

การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก  
เนื่องจากการบอบเนิ่น : กรณีศึกษาอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้าม  
ในจังหวัดสมุทรปราการ

EVALUATION OF DAMAGES AND DETERIORATIONS OF RC  
STRUCTURES DUE TO CARBONATION: CASE STUDY OF SCHOOL  
BUILDINGS AND PEDESTRIAN BRIDGES IN SAMUTPRAKARN  
PROVINCE

วิริยวัช คุชฌนทร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

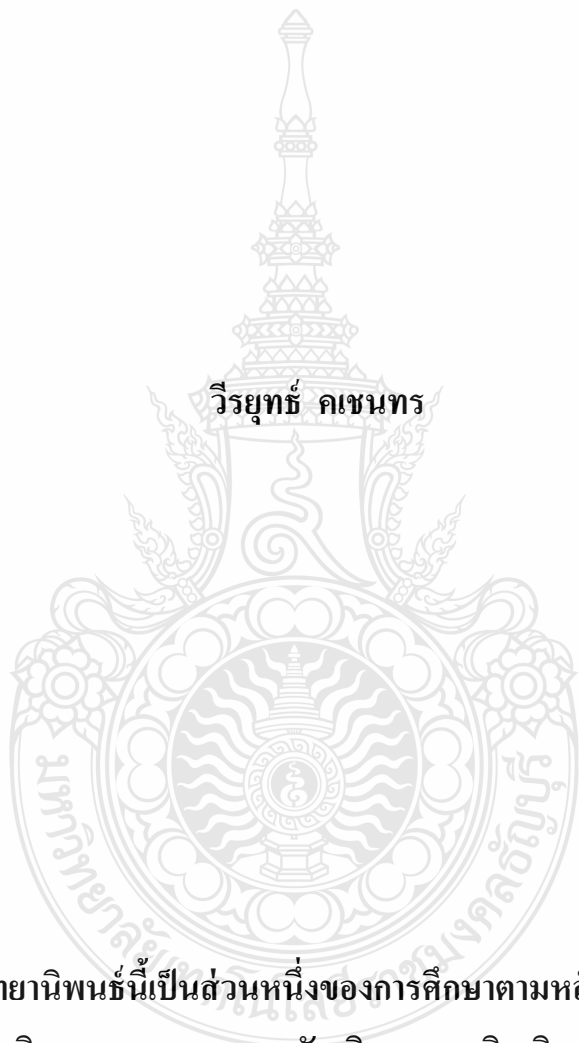
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก  
เนื่องจากคาร์บอนเนชั่น : กรณีศึกษาอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้าม  
ในจังหวัดสมุทรปราการ



วิริยฤทธิ์ คเชนทร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนชั้น : กรณีศึกษาอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามในจังหวัดสมุทรปราการ
ชื่อ- นามสกุล	นายวิรัช ทัศนพร
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา แขนงวิศวกรรมโครงสร้าง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศักดิ์ กร้ามาตร, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีชัย สาราญวานิช, Ph.D.
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดปัญหาคาร์บอนชั้นต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่งผลให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมและทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตสั้นลง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามเนื่องจากการเกิดคาร์บอนชั้น ในจังหวัดสมุทรปราการ โดยตรวจสอบกำลังอัดคอนกรีต ระยะหุ้มเหล็กเสริม ความหนาปูนฉาบและความลึกคาร์บอนชั้นของชิ้นส่วนของอาคารต่างๆ ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 18 แห่ง

จากผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดคอนกรีตและระยะหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุการใช้งานนานและขาดการบำรุงรักษา มีความลึกคาร์บอนชั้นสูงกว่าและค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นต่ำกว่า โครงสร้างที่มีอายุการใช้งานสั้นกว่า แต่จากการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมของโครงสร้างกลับพบว่า โครงสร้างที่มีอายุการใช้งานสั้นมีโอกาสที่โครงสร้างจะหมดอายุการใช้งานก่อน อาจเนื่องจากสภาพแวดล้อมในปัจจุบันมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของโครงสร้างอายุน้อยมีค่าสูง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นนั้น หากใช้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นแบบกระจายตัวคงที่จะให้ค่าความเสี่ยงสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นแบบแปรเปลี่ยนตามเวลา สุดท้ายพบว่าความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยที่วัดได้จากโครงสร้างจริงมีค่ามากกว่าความลึกคาร์บอนชั้นที่คำนวณตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง สำหรับ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญปัญหาคาร์บอนชั้น

**คำสำคัญ :** การประเมิน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนชั้น อาคารเรียน สะพานลอยเดินข้าม

<b>Thesis Title</b>	Evaluation of damages and deteriorations of RC structures due to carbonation : Case study of school buildings and pedestrian bridges in Samutprakarn Province
<b>Name -Surname</b>	Mr.Weerayut Khachenthon
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
<b>Thesis Co-advisor</b>	Assistant Professor Taweechai Sumranwanich, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2013

### **ABSTRACT**

Carbon dioxide is the cause of carbonation problem in reinforced concrete structure, leading to the steel corrosion in concrete and shortening the service life of the structure.

This research aims to evaluate the damages and deteriorations of RC structures of school buildings and pedestrian bridges due to carbonation in Samutprakarn province. The compressive strength of concrete, covering depth of reinforcing steel, plastering thickness and carbonation depth of members in 18 reinforced concrete (RC) structures were examined.

From the study, it was found that the compressive strengths of concrete and the covering depths of reinforcing steel of the RC structures were higher than that of the design values. RC structures with longer service age and lack of maintenance have deeper carbonation depth and lower carbonation coefficient than those with shorter service age. In the risk analysis it was found that structures with shorter service age have more opportunities of shorter service use. This might be because of the higher carbon dioxide concentration in present environment and leads to higher carbonation coefficient. In the comparison of the corrosion risk due to carbonation, it was seen that the use of constant distribution of carbonation coefficient results in higher corrosion risk than that of time-dependent distribution of carbonation coefficient. Finally, it was found that actual carbonation depths are higher than calculated carbonation depth determined from the code of Department of Public Works and Town & Country for RC structures exposed to carbonation problem.

**Keywords :** evaluation, RC structures, carbonation, school building, pedestrian bridge

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิตินันต์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวิชัย สำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการสอบ ดร.หมิง จิ่ง คณะกรรมการสอบ และ ดร.ภักวิวัฒน์ แสนเจริญ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้ให้ความกรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษาและให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาจังหวัดสมุทรปราการเขต 1 และ สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาเขต 6 ที่ให้ความอนุเคราะห์เข้าตรวจสอบโครงสร้างอาคารเรียน ขอขอบพระคุณ แขวงทางสมุทรปราการ ที่ให้ความอนุเคราะห์เข้าตรวจสอบโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้ออุปถัมภ์ในการทดสอบ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสืบค้น ตลอดจนผู้ร่วมงานในการทำวิจัยครั้งนี้ ทุกๆท่าน

ขอขอบพระคุณและมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ภรรยาและลูก พี่น้อง เพื่อนที่แสนดีและคณะครู-อาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ และเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจหากงานวิจัยในครั้งนี้ ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้

วิรุทธิ์ คชนทร

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	16
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	16
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	17
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	17
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	18
2.1 ปัญหาการเสื่อมสภาพของ โครงสร้างคอนกรีต.....	18
2.2 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอนชั้น.....	19
2.3 ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบเมื่อพิจารณาถึงความคงทน.....	21
2.4 การออกแบบเมื่อพิจารณาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนชั้น.....	26
2.5 การตรวจพินิจ.....	29
2.6 การทดสอบแบบไม่ทำลาย.....	30
2.7 การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นในคอนกรีต.....	34
2.8 สถิติและความน่าจะเป็น.....	34
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 ศึกษาสถานที่ตั้งและตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง.....	42
3.2 การตรวจพินิจความเสียหายของโครงสร้าง.....	46

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์.....	46
3.4 การทดสอบแบบไม่ทำลาย.....	47
3.5 การทดสอบคาร์บอนเนชั่น.....	48
3.6 วิเคราะห์ผลการศึกษา.....	50
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	51
4.1 ความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง.....	51
4.2 กำลังอัดของคอนกรีต.....	71
4.3 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม.....	78
4.4 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์.....	86
4.5 ความลึกคาร์บอนเนชั่น.....	88
4.6 การประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของ โครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก.....	91
4.7 การเปรียบเทียบความลึกคาร์บอนเนชั่นจาก โครงสร้างจริงและการออกแบบ.....	113
บทที่ 5 สรุปผล.....	118
5.1 สรุปผลจากการศึกษางานวิจัย.....	118
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	119
รายการอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก .....	124
ภาคผนวก ก ข้อมูล การสะท้อนกลับจากค้อนกระแทก ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ระยะความลึกคาร์บอนเนชั่น ปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ และ ความชื้นสัมพัทธ์.....	125
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	166
ประวัติผู้เขียน.....	177

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม ( $\alpha$ ).....	23
ตารางที่ 2.2 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป ( $C_c$ ) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป.....	23
ตารางที่ 2.3 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป ( $C_c$ ) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	24
ตารางที่ 2.4 ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด.....	26
ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น.....	27
ตารางที่ 3.1 โครงสร้างอาคารที่ศึกษาอัตราการเกิดคาร์บอนชั้น.....	42
ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งโครงสร้างอาคารเรียนที่ดำเนินการตรวจสอบ.....	43
ตารางที่ 3.3 ตำแหน่งโครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามที่ดำเนินการตรวจสอบ.....	44
ตารางที่ 4.1 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนสมุทรปราการ.....	52
ตารางที่ 4.2 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง.....	53
ตารางที่ 4.3 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนวัดทรงธรรม	54
ตารางที่ 4.4 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม.....	55
ตารางที่ 4.5 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์.....	56
ตารางที่ 4.6 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนนาคคีอนุสรณ์.....	57
ตารางที่ 4.7 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนบ้านคลองหลวง.....	58
ตารางที่ 4.8 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนวัดแพรกษา.....	59
ตารางที่ 4.9 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์.....	60



## สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.10 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.27+789	61
ตารางที่ 4.11 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.31+580	62
ตารางที่ 4.12 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.36+443	63
ตารางที่ 4.13 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.34+080	64
ตารางที่ 4.14 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.30+244	65
ตารางที่ 4.15 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.23+118	66
ตารางที่ 4.16 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.27+390	67
ตารางที่ 4.17 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.29+220	68
ตารางที่ 4.18 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.30+640	69
ตารางที่ 4.19 สรุปความเสียหายที่พบใน โครงสร้างอาคารเรียน.....	70
ตารางที่ 4.20 สรุปความเสียหายที่พบใน โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม.....	71
ตารางที่ 4.21 กำลังอัดเฉลี่ยที่ได้จากความสัมพันธ์ Japan Society of Civil Engineers (JSCE) ของ โครงสร้างอาคารเรียน.....	72
ตารางที่ 4.22 กำลังอัดเฉลี่ยที่ได้จากความสัมพันธ์ Japan Society of Civil Engineers (JSCE) ของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม.....	72
ตารางที่ 4.23 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตของ โครงสร้างอาคารเรียน.....	77
ตารางที่ 4.24 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ในคอนกรีตของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม...	78
ตารางที่ 4.25 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและปูนฉาบเฉลี่ย (อาคารเรียน).....	79
ตารางที่ 4.26 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและปูนฉาบเฉลี่ย (สะพานลอยเดินข้าม).....	79
ตารางที่ 4.27 ปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของ สิ่งแวดลอม (อาคารเรียน).....	87
ตารางที่ 4.28 ปริมาณก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของ สิ่งแวดลอม (สะพานลอยเดินข้าม).....	88
ตารางที่ 4.29 ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของ โครงสร้าง อาคารเรียน.....	89

## สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.30 ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของโครงสร้าง สะพานลอยเดินข้าม.....	89
ตารางที่ 4.31 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของอาคารเรียน ณ เวลา ที่ทำการ ทดสอบ (พ.ศ.2556) ที่อายุการใช้งาน 50 ปี และ 100 ปี.....	100
ตารางที่ 4.32 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยเดิน ข้าม ณ เวลาที่ทำการทดสอบ (พ.ศ.2556) ที่อายุการใช้งาน 50 ปี และ 100 ปี...	100
ตารางที่ 4.33 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น.....	114
ตารางที่ 4.34 ความลึกคาร์บอนชั้นที่ได้จากการออกแบบ (ไม่มีผลของสีและความหนา ปูนฉาบ) กับโครงสร้างจริง (รวมความหนาปูนฉาบและสี) อาคารเรียน.....	116
ตารางที่ 4.35 ความลึกคาร์บอนชั้นที่ได้จากการออกแบบ (ไม่มีผลของสีและความหนา ปูนฉาบ) กับโครงสร้างจริง (รวมความหนาปูนฉาบและสี) สะพานลอยเดินข้าม	117



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นในคอนกรีต.....	20
รูปที่ 2.2 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้นทั่วไป.....	28
รูปที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เกลือลอยในวัสดุประสาน.....	29
รูปที่ 2.4 เครื่องมือรีบาวด์แฮมเมอร์ (Schmidt Rebound Hammer).....	30
รูปที่ 2.5 เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก.....	32
รูปที่ 2.6 เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	33
รูปที่ 2.7 โค้งปกติ (Normal curve).....	35
รูปที่ 2.8 ผลต่างของค่าเฉลี่ยตัวอย่างจากประชากร.....	36
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการตรวจสอบโครงสร้างอาคาร.....	41
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของโครงสร้างอาคารเรียน.....	43
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม.....	44
รูปที่ 3.4 สภาพแวดล้อมของจังหวัดสมุทรปราการ.....	45
รูปที่ 3.5 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์.....	47
รูปที่ 3.6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยก้อนกระแทก.....	47
รูปที่ 3.7 การหาตำแหน่งเหล็กและวัดระยะหุ้มเหล็ก.....	48
รูปที่ 3.8 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่านหัวเจาะแบบ Hole Saw.....	49
รูปที่ 3.9 การทดสอบหาความลึกคาร์บอนชั้น.....	49
รูปที่ 3.10 การวัดความลึกคาร์บอนชั้น.....	50
รูปที่ 4.1 ค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่วัดได้จากโครงสร้างอาคารเรียน A1-A9.....	74
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปี และอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานที่ได้จากการคำนวณ โดย “FACOMP T2.0” .....	77
รูปที่ 4.3 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A1 โรงเรียนสมุทรปราการ.....	80
รูปที่ 4.4 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง.....	80

