

# ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น ของโครงสร้างสะพานลอยในเขตชุมชนจังหวัดนครปฐม The Risk of Carbonation Induced Corrosion of Pedestrian Bridge Structures in Community Area Nakhonpathom Province

บัญญัติ วารินทร์ไพล<sup>1</sup> และปิตินันต์ กร้ามาต<sup>2</sup>

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยในเขตชุมชนจังหวัดนครปฐม โดยทำการทดสอบวัดระยะหุ้มเหล็กเสริม รวมถึงวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม และการเจาะเก็บชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบระยะคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยทั้งหมด 15 โครงการ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ตามหลักสถิติหาความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนชั้นกับอายุของโครงสร้าง พบว่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีแนวโน้มสูงกว่าโครงสร้างสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในเขตปริมณฑลอื่นที่อายุและวัสดุใกล้เคียงกัน สุดท้ายสามารถประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจาก คาร์บอนชั้นที่อายุต่างกัน ได้จากความสัมพันธ์ของระยะคาร์บอนชั้น ระยะหุ้มเหล็กเสริมและอายุของโครงสร้าง

**คำสำคัญ:** ความเสี่ยง คาร์บอนชั้น ระยะหุ้มเหล็ก การเกิดสนิม สะพานลอย

## Abstract

This study estimates the risk of carbonation induced corrosion of pedestrian bridge structures in community area at Nakhonpathom Province. Cover thickness, carbon dioxide and humidity of the environment and carbonation depth of pedestrian 15 bridge structures were measured and analyzed by using statistical methods to find the relationship between risk of corrosion caused by carbonation and age of the structures. It was found that with equivalent age and materials, the risk of carbonation induced corrosion of pedestrian bridge structures in community area Nakhonpathom province was higher than that of the pedestrian bridge structures in the suburb area. Finally, the risk of carbonation induced corrosion of each pedestrian bridge structures at different ages was estimated.

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**Keywords:** Risk, Carbonation, Cover thickness, Corrosion, Pedestrian Bridge

## 1. บทนำ

โครงสร้างอาคารหรือโครงสร้างสาธารณูปโภคในปัจจุบัน เช่น สะพานลอย ถนนส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุการใช้งานต่างๆ กันหรือการใช้วัสดุในการก่อสร้างที่แตกต่างกันไป รวมถึงสภาพแวดล้อมของโครงสร้างก็ล้วนแล้วแต่แตกต่างกันทั้งสิ้น โดยสภาพแวดล้อมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพเนื่องจากปัญหาความคงทนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในเขตที่มีการจราจรหนาแน่น จะสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ในปริมาณที่สูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $Ca(OH)_2$  ในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการที่ (1)



ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตลดลงและส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้

จากผลการวิจัยในอดีตพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอเนชันในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น จากผลงานวิจัยในอดีตของ Royet al[1] พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชัน โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50-75 ทำให้อัตราการเกิด คาร์บอเนชันสูง ส่วนในกรณีของ Khunthongkeawet al[2] พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิด คาร์บอเนชัน โดย

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอเนชันได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ Fattuhi[3] ยังพบอีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงจะทำให้เกิดคาร์บอเนชันได้เร็วขึ้น

อย่างไรก็ดียังไม่มีการตระหนักอย่างเพียงพอถึงผลกระทบของคาร์บอเนชันที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในบริเวณเสี่ยงต่อการเกิด คาร์บอเนชัน รวมถึงยังขาดการตรวจสอบดูแลบำรุงรักษาและประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอเนชันของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าว ด้วยเหตุนี้การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอเนชันของโครงสร้างสาธารณะประเภทสะพานลอยในเขตปริมณฑลจังหวัดนครปฐมซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง (ประมาณ 600 ppm) และมีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอเนชันสูง โดยผลการศึกษาที่ได้จะสามารถนำไปใช้ในการวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตต่อไป

## 2. ระเบียบวิธีการศึกษา

### 2.1 การคัดเลือกตัวอย่างสะพานลอย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการตรวจสอบโครงสร้างสะพานลอยคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสถานะเสี่ยงต่อปัญหาความคงทนเกี่ยวกับคาร์บอเนชันเป็นหลัก รวมทั้งหมด 15 โครงการ รายละเอียดของโครงสร้างสะพานลอยดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของโครงสร้างสะพานลอยที่ตรวจสอบ (จังหวัดนครปฐม)

