การสำรวจอัตราการเกิดคาร์บอเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี

Survey on Carbonation Rate of Pedestrian Bridge Structures in Chonburi Community Area

สุพจน์ ธรรมนิทา[1*] และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: suphot_t@mail.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการตรวจสอบการเกิดคาร์บอเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี โดยทำการวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม วัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมและประเมินกำลังอัดประลัย พร้อมเจาะเก็บชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอเนชันของของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนของจังหวัดชลบุรี โดยเลือกใช้โครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม 4 สะพาน ข้อมูลที่ได้นำมาหาการเกิดคาร์บอเนชันและทำนายอายุของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม โดยใช้สมการของ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอเนชันของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) ผลการศึกษาพบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนของจังหวัดชลบุรี มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 31 ถึง 44 มิลลิเมตร และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 307 ถึง 367 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความลึกคาร์บอเนชันมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 32 ถึง 41 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชันมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.4 ถึง 7.1 มิลลิเมตร/ปี$^{1/2}$ สุดท้ายด้วยวิธีการตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐาน มยผ. สามารถทำนายและคำนวณอายุปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนของจังหวัดชลบุรีที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอเนชัน ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

คำสำคัญ: โครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอเนชัน, การทำนายอายุปลอดการซ่อมแซม, จังหวัดชลบุรี

Abstract

This article was an investigation on the carbonation depth of pedestrian bridge structures in Chonburi community area. Carbon dioxide (CO_2) concentration and relative humidity (RH) of the environment, and cover thickness, compressive strength and carbonation depth of concrete of pedestrian bridge structures were measured. In this study, the pedestrian bridge structures used 4 bridges in Chonburi community area. The study results were analyzed the occurrence on the carbonation depth of pedestrian bridge structures. The predict for free service life of pedestrian bridge structures in both by Fick's first law of diffusion equation and durability design of carbonation structure of Department of Public Works and Town & Country Planning were considered. The results indicated that the pedestrian bridge structures had the average of the cover thickness and the average of the compressive strength as 31-44 mm and 307-367 kg/cm^2, respectively. Besides, the average of the carbonation depth and the average of the carbonation coefficient of pedestrian bridge structures were 32-41 mm and 6.4-7.1 mm/year$^{0.5}$, respectively. Finally, the proposed method to Fick's first law of diffusion equation and durability design of carbonation structure of Department of Public Works and Town & Country Planning can predict and calculate the free service life of the pedestrian bridge structures exposed to CO_2. The result can be used in the design, planning and maintenance of pedestrian bridge structures faced by the carbonation environment as well as preventing damage that will occur in the future.

Keywords: pedestrian bridge structure, carbon dioxide, carbonation, service life prediction, Chonburi province

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การนำมาใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ อาทิ อาคารหรือโครงสร้างสาธารณะ หรือนำคอนกรีตมาหล่อขึ้นรูป และตกแต่งรูปทรงตามที่ต้องการ ถึงแม้ว่าคอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้สูง แต่ถ้าคอนกรีตมีการก่อสร้างในสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพ ก็จะทำ

ให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตแตกต่างกัน ซึ่งสภาพแวดล้อมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพเนื่องจากปัญหาความคงทนได้ เช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชัน คลอไรด์ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในเขตที่มีการจราจรหนาแน่น หรือในเขตเมืองจะมีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูง ก๊าซ CO_2 ดังกล่าวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตดังสมการ $Ca(OH)_2+CO_2 \quad CaCO_3+H_2O$ ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ซึ่งทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ จากผลการวิจัยในอดีตพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอเนชันในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น จากผลงานวิจัยในอดีตของ Roy et al [1] พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชัน โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 ถึง 75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอเนชันสูง ส่วนในกรณีของ Castro et al [2] พบว่าตำแหน่งที่ตั้งอาคารห่างจากทะเลประมาณ 100 ถึง 200 เมตร มีแนวโน้มอัตราการเกิดคาร์บอเนชันสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และระดับความสูงเพิ่มขึ้นของอาคารตัวอย่างทำให้อัตราการเกิดคาร์บอเนชันสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ Khunthongkeaw et al [3] พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชัน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอเนชันได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงและปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งต่างก็มีส่วนทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จึงทำให้ความลึกคาร์บอเนชันมากขึ้น อย่างไรก็ดียังไม่มีการตระหนักอย่างเพียงพอถึงการวางแผนและการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีผลกระทบเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชันอย่างจริงจัง รวมถึงการนำมาตรฐานการออกแบบต่าง ๆ ที่ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพให้อยู่ในเกณฑ์ที่ป้องกันได้ในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ มาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตที่แพร่หลาย จึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสี่ยงการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชัน เป็นผลให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลงตามลำดับ

จังหวัดชลบุรีซึ่งตั้งอยู่ในภาคตะวันออกของประเทศไทยและเป็นจังหวัดที่ติดกับชายทะเล นอกจากนี้ยังมีนิคมอุตสาหกรรมตั้งอยู่ในพื้นที่ด้วยสภาพทางภูมิศาสตร์และเศรษฐกิจของจังหวัด ทำให้อาคารส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีการทำลายสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะพานลอยคนเดินข้ามที่อยู่ในบริเวณการจราจรหนาแน่นนั้น มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของตัวโครงสร้างเนื่องจากสภาวะแวดล้อมดังกล่าว ดังนั้นเพื่อเป็นการรับมือและป้องกันการเสื่อมสภาพของสะพานลอยคนเดินข้ามในพื้นที่จังหวัดชลบุรี

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการสำรวจและตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี เพื่อที่จะได้ทราบถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างดังกล่าว จะได้นำผลการศึกษาไปใช้ในการประเมินความเสี่ยงสำหรับพื้นที่อื่น ๆ ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน นอกจากนี้จะได้สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับความคงทนของอาคารในสภาพแวดล้อมที่มีการทำลายต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การคัดเลือกตัวอย่างสะพานลอยคนเดินข้าม

ในการสำรวจการเกิดคาร์บอเนชัน พร้อมทั้งประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี ในครั้งนี้ประกอบด้วย การตรวจสอบด้วยตาเปล่า การวัดความเข้มของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่สะพานลอยคนเดินข้ามดังกล่าวตั้งอยู่ การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม การประเมินกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาทดสอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาระยะความลึกคาร์บอเนชัน โดยได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมืองชลบุรีที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง จำนวน 4 สะพาน ได้แก่ สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส และสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี โดยตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตรวจสอบในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี

ตารางที่ 1 รายละเอียดของสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตรวจสอบในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี

โครงสร้าง	ปีที่แล้วเสร็จ	อายุ (ปี)	ตำแหน่งที่ตั้ง	
			ละติจูด (N)	ลองติจูด (E)
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1)	2524	38	13°22'13.0"	100°59'33.4"
สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	2532	30	13°21'43.3"	100°59'22.0"
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	2538	24	13°21'30.3"	100°59'13.2"
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2)	2541	21	13°22'15.5"	100°59'34.3"

**อายุโครงสร้างนับจากวันที่ก่อสร้างเสร็จไปจนถึงวันที่ตรวจสอบ (พ.ศ.2562)*

2.2 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในการตรวจวัดครั้งนี้ใช้เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยี่ห้อ EXTECH รุ่น CO250 เก็บวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบความลึกคาร์บอเนชัน ทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด 3 วัน (เดือนเมษายน) โดยในแต่ละวันทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเช้า (เวลาประมาณ 9 ถึง 10 นาฬิกา) ช่วงเที่ยง (เวลาประมาณ 12 ถึง 13 นาฬิกา) และช่วงเย็น (เวลาประมาณ 17 ถึง 18 นาฬิกา) ทั้งนี้การวัดความเข้มข้นก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ครั้งนี้เป็นการวัด ณ ช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่ใช่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ตลอดทั้งปี อย่างไรก็ตามเพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดคาร์บอเนชันของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่วัดได้ ณ ช่วงเวลาดังกล่าว