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม.....	81
รูปที่ 4.6 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม.....	81
รูปที่ 4.7 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์.....	81
รูปที่ 4.8 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A6 โรงเรียนนาคคือนุสรณ์.....	82
รูปที่ 4.9 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง.....	82
รูปที่ 4.10 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A8 โรงเรียนวัดแพรภษา.....	82
รูปที่ 4.11 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์.....	83
รูปที่ 4.12 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B1 กม.27+789.....	83
รูปที่ 4.13 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B2 กม.31+580.....	83
รูปที่ 4.14 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B3 กม.36+443.....	84
รูปที่ 4.15 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B4 กม.34+080.....	84
รูปที่ 4.16 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B5 กม.30+244.....	84
รูปที่ 4.17 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B6 กม.23+118.....	85

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.18 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B7 กม.27+390.....	85
รูปที่ 4.19 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B8 กม. 29+220.....	85
รูปที่ 4.20 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B9 กม. 30+640.....	86
รูปที่ 4.21 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปีโดย NOAA .....	87
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยกับอายุของโครงสร้าง.....	90
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยกับกำลังอัดของ โครงสร้าง.....	90
รูปที่ 4.24 กลไกความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นตามหลักความน่าจะเป็น ทางสถิติ.....	93
รูปที่ 4.25 ขั้นตอนการคำนวณหาความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น แบบการกระจายตัวคงที่.....	96
รูปที่ 4.26 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียน ช่วงอายุโครงสร้างมากกว่า 24 ปี ขึ้นไป (A1,A2,A3).....	97
รูปที่ 4.27 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียน ช่วงอายุโครงสร้าง ระหว่าง 12-24 ปี (A4,A5,A6).....	97
รูปที่ 4.28 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียน ช่วงอายุโครงสร้าง ระหว่าง 0-12 ปี (A7,A8,A9).....	98
รูปที่ 4.29 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยเดิน ข้าม ช่วงอายุโครงสร้างมากกว่า 15 ปี ขึ้นไป (B1,B2,B3).....	98
รูปที่ 4.30 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยเดิน ข้ามช่วงอายุโครงสร้าง ระหว่าง 10-15 ปี (B4,B5,B6).....	99

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.31 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของสะพานลอยเดินข้าม ช่วงอายุโครงสร้างระหว่าง 0-10 ปี (B7,B8,B9).....	99
รูปที่ 4.32 ขั้นตอนการกำหนดค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น แบบแปรเปลี่ยนตามเวลา.....	103
รูปที่ 4.33 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A1 โรงเรียนสมุทรปราการ.....	104
รูปที่ 4.34 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง.....	104
รูปที่ 4.35 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม.....	105
รูปที่ 4.36 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัย สงคราม.....	105
รูปที่ 4.37 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์.....	106
รูปที่ 4.38 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A6 โรงเรียนนาคคืออนุสรณ์.....	106
รูปที่ 4.39 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง.....	107
รูปที่ 4.40 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A8 โรงเรียนวัดแพรกษา.....	107
รูปที่ 4.41 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A9 โรงเรียนมัธยม วัดศรีจันทร์ประดิษฐ์.....	108
รูปที่ 4.42 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B1 กม.27+789.....	108

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.43 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B2 กม.31+580.....	109
รูปที่ 4.44 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B3 กม.36+443.....	109
รูปที่ 4.45 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B4 กม.34+080.....	110
รูปที่ 4.46 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B5 กม.30+224.....	110
รูปที่ 4.47 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B6 กม.23+118.....	111
รูปที่ 4.48 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B7 กม.27+390.....	111
รูปที่ 4.49 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B8 กม.29+220.....	112
รูปที่ 4.50 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับ แปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B9 กม.30+640.....	112
รูปที่ 4.51 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น.....	115
รูปที่ 4.52 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เกลือในวัสดุประสาน.....	115
รูปที่ 4.53 ความลึกคาร์บอนชั้นที่ได้จากโครงสร้างจริงเทียบกับความลึกคาร์บอนชั้นตาม มาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับ โครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนชั้น.....	117

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สิ่งก่อสร้างในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น อาคารสำนักงาน อาคารที่พักอาศัย อาคารเรียน สะพาน และถนน เป็นต้น ซึ่งอาคารและสิ่งก่อสร้างที่มีการใช้งานมานานและไม่ได้มีการดูแลบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง อาจมีการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงที่โครงสร้างนั้นตั้งอยู่ได้ ซึ่งส่วนใหญ่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมักพบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ (Cl) หรือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และหากไม่มีการบำรุงรักษาที่เหมาะสม โครงสร้างจะเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง

ดังนั้น ในปัจจุบันปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญและพบเห็นได้ทั่วไป อาทิ เช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนเมืองหรือย่านอุตสาหกรรมที่มีโรงงานอุตสาหกรรมและการจราจรหนาแน่น ซึ่งอาจสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยทั้งปีประมาณ 600 ถึง 650 ppm ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ระดับผิวเหล็กเสริมลดลงถึงจุดหนึ่ง (pH ประมาณ 9) เหล็กเสริมจะสูญเสียความต้านทานการเกิดสนิม (Depassivation) ได้ และหากมีออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และความชื้น (H<sub>2</sub>O) กระบวนการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้นทันที

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษารวบรวมข้อมูลการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นของอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้าม ในจังหวัดสมุทรปราการ เนื่องจากจังหวัดสมุทรปราการเป็นจังหวัดที่มีจำนวนประชากรหนาแน่นและเป็นเมืองอุตสาหกรรม ซึ่งมีสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงที่สามารถทำให้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพลงได้ โดยนำข้อมูลสาเหตุและปัจจัยการเสื่อมสภาพของโครงสร้างดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเข้มข้นของโครงสร้าง พร้อมทั้งหาความสัมพันธ์ระดับการเสื่อมสภาพกับปัจจัยต่างๆ ของโครงสร้างจริงเพื่อนำมาเปรียบเทียบความสึกกร่อนจากการออกแบบ การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเทียบกับมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต โดยพิจารณาถึงความคงทนของมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง พ.ศ.2550 ด้วย



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากคาร์บอนเนชั่น พร้อมทั้งสาเหตุและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้าง

1.2.2 เพื่อหาความสัมพันธ์ของระดับการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และประเมินโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นที่โครงสร้าง

1.2.3 ประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อทราบอายุการใช้งานที่เหลือของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยข้อมูลคุณสมบัติของคอนกรีตและสิ่งแวดล้อม

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเสื่อมสภาพโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระยะเวลาการเผชิญสิ่งแวดล้อมต่างๆ กัน 3 ช่วงระยะเวลา (0-12 ปี 12-24 ปี และมากกว่า 24 ปีขึ้นไป) ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้าม ในจังหวัดสมุทรปราการ ด้วยการตรวจสอบพินิจการเป็นสนิมของโครงสร้าง และการวัดความลึกคาร์บอนเนชั่น พร้อมข้อมูลกำลังอัดของโครงสร้าง และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณโครงสร้างตั้งอยู่ด้วย

1.3.2 ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่นกับคุณสมบัติคอนกรีตและสิ่งแวดล้อมที่โครงสร้างตั้งอยู่ พร้อมทั้งนำแบบจำลองมาใช้ เพื่อทำนายความลึกคาร์บอนเนชั่นจากข้อมูลที่วัดได้

## 1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

1.4.1 ทำให้ทราบข้อมูลของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น พร้อมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้าง

1.4.2 ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของระดับการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และประเมินโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นที่โครงสร้าง

1.4.3 สามารถนำแบบจำลองเพื่อทำนายความลึกคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสิ่งแวดล้อมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยข้อมูลคุณสมบัติของคอนกรีตและสิ่งแวดล้อม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้วางแผนการบำรุงซ่อมแซมโครงสร้างได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ และทราบอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เหลืออยู่ด้วย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต [1]

ลักษณะของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจะแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเสื่อมสภาพในรูปแบบต่างๆกันนั้นจะมีลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้นการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพนั้นจึงทำได้จากการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมสภาพ

อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางโครงสร้างอาจจะเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุหลักมากกว่าหนึ่งสาเหตุ หรือ อาจจะได้รับ ความเสียหายจากการรับแรงที่มากเกินไป หรืองานก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งจะทำให้ความต้านทานการเสื่อมสภาพของโครงสร้างลดลงอย่างมาก

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

2.1.1 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) การทรุดตัว (Settlement) การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage) การแข็งตัวและเหลวของน้ำในคอนกรีต (Freezing and Thawing)

2.1.2 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) ได้แก่ คาร์บอนเนชัน (Carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction)

2.1.3 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) ได้แก่ การขัดสี (Abrasion) การชะล้างด้วยกระแสน้ำและกระแสน้ำกรวดทราย (Erosion) และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitation)

2.1.4 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) ได้แก่ การเสื่อมสภาพ โดย ตะไคร่ รา รากพืช หรือแบคทีเรียบางประเภท

2.1.5 การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (Mixed Process) ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

## 2.2 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น

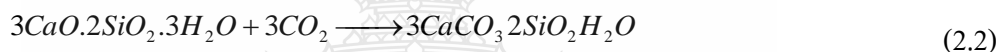
### 2.2.1 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีต

คาร์บอนเนชั่น เกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศซึ่งมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.03-0.1 โดยปริมาตร [2] (จะมีความเข้มข้นสูงกว่านี้หากอยู่ในบริเวณของแหล่งชุมชน หรือโรงงานอุตสาหกรรม)

คาร์บอนเนชั่น เป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรด ( $CO_2$ ) เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว (Alkaline Cement Paste) โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก ทำให้ได้ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) นอกจากนี้ยังอาจเกิดสารประกอบอื่น ๆ เช่น ไฮเดรตของซิลิกา ไฮเดรตของอลูมินา ดังสมการ



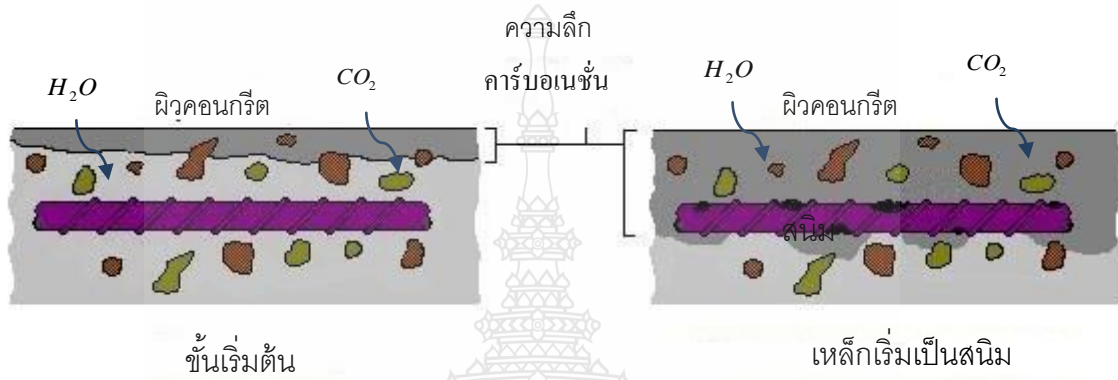
หรือ



โดยปกติซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างสูงโดยมีค่า pH ระหว่าง 12.6 ถึง 13.5 และอาจลดลงเหลือเพียง 8 ถึง 9 ถ้าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจนหมด ซึ่งหากมีอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นมากจะทำให้การเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและทำให้ฟิล์มที่เคลือบอยู่ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตถูกทำลายลงจึงอาจส่งผลให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมในที่สุด [3]

ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยาของสมการที่ 2.1 มากกว่า สมการที่ 2.2 และในความเป็นจริงแล้ว ทั้งสองปฏิกิริยาต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของสารละลาย คอนกรีตที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลงเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น จะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี โดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังนั้นคาร์บอนเนชั่นจะค่อยๆคืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆเพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วซึ่งมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และ น้ำ ( $H_2O$ ) ตามรูปที่ 2.1

ดังนั้นในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิท จะไม่เกิดคาร์บอนเนชัน เนื่องจากในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทก็จะไม่มีน้ำในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นคาร์บอนเนชันที่รุนแรง ในกรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่าง กึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-Dry) นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 ซึ่งเป็นความชื้นที่เกิดคาร์บอนเนชันได้มากที่สุด [4]



รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันในคอนกรีต [5]

คาร์บอนเนชันทำให้เกิดผลสำคัญ 3 ประการ คือ

1. ทำให้เกิดความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง
2. ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนเนชันเกิดเข้าไป จนถึงตำแหน่งเหล็กเสริม จนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤต
3. ทำให้เกิดการหดตัว (Carbonation Shrinkage) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ภายใต้น้ำหนักแรงอัดที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งหรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ผลของคาร์บอนเนชัน ทั้ง 3 กรณีนี้ ในกรณีที่ 2 คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ทำให้

ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนเนชั่นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

#### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น

1. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ขึ้นและแห้งเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นรุนแรง
2. ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ยิ่งมากก็จะทำให้การเกิดคาร์บอนเนชั่นรุนแรง
3. อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นดำเนินไปเร็ว
4. ความพรุนของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำต่ำจะเกิดคาร์บอนเนชั่นได้เร็วและมาก
5. การใช้สารปอซโซลานบางชนิด จะทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นมากขึ้นถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไป

#### 2.2.3 การป้องกันการเกิดคาร์บอนเนชั่น

1. ออกแบบให้คอนกรีตมีความพรุนต่ำ เช่น ใช้ปริมาณน้ำน้อย อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ หรือใช้วัสดุเติมช่องว่าง (Filler) เช่น ซิลิกาฟูม จะช่วยให้คอนกรีตมีอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นลดลง
2. บ่มคอนกรีตให้ดี การบ่มคอนกรีตให้ยาวนานขึ้นจะทำให้คอนกรีตบริเวณผิวและใกล้ผิวคอนกรีตมีความทึบน้ำดีขึ้น
3. สำหรับการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก ควรออกแบบโครงสร้างให้มีระยะหุ้มเหล็กเสริมมากขึ้น ถ้าทราบว่าโครงสร้างดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีคาร์บอนเนชั่นรุนแรง

