของโครงสร้างลดลง โดยการเสื่อมสภาพคอนกรีตมีหลาย ประเภท ทั้งหมดขึ้นกับสภาวะแวดล้อม เช่น เนื่องจากคาร์บอนเนชั่น จากงานวิจัยการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เช่น ฝุ่นหินปูน ผลวิจัยมีแนวโน้มที่ช่วยลดการเกิดคาร์บอนเนชั่น ได้ (Warinlai, 2014) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดย ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 - 75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูง (Roy, 1998) (Khunthongkeaw, 2006) และ (Cengiz, 2003) พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นได้เร็วขึ้น

อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม มีการจราจรหนาแน่น เฉลี่ยประมาณ 100,000 คันต่อวัน (Department of Highway, 2017) ทำให้มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง 600 ppm อาจมีความเสี่ยงต่อการการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นค่อนข้างมาก โดยความเป็นต่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำลงเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์

(Ca(OH)<sub>2</sub>) ถูกใช้ในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนเนชั่นเกิดเข้าไปถึงเหล็กเสริม ทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตรอบเหล็กลดต่ำลงถึงระดับวิกฤติ

โครงสร้างคอนกรีตที่ก่อสร้างในเขตจังหวัดนครปฐมกับในสถานที่จังหวัดอื่น ๆ อาจมีคอนกรีตฉาบปูน หรือทาสี ความคงทนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุในโครงสร้าง และสภาวะแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลของการฉาบปูน และสีต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเพียงพอ มีศึกษาซึ่งพบว่าวัสดุเคลือบผิวบางชนิดสามารถต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้ (Miguel, 2000) ไม่เพียงพอจะเลือกใช้วัสดุที่จะช่วยเพิ่มความคงทนได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ไม่สามารถประเมินอายุการใช้งาน และวางแผนบำรุงรักษาที่เหมาะสมโครงสร้างคอนกรีตที่ฉาบปูนและทาสีการทดสอบเพื่อประเมินผลของมอร์ตาร์ปูนฉาบ และสีต่ออัตราการเสื่อมสภาพของคอนกรีต และการออกแบบโดยคำนึงถึงความคงทน จึงเป็นวัตถุประสงค์การศึกษานี้

## 2. วิธีศึกษา

### 2.1 วัสดุที่ใช้

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุประสานประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก โดยมวลรวมใช้หิน ทรายแม่น้ำ น้ำประปามอร์ตาร์ปูนฉาบ สีอะคริลิก และวัสดุเคลือบผิว

## 2.2 วิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วยทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต โดยเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 100x 100 x 100 มิลลิเมตร ตาม ASTM C856 ฉาบและทาสีผิวของตัวอย่างทดสอบหนึ่งด้านเพื่อไว้ใช้ในการทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชั่น ส่วนอีกห้าด้านจะทาวาสเคลือบผิวเพื่อป้องกันการแพร่ขององค์ประกอบทางเคมีไม่ให้คอนกรีตเสื่อมสภาพ ตารางที่ 1 แสดงอายุของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาที่ฉาบปูน ทาสี และเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทดสอบ โดยทุกชั้นตอนจะทำภายในระยะเวลา 28 วัน ก่อนที่จะนำตัวอย่างทดสอบไปไว้ในสภาวะแวดล้อมกิโลเมตรที่ 52 ถนนมาลัยแมน จังหวัดนครปฐม (รูปที่ 1) โดยมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 590 - 600 ppm ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 - 60 อุณหภูมิ 30 - 35 องศาเซลเซียส เมื่อก่อนคอนกรีตอยู่ในสภาวะแวดล้อมครบตาม 120 210 และ 300 วัน จึงหาความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น แบ่งตัวอย่างออกเป็นสองซีก โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein - สมบัติของฟีนอล์ฟทาลีนจะมีสีชมพูไปจนถึงม่วงเข้ม เมื่ออยู่ในสภาวะเบส และจะจางลง หรือปราศจากสี เมื่ออยู่ในสภาวะกรด โดยเปลี่ยนสี ณ pH ประมาณ 8.5 ถึง 13) ที่ตัวอย่างซึ่งจะปรากฏสีม่วงในบริเวณที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น แต่ส่วนที่เกิดคาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสี (Fattuhi, 1986) แสดงในรูปที่ 2 ใช้เวอร์เนียวัดค่าความลึกบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นคอนกรีตแต่ละซีก (รูปที่ 3) แล้วหาค่าเฉลี่ย

ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่น และระยะเวลาที่คอนกรีตเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น จากสมการที่ 1 (Roy, 1998)

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

โดยที่  $d$  คือ ค่าความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่น (มิลลิเมตร),  $t$  คือ เวลาอายุของคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น (วัน) และ  $k$  คือ สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น (มิลลิเมตร/วัน<sup>1/2</sup>)



รูปที่ 1 ตำแหน่งสถานที่วางตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2 ฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนที่คอนกรีต ปรากฏสีม่วงในบริเวณที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น



รูปที่ 3 การวัดความลึกคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงการเคลือบผิวตัวอย่างด้านที่ไม่ต้องการให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นภายหลังขั้นตอนฉาบและทาสีดัง (ตารางที่ 1) โดยในการทดสอบนี้จะทำการศึกษาความคงทนของตัวอย่างทดสอบดังนี้ คือ คอนกรีตเปลือย - คอนกรีตทาสี - คอนกรีตฉาบปูนและ

ทาสี และมอร์ตาร์ปูนฉาบ โดยตารางที่ 1 แสดงอายุของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาที่ทำการฉาบปูน ทาสี และเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทดสอบ

ตารางที่ 1 อายุของตัวอย่างทดสอบ ณ เวลาฉาบปูน ทาสี และเคลือบผิวตัวอย่างทดสอบก่อนทดสอบ

ขั้นตอน	ระยะเวลาเมื่อคอนกรีตมีอายุนับจากวันหล่อ (วัน)
ถอดแบบ	1
บ่มในน้ำ	2 <sup>(1)</sup>
ฉาบปูน	7
ทาสี	21
เคลือบผิวด้านที่ไม่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบและสี	23 ถึง 24
นำตัวอย่างทดสอบไปไว้ในสภาวะแวดล้อม	28

(1) ตั้งแต่ถอดแบบและในบ่อบ่ม



ก) คอนกรีตเปลือย



ข) คอนกรีตฉาบปูน



ค) คอนกรีตฉาบปูน - ทาสี

รูปที่ 4 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น

## 2.3 ส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหาค่าความลึกคาร์บอนเนชั่นแสดงในตารางที่ 2 โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.45 0.55 และ 0.65 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนักของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.45 0.55 และ 0.65 โดยน้ำหนัก

ที่	สัญลักษณ์	W/C	ส่วนผสมของคอนกรีต			
			ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC-0.45	0.45	489	845	1230	220
2	CC-0.55	0.55	428	845	1230	235
3	CC-0.65	0.65	384	845	1230	250

## 2.4 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ปูนฉาบ

มอร์ตาร์ปูนฉาบที่ใช้ในการทดสอบ คือ ปูน ก่อ ฉาบ เท ที่นิยมใช้ก่อสร้างทั่วไปในงานฉาบ และงานก่ออิฐอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการทดสอบจะควบคุมให้สัดส่วนระหว่างปูนกับทราย 1:5 โดยน้ำหนัก และให้อัตราส่วนระหว่างน้ำกับมอร์ตาร์ปูนฉาบ 0.9

## 3. ผลทดสอบ และการวิเคราะห์

### 3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

ผลทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมอร์ตาร์ปูนฉาบที่ใช้ในการศึกษา ได้ผลการศึกษารองค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมี ของวัสดุประสานที่ใช้

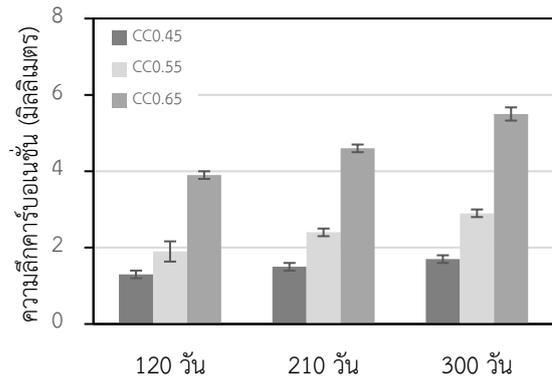
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	มอร์ตาร์ ปูนฉาบ
Si·O <sub>2</sub>	19.50	5.56
Al <sub>2</sub> ·O <sub>3</sub>	4.97	1.17
Fe <sub>2</sub> ·O <sub>3</sub>	3.78	3.01
Ca·O	65.38	87.77
Mg·O	1.08	-
S·O <sub>3</sub>	2.16	2.09
Na <sub>2</sub> ·O	0.22	-
K <sub>2</sub> ·O	0.47	-
L·O <sub>l</sub>	2.27	-
Free lime	1.00	-
Zn·O	-	0.02
Ti·O <sub>2</sub>	-	0.24
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3,250	4,500
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.95