	แล้วเสร็จ (พ.ศ.)	อายุโครงสร้าง* (ปี)	ตำแหน่งที่ตั้ง	
			ละติจูด (N)	ลองจิจูด (E)
<b>พื้นที่อำเภอกำแพงแสน</b>				
ก.ม.24+166 (ไลตส์กำแพงแสน)	2542	15	13°59'34"	99°59'43"
ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)	2542	15	13°59'07"	99°59'41"
ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)	2542	15	13°57'03"	100°00'14"
ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)	2542	15	13°56'17"	100°00'13"
ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)	2542	15	13°54'36"	99°58'50"
<b>พื้นที่อำเภอเมือง</b>				
ก.ม.5+650 (กิโล 5)	2542	15	13°51'25"	100°00'47"
ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนาบริหารธุรกิจ)	2543	15	13°47'48"	99°57'55"
ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)	2542	16	13°47'58"	99°59'21"
ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)	2544	14	13°48'06"	99°59'49"
ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)	2546	12	13°48'11"	100°00'43"
ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)	2546	12	13°48'14"	100°01'43"
ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)	2541	17	13°48'46"	100°06'59"
<b>พื้นที่อำเภอนครชัยศรี</b>				
ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)	2543	14	13°48'31"	100°08'27"
ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)	2541	17	13°48'23"	100°09'13"
ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)	2535	22	13°47'17"	100°10'20"

\*อายุโครงสร้างนับจากวันที่ก่อสร้างเสร็จไปจนถึงวันที่ตรวจสอบ (พ.ศ.2558)

## 2.2 การหาตำแหน่งเหล็กเสริมและวัดระยะหุ้มเหล็กเสริม

ทำการทดสอบหาตำแหน่งเหล็กเสริมด้วยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กเสริม (Cover Meter) ก่อนที่จะเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น โดยวัดระยะหุ้มเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น (รูปที่1) โดยแต่ละตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตจะวัดค่าระยะหุ้มเหล็กเสริม 4 ค่า เก็บข้อมูลระยะหุ้มเหล็กเสริม 6 ตำแหน่งต่อสะพานลอย 1 แห่ง ทำให้ได้ค่าระยะหุ้มเหล็กเสริมทั้งหมด 24 ค่าต่อสะพานลอย1 แห่ง



รูปที่ 1 การหาตำแหน่งเหล็กเสริมและการวัดระยะหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอย

## 2.3 ตำแหน่งที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น

ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น (Carbonation Depth) จากบริเวณเสาของสะพานลอย ที่ระดับความสูง 1.50 – 2.50 เมตร (ทั้ง 15 สะพานลอย) โดยเจาะเก็บตัวอย่าง 6 ตัวอย่างต่อ 1 สะพานลอย

## 2.4 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตและการทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น

ตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่นครั้งนี้ได้จากการเจาะด้วยสว่านหัวเจาะแบบ HOLESAW ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร ลึกประมาณ 5-6 เซนติเมตร

จากตำแหน่งที่กล่าวมาข้างต้น โดยนำตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวมาทำการผ่าซีกเพื่อทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น (รูปที่ 2ก) ปฏิบัติการคาร์บอนเนชั่นทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง (โดยทั่วไปค่า pH ของคอนกรีตประมาณ 13) โดยฉีดพ่นด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาเลอินไปยังคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้ว (รูปที่ 2ข) ซึ่งสารละลายฟีนอล์ฟธาเลอินจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มในบริเวณที่ค่า pH ของคอนกรีตมีค่ามากกว่า 9 จากนั้นวัดค่าระยะคาร์บอนเนชั่น (รูปที่ 2ค) ซึ่งเป็นระยะที่คอนกรีตไม่มีการเปลี่ยนแปลงสี



(ก) การผ่าซีกตัวอย่างคอนกรีต

(ข) นำก้อนตัวอย่างที่ผ่าซีกฉีดพ่นด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาเลอิน



(ค) การวัดระยะคาร์บอนเนชั่น

รูปที่ 2 การทดสอบและวัดระยะคาร์บอนเนชั่น

## 2.4 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในการตรวจวัดครั้งนี้ใช้เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยี่ห้อ EXTECH รุ่น CO250 เก็บวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) บริเวณโครงสร้างสะพานลอยที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น ทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด 3 เดือน (ในช่วงเดือนมีนาคมเมษายน และพฤษภาคม พ.ศ.2558) โดยในแต่ละวัน

จะวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงเวลาคือ ช่วงเช้า (เวลาประมาณ 9-10 น.) ช่วงเที่ยง (เวลาประมาณ 12-13 น.) และช่วงเย็น (เวลาประมาณ 17-18 น.) ในแต่ละสะพานลอยที่มีการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น จะเก็บค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 162 ค่า ทั้งนี้การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ครั้งนี้เป็นการวัด ณ ช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่ใช่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ตลอดทั้งปี รวมถึงอาจจะไม่เป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลดังกล่าว อย่างไรก็ตามเพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิด คาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างสะพานลอยครั้งนี้ จะใช้ข้อมูลที่วัดได้ ณ ช่วงเวลาดังกล่าว และมีการวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์อย่างต่อเนื่องเพื่อนำมาปรับปรุงการวิเคราะห์ต่อไปในอนาคต

## 3.ผลการทดสอบและวิเคราะห์

จากผลการทดสอบโครงสร้างสะพานลอยทั้งหมด พบว่าระยะหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอยทั้ง 15 แห่ง ที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 48-75 มม. ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ออกแบบมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 30 มม. [4] แสดงให้เห็นว่าการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างของสะพานลอยดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ในส่วนของระยะคาร์บอนเนชั่นดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าสะพานลอยที่มีสถานที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีแนวโน้มของระยะคาร์บอนเนชั่นที่มากกว่าที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอนครชัยศรีและอำเภอกำแพงแสน ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ 1) อายุของ

โครงสร้าง 2) สภาวะแวดล้อมบริเวณโครงสร้าง สะพานลอย 3) คุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งคุณสมบัติทั้งหลายเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ทำให้ความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมแตกต่างกัน

สำหรับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ ดังแสดงในตารางที่ 3 เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้อัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนขึ้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยนำโครงสร้างสะพานลอยที่มีคุณสมบัติของคอนกรีตและอายุโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันมาเปรียบเทียบเช่น สะพานลอยหนองดินแดง (ก.ม.64+075) ศาลเยาวชน (ก.ม.63+230) โรงเรียนกำแพงแสนวิทยา (ก.ม.23+325) และหนองปลาไหล (ก.ม.19+235) พบว่าสะพานลอยหนองดินแดงและศาลเยาวชนมีอัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนขึ้นมากกว่าสะพานลอยโรงเรียนกำแพงแสนวิทยาและหนองปลาไหลทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในอากาศมีปริมาณที่สูงจึงเป็นภาวะปัจจัยส่วนหนึ่งที่ทำให้การพัฒนาระยะคาร์บอนขึ้นสูงขึ้น

จากตารางที่ 2 และ 3 พบว่าสะพานลอยโลตัสกำแพงแสน (ก.ม.24+166) ทุ่งเศรษฐี (ก.ม.17+835) และกิโย 5 (ก.ม.5+650) มีอายุโครงสร้างและสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงกัน แต่โอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนขึ้น ณ เวลาที่ทำการทดสอบ (พ.ศ. 2558) ของสะพานลอยกิโย 5 มีค่ามากกว่าทุ่งเศรษฐี และโลตัสกำแพงแสน ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากคุณสมบัติด้านวัสดุที่อาจจะต่างกัน เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เป็นต้น ซึ่งอาจจะทำให้โอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นต่างกัน ในขณะที่เดียวกันสะพานลอยวัดท่าตำหนัก (ก.ม.42+960) ซึ่งมีอายุ 269 เดือน

พบว่ามีโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นน้อยกว่าสะพานลอยศาลเยาวชน (ก.ม.63+230) อายุ 167 เดือน และวัดลาดปลาเค้า (ก.ม.59+785) อายุ 142 เดือน อาจจะเป็นเนื่องมาจากคุณสมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกันและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า

จากรูปที่ 3ก แสดงแบบจำลองโค้งปกติของระยะคาร์บอนขึ้นและระยะหุ้มเหล็กเสริมซึ่งข้อมูลทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นเมื่ออายุโครงสร้างมากขึ้นความสัมพันธ์ของโค้งปกติของระยะคาร์บอนขึ้นจะซ้อนทับโค้งปกติของระยะหุ้มเหล็กเสริม ทำให้โค้งปกติของข้อมูลทั้งสองเกิดส่วนที่ซ้อนทับกันขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3ข ซึ่งเป็นการแสดงแบบจำลองความเสี่ยงที่เหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีโอกาสเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้น โดยการแปรผันตามอายุของโครงสร้าง ซึ่งรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ความน่าจะเป็นของระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย  $x_1$  จะมีค่าคงที่ตลอดอายุการใช้งาน ในขณะที่พื้นที่ความน่าจะเป็นของระยะคาร์บอนขึ้นจะเพิ่มขึ้นทุกช่วงอายุการใช้งาน จาก  $d_1$  ไป  $d_2$  หรือ  $d_3$  เป็นต้น จนกระทั่ง ณ ช่วงอายุหนึ่งของโครงสร้าง ความน่าจะเป็นของระยะคาร์บอนขึ้นจะซ้อนทับกับความน่าจะเป็นของระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งส่วนที่ซ้อนทับก็คือความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้น จากการซ้อนทับของระยะหุ้มเหล็กเสริมและระยะคาร์บอนขึ้นทำให้เกิดค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตัวใหม่ของข้อมูลระยะคาร์บอนขึ้นและระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3ค