### 2.3 ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบเมื่อพิจารณาจากความคงทน [6]

#### 2.3.1 วัสดุผสมคอนกรีตและคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย หินหรือกรวด และสารผสมเพิ่มชนิดต่างๆ และได้รับการบ่มด้วยความชื้นจนมีกำลังและคุณสมบัติอื่นๆ ตามที่ต้องการ วัสดุที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องมีคุณภาพดังต่อไปนี้

1. ปูนซีเมนต์ที่จะใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องเป็นปูนซีเมนต์ประเภท Portland Cement Type 1 เป็นหลัก หรืออาจจะใช้ปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ ในกรณีที่ต้องการแก้ปัญหาเฉพาะ โดยปูนซีเมนต์ต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 [7] หากมีการใช้สาร

ปอซโซลานให้อ้างอิงมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับสารประเภทนั้นๆ หรืออ้างอิงมาตรฐานอื่นๆ ที่เทียบเท่า เช่น อ้างอิงมาตรฐาน มอก.2135 [8] สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์

2. ทราาย ให้ใช้ทราายน้ำจืดที่มีคุณภาพดี สะอาด มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 566 [9] หรือมาตรฐานASTM C33 [10]

3. หิน ที่สามารถใช้ในการผสมคอนกรีตต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 566 หรือตามมาตรฐาน ASTM C33

4. น้ำ ที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องเป็นน้ำจืดใสสะอาดที่มีปริมาณสารปนเปื้อน เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ความเป็นกรดค้าง หรือสารแขวนลอย อยู่ในปริมาณที่ไม่มาก และจะไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตเช่น การพัฒนากำลังของคอนกรีต หรือ ความคงทน มาตรฐาน ASTM C94 [11]

5. สารผสมเพิ่ม ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C494 [12]

กำลังของคอนกรีต (Strength of Concrete) ให้ใช้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เป็นเกณฑ์ ยกเว้นในกรณีที่ระบุเป็นอย่างอื่น ทั้งนี้การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตให้ใช้วิธีการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐานของ ASTM C39 [13] สำหรับแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก หรือ BS 1881-116 สำหรับแท่งตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881-116 จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 250 กก./ซม<sup>2</sup>. และกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 200 กก./ซม<sup>2</sup>. ยกเว้นในกรณีที่ระบุเป็นอย่างอื่น

### 2.3.2 ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด

ในการออกแบบคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริม ไม่น้อยกว่าระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด ซึ่งระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_{\min} = \alpha \cdot C_0 \quad (2.3)$$

โดยที่  $C$  คือ ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริม หน่วยเป็น (มม.)

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริม (ดูตารางที่ 2.1)

$C_0$  คือ ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป หน่วยเป็น (มม.) (ดูตารางที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม ( $\alpha$ )

ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ( $w/b$ ) หรือ กำลังอัดประลัย ( $f_c'$ ) ทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน	ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม
$w/b > 0.65$ หรือ $f_c' < 20$ MPa	1.2
$0.45 \leq w/b \leq 0.65$ หรือ $20 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 40 \text{ MPa}$	1.0
$w/b < 0.45$ หรือ $f_c' > 40 \text{ MPa}$	0.9*

หมายเหตุ

(\*) ยกเว้นกรณีที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไปไม่เกิน 20 มม. และกรณีที่ต้องเผชิญกับกรดหรือเผชิญกับสถานะซัลเฟตตั้งแต่ระดับปานกลางขึ้นไป ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 1.0

ตารางที่ 2.2 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป ( $C_0$ ) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
<b>(ก) คอนกรีตหล่อในที่</b>	
1) คอนกรีตที่หล่อติดกับดิน โดยใช้ดินเป็นแบบ และผิวคอนกรีตสัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน	75
2) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 16 มม.	50
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	40
3) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือ ไม่ถูกแดดฝน ในแผ่นพื้น ผนัง และตง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	40
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่าในคาน	20
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กถูกตั้งในเสา	40
- เหล็กปลอกเดี่ยวยหรือปลอกเกลียว	40
<b>(ข) คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน)</b>	
1) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน	
ในแผ่นผนัง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	40
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	20

ตารางที่ 2.2 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป ( $C_0$ ) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป (ต่อ)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
<p>ในองค์อาคารอื่น</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป</li> <li>- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม. ถึง 36 มม.</li> <li>- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า</li> </ul> <p>2) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน</p>	<p>50</p> <p>40</p> <p>30</p>
<p>ในแผ่นพื้นผนัง และตง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป</li> <li>- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่าในคาน</li> <li>- เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้ง</li> </ul>	<p>30</p> <p>15</p> <p>25</p>
<p>ในเสา</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- เหล็กลูกตั้ง เหล็กปลอกเดี่ยวยหรือปลอกเกลียว</li> </ul>	<p>30</p>
<p>(ค) คอนกรีตที่หล่อในน้ำ</p>	<p>100</p>

ตารางที่ 2.3 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป ( $C_0$ ) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีความเสี่ยง ต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
<p>(ก) คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- แผ่นพื้น และผนัง</li> <li>- องค์อาคารอื่น</li> </ul>	<p>50</p> <p>65</p>
<p>(ข) คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน) ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- แผ่นพื้น และผนัง</li> <li>- องค์อาคารอื่น</li> </ul>	<p>40</p> <p>50</p>



### ข้อเสนอแนะ

วิศวกรผู้ออกแบบไม่สามารถกำหนดระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมให้น้อยกว่า แต่สามารถกำหนดระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมให้มากกว่าค่านี้ได้ ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานที่ต้องการ

#### 2.3.3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

โดยปกติจะกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามต้องการ แต่ สำหรับลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อม ที่มีผลต่อความคงทนของคอนกรีต เพื่อให้คอนกรีตมีความ คงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ จำเป็นต้องกำหนดอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานให้ต่ำ ถึงแม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้อาจจะสูงกว่ากำลังอัดที่ต้องการ ในการรับน้ำหนัก บรรทุกที่ออกแบบก็ตาม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด ให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

#### อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด

- |  |      |
|--|------|
| 1) คอนกรีตที่ต้องการความทึบน้ำ.....  | 0.50 |
| 2) คอนกรีตในสถานะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีต<br>ระดับปานกลาง..... | 0.50 |
| 3) คอนกรีตในสถานะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีต<br>ระดับรุนแรง.....  | 0.45 |

### ข้อเสนอแนะ

วิศวกรผู้ออกแบบสามารถกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำกว่าค่าที่กำหนดในหัวข้อนี้ได้ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ 2.4

#### 2.3.4 ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด

ในบางโอกาส องค์กรบางประเภท เช่น คาน อาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงรอยร้าวได้ เช่น รอยร้าวที่เกิดจากโมเมนต์ดัดได้ ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้มักไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงขององค์กร ถ้าองค์กรนั้นไม่ได้มีการเสื่อมสภาพ อย่งไรก็ดี รอยร้าวที่มีความกว้างมากก็จะเป็นผลให้สารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต และเหล็กเสริมซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย ทำให้องค์กรนั้นเสื่อมสภาพเร็วขึ้นและมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมขนาดความกว้างของรอยร้าวไม่ให้มากเกินไป ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด สำหรับโครงสร้างในสภาพแวดล้อมทั่วไป หรือในสภาพแวดล้อมที่เผชิญต่อการเป็นสนิมของเหล็กเสริม สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	เหล็กเสริมทั่วไป (มม.)	เหล็กเสริมอัดแรง (มม.)
สภาวะทั่วไป	$0.005 \times C$	$0.004 \times C$
สภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิม	$0.004 \times C$	ห้ามมีรอยร้าว
สภาวะเสี่ยงต่อการเกิดสนิมรุนแรง	$0.0035 \times C$	ห้ามมีรอยร้าว

หากระยะหุ้มเหล็กเสริม ( $C$ ) เกิน 100 มม. ให้ใช้ค่า 100 มม. ในการคำนวณหาความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด

**ข้อเสนอแนะ**

วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดขนาดความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุดให้ต่ำกว่าค่าในตารางก็ได้ ถ้าต้องการให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

**2.4 การออกแบบเมื่อพิจารณาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น**

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลง จนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ตัวอย่างของสภาพแวดล้อมที่มีคาร์บอนเนชั่น เช่น โครงสร้างในที่จอดรถ โครงสร้างริมถนนหรือได้สะพานบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น โครงสร้างใต้สะพานที่เผชิญกับเขม่าควันต่างๆ ตลอดจนในอาคารที่มีผู้คนอยู่มาก เป็นต้น เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและมีอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ความลึกคาร์บอนเนชั่นในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาให้มีค่าน้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการต่อไปนี้ในการออกแบบ

$$C \geq \gamma_i \cdot X_c \tag{2.4}$$

- โดยที่  $C$  คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (มม.)
- $\gamma_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย
- $X_c$  คือ ความลึกคาร์บอนเนชั่นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับ

สภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

โดยที่  $\gamma_i$  มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดภัย บำรุงรักษาน้อยกว่า 15 ปี และมีค่าเท่ากับ 1.1 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดภัย บำรุงรักษาตั้งแต่ 15 ปี ขึ้นไป

ความลึกคาร์บอนชั้นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ ออกแบบ ( $X_c$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_r} \quad (2.5)$$

โดยที่  $X_c$  คือ ความลึกคาร์บอนชั้นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

$\alpha_1$  คือ สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น เช่น ฝน

$\alpha_2$  คือ สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น

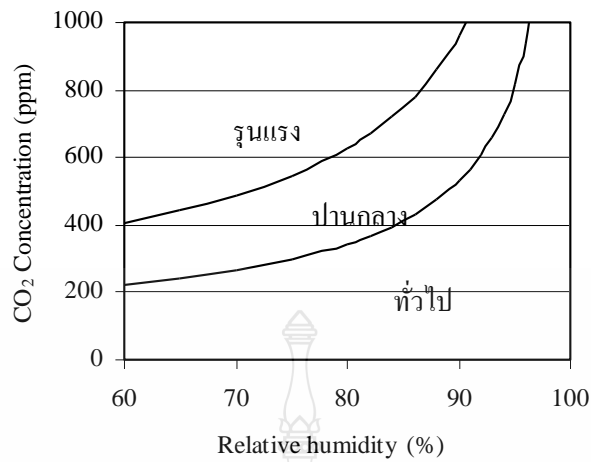
$t_r$  คือ อายุการใช้งานของคอนกรีตที่ต้องการ หน่วยเป็น ปี

โดยที่  $\alpha_1$  มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น และมีค่าเท่ากับ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อม คาร์บอนชั้น ( $\alpha_2$ ) สามารถกำหนดได้จาก ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	$\alpha_2$
สถานะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง	1.00

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 2.2 โดย ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ ก่อสร้าง



รูปที่ 2.2 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเข้มข้นทั่วไป

สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเข้มข้น ( $k$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

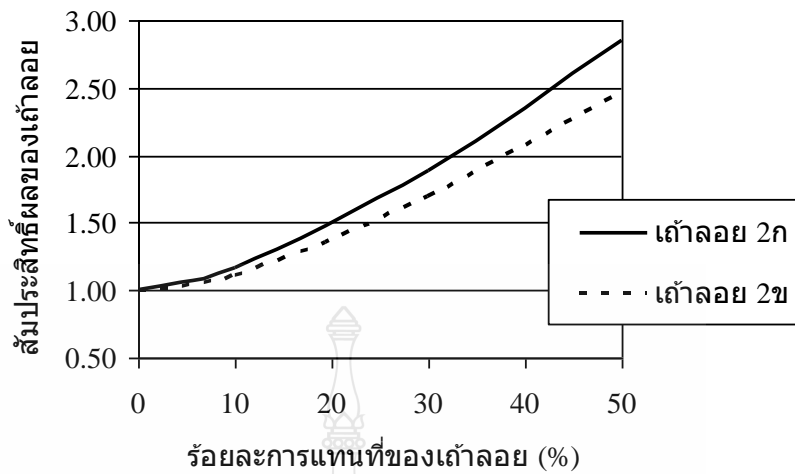
$$k = 17.5.k_r.(w/b)^3 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $k$  คือ สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเข้มข้น หน่วยเป็นมิลลิเมตร/ปี

$k_r$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่แก๊สในวัสดุประสาน (แก๊สชนิด 2ก และ 2ข ตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)

$w/b$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่แก๊สในวัสดุประสาน ( $k_r$ ) สามารถกำหนดได้ โดยใช้รูปที่ 2.2 (ชนิดของแก๊ส 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)



รูปที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน

### ข้อเสนอแนะ

สมการการออกแบบความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นชุดนี้ สามารถใช้ในกรณีของคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ไม่เกิน 0.65 และมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานไม่เกินร้อยละ 50 ในกรณีของคอนกรีตที่มีรอยร้าว ผลของการมีรอยร้าวจะทำให้อายุการใช้งานที่ปลอดภัยการบำรุงรักษาสั้นลง ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น ( $k$ ) ในสมการที่ 2.6 ไม่ได้คำนึงถึงผลของรอยแตกร้าว หากต้องการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีรอยร้าวหรือใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเกิน 0.65 หรือมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานเกินกว่าร้อยละ 50 ควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

### 2.5 การตรวจพินิจ

การตรวจพินิจ (Visual Inspection) หมายถึง การตรวจสอบด้วยตาเปล่า ประกอบกับอุปกรณ์การตรวจสอบพื้นฐาน เช่น ไม้บรรทัด มาตรฐานวัดความกว้างของรอยร้าว โดยไม่มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นการสำรวจทางกายภาพด้วยสายตา เพื่อตรวจสอบสภาพการชำรุดและการประเมินโครงสร้าง การสำรวจทางกายภาพด้วยสายตานี้ถือเป็นขั้นตอนแรกและเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากในการตรวจสอบโครงสร้าง เนื่องจากความเสียหายของโครงสร้างส่วนใหญ่ที่สามารถมองเห็นได้ ดังนั้นการสำรวจทางกายภาพด้วยสายตาจึงสามารถบอกได้ถึงข้อมูลสำคัญต่างๆ เช่น คุณภาพของการก่อสร้าง สภาพการใช้งาน การเสื่อมสภาพของวัสดุ รูปแบบของการแตกร้าว รวมถึงการชำรุดของชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นต้น และบอกได้ถึงระดับความรุนแรงของความเสียหาย