### 3.2 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

จากการทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตในครั้งนี้ ได้พิจารณาถึงผลกระทบต่อความลึกคาร์บอนเนชั่น 3 ประการ คือ 1) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 2) ผลกระทบจากสี 3) ผลกระทบจากมอร์ตาร์ปูนฉาบ ดังนี้

#### 3.2.1 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

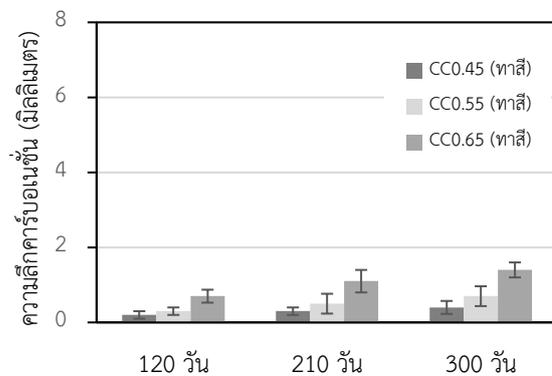
รูปที่ 5 แสดงความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 0.55 และ 0.65 โดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่อายุ 120 210 และ 300 วัน พบว่าความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.65 มากกว่าของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55 และ 0.45 ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากมีการใช้น้ำในส่วนผสมมากกว่าทำให้เนื้อคอนกรีตมีโพรงและพรุนมาก ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Fattuhi, 1986) และ (Warinlai, 2017)



รูปที่ 5 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเปลือย

#### 3.2.2 ผลกระทบจากสี

รูปที่ 6 แสดงความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตทาสีที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 0.55 และ 0.65 โดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่อายุ 120 210 และ 300 วัน พบว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานทุกอัตราส่วนมีความลึกคาร์บอนเนชั่นน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ทาสีทุกสัดส่วนผสม เนื่องจากสีที่ทาบนคอนกรีตมีฟิล์มบางที่ช่วยป้องกันการถูกทำลายโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ความลึกคาร์บอนเนชั่นน้อยลง

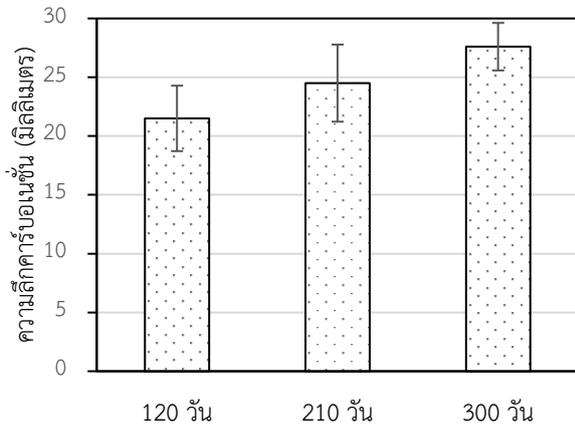


รูปที่ 6 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตทาสี

#### 3.2.3 ผลกระทบจากมอร์ตาร์ปูนฉาบ

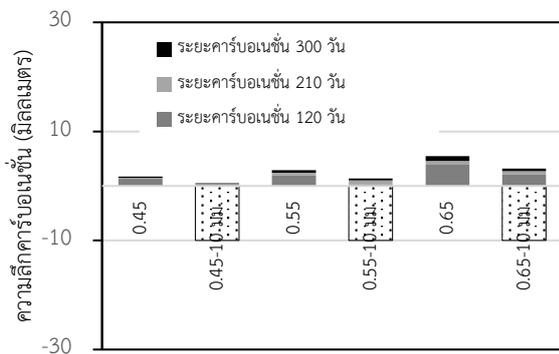
รูปที่ 7 แสดงความลึกคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ปูนฉาบโดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่อายุ 120 210 และ 300 วัน พบว่าความลึกของมอร์ตาร์ปูนฉาบมีค่ามากกว่าของคอนกรีตเปลือย และคอนกรีตที่ทาสีในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเกิดจากมอร์ตาร์ปูนฉาบมีความพรุนมากกว่าคอนกรีต รวมถึงมอร์ตาร์ปูนฉาบมีผงฝุ่นหินปูนเป็นส่วนผสม ทำให้ความเป็นด่างลดลงเมื่อเทียบกับกรณีของปูนซีเมนต์มาตรฐานทั่วไป จะทำให้สูญเสียความเป็นด่างได้ง่าย นอกจากนี้ มอร์ตาร์ปูนฉาบไม่มี