2.3 การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

การทดสอบวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอเนชันแสดงดังรูปที่ 1 โดยใช้เครื่อง Electromagnetic induction ซึ่งใช้ทฤษฎีการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการวัดระยะห่างจากผิวโลหะ [4] ตรวจสอบบริเวณผิวของโครงสร้างคอนกรีตโดยเลือกหน้าตัดที่ผิวเรียบเท่านั้น ในแต่ละโครงสร้างอาคารจะวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 6 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 6 ค่า

2.4 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก

ในการทดสอบกำลังอัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีตในครั้งนี้ ใช้ค้อนกระแทกแบบชมิดท์ (Schmidt Hammer) ทำการทดสอบวัดค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต (รูปที่ 2) เก็บค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต 36 ค่าต่อ 1 ตำแหน่งการทดสอบ โดยจุดที่มีการวัดค่าการสะท้อนแต่ละครั้งต้องห่างกันประมาณ 25 มิลลิเมตร ในส่วนของค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัด ของคอนกรีตโดยอ้างอิงการประมาณค่าตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (1) (Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2005)

$$f_c' = -18 + (1.27 \times RN) \quad (1)$$

โดยที่ f_c' คือ ค่าประมาณกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และ RN คือ ค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer

รูปที่ 1 การทดสอบวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

รูปที่ 2 วิธีการทดสอบกำลังอัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีต โดยใช้ค้อนกระแทกแบบชมิดท์

2.5 การเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอเนชัน

การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่าน BOSCH หัวเจาะ HOLESAW (รูปที่ 3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร ตำแหน่งที่เจาะสูงจากระดับพื้นดินประมาณ 1 ถึง 1.5 เมตร และการเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตลึกประมาณ 4 ถึง 5 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาจากแบบโครงสร้างและพื้นที่ก่อสร้างจริง ซึ่งพิจารณาจากโครงสร้างหลักและสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ โดยแต่สะพานลอยคนเดินข้ามทั้งหมด 4 ตัวอย่างต่อ 1 สะพาน จากนั้นทำการผ่าซีกชิ้นตัวอย่าง ฉีดด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาลีนเพื่อวัดระยะความลึกคาร์บอเนชัน

การทดสอบความลึกคาร์บอเนชัน โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ นำมาผ่าซีกดังแสดงในรูปที่ 4 โดยการฉีดพ่นสารละลายฟีนอล์ฟธาลีนไปยังคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้ว ถ้าผิวของคอนกรีตที่ถูกฉีดเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มแสดงว่ายังไม่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน หากคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน จากนั้นวัดค่าระยะความลึกคาร์บอเนชันจากระยะความหนาของคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่ไปจนถึงจุดตัดของสีชมพูเข้ม

รูปที่ 3 การเจาะตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอเนชัน

รูปที่ 4 การทดสอบและวัดความลึกคาร์บอเนชัน

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การพัฒนาความลึกคาร์บอเนชันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการเกิดคาร์บอเนชันนั้น ต้องอาศัยปัจจัยที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โดยค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชันในระดับรุนแรงมีค่าเท่ากับ 400 ppm เป็นต้นไป ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 60 (ความชื้นสัมพัทธ์กึ่งชื้นกึ่งแห้ง) จัดว่าเป็นสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอเนชันรุนแรงเช่นกัน [5] เมื่อปัจจัยทั้งสองด้านมีความเสี่ยงในระดับที่สูงย่อมทำให้การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชันสูงขึ้นตามลำดับ สำหรับภาพรวมของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสะพานลอยคนเดินข้ามทั้ง 4 สะพาน (ตารางที่ 2) พบว่า มีความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูง คือ 1,112 ถึง 1,167 ppm และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่างร้อยละ 53.4 ถึง 58.1 เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน มยผ. [5] ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีภาวะความเสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอเนชันที่ระดับความรุนแรง