นอกจากนี้ยังช่วยในการตั้งสมมุติฐานสาเหตุของความเสียหายได้ขั้นตอนของการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวทางดังต่อไปนี้

2.5.1 การรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้าง เช่น แบบโครงสร้าง ประวัติการใช้งาน ข้อมูลวัสดุ ตำแหน่งของโครงสร้าง โดยเฉพาะส่วนที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของโครงสร้างที่อยู่ภายในจุดประสงค์ของการตรวจสอบ

2.5.2 การสำรวจสภาพของโครงสร้างด้วยการตรวจพินิจ โดยอาจใช้อุปกรณ์พื้นฐานประกอบการสำรวจเช่น กล้องถ่ายรูป หรือ สายวัด เป็นต้น เพื่อช่วยในการเก็บข้อมูล

2.5.3 การตรวจสอบเพิ่มเติมด้วย การเจาะตัวอย่างทดสอบคอนกรีต หรือ การเก็บผงตัวอย่างเพื่อการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี หรือ การสุ่มทดสอบโครงสร้างบางส่วนด้วยเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย

2.5.4 การประเมินลักษณะของความเสียหาย สาเหตุของความเสียหาย และระดับของความเสียหายในปัจจุบันจากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจและตรวจสอบ

2.5.5 การวางแผนในการดำเนินการหยุดความเสียหาย หรือ การเสื่อมสภาพของโครงสร้าง หรือ ทำการซ่อมแซมโครงสร้างด้วยวิธีการที่เหมาะสม

## 2.6 การทดสอบแบบไม่ทำลาย [14]

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive Tests) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของคอนกรีตหรือเพื่อตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยที่ไม่ทำให้คอนกรีตได้รับความเสียหายหรือเกิดความเสียหายน้อยที่สุด การทดสอบแบบไม่ทำลายที่ดีจะใช้เครื่องมือทางเทคนิคและการควบคุมรายละเอียดของการทดสอบให้เป็นไปตามกำหนด โดยแบ่งการทดสอบดังต่อไปนี้

### 2.6.1 การทดสอบหาค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต (Compressive Strength Test)

การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยวิธี Rebound Hammer เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย สามารถทำการทดสอบแบบในที่โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับของ Steel Hammer



รูปที่ 2.4 เครื่องมือรีบาวด์แฮมเมอร์ (Schmidt Rebound Hammer)

1. หลักการทดสอบ การทดสอบวิธีนี้สามารถนำไปใช้ในกรณีต่างๆ ได้ดังนี้

ประเมินหาค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ณ สภาพปัจจุบัน นำค่าที่ได้ไปตรวจสอบหาความสามารถในการรับน้ำหนักขององค์อาคารคอนกรีตที่เหลืออยู่ การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ Schmidt Hammer อาศัยแรงต้านทานที่เกิดขึ้นจากการดันของ Steel Hammer ซึ่งมีหน้าตัดที่แน่นอน กดลงบนผิวหน้าคอนกรีตที่ต้องการตรวจสอบแล้วเกิดการสะท้อนกลับ ทำให้ได้ค่าระยะที่ดันทูก้อนให้สะท้อนกลับคือค่า Rebound Number ซึ่งค่า Rebound Number นี้จะถูกนำไปแปลงผลเป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยใช้ดัชนีมาตรฐานในการแปลงผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดสูงสุดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด (Schmidt Hammer) เป็นไปตาม ASTM C805 “Rebound Number of Hardened Concrete”

2. ขั้นตอนการทดสอบ ให้ตรวจสอบสภาพผิวตัวอย่างทดสอบ ขัดผิวที่ต้องการทดสอบให้เรียบ ถ้าผิวโค้งนูน หรือ ผิวเว้าจะมีผลต่อการ Rebound ของ Rebound Hammer เนื่องจากผิวที่โค้งนูนจะทำให้ค่าที่อ่านได้ต่ำกว่าค่าความเป็นจริง ส่วนผิวที่เว้าจะทำให้ค่าที่อ่านได้สูงกว่าค่าความเป็นจริง ให้ทำการวัดค่าการทดสอบบริเวณตำแหน่งที่ต้องการทราบค่ากำลังอัดให้มีตำแหน่งการกดอย่างน้อย 10 จุด โดยจุดที่วัดค่าการสะท้อนแต่ละครั้งห่างกันอย่างน้อย 2.5 ซม. แต่ละตำแหน่งสามารถทำการกด Rebound Number ได้ 3 ทิศทาง ได้แก่ กดในแนวนอน แนวตั้งแบบยิงขึ้น หรือ แนวตั้งแบบยิงลง เนื่องจากแต่ละทิศทางจะใช้กราฟในการปรับค่า Rebound Number เป็นค่า Strength of Concrete ที่แตกต่างกัน

ในส่วนของค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอ้างอิงการประมาณค่าตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.7 หรือ สมการที่ 2.8 [15]

$$f'_c = -18 + (1.27 \times RN) \quad (2.7)$$

โดยที่  $f'_c$  คือ ค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต (N/mm<sup>2</sup>)

RN คือ ค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer

$$f'_c = -176.4 + (12.446 \times RN) \quad (2.8)$$

โดยที่  $f'_c$  คือ ค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต (กก./ซม.<sup>2</sup>)

RN คือ ค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer

## 2.6.2 การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริม (Reinforcing Rebar Location Determination)

การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมโดยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายซึ่งจะใช้บอกตำแหน่งวัตถุที่สามารถเห็นด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เช่น เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงระยะหุ้มเหล็กเสริมของคอนกรีต



รูปที่ 2.5 เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก

1. หลักการทดสอบ เครื่องมือตรวจวัดเหล็กเสริมถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเครื่องมือจะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นรอบเหล็กเสริมโดยซึ่งเหนี่ยวนำเป็นช่วงๆ ให้เกิดการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าขึ้นในเหล็กเสริม ที่จุดสิ้นสุดแต่ละช่วงของกระแสไฟฟ้าจะเกิดสนามแม่เหล็กที่อ่อนแรงลงเช่นเดียวกับเกิดการสะท้อนของแหล่งกำเนิดคลื่น กำลังของสนามแม่เหล็กลดน้อยลงนี้จะถูกตรวจวัดโดยหัวทดสอบโดยที่สัญญาณจากหัวทดสอบจะถูกแปลงความหมายต่อไป

2. ขั้นตอนการทดสอบ ให้ใช้เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กที่ผลิตโดยบริษัทที่มีมาตรฐานและก่อนนำเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กไปใช้ ให้สอบเทียบเครื่องมือในห้องทดสอบเพื่อยืนยันความแม่นยำของเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก โดยความถี่ของการตรวจสอบขึ้นอยู่กับคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือและควรรบันทึกประวัติการตรวจสอบไว้ด้วย โดยดำเนินการตรวจวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กได้ต่อเมื่อการแสดงผลของเครื่องนิ่งเท่านั้นเมื่ออุปกรณ์อยู่ในสภาพพร้อมทำงานให้นำหัววัดแนบกับผิวคอนกรีต และเคลื่อนที่บนผิวคอนกรีตในทิศทางที่ต้องการวัด ทิศทางการเคลื่อนหัววัดควรตั้งฉากกับแนวการวางตัวของเหล็กเสริม เนื่องจากเหล็กเสริมมีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



มากที่สุดเมื่อวางตัวผ่านแกนของขดลวดในหัววัด โดยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กจะส่งสัญญาณให้ผู้ดำเนินการวัดทราบเมื่อผ่านตำแหน่งที่มีเหล็กเสริมอยู่

### 2.6.3 การวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ

เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจสอบครั้งนี้เป็น RH Meter รุ่น 77535 โดยการใช้สัญญาณตัวเซ็นเซอร์บริเวณส่วนหัวของเครื่องในการตรวจรับค่าที่เกิดขึ้น



### รูปที่ 2.6 เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1. คุณสมบัติของตัวเครื่องวัดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ RH Meter รุ่น 77535
  - 1) สามารถวัดค่า CO<sub>2</sub> ในช่วง Range : 0 ถึง 9,999 ppm
  - 2) สามารถวัดค่าอุณหภูมิในช่วง -10 ถึง 60 องศาเซลเซียส
  - 3) สามารถวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 0.1% ถึง 99.9%RH
  - 4) สามารถคำนวณค่า Dew Point และ Wet Bulb ได้
  - 5) สามารถตั้งเตือนได้
  - 6) สามารถต่อกับ Computer โดยผ่านช่อง RS-232
  - 7) หน้าจอเป็น LCD สามารถแสดงค่าได้ 3 ค่า
  - 8) เซ็นเซอร์เป็นแบบ NDIR (non-dispersive infrared)
  - 9) หาค่าเฉลี่ยได้ทุก 15 นาที และ เฉลี่ยทุก 8 ชั่วโมง
2. ขั้นตอนการทดสอบ เมื่อต้องการทำการวัดค่าที่บริเวณใดให้ทำการเปิดเครื่องที่บริเวณนั้น เครื่องจะทำการบู๊ทเป็นเวลา 30 วินาทีหลังจากนั้นก็แสดงค่าที่หน้าปัดของตัวเครื่อง ซึ่งมีทั้งหมด 3 ค่า คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ โดยเครื่องจะบอกค่าเฉลี่ยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทุก 15 นาที ให้ทำการเก็บข้อมูลโดยบันทึกค่า

## 2.7 การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันในคอนกรีต

คาร์บอนเนชัน (Carbonation) เป็นขบวนการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตแล้วทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์และความชื้นแล้ว มีผลทำให้สภาพความเป็นด่างของเนื้อคอนกรีตลดลง ปกติซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างสูงโดยมีค่า pH ระหว่าง 12.6 ถึง 13.5 และอาจลดลงเหลือเพียง 8 ถึง 9 ถ้าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจนหมด

ขบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตก่อนแล้วค่อยๆ แทรกซึมเข้าไปจนถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม หลังจากนั้นแผ่นฟิล์มบางที่ได้จากไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ที่เคลือบผิวของเหล็กเสริม จะถูกทำลาย การผุกร่อนของเหล็กเสริมก็จะเริ่มขึ้น

2.7.1 หลักการทดสอบ การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน สามารถทำได้โดยใช้วิธีของ RILEM โดยการใช้น้ำยาฟีนอล์ฟธาเลิน (Phenolphthalein) โดยใช้ผงฟีนอล์ฟธาเลิน 1 กรัม ผสมแอลกอฮอล์ 100 กรัม ในกระบอกฉีด ฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่ต้องการวัดความลึกของคาร์บอนเนชัน คอนกรีตที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่จะปรากฏเป็นสีม่วง ส่วนคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนชันจะไม่มีสี

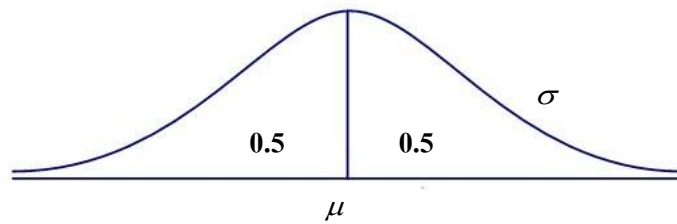
2.7.2 มาตรฐานการทดสอบ การตรวจวัดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นไปตามทฤษฎีของ RILEM [16]

## 2.8 สถิติและความน่าจะเป็น [17]

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีการเก็บข้อมูลไว้หลายอย่าง เช่น วัฏระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก วัดกำลังอัดคอนกรีตจากโครงสร้างอาคารด้วยค้อนกระแทก วัดความลึกคาร์บอนเนชัน เป็นต้น ซึ่งแต่ละรูปแบบก็มีการเก็บค่าดังกล่าวไว้หลายค่า จึงจำเป็นต้อง มีการวิเคราะห์ค่าดังกล่าว เพื่อให้ได้ตัวแปรของค่าที่ต้องการใกล้เคียงความจริงมากที่สุด จึงต้องอาศัย หลักทางสถิติเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบของการแจกแจงปกติ ซึ่งเป็นการแจกแจง ความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม ส่วนมากจะมีค่าใกล้เคียงค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ต้องการศึกษา

2.8.1 การแจกแจงปกติ (Normal Distribution) การแจกแจงปกติเป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นชนิดต่อเนื่องที่สำคัญมาก เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง [18] นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปประมาณการแจกแจงความน่าจะเป็นชนิดไม่ต่อเนื่องได้ เมื่อจำนวนการทดลองมีค่ามาก

กราฟของการแจกแจงปกติเราเรียกว่า โคนึงปกติ (Normal Curve) ซึ่งมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 2.7 โค้งปกติ (Normal Curve)

### คุณสมบัติของโค้งปกติ

1. เป็นโค้งปกติสมมาตร
2. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $\mu$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ  $\sigma$
3. พื้นที่ใต้เส้นโค้งปกติเท่ากับ 1 หรือ 100 %
4. ค่าเฉลี่ยเลขคณิต มัชยฐานและฐานนิยมมีค่าเท่ากันและอยู่ตรงกลางของกราฟ ดังนั้นจะแบ่งพื้นที่ใต้โค้งปกติออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน คือ 0.5 หรือ 50% พื้นที่ใต้เส้นโค้งทั้งหมด เท่ากับ 1 หรือ 100%

เนื่องจากพื้นที่ใต้เส้นโค้งก็คือความน่าจะเป็น ดังนั้นเมื่อต้องการหาค่าความน่าจะเป็นหรือพื้นที่ใต้เส้นโค้งในช่วงใดช่วงหนึ่ง ต้องใช้วิธีการอินทิเกรต เนื่องจากเป็นตัวแปรแบบต่อเนื่อง ซึ่งทำได้ยาก จึงสร้างตารางเพื่อหาพื้นที่หรือความน่าจะเป็นสำหรับ  $\mu = 0$  และ  $\sigma = 1$  เรียกว่า การแจกแจงปกติมาตรฐานใช้สัญลักษณ์  $Z$