ตารางที่ 2 ผลระยะหุ้มเหล็กเสริม, ระยะคาร์บอนชั้น และสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น

โครงสร้างสะพานลอยที่เข้าตรวจสอบ	สถานที่ตั้ง (อำเภอ)	ระยะหุ้มเหล็กเสริม		ระยะคาร์บอนชั้น		สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (K)	
		ระยะเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มม.)	ระยะเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มม.)	K เฉลี่ย (มม./เดือน <sup>1/2</sup> )	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มม./เดือน <sup>1/2</sup> )
ก.ม.24+166 (ไลต์สกาแพงแสน)	กำแพงแสน	69.71	7.61	18.70	1.47	1.38	0.11
ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)	กำแพงแสน	74.08	10.18	20.50	3.50	1.52	0.26
ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)	กำแพงแสน	64.71	7.23	19.20	1.45	1.42	0.11
ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)	กำแพงแสน	53.79	4.15	14.00	2.99	1.03	0.22
ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)	กำแพงแสน	73.33	8.8	25.50	6.49	1.89	0.48
ก.ม.5+650 (กิโล 5)	เมือง	48.13	4.74	18.80	3.00	1.39	0.22
ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ)	เมือง	54.00	10.66	31.60	2.00	2.35	0.15
ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)	เมือง	58.33	11.81	39.30	4.31	2.82	0.31
ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)	เมือง	61.58	9.67	60.00	0.48	4.64	0.04
ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)	เมือง	51.46	6.09	37.80	1.04	3.17	0.09
ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)	เมือง	51.96	4.55	34.50	4.82	2.89	0.40
ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)	เมือง	75.13	4.44	18.30	1.14	1.27	0.08
ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)	นครชัยศรี	63.08	3.61	21.70	4.38	1.66	0.33
ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)	นครชัยศรี	48.63	4.78	17.40	1.07	1.21	0.07
ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)	นครชัยศรี	60.96	5.34	24.50	4.60	1.50	0.28

จากข้อมูลในตารางที่ 2 สามารถทำการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมตามอายุต่างๆ ของโครงสร้างได้โดยประยุกต์หลักทางสถิติเกี่ยวกับการแจกแจงความน่าจะเป็นต่อเนื่องของผู้แต่งจากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [5] เข้ามาทำการวิเคราะห์ ตามแบบจำลองรูปที่ 3ก, ข, ค อาศัยความสัมพันธ์ของการแจกแจงของผลต่างค่าเฉลี่ยของระยะหุ้มเหล็กเสริมและระยะคาร์บอนชั้น โดยระยะคาร์บอนชั้นที่จะนำมาสร้างความสัมพันธ์วิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นจะมีการบวกระยะเพิ่มเข้าไป 10 มิลลิเมตรทุกระยะคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้างตามมาตรฐาน JSCE [6] ที่ระบุไว้ว่าระยะ

คาร์บอนชั้นที่วัดจากโครงสร้างโดยการฉีดสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ไปยังตัวอย่างคอนกรีตนั้น สารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์จะมีการเปลี่ยนสีที่ค่า pH ประมาณ 9.2 แต่ในทางทฤษฎีพบว่าโอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมจะมีค่ามากกว่าค่า pH ที่ 9.2 ซึ่งอยู่ระหว่างค่า pH ที่ 9.2-13 ดังนั้นมาตรฐาน JSCE จึงมีการบวกระยะคาร์บอนชั้นเพิ่มไปอีก 10 มิลลิเมตร เพื่อความปลอดภัยของโครงสร้างดังสมการที่ (3) สำหรับสมการที่ (2) คือสมการพื้นฐานของการหาระยะคาร์บอนชั้น

$$x_{car,real} = k\sqrt{t_0} \quad (2)$$

$$k\sqrt{t} + 10 = x_{car,real}(pH) \quad (3)$$

โดยที่  $x_{car,real}$  คือระยะคาร์บอนเนชั่นที่วัดได้จากโครงสร้าง ณ อายุที่ทำการทดสอบ (มม.),  $x_{car,real(pH)}$  คือระยะคาร์บอนเนชั่นที่มีการบวกเพิ่ม 10 มม. ตามมาตรฐาน JSCE,  $k$  คือค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น (มม./เดือน<sup>1/2</sup>),  $t_0$  คืออายุของโครงสร้าง ณ เวลาที่ทำการทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น (เดือน) และ  $t$  คืออายุของโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์ (เดือน)