3.2 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

จากผลการทดสอบโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม พบว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามทั้ง 4 สะพาน มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 31 ถึง 44 มิลลิเมตร (ตารางที่ 3) ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ออกแบบมาตรฐานที่กำหนด [4] แสดงให้เห็นว่าการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างของสะพานลอยดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

3.3 กำลังอัดประลัยคอนกรีต

จากผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยวัดการสะท้อนกลับของผิวของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Schmidt Hammer) ของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ศึกษา พบว่า กำลังอัดประลัยของสะพานลอยคนเดินข้ามทั้ง 4 สะพาน มีค่าเฉลี่ยมากกว่า 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ตารางที่ 3) ซึ่งมากกว่ากำลังอัดประลัยของเกณฑ์มาตรฐานโครงสร้างทั่วไป

3.4 ความลึกคาร์บอเนชัน

ในส่วนของระยะความลึกคาร์บอเนชัน (ตารางที่ 3) นั้น พบว่าสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) มีค่ามากที่สุด ตามไปด้วย สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส และสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอายุของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่มากนั้น การทำลายคอนกรีตเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ย่อมนานกว่า ส่งผลให้การเกิดคาร์บอเนชันที่มากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากผลของกำลังอัดประลัยของโครงสร้าง ปริมาณความเข้มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในบริเวณแต่ละพื้นที่ที่โครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามแต่ละสะพานตั้งอยู่นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 2) จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการเกิดคาร์บอร์เนชันที่ไม่แตกต่าง

3.5 สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชัน

โดยสมการ Fick's first law of diffusion เมื่อทราบอายุของโครงสร้างและความลึกคาร์บอเนชัน สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชันได้จากสมการ $d = k\sqrt{t}$ โดยที่ d คือค่าความลึกคาร์บอเนชัน (มิลลิเมตร) t คือ อายุของโครงสร้าง (ปี) และ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชัน (มิลลิเมตร/ปี$^{1/2}$)

จากผลการทดสอบโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชันได้ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า โครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนของจังหวัดชลบุรี มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันที่ไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือ สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันของสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี มีค่ามากที่สุด ตามด้วยของสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) และสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ปริมาณความเข้มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์

รายการ	อายุ (เดือน)	ความเข้มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ppm)	ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1)	456	1,115	57.4
สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	360	1,118	56.5
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	336	1,112	53.4
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2)	252	1,167	58.1

ตารางที่ 3 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม กำลังอัดประลัย ความลึกคาร์บอเนชัน และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน

รายการ	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (มม.)	กำลังอัดประลัย (กก./ซม.^{2})	ความลึกคาร์บอเนชัน (มม.)	สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน (มม./ปี$^{1/2}$)
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1)	44	367	41	6.7
สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	43	361	39	7.1
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	31	307	34	6.4
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2)	40	327	32	7.0

3.6 การทำนายอายุโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามจากการเกิดคาร์บอเนชันตามสมการ Fick's first law of diffusion

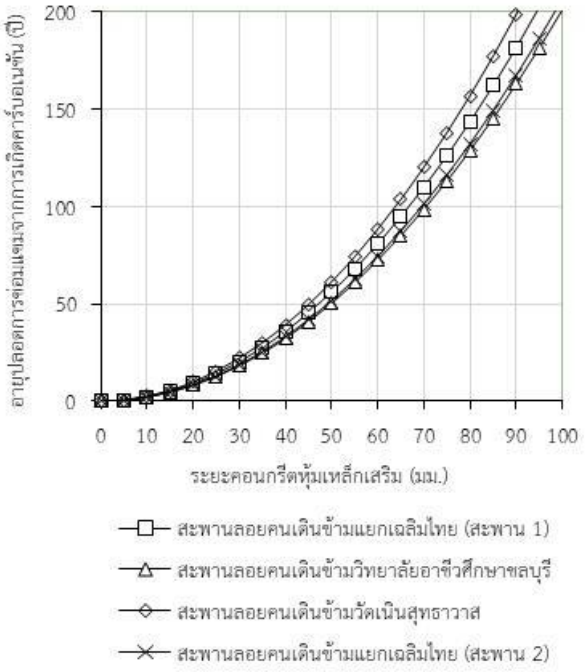
3.6.1 ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