ค่ามาตรฐาน เมื่อต้องการเปรียบเทียบข้อมูลตั้งแต่สองค่าขึ้นไปที่มาจากข้อมูลคนละชุด บางครั้งไม่สามารถเปรียบเทียบได้โดยตรง เพราะค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูลแต่ละชุดและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมักจะไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความถูกต้องในการเปรียบเทียบมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการแปลงค่าที่ต้องการเปรียบเทียบเป็นค่ามาตรฐาน

ถ้าให้  $X_i$  เป็นค่าที่  $i$  ของตัวแปร  $X$  แล้ว ค่ามาตรฐานของ  $X_i$  คือ

$$Z_i = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, N$$

โดยที่  $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของประชากร

$\sigma$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร

$N$  คือ จำนวนประชากร

หรือ 
$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n$$

โดยที่  $X$  คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของตัวอย่าง  
 $S$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง  
 $n$  คือ จำนวนตัวอย่าง

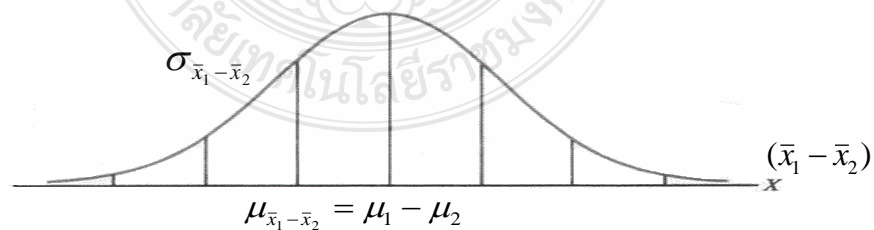
จากสูตรการแปลงเป็นค่ามาตรฐานข้างต้น จะเห็นว่า ค่ามาตรฐานเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่า ความแตกต่างระหว่างค่าของข้อมูลนั้น ๆ กับค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็นกี่เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

นอกจากนั้นยังมีการนำหลักสถิติเข้ามาประยุกต์ในการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมของ เหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนชั้น โดยต้องอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ชนิดคือ ระยะเวลาหุ้มเหล็ก และความลึกคาร์บอนชั้น จึงทำให้ต้องมีการนำหลักการแจกแจงของผลต่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างเข้ามา ประยุกต์ใช้งาน

แต่จากหลักทางสถิติแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถพิจารณารูปแบบของข้อมูลได้ 2 รูปแบบ คือ ประชากรและตัวอย่าง ซึ่งในการวิเคราะห์ก็จะต้องคำนึงถึงรูปแบบของข้อมูลดังกล่าว ด้วย เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาจริง

กรณีทราบค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของสองตัวอย่าง

ถ้าเลือกตัวอย่างสุ่มจากตัวอย่างสองกลุ่มที่มีการแจกปกติและเป็นอิสระต่อกันที่มีค่าเฉลี่ย  $\mu_1, \mu_2$  และค่าความแปรปรวน  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  ตามลำดับ โดยมีขนาดของตัวอย่าง  $n_1, n_2$  แล้วการแจกแจง ตัวอย่างของผลต่างของค่าเฉลี่ยของสองตัวอย่างจะเป็นแบบปกติ



รูปที่ 2.8 ผลต่างของค่าเฉลี่ยตัวอย่างจากประชากร

ผลต่างของค่าเฉลี่ยตัวอย่างจากประชากรทั้งสอง ( $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$ ) จะมีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเป็น  $(\mu_1 - \mu_2)$  และค่าความแปรปรวนเป็น  $\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$  นั่นคือ

ค่าเฉลี่ย 
$$\mu_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \mu_1 - \mu_2$$

ความแปรปรวน 
$$\sigma_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}^2 = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$$

พื้นที่ตัวแปรสุ่ม 
$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Castro et al. (2000) [19] ได้ศึกษาเรื่อง “Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings” ศึกษาตำแหน่งที่ตั้งของอาคารอยู่ใกล้สภาวะแวดล้อมทะเลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น พบว่าตำแหน่งที่ตั้งอาคารห่างจากทะเลประมาณ 100-200 เมตร มีแนวโน้มอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และระดับความสูงเพิ่มขึ้นของอาคารตัวอย่าง ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงขึ้นด้วย โดยทำการศึกษาปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตของอาคารที่ระดับความสูง 50, 125 และ 190 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่น

Fattuhi (1986) [20] ได้ศึกษาเรื่อง “Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period ” โดยทำการหล่อคอนกรีตตัวอย่างทดสอบแบบเร่งในห้องปฏิบัติการ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในการทดสอบมีดังนี้ 0.7 ,0.6 และ 0.4 ทำการทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่นที่ 1,3,7,21 และ 28 วัน พบว่าอัตราการเกิดความลึก คาร์บอนเนชั่นจะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น

Khunthongkeaw et al. (2006) [21] ได้ศึกษาเรื่อง “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete” มีการศึกษาโดยใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่างกันสำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปวางไว้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆกันคือในเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO สูงจะมีการเกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ

CaO ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชันของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้พบว่า การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันได้เร็วขึ้น

Alexander et al. (2007) [22] ได้ศึกษาเรื่อง “Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities,” พบว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแห้งจะมีการเกิด คาร์บอนเนชันมากกว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง โดยทำการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างสะพาน 3 แห่งในแอฟริกาใต้ที่มีอายุระหว่าง 11-76 ปี คือสะพานที่อยู่ในพื้นที่ Cape Peninsula, Durban และ Johannesburg ซึ่งการเกิดคาร์บอนเนชัน ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง สภาพแวดล้อมที่ตั้งของโครงสร้างสะพาน

Haque and Khaiat (1997) [23] ได้ศึกษาเรื่อง “Carbonation of Concrete Structures in Hot Dry Coastal Regions,” พบว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางที่น้อย (ระหว่าง 0.5-2 กม.) มีอัตรา การเกิดคาร์บอนเนชันสูงกว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางที่มาก (ระหว่าง 3-20 กม.) ในส่วนของกำลังอัดพบว่าความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด โดยการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งใกล้กับทะเล มีการเก็บตัวอย่างคอนกรีตของโครงสร้างผนังและเสา ทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนเนชัน รวมถึงการวัดค่ากำลังอัดของโครงสร้าง

Keun Kim et al. (2009) [24] ได้ศึกษาเรื่อง “Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete” พบว่าคอนกรีตที่อายุมากขึ้นการเกิดคาร์บอนเนชันก็ยิ่งมากขึ้นด้วย และคอนกรีตที่มีกำลังต่ำจะมีอัตราการพัฒนาความลึกคาร์บอนเนชันได้สูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูง โดยการหล่อคอนกรีตที่ความแข็งแรงสูง กลาง และต่ำ ทดสอบในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการ มีการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชันที่อายุ 1,2,3 และ 4 ปี และวัดค่ากำลังอัด

Cengiz Duran Atis (2003) [25] ได้ศึกษาเรื่อง “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash,” มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยทดสอบในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการที่ความชื้นสัมพัทธ์ ที่ 65% และ 100 % ทำการทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชันและค่ากำลังอัดที่ 3,7,28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณมากทำให้ การเกิดคาร์บอนเนชันสูงกว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณน้อย และในส่วนของกำลังอัด พบว่าความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

Haque et al. (2007) [26] ได้ศึกษาเรื่อง “Climatic zone-A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf ” ศึกษาถึงความคงทนของโครงสร้างที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในโซนทะเลเอาระเบียง มีการศึกษาถึงการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ซัลเฟต และคาร์บอนเนชัน

สำหรับในส่วนคาร์บอนเนชั่นพบว่าตำแหน่งที่ของอาคารที่ใกล้กับทะเลมีแนวโน้มการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าตำแหน่งที่ของอาคารที่ไกลจากทะเล

Khayat (2002) [27] ได้ศึกษาเรื่อง “Concrete carbonation in arid climate ” มีการหล่อคอนกรีต ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ 0.45-0.80 พบว่า อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นจะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น และในส่วนของกำลังอัดพบว่าความลึกคาร์บอนเนชั่นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และทวิทัศน์ คงทรัพย์ [28] ได้ศึกษาเรื่อง “ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว” มีการศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำร้อยละ 20 และ 40 โดยอัตราส่วนปริมาตรของซีเมนต์เปสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2 1.4 และ 1.6 ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ พบว่าความลึกคาร์บอนเนชั่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบดำ

จรรย์วงศ์ และคณะ (2550) [29] ได้ศึกษาเรื่อง “การสำรวจ ทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสา โครงสร้างทางรถไฟยกระดับ” มีการเก็บตัวอย่างคอนกรีตโดยวิธีการ Coring เพื่อทดสอบหาค่าความลึกคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างทางด่วนสายเหนือจากสถานีรถไฟหัวลำโพงถึงท่าอากาศยานนานาชาติดอนเมือง สายตะวันออก และสายตะวันตก มีระยะระหว่าง 2.00-19.40 มม. และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 10.90 มม. มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 65 ปี

Roy et al. (1996) [30] ได้ศึกษาเรื่อง “Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building” มีการศึกษาถึงผลกระทบของความหนาปูนฉาบที่มีต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุ 19 ปี โดยการเจาะเก็บตัวอย่างโครงสร้างเสา และคาน ทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่นด้วยการใช้สารละลายฟีนอล์ฟธาลิน มีการนำข้อมูลแสดงผลด้วยกราฟแท่ง ดูการกระจายตัวของข้อมูล

Jiranuwat Banjongratc et al.(2010) [31] ได้ศึกษาเรื่อง “Effect of Plastering Mortar and Paint On Carbonation Resistance of Concrete” มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4,0.5 และ 0.6 โดยตัวอย่างคอนกรีตมีทั้งการทาสี ไม่ทาสี ฉาบปูนและไม่ฉาบปูนภายนอกของตัวอย่างคอนกรีต ทำการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นโดยการผ่าซีกตัวอย่างคอนกรีตแล้วฉีดด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาลิน พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้อัตราการเกิด คาร์บอนเนชั่นสูงขึ้น สำหรับผลของสีและปูนฉาบสามารถป้องกันการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้ในระดับหนึ่ง

บัญญัติ วารินทร์ไพลและคณะ(2554) [32] ได้ศึกษาเรื่อง “การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารที่พักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชน” โดยทำการตรวจสอบพินิจทดสอบและประเมินค่ากำลังอัด วัฏระยะหุ้มเหล็ก วัฏระยะความหนาปูนฉาบในกรณีที่มีชั้นปูนฉาบเกาะเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบระยะคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารที่พักอาศัยทั้งหมด 9 โครงการ พบว่า อัตราการเกิดระยะคาร์บอนชั้น (สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น,  $k$ ) ของโครงสร้างอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งติดกับทางด่วนสูงกว่าที่ไม่ติดกับทางด่วน ในขณะที่ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างอาคารในเขตกรุงเทพมหานครมีอัตราการเกิดคาร์บอนชั้นสูงกว่าในเขตปริมณฑล ส่วนในกรณีโครงสร้างอาคารชั้นส่วนสำเรีงนั้นมีแนวโน้มว่าอัตราการเกิดคาร์บอนชั้น (สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น,  $k$ ) ซ้ำกว่าโครงสร้างอาคารหล่อในที่เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน

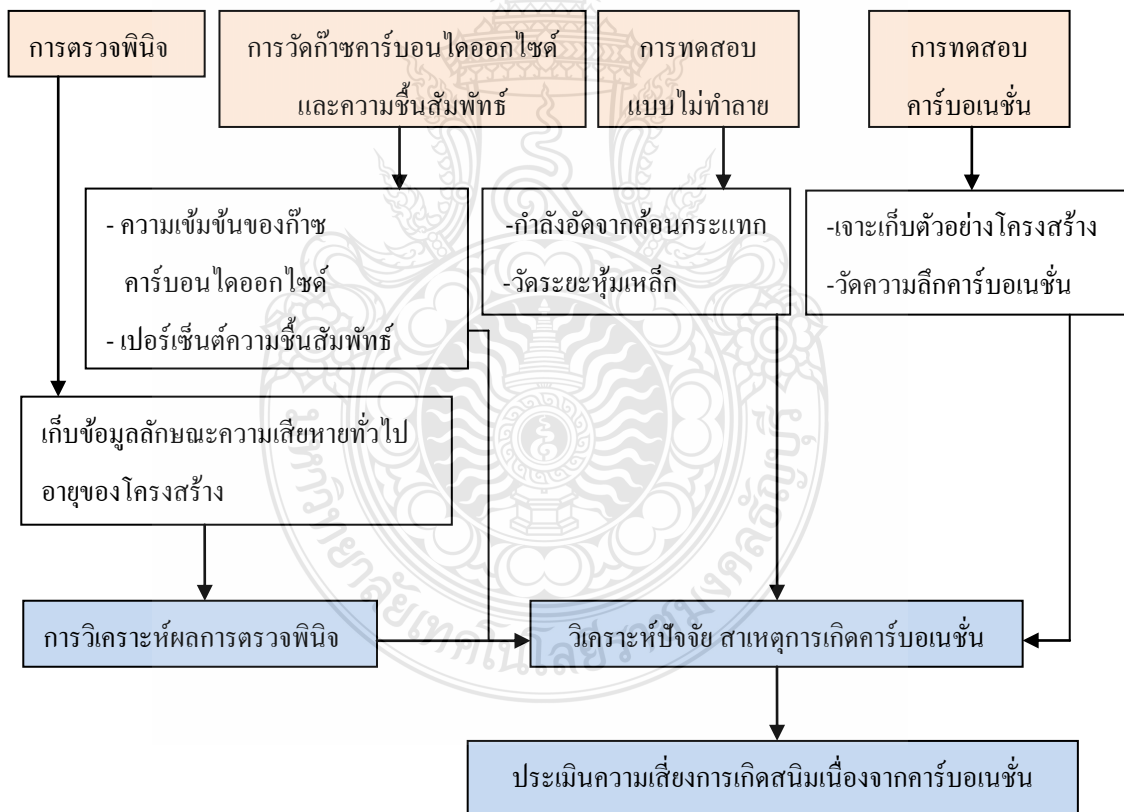




### บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามคอนกรีตเสริมเหล็กครั้งนี้ มีการตรวจพินิจด้วยตาเปล่า ร่วมกับการใช้อุปกรณ์ตรวจสอบพื้นฐาน เช่น ไม้บรรทัด มาตรการวัดความกว้างของรอยร้าว พร้อมกับการทดสอบแบบไม่ทำลายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ช่วยในการทดสอบและเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาทดสอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการเพื่อหาระยะเวลาความลึกคาร์บอนเนชั่น โดยวิธีดำเนินการของการตรวจสอบแต่ละประเภทสามารถจำแนกได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการตรวจสอบโครงสร้างอาคาร