มวลรวมหยาบ ซึ่งสามารถช่วยป้องกันให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าสู่คอนกรีต (เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องเคลื่อนที่แทรกผ่านมวลรวมหยาบเพื่อแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีต) ทำให้มอร์ตาร์ปูนฉาบเสียหายเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นได้มากกว่า



รูปที่ 7 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ปูนฉาบ

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเปลือยกับคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ 10 มิลลิเมตร โดยสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจริงจังหวัดนครปฐมที่อายุ 120 210 และ 300 วัน แสดงให้เห็นว่าสามารถต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้ค่อนข้างน้อย แต่ช่วยให้ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ฉาบปูนน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตส่วนผสมเดียวกันที่ไม่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ

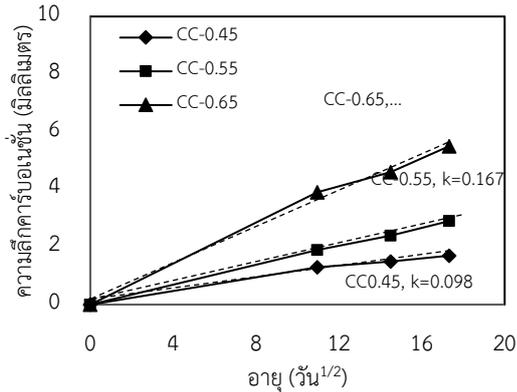


รูปที่ 8 เปรียบเทียบความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเปลือยกับคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ

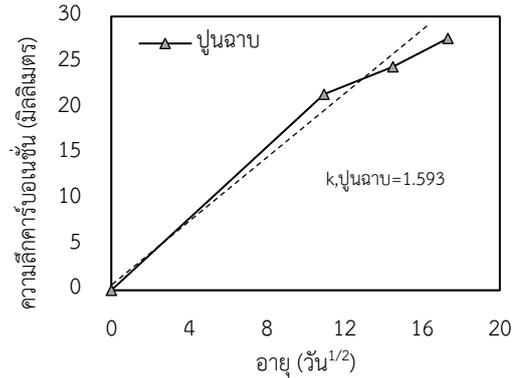
ตารางที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น (k) ของคอนกรีตเปลือย - คอนกรีตทาสี - คอนกรีตฉาบปูนและมอร์ตาร์ปูนฉาบดังรูปที่ 9 ถึง 11 ตามลำดับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น และอายุ ( $\text{วัน}^{1/2}$ ) จากข้อมูลทั้งหมดปรากฏว่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเปลือยจะมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนในตัวซีเมนต์เพสต์ และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลง นอกจากนั้นจากผลของการทาสีสามารถช่วยลดการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตได้ ดังจะเห็นจากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ทาสี (รูปที่ 10) กับสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ไม่ได้ทาสีในรูปที่ 9 การทาสีช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นได้มากถึงร้อยละ 75 เมื่อเทียบกับคอนกรีตชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ทาสีส่วนคอนกรีตที่ฉาบปูนพบว่ามีส่วนช่วยในการต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้เช่นกัน โดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตรูปที่ 9 และ 11 ซึ่งการฉาบช่วยลดสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นได้มากถึงร้อยละ 60 เช่นกัน สำหรับมอร์ตาร์ปูนฉาบแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 12 สรุปได้ว่า สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นมีค่ามากกว่าของคอนกรีตเปลือยคอนกรีตที่ทาสี และคอนกรีตที่ฉาบปูน ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวข้างต้นแล้ว

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น (k) ของคอนกรีตเปลือยคอนกรีตทาสีคอนกรีตฉาบปูน และมอร์ตาร์ปูนฉาบ