อย่างไรก็ตามจากสมการที่ (2) เป็นการคำนวณหาระยะคาร์บอนเนชั่น ณ อายุที่ทำการทดสอบเท่านั้น ในกรณีที่จะหาระยะคาร์บอนเนชั่นที่มีการแปรผันตามอายุโครงสร้าง จะต้องมีการเปลี่ยนค่า  $t$  ในสมการที่ (3) เป็น  $t_{1,2,...n}$  โดย 1,2...n คืออายุโครงสร้างที่มีการแปรผันตามเวลาที่ต้องการพิจารณา

จากแผนภาพจำลองความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นดังแสดงในรูปที่ 3ก, ข, ค ต้องมีการหาตัวแปรที่จะนำไปวิเคราะห์ตามหลักสถิติเพื่อหาความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น ประกอบด้วย 1) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสมมุติให้ค่าทั้งสองค่าดังกล่าวคงที่ตลอดอายุการใช้งาน 2) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคาร์บอนเนชั่นจะมีการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวแตกต่างกันคือให้ค่าเฉลี่ยของระยะคาร์บอนเนชั่นจะมีการแปรผันตามเวลาของอายุโครงสร้าง สำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ยจะสมมุติให้คงที่ตลอดอายุการใช้งาน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรสัมปกติมาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นโดยอาศัยสมการที่ (4) ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นผลของช่วงอายุใดอายุหนึ่งของโครงสร้างเท่านั้น เพราะฉะนั้นถ้าต้องการให้ตัวแปรสัมปกติมาตรฐานอายุโครงสร้างที่มีการแปรผันไปตามเวลาจึงจำเป็นต้องอาศัยสมการที่ (3) ที่มีตัวแปรเกี่ยวกับอายุโครงสร้างอยู่ด้วย

สำหรับที่จะทำการแปรผันอายุโครงสร้างให้ได้ค่าระยะคาร์บอนเนชั่นที่อายุโครงสร้างต่างๆ กัน จึงทำให้ค่าตัวแปรสัมปกติมาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นที่ได้หลากหลายอายุมากยิ่งขึ้น

$$Z = \frac{(\bar{X}_{car,real(pH)} - \bar{X}_{cover}) - (0)}{\sqrt{s_{car,real}^2 + s_{cover}^2}} \quad (4)$$

โดยที่  $Z$  คือค่าตัวแปรสัมปกติมาตรฐาน (นำไปเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้ง) ของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น, 0 คือค่าผลต่างของข้อมูลระยะคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ยและระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ยที่ทำให้เหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิม  $(\bar{X}_{car,real(pH)} > \bar{X}_{cover})$ ,  $\bar{X}_{cover}$  คือระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย (มม.),  $\bar{X}_{car,real(pH)}$  คือระยะคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ยที่มีการบวกเพิ่ม 10 มม. ตามมาตรฐาน JSCE (มม.),  $s_{car,real}$  คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ย และ  $s_{cover}$  คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย

เมื่อได้ค่าตัวแปรสัมปกติมาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นแล้ว นำค่าดังกล่าวมาเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐานซึ่งพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐานนี้คือความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม

จากรูปที่ 4, 5 และ 6 แสดงความสัมพันธ์ของอายุโครงสร้างกับความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจาก คาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอกำแพงแสน อำเภอเมือง และอำเภอนครชัยศรี ตามลำดับ ซึ่งพบว่าทุกช่วงอายุของโครงสร้างในทุกๆ สะพานลอยมีความเสี่ยงของการเกิดสนิมแตกต่างกัน เช่นเมื่อเปรียบเทียบกับอายุการใช้งานของโครงสร้าง 100 ปี ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจาก คาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยที่มี

สถานที่ตั้งในเขตอำเภอเมือง นครปฐม อาทิ สะพานลอย กม. 95+51 (หนองดินแดง) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 95.51 สะพานลอย กม.63+230 (ศาลยาวาชน) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 99.99, สะพานลอย กม.61+585 (บ้านหนองหิน) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 91.98 เป็นต้น มีความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจาก คาร์บอนเข้มข้นสูงกว่าสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอ นครชัยศรีและอำเภอกำแพงแสน เช่น สะพานลอย กม.47+485 (วัดเสถียร) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 56.38 และสะพานลอย กม.23+325 (ร.ร. กำแพงแสนวิทยา) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 30.91 เป็นต้น