### 3.1 ศึกษาสถานที่ตั้งและตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง

สถานที่ตั้งของอาคาร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ระดับสูง โครงสร้างการศึกษานี้อยู่ในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ โดยทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากโครงสร้างของอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้าม ส่วนตำแหน่งในการเก็บตัวอย่างนั้นจะเป็นชิ้นส่วนของคานหรือเสาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเลือกเก็บตัวอย่างเฉพาะอาคารเรียนที่ใกล้กับแหล่งชุมชน ถนน และในส่วนของสะพานลอยเดินข้ามที่มีการจราจรหนาแน่น และเป็นแหล่งชุมชนโดยทำการบันทึกเก็บข้อมูลทั่วไป ของโครงสร้างไปพร้อมกัน เช่น อายุของโครงสร้าง ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ความชื้นสัมพัทธ์ กำลังอัดของโครงสร้าง ความสูงของตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง ระยะทางจากถนนถึงตัวอาคาร และระยะทางจากแม่น้ำถึงตัวอาคาร เป็นต้น

โครงสร้างสำหรับศึกษาอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้น ในงานวิจัยครั้งนี้มีการเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างอาคารที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด 18 แห่ง รายละเอียดตามตารางที่ 3.1 ส่วนตารางที่ 3.2 กับรูปที่ 3.2 แสดงสถานที่ตั้งของอาคารเรียน และตารางที่ 3.3 กับรูปที่ 3.3 แสดงสถานที่ตั้งของสะพานลอยเดินข้าม ซึ่งโครงสร้างอาคารถูกเลือกมาทั้งหมดนี้มีอายุของโครงสร้างตั้งแต่ 4 ปี จนถึง 44 ปี โดยโครงสร้างทั้งหมดอยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน

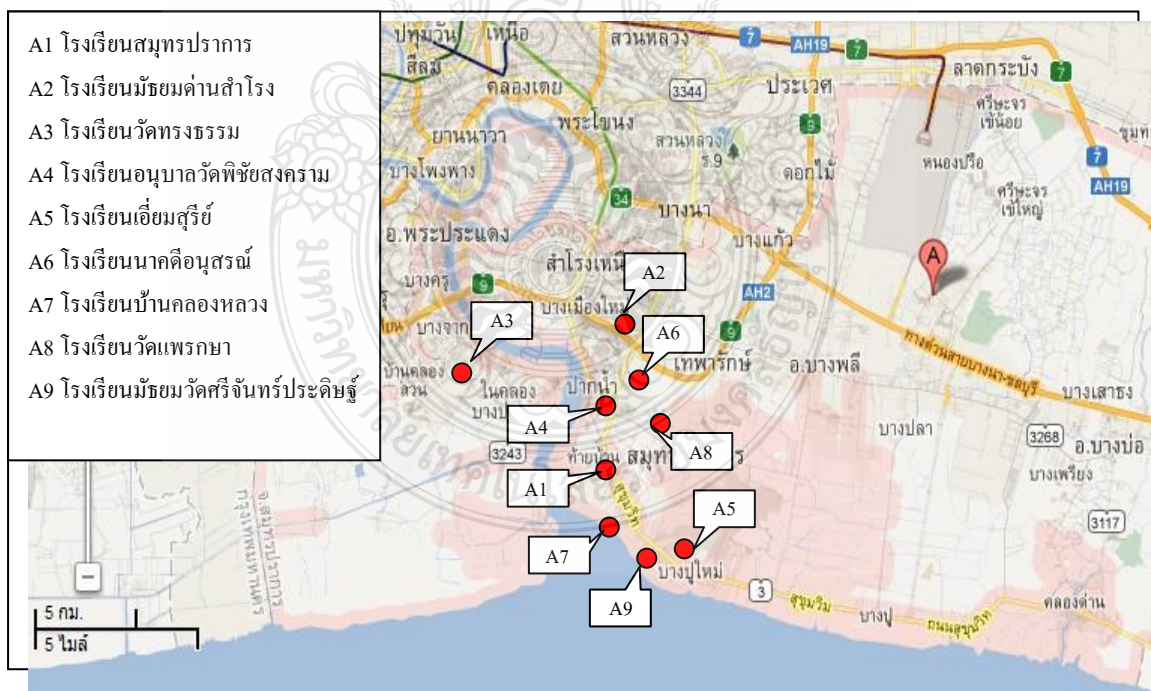
ตารางที่ 3.1 โครงสร้างอาคารที่ศึกษาอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้น

A	โครงสร้าง อาคารเรียน	อายุ (ปี)	B	โครงสร้าง สะพานลอยเดินข้าม	อายุ (ปี)
A1	โรงเรียนสมุทรปราการ	44	B1	กม.27+789 (โรงเรียนสมุทรปราการ)	18
A2	โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง	30	B2	กม.31+580 (โยชัว)	18
A3	โรงเรียนวัดทรงธรรม	29	B3	กม.36+443 (วัดศรีจันทร์ประดิษฐ์)	16
A4	โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม	20	B4	กม.34+080 (สามห่วง)	15
A5	โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์	16	B5	กม.30+244 (การเคหะสมุทรปราการ)	11
A6	โรงเรียนนาคคือนุสรณ์	14	B6	กม.23+118 (บริษัทนมตรางะลิ)	11
A7	โรงเรียนบ้านคลองหลวง	10	B7	กม.27+390 (โรงเรียนแสงี่ยมพิทยานุกูล)	6
A8	โรงเรียนวัดแพรกษา	5	B8	กม.29+220 (เขื่องฟาร์มจระเข้)	4
A9	โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์	5	B9	กม.30+640 (สะพานคู่)	4

ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งโครงสร้างอาคารเรียนที่ดำเนินการตรวจสอบ

โครงสร้าง	อายุ (ปี)	ระยะทาง จากถนน (ม.)	ระยะทาง จากแม่น้ำ (ม.)	ละติจูด N	ลองจิจูด E
A1 โรงเรียนสมุทรปราการ	44	130	670	13°32'21.00"	100°37'10.89"
A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง	30	30	4,200	13°38'51.54"	100°35'55.74"
A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม	29	20	50	13°30'11.08"	100°11'25.74"
A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม	20	8	111	13°35'46.24"	100°35'49.73"
A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์	16	90	675	13°31'19.03"	100°39'29.15"
A6 โรงเรียนนาคคือนุสรณ์	14	75	2,300	13°34'41.34"	100°39'13.91"
A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง	10	96	2,150	13°33'51.57"	100°36'29.27"
A8 โรงเรียนวัดแพรกษา	5	8	4,850	13°34'20.97"	100°38'20.92"
A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์	5	55	344	13°31'16.23"	100°38'37.82"

\*อายุโครงสร้างนับจากวันที่ก่อสร้างแล้วเสร็จจนถึงวันที่ตรวจสอบโครงสร้าง (พ.ศ. 2555)



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของโครงสร้างอาคารเรียน

ตารางที่ 3.3 ตำแหน่งโครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามที่ดำเนินการตรวจสอบ

โครงสร้าง	อายุ (ปี)	ระยะทาง จากถนน (ม.)	ระยะทาง จากแม่น้ำ (ม.)	ละติจูด N	ลองจิจูด E
B1 กม. 27+789	18	0	1,550	13°35'5.10"	100°36'29.13"
B2 กม. 31+580	18	0	1,450	13°33'12.87"	100°36'52.10"
B3 กม. 36+443	16	0	660	13°31'25.77"	100°38'43.27"
B4 กม. 34+080	15	0	850	13°32'5.96"	100°37'37.88"
B5 กม. 30+244	11	0	2,260	13°33'51.35"	100°36'33.67"
B6 กม. 23+118	11	0	860	13°37'6.65"	100°35'28.16"
B7 กม. 27+390	6	0	1,620	13°35'17.70"	100°36'33.72"
B8 กม. 29+220	4	0	2,150	13°34'14.36"	100°36'22.72"
B9 กม. 30+640	4	0	2,050	13°33'39.79"	100°36'39.21"

\*อายุโครงสร้างนับจากวันที่ก่อสร้างแล้วเสร็จจนถึงวันที่ตรวจสอบโครงสร้าง (พ.ศ. 2555)



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม

และจากรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นสภาพแวดล้อม ที่มีการจราจรหนาแน่น และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานซึ่งโครงสร้างที่ศึกษาทั้งหมดตั้งอยู่ในตำแหน่งสภาพแวดล้อมดังกล่าวซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนเข้มข้นในอัตราที่สูง



รูปที่ 3.4 สภาพแวดล้อมของจังหวัดสมุทรปราการ

### 3.2 การตรวจพินิจความเสียหายของโครงสร้าง

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างเบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์สภาพและความเสียหายของ โครงสร้าง อาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามในจังหวัดสมุทรปราการชั้นตอนระเบียบวิจัยในการศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 3.2.1 ทำการเลือกโครงสร้างตัวอย่างและเข้าตรวจสอบพินิจ

#### 3.2.2 กำหนดโครงสร้างที่ต้องการตรวจสอบพร้อมกับวางแผนการตรวจสอบ ดังนี้

1. การเดินตรวจสอบเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของโครงสร้าง ศึกษา รูปแบบและลักษณะการใช้งานของโครงสร้างปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้าง และข้อมูลการซ่อมแซมบำรุงรักษาของตัวอาคาร เป็นต้น

2. การเดินสำรวจสภาพอาคาร โครงสร้างอาคาร โดยการจดบันทึกตำแหน่งและ ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอาคาร พร้อมกับถ่ายรูปเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเสียหาย ควรจะ เก็บข้อมูลต่อไปนี้ประกอบด้วย

3. การรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง เช่น แบบโครงสร้าง วัสดุก่อสร้างที่ใช้ ประวัติของโครงสร้าง ลักษณะแวดล้อม

4. นำข้อมูลที่บันทึกได้ มาจำแนกและวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอาคาร และโครงสร้างอาคารที่ตรวจสอบ

### 3.3 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์

ทำการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์บริเวณอาคาร โครงสร้างที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีต ในการตรวจวัดครั้งนี้ใช้เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ High Accuracy รุ่น 77535 โดยวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด 3 วัน โดยในแต่ละวันจะวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงเวลาคือ ช่วงเช้า (เวลาประมาณ 8:00-9:00 น.) ช่วงกลางวัน (เวลาประมาณ 12:00-13:00 น.) และช่วงเย็น (เวลาประมาณ 16:00-17:00 น.) ในแต่ละ โครงสร้าง ที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ จะเก็บค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ โครงสร้างละ 36 ค่า



รูปที่ 3.5 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์

### 3.4 การทดสอบแบบไม่ทำลาย

#### 3.4.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ

ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตครั้งนี้ ใช้ค้อนกระทบแบบชมิทท์ (Schmidt Hammer) ทำการทดสอบวัดค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต เก็บค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต 16 ค่าต่อ 1 ตำแหน่งการทดสอบ โดยจุดที่มีการวัดค่าการสะท้อนแต่ละครั้งต้องห่างกันประมาณ 2.5 เซนติเมตร โดยแต่ละชั้นของอาคารเรียนจะเก็บข้อมูลชั้นละ 6 ตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งทดสอบ (โครงสร้างเสาหรือคาน) ส่วนสะพานลอยเดินข้าม จะเก็บข้อมูลทั้งหมด 6 ตำแหน่งต่อ 1 โครงสร้างที่ใกล้กับตำแหน่งทดสอบ(โครงสร้างเสาหรือคานบันได)



รูปที่ 3.6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ

### 3.4.2 การหาตำแหน่งเหล็กและวัตรระยะหุ้มเหล็ก

ในการวิจัยนี้มีการทดสอบวัตรระยะหุ้มเหล็กด้วยเครื่องวัตรระยะหุ้มเหล็กในตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่าง โดยใช้เครื่องมือ Profometer ในการตรวจสอบจะวัดค่าระยะหุ้มเหล็ก โดยแต่ละชั้นของอาคารเรียนจะเก็บข้อมูลชั้นละ 6 ตำแหน่ง (โครงสร้างเสาหรือคาน) ส่วนสะพานลอยเดินข้าม จะเก็บข้อมูลทั้งหมด 12 ตำแหน่งต่อ 1 โครงสร้าง (โครงสร้างเสาหรือคานบันได)



รูปที่ 3.7 การหาตำแหน่งเหล็กและวัตรระยะหุ้มเหล็ก

## 3.5 การทดสอบคาร์บอนชั้น

3.5.1 การเก็บตัวอย่าง ตัวอย่างที่นำทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น ได้จากการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่านหัวเจาะแบบ Hole Saw ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร เจาะลึกประมาณ 4-5 เซนติเมตร โดยเก็บจากโครงสร้างเสาและคานของอาคารเรียน บริเวณกันสาดด้านหน้าและด้านหลังอาคารเรียนชั้นละ 6 ตำแหน่ง ที่ความสูงแต่ละชั้น ชั้น1 (1.00-1.50 เมตร) ชั้น2 (3.50-4.00 เมตร) ชั้น3 (6.50-7.00 เมตร) เป็นต้น ในส่วนของสะพานลอยเดินข้าม จะเก็บตัวอย่าง ทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ต่อ 1 โครงสร้าง จะเก็บในส่วนของตัวเสาต่อม่อสะพาน คานแม่บันได ที่ระดับความสูงที่ 1.00-1.50 เมตร 3.00-3.50 และ 4.00-5.50 เมตร ตามลำดับ





รูปที่ 3.8 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยส่วนหัวเจาะแบบ Hole Saw

### 3.5.2 การทดสอบหาความลึกคาร์บอนชั้น

นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ มาผ่าซีก ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) เพื่อทดสอบหาความลึกคาร์บอนชั้น จากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง (โดยทั่วไปค่า pH ของคอนกรีตประมาณ 13) ในการทดสอบนี้ ได้ทำการแยกส่วนที่เกิดคาร์บอนชั้นออกจากส่วนที่ยังไม่เกิดคาร์บอนชั้น โดยฉีกแผ่นด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ไปยังผิวคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้ว ตามรูปที่ 3.9 (ข) ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงเข้มหาก ค่า pH ของคอนกรีตมีค่าน้อย คือมีค่าประมาณ 9-10