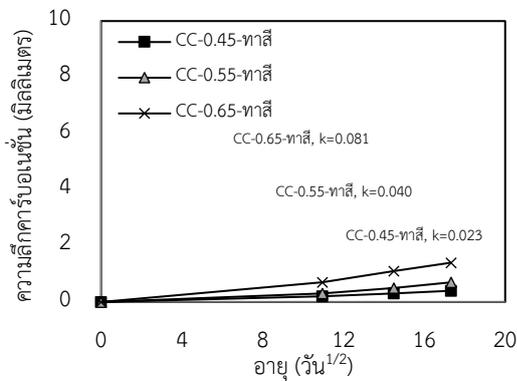
สัดส่วนผสม	ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น, k (มิลลิเมตร/วัน <sup>1/2</sup> )
CC - 0.45	0.098
CC - 0.55	0.167
CC - 0.65	0.318
CC - 0.45 - ทาสี	0.023
CC - 0.55 - ทาสี	0.040
CC - 0.65 - ทาสี	0.081
CC - 0.45 - ฉาบปูน	0.040
CC - 0.55 - ฉาบปูน	0.081
CC - 0.65 - ฉาบปูน	0.185
มอร์ตาร์ปูนฉาบ	1.593



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น และอายุ (วัน<sup>1/2</sup>) ของคอนกรีต



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น และอายุ (วัน<sup>1/2</sup>) ของมอร์ต้าร์ปูนฉาบ

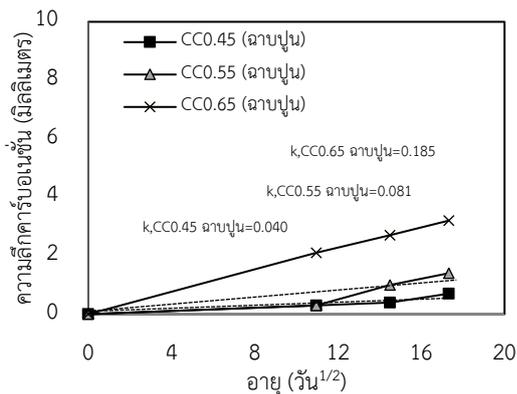


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น และอายุ (วัน<sup>1/2</sup>) ของคอนกรีตทาสี

จากความสัมพันธ์ของคอนกรีตทาสีที่เกิดคาร์บอนเนชั่นในสภาวะแวดล้อมสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องมาจากการทาสี (สมการที่ 2) ซึ่งประยุกต์หาปัจจัยของสีที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นในสภาวะแวดล้อมได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเปลือยกับสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ทาสี จะได้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2

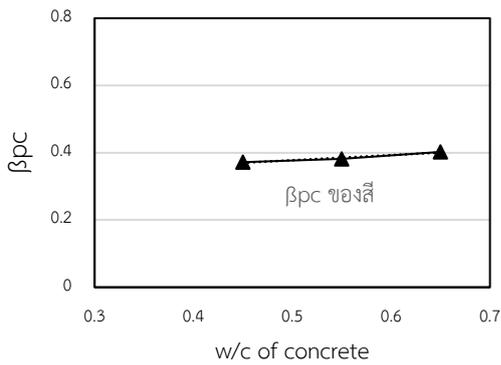
$$\beta_{pc} = \frac{k_{pc}}{k_c} \quad (2)$$

โดยที่  $\beta_{pc}$  คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องมาจากการทาสีในสภาวะแวดล้อม  $k_{pc}$  คือสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ทาสี และ  $k_c$  คือสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเปลือย



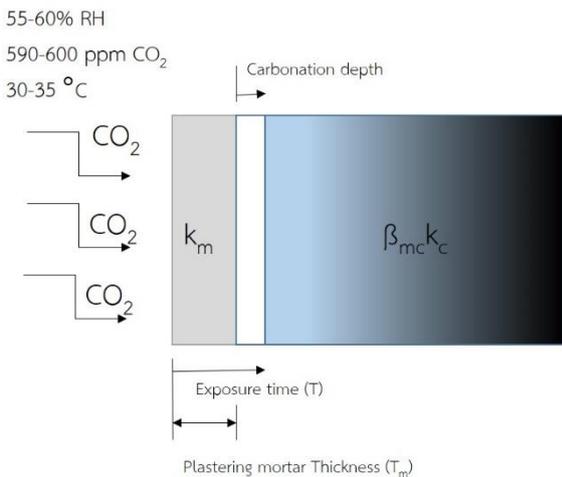
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น และอายุ (วัน<sup>1/2</sup>) ของคอนกรีตที่ฉาบปูน