เมื่อพิจารณาโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง โครงสร้างเหล่านี้มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชันในอัตราที่สูง ซึ่งปฏิกิริยาคาร์บอเนชันทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง และส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ในที่สุด จนทำให้โครงสร้างเกิดความวิบัติขึ้นตามมา ดังนั้นการวางแผนเพื่อจะให้โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ โดยรูปที่ 5 ได้แสดงกราฟทำนายอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion คือ $d = k\sqrt{t}$ พบว่า ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่เท่ากันนั้น อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) มีค่ามากที่สุด ตามด้วยสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) และสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี ตามลำดับ

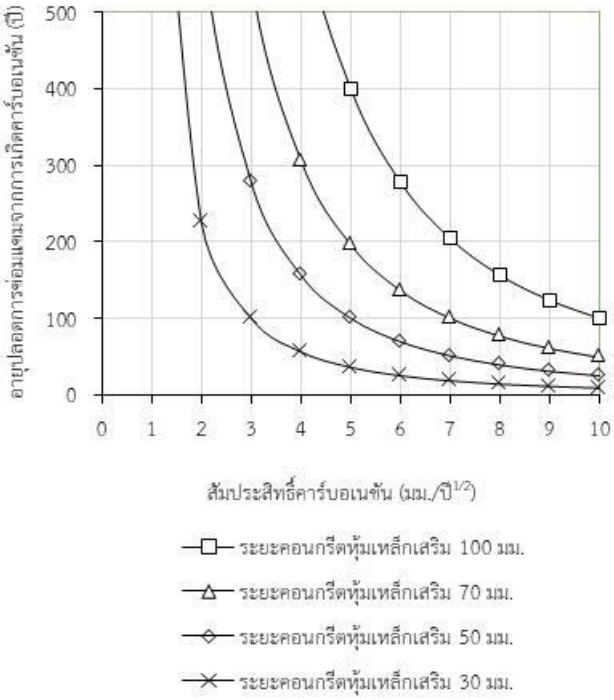
จากรูปที่ 5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันกับระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของสะพานลอยคนเดินข้ามอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงสมการ Fick's first law of diffusion พบว่า กรณี สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) นั้น มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 44 มิลลิเมตร จะให้อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 43 ปี และสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 43 มิลลิเมตร จะให้อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 37 ปี ในขณะที่สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาสนั้น มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 31 มิลลิเมตร จะให้อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 23 ปี สุดท้ายสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 40 มิลลิเมตร จะให้อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 33 ปี

3.6.2 ผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชัน

จากค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชัน (ตารางที่ 3) สามารถทำนายอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชัน โดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion คือ $d = k\sqrt{t}$ ได้ดังรูปที่ 8 โดยในภาพดังกล่าวได้เสนอแนวคิดให้โครงสร้างที่มีการออกแบบให้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างเท่ากับ 30 50 70 และ100 มิลลิเมตร พบว่า โครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชันน้อยทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีมากกว่าของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชันมาก ในขณะเดียวกันที่สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชันเท่ากัน พบว่า โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมมากกว่าจะมีอายุการใช้งานที่มากกว่า



รูปที่ 5 อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันของสะพานลอยคนเดินข้ามอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม อ้างอิงสมการ Fick's first law of diffusion



รูปที่ 6 อายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน อ้างอิงสมการ Fick's first law of diffusion

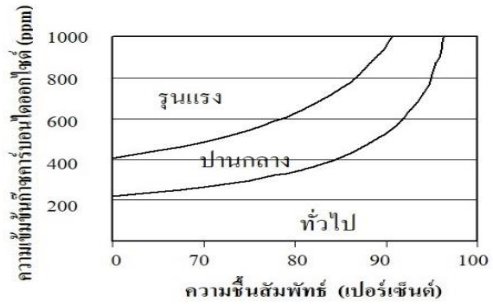
3.7 การทำนายอายุโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