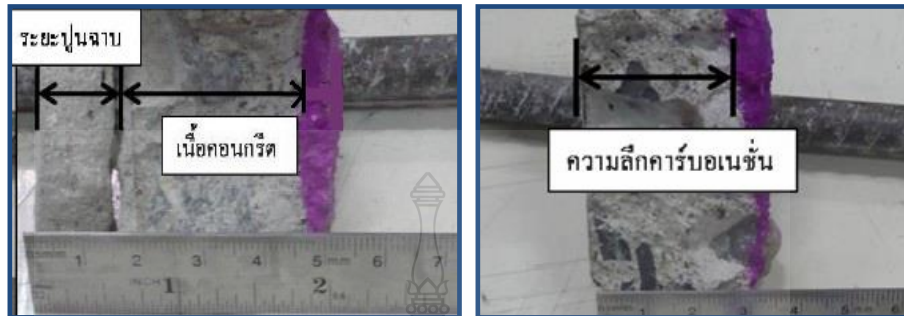
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.9 การทดสอบหาความลึกคาร์บอนชั้น

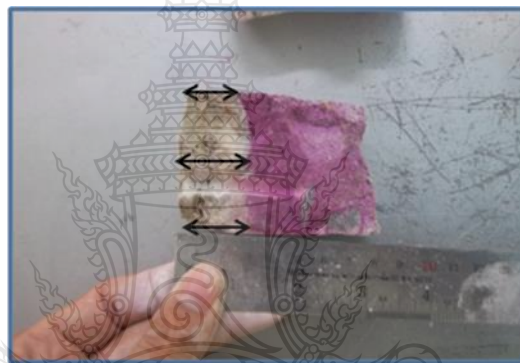
การวัดความลึกคาร์บอนชั้น ถ้าเป็น โครงสร้างผิวฉาบปูน (อาคารเรียน) ให้วัดค่าความลึกคาร์บอนชั้นจากระยะคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมรวมกับระยะปูนฉาบ ตามรูปที่ 3.10 (ก) สำหรับ โครงสร้างที่ไม่ฉาบปูน (สะพานลอยเดินข้าม) วัดค่าความลึกคาร์บอนชั้น จากระยะคอนกรีตที่ยังคงสี

เดิมอยู่ไปจนถึงขอบเส้นของสีม่วงเข้ม ตาม รูปที่ 3.10 (ข) โดยทำการวัดเพื่อหาค่าเฉลี่ยความลึกคาร์บอนเนชั่นตามรูปที่ 3.10 (ค)



(ก) กรณีฉาบปูน

(ข) กรณีไม่ฉาบปูน



(ค) การวัดระยะความลึกคาร์บอนเนชั่นเพื่อหาค่าเฉลี่ย

### รูปที่ 3.10 การวัดความลึกคาร์บอนเนชั่น

## 3.6 วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.6.1 วิเคราะห์ผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้าง

3.6.2 วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของระดับการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และประเมินโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นที่โครงสร้างเพื่อทราบอายุการใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง

3.6.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบมาตรฐานการออกแบบเมื่อพิจารณาความคงทนกับโครงสร้างที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง

##### 4.1.1 รายละเอียดโครงสร้างที่สำรวจความเสียหาย

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจากสิ่งก่อสร้าง ไม่ว่าจะเป็น อาคาร สะพาน เขื่อน ท่าเรือ หรือโครงสร้างในลักษณะอื่นๆ ที่ได้ทำการออกแบบไว้โดยกำหนดให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถรับแรงกระทำที่สูงสุดได้ค่าหนึ่ง ภายใต้อายุการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าว คือ ช่วงอายุของโครงสร้างนั่นเอง ในกรณีของอาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง ช่วงเวลาดังกล่าวจะหมายถึง ช่วงอายุของอาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง สาเหตุที่โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่จำกัด เกิดจากการเสื่อมสภาพ และการเสียหายของวัสดุเป็นหลัก ซึ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพและการเสียหายของวัสดุดังกล่าว อาจเกิดจากการผุกร่อน การล้า เนื่องจากการรับน้ำหนักเป็นเวลานาน การรับน้ำหนักที่สูงเกินไปกว่าที่กำหนดไว้ การรับแรงกระทำในลักษณะที่ไม่ได้ออกแบบไว้ หรือเกิดจากการเสื่อมสลายจากปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ รวมถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น อากาศ ความชื้น ไอทะเล การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นต้น

นอกจากสาเหตุความเสียหายดังกล่าวข้างต้น อาจเกิดจาก อุบัติภัยต่างๆ เช่น ไฟไหม้ แผ่นดินไหว หรือ พายุ ซึ่งทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย ก็อาจทำให้ช่วงของอายุของโครงสร้างลดลงอย่างต่อเนื่อง

การศึกษาสภาพแวดล้อมของสิ่งปลูกสร้าง โดยทั่วไป ของจังหวัดสมุทรปราการ พบว่า ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มทั้งหมด มีแม่น้ำเจ้าพระยา ไหลผ่านทางทิศตะวันตกของจังหวัด จากทิศเหนือไปทิศใต้ลงสู่อ่าวไทย มีชายฝั่งทะเลยาว 47.5 กิโลเมตร เนื่องจากจังหวัดสมุทรปราการ เป็นจังหวัดในเขตปริมณฑลเขตติดต่อกับกรุงเทพมหานคร เป็นจังหวัดที่เป็นที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมาก ซึ่งข้อมูล ณ เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2550 พบว่าจังหวัดสมุทรปราการมีโรงงานอุตสาหกรรม 6,136 แห่ง และยังมีจำนวนประชากรอาศัยอยู่หนาแน่น ปัจจุบันจังหวัดสมุทรปราการมีเนื้อที่ 1,004 ตารางกิโลเมตร อาณาเขตทิศเหนือติดต่อกับกรุงเทพมหานครและจังหวัดฉะเชิงเทรา ทิศตะวันออกติดต่อกับจังหวัดฉะเชิงเทรา ทิศตะวันตกติดต่อกับกรุงเทพมหานคร ทิศใต้จรด อ่าวไทย [33] จึงทำให้โครงสร้างอาคาร สิ่งก่อสร้างต่างๆ ในเขตพื้นที่ดังกล่าว มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของโครงสร้างจากสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงที่โครงสร้างนั้นตั้งอยู่ ซึ่งส่วนใหญ่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก มักพบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากเกลือคลอไรด์ (Cl)

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และหากไม่มีการบำรุงรักษาที่เหมาะสม โครงสร้างจะเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม สนิมที่เกิดขึ้นจะดันให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว จนอาจทำให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างได้

ดังนั้น ลักษณะและสาเหตุของความเสียหายของโครงสร้าง ที่พบในอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามทั้ง 18 แห่ง ที่เข้าตรวจสอบ สามารถสรุปสาเหตุและความเสียหายของโครงสร้างดังกล่าวได้ตามตารางที่ 4.1 ถึง ตารางที่ 4.18

A1 โรงเรียนสมุทรปราการ (อาคาร 1) เป็นอาคารเรียน 3 ชั้น จำนวน 18 ห้องเรียน สร้างแล้วเสร็จ เมื่อ ปี พ.ศ. 2511

ตารางที่ 4.1 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนสมุทรปราการ

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><b>ปัญหา</b> การแตกร้าวและการหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบ คอนกรีต เหล็กโครงสร้างเป็นสนิม</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีต จนเหล็กเสริมเป็นสนิม ขาดการดูแล ซ่อมแซม</p>
	<p><b>ปัญหา</b> การแตกร้าวและการหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบ คอนกรีตบริเวณเสาและคาน</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เหล็กเสริมเป็นสนิม ขาดการดูแล</p>
	<p><b>ปัญหา</b> การหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบใต้พื้นกันสาด เหล็กเสริมเกิดสนิม</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดความชื้น เหล็กภายในเกิดสนิม , ขาดการดูแล ซ่อมแซม</p>

A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง (อาคาร 2) เป็นอาคารเรียน 5 ชั้น แบบ พ 531 จำนวน 24 ห้องเรียน สร้างแล้วเสร็จ เมื่อ ปี พ.ศ. 2525

ตารางที่ 4.2 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> เกิดการหลุดร่อนปูนฉาบใต้พื้น</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากปูนฉาบเสื่อมสภาพ</p>
	<p><u>ปัญหา</u> ท้องพื้นกันสาดกะเทาะ</p> <p><u>สาเหตุ</u> พื้นเกิดความชื้น เหล็กเสริมเกิดสนิมและการเสื่อมสภาพของคอนกรีต</p>
	<p><u>ปัญหา</u> การแตกร้าวและการหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบ คอนกรีต เหล็กโครงสร้างเป็นสนิม</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีต จนเหล็กเสริมเป็นสนิม ขาดการดูแล ซ่อมแซม</p>
	<p><u>ปัญหา</u> การหลุดร่อนของพื้นคอนกรีต</p> <p>เนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม ใต้พื้น โถงบันไดและห้องน้ำ</p> <p><u>สาเหตุ</u> พื้นเกิดความชื้น เหล็กเสริมเป็นสนิม</p>

A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม (อาคาร 2) อาคารเรียน แบบ พ 532 จำนวน 24 ห้องเรียน สร้างแล้วเสร็จเมื่อ ปี พ.ศ. 2525

ตารางที่ 4.3 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างที่พบในอาคารเรียน  
โรงเรียนวัดทรงธรรม

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> ครีบกันสาดเกิดรอยร้าว</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากการซึมของน้ำ ความชื้น เหล็กเสริมเป็นสนิม</p>
	<p><u>ปัญหา</u> การหลุดร่อนของปูนฉาบ</p> <p><u>สาเหตุ</u> พื้นเกิดความชื้น เหล็กโครงสร้างพื้นเป็นสนิม</p>
	<p><u>ปัญหา</u> คานรับบันไดเกิดรอยร้าวกลางคาน</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากแรงบิดในโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> รอยต่อระหว่างเสาและคานเกิดรอยแตกร้าวผิวปูนฉาบ</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>

A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม (อาคาร 4) เป็นอาคารเรียน 4 ชั้น 12 ห้องเรียน แบบ สปช. 2/28 สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2535

ตารางที่ 4.4 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน

โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> เกิดรอยแตกร้าวผนังด้านนอก</p> <p><u>สาเหตุ</u> การทรุดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> เกิดรอยแตกร้าวของเสา</p> <p><u>สาเหตุ</u> การเสื่อมสภาพของคอนกรีต การเกิดสนิมของเหล็กเสริม</p>
	<p><u>ปัญหา</u> เกิดรอยแตกร้าวพื้น</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> เกิดรอยแตกร้าวปูนฉาบเสา</p> <p><u>สาเหตุ</u> การเสื่อมสภาพของคอนกรีต การเกิดสนิมของเหล็กเสริม</p>

A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์ (อาคาร 2) อาคารเรียน 4 ชั้น 20 ห้องเรียน ชั้นล่างเอนกประสงค์  
สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2541

ตารางที่ 4.5 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวพื้นกันสาด ทุกช่วงเสา <u>สาเหตุ</u> เกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> ผิวปูนฉาบหลุดร่อน <u>สาเหตุ</u> เกิดจากการทรุดตัวของพื้นชั้น 1</p>
	<p><u>ปัญหา</u> ผิวปูนฉาบหลุดร่อน <u>สาเหตุ</u> เกิดจากการทรุดตัวของพื้นชั้น 1</p>
	<p>สภาพของเหล็กเสริมด้านในเป็นสนิม</p>







A6 โรงเรียนนาคตินุสรณ์ (อาคาร 1) เป็นอาคารเรียน 4 ชั้น จำนวน 20 ห้องเรียน ชั้นล่าง  
 เอนกประสงค์ สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2546

ตารางที่ 4.6 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนนาคตินุสรณ์

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> คอนกรีตเกิดแตกร้าว, มีคราบเชื้อรา กันสาด            หน้าอาคาร  <u>สาเหตุ</u> น้ำขัง เกิดความชื้น เหล็กเสริมภายในเกิด            สนิม</p>
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวพื้นกันสาด  <u>สาเหตุ</u> เกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวพื้นกันสาด  <u>สาเหตุ</u> เกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> พื้นอาคารเกิดจากการทรุดตัว  <u>สาเหตุ</u> เกิดจากการทรุดตัวของดิน</p>

A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง (อาคารเฉลิมพระเกียรติ) อาคารเรียน 3 ชั้น 12 ห้องเรียน  
ปี พ.ศ. 2548

ตารางที่ 4.11 สาเหตุและลักษณะความเสียหาย ของโครงสร้างอาคารเรียน โรงเรียนบ้านคลองหลวง

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> ผนังปูนฉาบเกิดรอยร้าวแตกกระจาย <u>สาเหตุ</u> อาจเกิดจากส่วนผสมปูนฉาบไม่ดี หรือผนังเกิดการขยายตัวไม่สม่ำเสมอ จึงเกิดรอยแตกกระจายไปทั่ว</p>
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวพื่นกันสาด <u>สาเหตุ</u> เนื่องจากเกิดการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวเสาหน้าอาคาร <u>สาเหตุ</u> เกิดจากการทรุดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> สภาพคอนกรีตมีเนื้อพรุนเป็นโพรง เหล็กเสริมภายในเริ่มเป็นสนิม <u>สาเหตุ</u> การควบคุมคุณภาพคอนกรีต การควบคุมขณะการก่อสร้าง ไม่ดีพอ</p>

A8 โรงเรียนวัดแพกษา (อาคารเทศบาลสมุทรปราการ) เป็นอาคารเรียน 4 ชั้น จำนวน 20 ห้องเรียน ชั้นล่างเอนกประสงค์ สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2551

ตารางที่ 4.6 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างที่พบในอาคารเรียนโรงเรียนวัดแพกษา