รูปที่ 13 แสดงสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องมาจากการทาสีในสภาวะแวดล้อม ปรากฏว่าปัจจัยของสีมีผลกระทบต่อคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนชั่นในสภาวะแวดล้อมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต

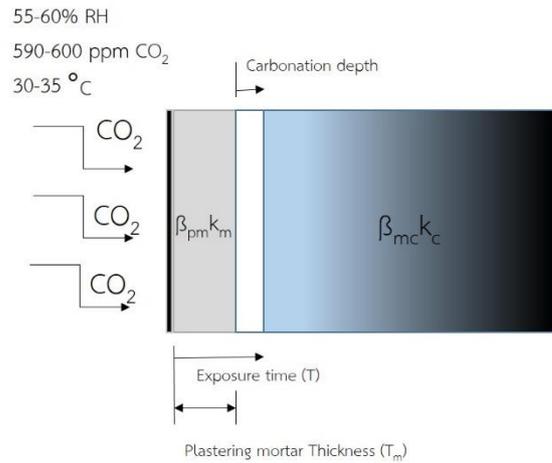


รูปที่ 13 สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นอันเนื่องจากการทาสีในสภาวะแวดล้อม

รูปที่ 14 แสดงแผนภาพการถูกทำลายของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยรูปที่ 14 ก คอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ ถูกทำลายโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มซึมผ่านชั้นของมอร์ตาร์ปูนฉาบอย่างต่อเนื่องจนถึงชั้นของคอนกรีต ส่วนรูปที่ 14 ข เป็นการทำลายของคอนกรีตที่มีสี และมอร์ตาร์ปูนฉาบ ถูกทำลายโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มซึมผ่านชั้นของสี ผ่านชั้นของมอร์ตาร์ปูนฉาบไปจนถึงชั้นของคอนกรีต ซึ่งกระบวนการถูกทำลายทั้งสองแผนภาพ ล้วนทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตลดลง เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น



ก) คาร์บอนไดออกไซด์ทำลายคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ



ข) คาร์บอนไดออกไซด์ทำลายคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ และทาสี

รูปที่ 14 ชั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำลายคอนกรีต

รูปที่ 14 ก สามารถประยุกต์สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตที่มีมอร์ตาร์ปูนฉาบ โดย  $k_m$  คือ สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ปูนฉาบ  $\beta_{mc}$  คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นอันเนื่องจากมอร์ตาร์ปูนฉาบ แบบจำลองดังกล่าวจะสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่น (วัดจากผิวคอนกรีต) ดังสมการที่ 3

จาก  $d = k\sqrt{t}$

$$\left(\frac{d}{k}\right)^2 = t$$

$$t = t_m + t_c$$

$$t = \left(\frac{T_m}{k_m}\right)^2 + \left(\frac{D}{k_c}\right)^2$$

$$D = k_c \left( \sqrt{t - \left(\frac{T_m}{k_m}\right)^2} \right)$$

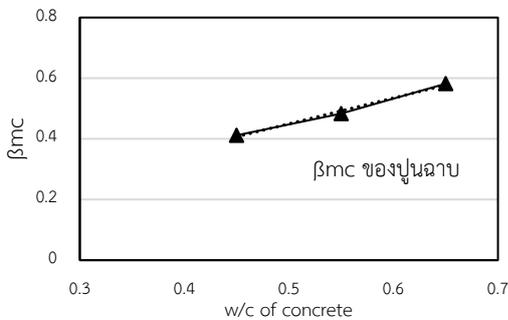
$$\text{หรือ } D = \beta_{mc} k_c \left( \sqrt{t - \left(\frac{T_m}{k_m}\right)^2} \right) \quad (3)$$

$$\beta_{mc} = \frac{k_{mc}}{k_c} \quad (4)$$

โดย  $T_m$  คือ ความหนาอมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ,  $D$  คือ ความลึกคาร์บอนเนชั่น

สมการที่ 3 สามารถใช้ค่า  $k_c$  และ  $k_m$  ที่ได้จากการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต และอมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ ส่วน  $\beta_{mc}$  หาได้จากสมการที่ 4 โดยหาก  $\beta_{mc}$  มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าอมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบไม่ส่งผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น แต่หาก  $\beta_{mc}$  น้อยกว่า 1 แสดงว่าอมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตลดลง

รูปที่ 15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นอันเนื่องมาจากอมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบในสภาวะแวดล้อม ซึ่งจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น