มาตรฐานการออกแบบของกรมโยธาธิการและผังเมืองเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการออกแบบได้ [5] โดยใช้สมการ $X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t}$ โดยที่ x_c คือ ความลึกคาร์บอเนชัน (มิลลิเมตร) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ α_1 คือสัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น โดยเท่ากับ 1.00 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น และ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น ส่วน α_2 คือสัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน พิจารณาได้จากตารางที่ 3 และ t คืออายุของโครงสร้าง (ปี)

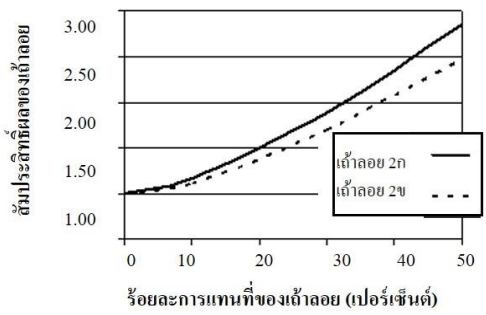
ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 7 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต และ k คือสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชัน ดังสมการ $k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3$ เมื่อ w/b คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดย k_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ วสท. 1014-46) ดังรูปที่ 8

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน [5]

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	α_2
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอเนชันปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอเนชันรุนแรง	1.00



รูปที่ 7 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน [5]

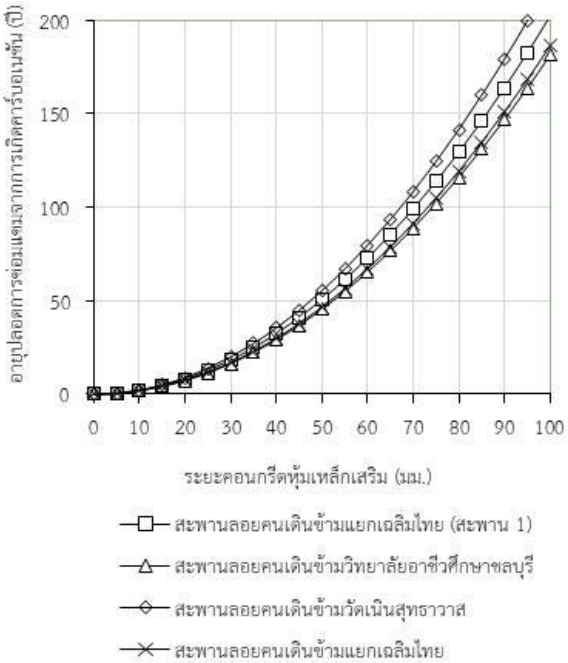


รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน [5]

3.7.1 ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

ผลจากการทำนายอายุที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามมาตรฐาน มยผ. ดังรูปที่ 9 ซึ่งมีอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอเนชันไปในทิศทางเดียวกันกับสมการ Fick's first law of diffusion

จากรูปที่ 9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันกับระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของสะพานลอยคนเดินข้ามอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมาตรฐาน มยผ. นั้นก็สามารถทำนายอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชัน เช่นเดียวกับกรณีของสมการ Fick's first law of diffusion กล่าวคือ สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) นั้น มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 44 มิลลิเมตร จะให้อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 41 ปี และสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 43 มิลลิเมตร จะให้อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 35 ปี ในขณะที่สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาสนั้น มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 31 มิลลิเมตร จะให้อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 22 ปี สุดท้ายสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 40 มิลลิเมตร จะให้อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 31 ปี โดยตามมาตรฐาน มยผ. จะให้อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันที่น้อยกว่าของที่อ้างอิงจากสมการ Fick's first law of diffusion