ในขณะเดียวกันถ้าพิจารณาโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน เช่น สะพานลอย กม. 24+166 (โลตัสกำแพงแสน) และสะพานลอย กม. 17+835 (ทุ่งเศรษฐี) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเข้มข้นของสะพานลอยโลตัสกำแพงแสนสูงกว่าสะพานลอยทุ่งเศรษฐี แต่เมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของโครงสร้าง 100 ปีเท่ากัน พบว่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจาก คาร์บอนเข้มข้นของสะพานลอยทุ่งเศรษฐีเท่ากับร้อยละ 38.95 ซึ่งสูงกว่าสะพานลอยโลตัสกำแพงแสน เท่ากับร้อยละ 28.56 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากกระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ต่างกัน คือสะพานลอยทุ่งเศรษฐีมีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมน้อยกว่าสะพานลอยโลตัสกำแพงแสน ย่อมส่งผลให้ระยะ คาร์บอนเข้มข้นเข้าทำลายคอนกรีตจนส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมภายในคอนกรีตได้เร็วขึ้น

นอกจากนี้จากตารางที่ 2 และรูปที่ 5 และ 6 ยังพบอีกว่าโครงสร้างสะพานลอยที่มีอายุใกล้เคียงกัน คือสะพานลอย กม. 50 + 174 (วัดธรรมศาลา) ซึ่งมีที่ตั้งโครงสร้างอยู่ในอำเภอเมือง นครปฐมมีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเข้มข้นสูงกว่า

สะพานลอย 45 + 648 (วัดศิระทอง) แต่เมื่อเปรียบเทียบความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นพบว่าสะพานลอยวัดธรรมศาลา (ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 21.66 ที่อายุการใช้งาน 100 ปี) มีความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นน้อยกว่าสะพานลอยวัดศิระทอง (ความเสี่ยงของการเกิดสนิมร้อยละ 54.79 ที่อายุการใช้งาน 100 ปี) ทั้งนี้เนื่องจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ต่างกันคือระยะหุ้มเหล็กเสริมของสะพานลอยวัดศิระทองมีค่าน้อยกว่าสะพานลอยวัดธรรมศาลา ย่อมส่งผลให้ระยะคาร์บอนเข้มข้นเข้าทำลายคอนกรีตจนส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมภายในคอนกรีตได้เร็วขึ้น

ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณารูปที่ 4, 5 และ 6 พบว่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นที่อายุการใช้งานโครงสร้าง 100 ปีของสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในอำเภอนครชัยศรีมีแนวโน้มความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นสูงกว่าโครงสร้างที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขตอำเภอกำแพงแสน แต่ต่ำกว่าโครงสร้างที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในอำเภอเมือง นครปฐม

สำหรับความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้น ณ เวลาที่ทำการทดสอบระยะคาร์บอนเข้มข้น (พ.ศ.2558) ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าสะพานลอยที่มีที่ตั้งในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นสูงกว่าสะพานลอยที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอนครชัยศรีและกำแพงแสน จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นมีสาเหตุเนื่องมาจาก 1) อัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนเข้มข้นต่างกัน คือในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีอัตราการพัฒนา ระยะคาร์บอนเข้มข้นสูงกว่าในเขตอำเภอนครชัยศรีและกำแพงแสน 2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มีระยะต่างกัน ซึ่งจะมีส่วนทำให้คาร์บอนเข้มข้นไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริม จนทำให้ความเป็นต่าง

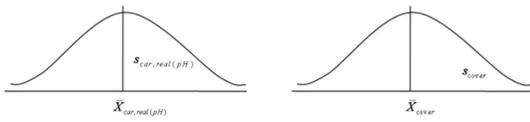
ของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤติได้ต่างกัน 3) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ที่มีปริมาณพอเหมาะต่อการเกิดคาร์บอนเนชันในอัตราที่ต่างกัน คือในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าในเขตอำเภอนครชัยศรีและกำแพงแสน

4) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างของแต่ละพื้นที่ต่างกัน และ 5) อายุของโครงสร้างต่างกัน คือโครงสร้างสะพานลอยในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีแนวโน้มการก่อสร้างก่อนโครงสร้างอาคารในเขตอำเภอกำแพงแสน จึงทำให้โครงสร้างสะพานลอยในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีอายุมากกว่าในเขตอื่นๆ