รูปที่ 15 สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นอมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบในสภาวะแวดล้อม

ขณะเดียวกัน หากพิจารณาคอนกรีตที่ทาสีและฉาบปูนด้วย สามารถสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเกิดคาร์บอนเนชั่นโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะผ่านชั้นสี มอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ ไปยังชั้นคอนกรีต (สมการที่ 5 และ 6) อย่างไรก็ตาม สมการที่ 6 ตัวแปรความหนาของชั้นสี ซึ่งค่อนข้างบางมาก (30 - 40  $\mu\text{m}$ ) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดคาร์บอนเนชั่นเป็นดังสมการที่ 7 โดย  $\beta_{pm}$  หาได้จากสมการที่ 8 ซึ่งจากผลทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต มอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ และสี ในสภาวะแวดล้อมจังหวัดนครปฐม จะทราบ  $\beta_{pm}$  เท่ากับ 0.38 ใช้เป็นฐานข้อมูลในการออกแบบความคงทนของคอนกรีตกับการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นภายใต้สภาวะแวดล้อมจังหวัดนครปฐมต่อไป

$$\text{จาก } d = k\sqrt{t}$$

$$\left(\frac{d}{k}\right)^2 = t$$

$$t = t_p + t_m + t_c \quad (5)$$

$$t = (T_p / k_p)^2 + (T_m / k_m)^2 + (D / k_c)^2$$

$$t = (T_p / k_p)^2 + (T_m / \beta_{pm} k_m)^2 + (D / \beta_{mc} k_c)^2 \quad (6)$$

กำหนดให้ความหนาของชั้นสีบางมาก (30 - 40  $\mu\text{m}$ )

ค่า  $T_p = 0$

$$t = (D / \beta_{mc} k_c)^2 + (T_m / \beta_{pm} k_m)^2 \quad (7)$$

$$(T_m / \beta_{pm} k_m)^2 = t - (D / \beta_{mc} k_c)^2$$

$$(\beta_{pm} k_m)^2 = \frac{T_m^2}{t - (D / \beta_{mc} k_c)^2}$$

หรือ

$$\beta_{pm} = \frac{1}{\frac{k_m}{T_m} \sqrt{[t - (\frac{D}{\beta_{mc} k_c})^2]}} \quad (8)$$

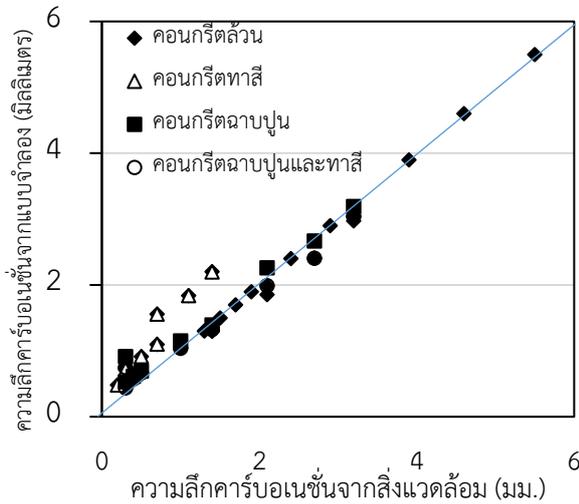
เมื่อ  $t_c$ ,  $t_m$  และ  $t_p$  คือ เวลาที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านคอนกรีต มอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ และสี (วัน),  $T_p$  คือ ความหนาของชั้นสี (มิลลิเมตร),  $k_p$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของสี (มิลลิเมตร/วัน<sup>1/2</sup>) และ  $\beta_{pm}$  คือ สัมประสิทธิ์ของอัตราเร็วการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องมาจากสีที่ผิวอมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ

### 3.3 การตรวจสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้านทานคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่มีสีหรืออมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบกับผลการทดลองในสภาวะแวดล้อม กรณีศึกษา จังหวัดนครปฐม

บทความนี้ได้เสนอการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์พื้นฐานเพื่อทำนายความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ฉาบปูน หรือทาสีในทุกช่วงอายุของโครงสร้างคอนกรีตเมื่อทราบชนิดของสีและสัดส่วนผสมของอมอร์ตาร์ทาร์ปูนฉาบ ทำให้ทราบปัจจัยตัวแปรต่าง ๆ ที่เสนอในบทความนี้ คือ  $\beta_{pc}$ ,  $\beta_{mc}$  และ  $\beta_{pm}$  นำไปสู่กระบวนการประเมินที่ถูกต้องและใช้งานได้จริง