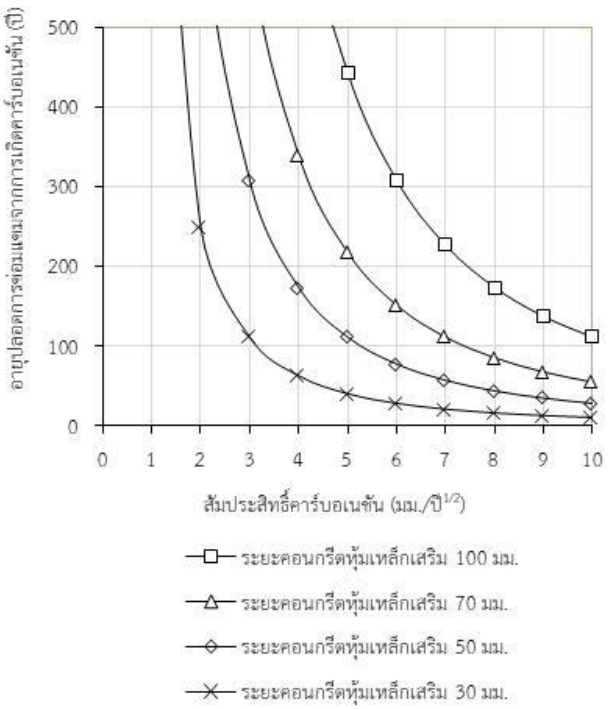


รูปที่ 9 อายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กอ้างอิงมาตรฐาน มยผ.

3.7.2 ผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชัน

จากผลสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน (ตารางที่ 3) สามารถทำนายอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตาม

สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน โดยใช้มาตรฐาน มยผ. ได้เช่นกัน ดังรูปที่ 10 โดยในภาพดังกล่าวได้เสนอแนวคิดให้ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 30 50 70 และ 100 มิลลิเมตร เหมือนกับวิธีของสมการ Fick's first law of diffusion ซึ่งสามารถทำนายอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอเนชันของโครงสร้างได้



รูปที่ 10 อายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นอ้างอิงมาตรฐาน มยผ. (โครงสร้างสำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น: α_1 =0.95 และอยู่สภาพเสี่ยงต่อคาร์บอเนชันรุนแรง: α_2 =1)

จากการทำนายอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี ตามสมการ Fick's first law of diffusion และตามมาตรฐาน มยผ. โดยการใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชันเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ เพื่อทำนายอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม สามารถนำไปใช้ในการวางแผนออกแบบ บำรุงรักษาโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรีที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอเนชัน ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

4. สรุป

จากผลของการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1) สิ่งแวดล้อมของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรีมีค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 1,112 ถึง 1,167 ppm และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 53 ถึง 58 เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน มยผ. จัดอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชันในระดับรุนแรง

2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรีมีค่าระหว่าง 31 ถึง 44 มิลลิเมตร ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าระหว่าง 307 ถึง 367 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

3) ความลึกคาร์บอเนชันเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี มีค่าอยู่ระหว่าง 32 ถึง 41 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชันมีค่าอยู่ระหว่าง 6.4 ถึง 7.1 มิลลิเมตร/ปี$^{1/2}$

4) ตามสมการ Fick's first law of diffusion นั้น สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส และสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) มีอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 43 37 23 และ 33 ปี ตามลำดับ

5) ตามมาตรฐาน มยผ. นั้น สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส และสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) มีอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันเท่ากับ 41 35 22 และ 31 ปี ตามลำดับ

6) ตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง สามารถทำนายและคำนวณอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอเนชัน ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

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

[2] P. Castro, E.I. Morenob and J. Genesca, (2000). Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings, Cement and Concrete Research, Vol 30, pp. 1565- 1571.

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

[4] มาตรฐาน มยผ. 1501-51 ถึง มยผ. 1507–51, มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย, กรมโยธาธิการและผังเมือง.

[5] มาตรฐาน มยผ. 1332 – 55, มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน, กรมโยธาธิการและผังเมือง.