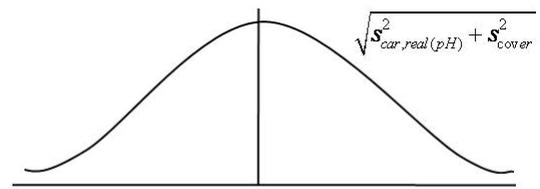
ตารางที่ 3 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และร้อยละความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชัน ณ เวลาที่ทำการทดสอบ (พ.ศ. 2558)

โครงสร้างสะพานลอยที่เข้าตรวจสอบ	สถานที่ตั้ง (อำเภอ)	อายุ (เดือน)	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		ความชื้นสัมพัทธ์		ร้อยละความเสี่ยงการเกิดสนิม
			ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ppm)	ระยะเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มม.)	
ก.ม.24+166 (โลตส์กำแพงแสน)	กำแพงแสน	183	670.19	12.01	37.05	12.79	0.03
ก.ม.23+325 (ร.ร.กำแพงแสนวิทยา)	กำแพงแสน	183	657.18	10.95	47.97	1.68	1.11
ก.ม.19+235 (หนองปลาไหล)	กำแพงแสน	183	661.72	10.38	44.20	8.90	9.44
ก.ม.17+835 (ทุ่งเศรษฐี)	กำแพงแสน	183	668.56	11.55	43.92	7.89	14.76
ก.ม.15+760 (ลาดหญ้าไทร)	กำแพงแสน	183	658.11	9.32	48.68	3.25	4.79
ก.ม.5+650 (กิโล 5)	เมือง	183	669.36	10.11	53.84	1.11	23.72
ก.ม.66+780 (ร.ร.พัฒนบริหารธุรกิจ)	เมือง	180	663.70	9.93	41.03	14.35	33.22
ก.ม.64+075 (หนองดินแดง)	เมือง	194	675.83	11.25	33.80	9.41	37.81
ก.ม.63+230 (ศาลยาวชน)	เมือง	167	690.85	7.21	34.95	8.69	61.72
ก.ม.61+585 (บ้านหนองหิน)	เมือง	269	696.15	6.21	40.14	12.62	44.62
ก.ม.59+785 (วัดลาดปลาเค้า)	เมือง	142	692.75	7.67	40.60	12.56	39.08
ก.ม.50+174 (วัดธรรมศาลา)	เมือง	207	697.16	4.85	51.77	7.19	4.12
ก.ม.47+485 (วัดเสถียร)	นครชัยศรี	171	695.17	6.40	46.45	10.71	12.10
ก.ม.45+648 (วัดศิระทอง)	นครชัยศรี	207	675.77	11.32	43.84	12.14	23.52
ก.ม.42+960 (วัดท่าตำหนัก)	นครชัยศรี	269	673.51	7.12	45.58	11.10	17.79

\*ร้อยละความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชัน ณ เวลาที่ทดสอบระยะคาร์บอนเนชัน (พ.ศ. 2558)

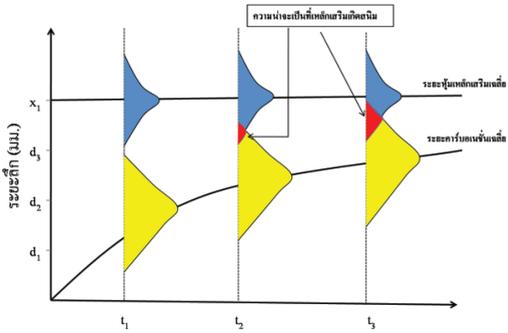


(ก) แผนภาพจำลองโค้งปกติของระยะคาร์บอนเนชั่นและระยะหุ้มเหล็กเสริม



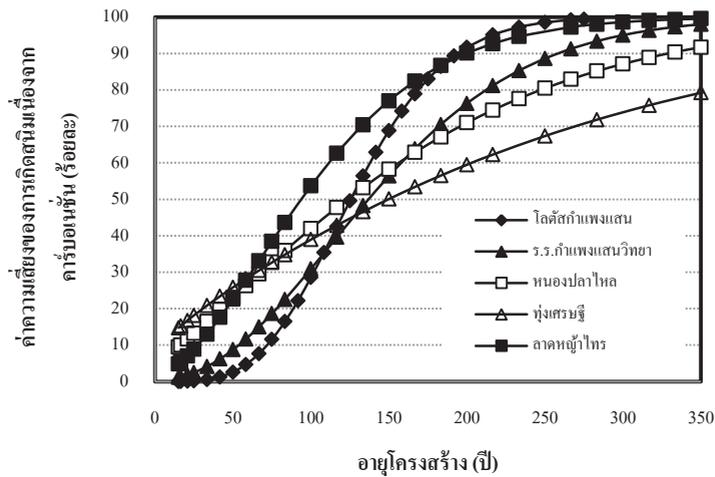
$$\bar{X}_{cor,real(pH)} - \bar{X}_{cover}$$