อย่างไรก็ตาม ตัวแปร  $\beta_{pc}$ ,  $\beta_{mc}$  และ  $\beta_{pm}$  ได้จากการทดสอบวัสดุ และเงื่อนไขการทดสอบของสภาวะแวดล้อมกรณีศึกษาจังหวัดนครปฐมเท่านั้น ซึ่งอาจจะมีการทดสอบใน

สภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นต่อไปในอนาคตได้แนวคิดที่เสนอในบทความนี้แสดงให้เห็นว่าสมการคณิตศาสตร์พื้นฐานสามารถใช้ประมาณความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ฉาบปูน และทาสีได้ (รูปที่ 16)



รูปที่ 16 เปรียบเทียบความลึกคาร์บอนชั้นจากแบบจำลอง และคาร์บอนชั้นจากสิ่งแวดล้อมมอร์ตาร์ปูนฉาบ

อย่างไรก็ตาม การทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาพื้นที่จังหวัดนครปฐม ซึ่งค่าตัวแปรต่าง ๆ ตลอดจนแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นย่อมเกิดจากสภาวะแวดล้อมจังหวัดนครปฐมเท่านั้นในอนาคต อาจต้องมีการศึกษาพื้นที่ที่สภาวะแวดล้อมต่างจากนี้ เช่น ชายทะเล ชนบท เพื่อให้ผลการทดลองที่หลากหลาย ตลอดจนค่าตัวแปรต่างๆ และแบบจำลองคณิตศาสตร์จะได้ใช้เป็นฐานข้อมูลการออกแบบการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเพิ่มขึ้นต่อไปได้

#### 4. สรุปผล

ผลศึกษาวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ทาสีและคอนกรีตที่ฉาบปูนมีค่าความลึกคาร์บอนชั้นน้อยกว่าของคอนกรีตเปลือย
2. คอนกรีตที่ ทาสี และคอนกรีตที่ ฉาบปูนช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นลดลงร้อยละ 75 และ ร้อยละ 60 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตเปลือย

3. วัสดุต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้น คือ สี และมอร์ตาร์ปูนฉาบสามารถประยุกต์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ค่า  $\beta_{pc}$ ,  $\beta_{mc}$  และ  $\beta_{pm}$
4. สามารถคำนวณปัจจัยและประสิทธิภาพของวัสดุต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้นในสภาวะแวดล้อมจริง จังหวัดนครปฐมได้ โดยไปใช้ในการออกแบบ วางแผนดูแลรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนชั้นตลอดจนป้องกันความเสียหายที่ได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- American Society for Testing and Materials. (2004). Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. ASTM C 856: Annual Book of ASTM Standards, United States of America.
- Cengiz, D. A. (2003). Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. *Construction and Building Materials*, 17(3), 147–152.
- Department of Highways. (2017, February 22). Traffic Volume. [https://www.data.go.th/dataset/item\\_4be8c846-a4db-4ec4-99dd-59688b9e0dea](https://www.data.go.th/dataset/item_4be8c846-a4db-4ec4-99dd-59688b9e0dea) (in Thai)
- Fattuhi, N. I. (1986). Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period. *Materiaux et Constructions*, 19(2), 131-136.

Khunthongkeaw, j. , Tangtermsirikul, S. , & Leelawat, T. (2006). A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 20(9), 744-753.

Miguel, A. S. & Cesar, D. O. (2000). Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating. *Building and Environment*, 36(8), 949-953.

RILEM Committee CPC-18. (1988). Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Material and Structure*, 21(126), 453-458.

Roy, S.K., Poh, K.B., & Northwood, D.O. (1996). Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building. *Construction and Building Materials*, 10(4), 267-272.

Roy, S. K. , Poh, K. B. , & Northwood, D. O. (1999). Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies. *Building and Environment*, 34(5), 597-606

Warinlai, B. , & Krammart, P. (2014). A study of carbonation depth of concrete in real environment of Nakhon Pathom Province. The 10<sup>th</sup> Annual Concrete Conference, Thailand Concrete Association, (pp. mat 313-319). (in Thai)

Warinlai, B. & Krammart, P. (2017) Basic properties and carbonation of concrete replaced with different binders. *SWU Engineering Journal*, 13(1), 27-38. (in Thai)