(ค) แผนภาพจำลองโค้งปกติที่เกิดจากการซ้อนทับของระยะคาร์บอนเนชั่นและระยะหุ้มเหล็กเสริม

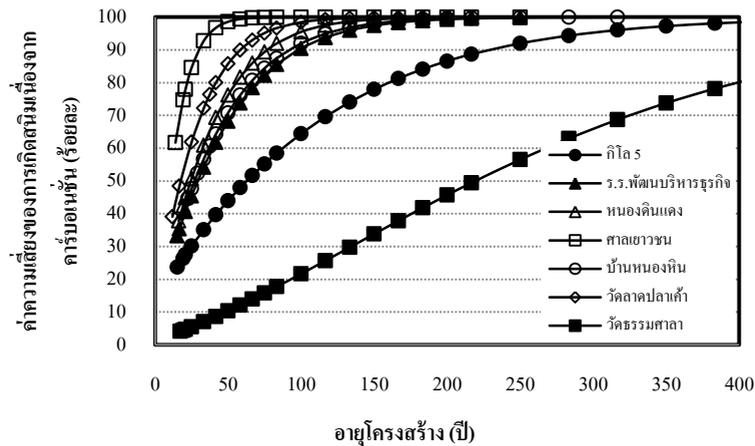


รูปที่ 3 แผนภาพแสดงกลไกความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นตามหลักความน่าจะเป็นทางสถิติ

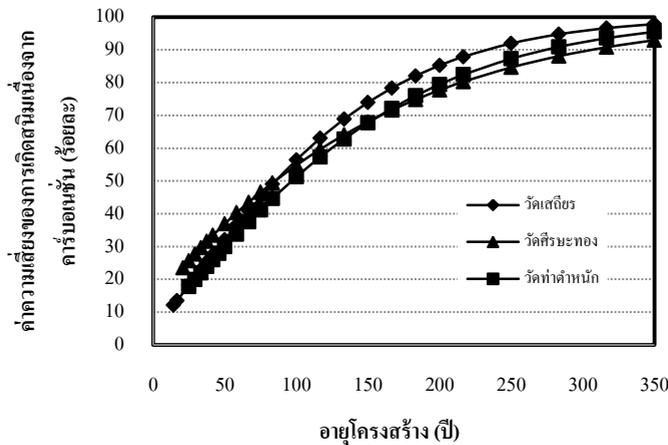
(ข) แผนภาพจำลองความเสี่ยงของระยะคาร์บอนเนชั่นและระยะหุ้มเหล็กเสริมที่มีการแปรผันตามอายุโครงสร้าง



รูปที่ 4 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขตอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 5 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากการบอเนชั่นของสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขตอำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 6 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากการบอเนชั่นของสะพานลอยที่มีตำแหน่งที่ตั้งในเขตอำเภอ นครชัยศรี จังหวัดนครปฐม

#### 4. สรุป

จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากการบอเนชั่นของโครงสร้างสะพานลอยที่อยู่ในเขตอำเภอเมืองนครปฐมมีค่าสูงกว่าในเขตอำเภอนครชัยศรีและกำแพงแสน

2) ด้วยวิธีการนำเสนอ สามารถคำนวณความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากการบอเนชั่นที่อายุต่างๆ กันของโครงสร้างได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้อง

เผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเข้มข้นตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## 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: 597-606.
- [2] J.Khunthongkeaw, S.Tangtermsirikul and T.Leelawat, 2006. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. Construction and Building Materials, Vol.20: 744-753.
- [3] N.I. Fattuhi, 1986. Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period. Materiaux et Constructions, Vol.19: 131-136.
- [4] Standard drawings, 1994. Kingdom of Thailand ministry of transport and communications department of highways.
- [5] คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์, 2535. ความน่าจะเป็นและสถิติ. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] JSCE Guidelines for Concrete No.6: Standard Specifications for Concrete Structures – 2002 “Materials and Construction”
- [7] บัญญัติ วารินทร์ไพล, รัตติพงษ์ สหมิตรมงคล, ปิติศานต์ กร้ามาตร และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2553. การสำรวจอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นของอาคารที่พักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล, เอกสารประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 6, ชะอำ เพชรบุรี, บทความเลขที่ MAT 64.
- [8] Tangtermsirikul S., 2003. Durability and mix design of concrete. First Edition, Printing House of Thammasat University.