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><b>ปัญหา</b> การแตกร้าวชั้นปูนฉาบบริเวณส่วนต่อระหว่างเสาจริงกับเสาก่ออิฐ</p> <p><b>สาเหตุ</b> อาคารทรุด เกิดรอยแยก ไม่ได้เสียบเหล็กยึดระหว่างโครงสร้าง</p>
	<p><b>ปัญหา</b> ผิวปูนฉาบโครงสร้างคานแตกถายงบริเวณด้านนอกอาคาร</p> <p><b>สาเหตุ</b> อาจเกิดจากส่วนผสมปูนฉาบไม่ดี หรือผนังเกิดการขยายตัว</p>
	<p><b>ปัญหา</b> รอยแตกร้าวพื่นกันสาด ทุกช่วงเสา</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><b>ปัญหา</b> รอยแตกร้าวเสา</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดจากการทรุดตัวของโครงสร้างเนื่องจากเป็นส่วนต่อเติม</p>

A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์ (อาคารเฉลิมพระเกียรติ) เป็นอาคารเรียน 3 ชั้น แบบ 216ล ปรับปรุง 46 จำนวน 16 ห้องเรียน ชั้นล่างเอนกประสงค์ สร้างแล้วเสร็จ ปี พ.ศ. 2550



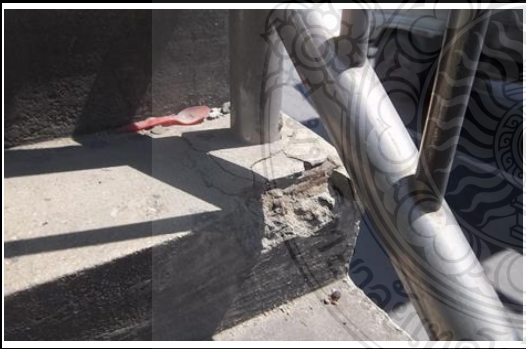

ตารางที่ 4.8 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างอาคารเรียน

โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวพื้นกันสาด</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> กริบ คสล.ด้านหลังอาคารช่วงรอยต่อระหว่างโครงสร้างอาคารเกิดรอยร้าว</p> <p><u>สาเหตุ</u> การทรุดตัวของพื้นอาคาร</p>
	<p><u>ปัญหา</u> ผิวปูนฉาบหลุดร่อน</p> <p><u>สาเหตุ</u> จากปูนฉาบไม่ดีพอหรือฉาบบางเกินไป</p>
	<p><u>ปัญหา</u> ผิวปูนฉาบหลุดร่อนของเสาทุกต้นด้านหน้าอาคาร</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการทรุดตัวของพื้นรอบนอกอาคารชั้นล่าง(พื้นวางบนดิน)</p>





B1 กม. 27+789 (โรงเรียนสมุทรปราการ) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 34.00 เมตร กว้าง 2.40 เมตร สูง 6.00 เมตร สร้างแล้วเสร็จ เมื่อ 15 มี.ค. 2538

ตารางที่ 4.10 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม. 27+789

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><b>ปัญหา</b> คอนกรีตเกิดแตกร้าว, สีหลุดร่อน มีคราบเชื้อรา, การรั่วซึมระหว่างท่อน้ำทิ้งบริเวณใต้พื้นทางเดิน</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดความชื้น เหล็กภายในเกิดสนิม, ขาดการดูแลบำรุงรักษา เป็นเวลานาน จึงส่งผลให้คราบต่างๆสะสม</p>
	<p><b>ปัญหา</b> การกระแทกของคอนกรีตจนเห็นเหล็กช่วงเสากับเสาต่อม่อ</p> <p><b>สาเหตุ</b> อาจมาจากคอนกรีตเสามีเนื้อพรุนเป็นโพรงหรือความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเสาน้อยเกินไป หรือเสามีความเปื่อยขึ้นตลอดเวลา</p>
	<p><b>ปัญหา</b> นี้เกิดจากการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตรอยต่อแผ่นเพลาที่ฝังขึ้นบันได</p> <p><b>สาเหตุ</b> เพลาเหล็กยึดราวบันไดเกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตช่วงนั้นแตกร้าว</p>
	<p><b>ปัญหา</b> คอนกรีตมุมเหลี่ยมขึ้นบันไดหลุดจนเห็นเหล็กเสริม</p> <p><b>สาเหตุ</b> เกิดจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่จุดนั้นไม่เพียงพอ</p>

**B2** กม.31+580 (โยชน์) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 36.40 เมตร กว้าง 2.30 เมตร สูง 5.90 เมตร สร้างแล้วเสร็จ เมื่อ 31 มี.ค. 2538

ตารางที่ 4.11 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม. 31+580

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> เหล็กเสริมเกิดสนิมจนทำให้ผิวคอนกรีตหลุดร่อน ช่วงรอยต่อระหว่างพื้นทางเดินกับเสา</p> <p><u>สาเหตุ</u> การสั่นสะเทือนโครงสร้างจากรถบรรทุกขนาดใหญ่วิ่งผ่าน</p>
	<p><u>ปัญหา</u> เหล็กเป็นสนิม คอนกรีตแตกร้าวหลุดร่อนของคานรับพื้นทางเดิน</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมน้อยเกินไป</p>
	<p><u>ปัญหา</u> เกิดรอยร้าวคอนกรีต บริเวณ โคนเสาตอม่อ</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกเกินกำลังหรือเกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> เหล็กเสริมใต้ท้องพื้นเกิดสนิม</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมน้อยเกินไป</p>

B3 กม. 36+443 (วัดศรีจันทร์ประดิษฐ์) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 36.50 เมตร กว้าง 2.30 เมตร สูง 5.90 เมตร สร้างแล้วเสร็จ เมื่อ 9 ก.พ. 2540

ตารางที่ 4.12 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม. 36+443

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> ผิวคอนกรีตหลุดร่อนเหล็กเกิดสนิมได้ทั้งพื้น</p> <p><u>สาเหตุ</u> ระยะของเนื้อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กอยู่นั้นไม่เพียงพอ เหล็กเสริมเป็นสนิมดันคอนกรีตหลุดร่อนและคอนกรีตหมดสภาพ</p>
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวช่วงพื้นชนพนักบันได</p> <p><u>สาเหตุ</u> เพลทเหล็กยึดราวบันไดเกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตช่วงนั้นแตกร้าว</p>
	<p><u>ปัญหา</u> การกะเทาะ หลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตบนพื้นทางเดิน</p> <p><u>สาเหตุ</u> พื้นผิวอาจถูกกาชะล้างหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีต</p>
	<p><u>ปัญหา</u> คอนกรีตช่วงรอยต่อคานกับเสาของสะพานแตก หลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริม</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากเหล็กเสริมเป็นสนิม</p>

B4 กม. 34+080 (สามห่วง) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 36.50 เมตร กว้าง 2.30 เมตร สูง 5.90 เมตร สร้างแล้วเสร็จ เมื่อปี 2541

ตารางที่ 4.13 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม. 34+080

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> เหล็กเสริมเกิดสนิมจนทำให้ผิวคอนกรีตหลุดร่อน</p> <p><u>สาเหตุ</u> ระยะคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ</p>
	<p><u>ปัญหา</u> การแตกร้าวช่วงคานบันได</p> <p><u>สาเหตุ</u> เหล็กเสริมภายในเป็นสนิมเกิดการขยายคานคอนกรีต</p>
	<p><u>ปัญหา</u> นี้เกิดจากการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตบนพื้นทางเดิน</p> <p><u>สาเหตุ</u> ระยะคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมไม่เพียงพอ</p>
	<p><u>ปัญหา</u> นี้เกิดจากหลุดร่อนคอนกรีต เหล็กเป็นสนิมคานแม่บันได</p> <p><u>สาเหตุ</u> ระยะคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมไม่เพียงพอ คอนกรีตเสื่อมสภาพ</p>






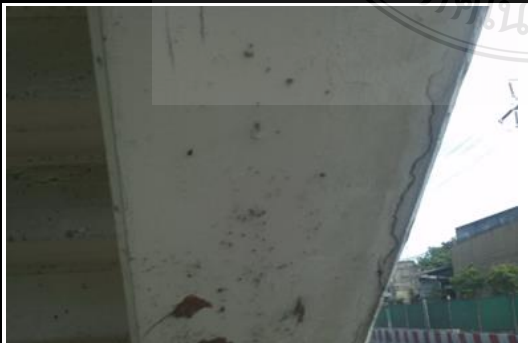
B5 กม. 30+244 (การเคหะสมุทรปราการ) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 36.40 เมตร กว้าง 2.30 เมตร สูง 5.90 เมตร สร้างแล้วเสร็จ เมื่อ 17 ก.พ. 2545

ตารางที่ 4.14 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม. 30+244

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> เหล็กเสริมเกิดสนิมจนทำให้ผิวคอนกรีตหลุดร่อน</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เหล็กเสริมเป็นสนิม</p>
	<p><u>ปัญหา</u> การแตกร้าวช่วงพื้นชนพักบันได</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เหล็กเสริมเป็นสนิม</p>
	<p><u>ปัญหา</u> นี้เกิดจากการหลุดร่อนของเนื้อคอนกรีตบนพื้นทางเดิน</p> <p><u>สาเหตุ</u> ระยะเวลาคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมไม่เพียงพอ การหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ</p>
	<p><u>ปัญหา</u> นี้เกิดจากหลุดร่อนคอนกรีตช่วงรอยต่อคานกับเสาของสะพาน</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เหล็กเสริมเป็นสนิม</p>

B6 ก.ม. 23+118 (บ.นมตรามะลิ) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 26.50 เมตร กว้าง 2.00 เมตร สูง 6.00 เมตร สร้างแล้วเสร็จ เมื่อ 18 ก.ค. 2545

ตารางที่ 4.15 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม ก.ม. 23+118

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> ผิวคอนกรีตช่วงคานบันไดเริ่มหลุดร่อน</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากเหล็กเสริมภายในเป็นสนิม</p>
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวช่วงรอยต่อเสากับคานบันได</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต</p>
	<p><u>ปัญหา</u> สีหลุดร่อนสี, มีฝุ่นซอกลง, มีรอยร้าว</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากอากาศความชื้น และการเสื่อมสภาพของสี</p>
	<p><u>ปัญหา</u> รอยร้าวคานบันได ในแนวราบยาวไปตามคานใต้คาน หรือขอบด้านล่างของคาน</p> <p><u>สาเหตุ</u> รอยร้าวเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม</p>

B7 ก.ม. 27+390 (โรงเรียนเสด็จมพิทยานุกูล) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 36.00 เมตร กว้าง 3.20 เมตร สูง 5.50 เมตร สร้างแล้วเสร็จ เมื่อ 29 มี.ค. 2550

ตารางที่ 4.16 สาเหตุและลักษณะความเสียหาย ของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม.27+390

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> คอนกรีตกะเทาะหลุดร่อน</p> <p><u>สาเหตุ</u> มาจากการหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ หรือ คุณภาพคอนกรีตไม่ดีพอ</p>
	<p><u>ปัญหา</u> ผิวคอนกรีตแตกลายงา</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> สีเริ่มซีดหลุดร่อน</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากแสงแดด อากาศ ความชื้นและฝนชะล้างและการเสื่อมสภาพของสี</p>
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวคานรับชานพักบันได</p> <p><u>สาเหตุ</u> รอยร้าวเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม</p>

B8 กม. 29+220 (เขื่องฟาร์มจระเข้) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 36.00 เมตร กว้าง 3.20 เมตร สูง 5.50 เมตร สร้างแล้วเสร็จ เมื่อปี พ.ศ. 2552

ตารางที่ 4.17 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม. 29+220

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> รอยแตกร้าวขึ้นบันได</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการหดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> สีสลอก ผิวหน้าโครงสร้างเกิดหลุดร่อน</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากผิวหน้าปูนที่ป้ายฉาบบางบางบนผิวคอนกรีตไม่ดีพอ</p>
	<p><u>ปัญหา</u> สีสลอก คอนกรีตเกิดหลุด กระเทาะ</p> <p><u>สาเหตุ</u> เนื่องจากการหล่อคอนกรีตไม่ดีพอ หรือคุณภาพคอนกรีตไม่ดีพอ</p>
	<p><u>ปัญหา</u> เกิดคราบสนิม</p> <p><u>สาเหตุ</u> เกิดจากการหล่อโครงสร้างไม่ดีพอระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมน้อยเกินไป</p>

B9 กม. 30+640 (สะพานคู่) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 36.00 เมตร กว้าง 3.20 เมตร สูง 5.50 เมตร สร้างแล้วเสร็จ เมื่อปี พ.ศ. 2552

ตารางที่ 4.18 สาเหตุและลักษณะความเสียหายของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม กม. 30+640

ลักษณะความเสียหาย	สาเหตุความเสียหาย
	<p><u>ปัญหา</u> รอยร้าวบริเวณเสารับโครงสร้างคานบนได้</p> <p><u>สาเหตุ</u> จากการทรุดตัวของโครงสร้าง</p>
	<p><u>ปัญหา</u> การแตกร้าวช่วงเสาต่อม่อ</p> <p><u>สาเหตุ</u> จากการทรุดตัวและการสั่นสะเทือนจากรถยนต์ขนาดใหญ่ที่วิ่งผ่าน</p>
	<p><u>ปัญหา</u> เหล็กเสริมโผล่ เกิดสนิม</p> <p><u>สาเหตุ</u> การจัดวางระยะเหล็กเสริมผิดไปจากแบบ</p>
	<p><u>ปัญหา</u> สีลอก เกิดจากอุณหภูมิร้อนของผิวหน้าโครงสร้าง</p> <p><u>สาเหตุ</u> อากาศ ความชื้นและฝนชะล้างและการเสื่อมสภาพของสี</p>

#### 4.1.2 สรุปความเสียหายที่พบจากการตรวจสอบอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้าม

จากการตรวจสอบเบื้องต้นโดยใช้วิธีตรวจสอบด้วยสายตา พบว่าปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมส่วนใหญ่มักเกิดบริเวณคานคอดิน คานบริเวณกันสาดและพื้นใต้กันสาด เสา ซึ่งสาเหตุหลักเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพ เหล็กเสริมเป็นสนิม คอนกรีตแตกหลุดร่อน ระบบระบายน้ำไม่มีการบำรุงรักษาทำให้น้ำขัง ส่วนในบริเวณอื่นๆที่พบมักเกิดจากการมีระยะหุ้มเหล็กน้อยเกินไป สรุปวิเคราะห์สาเหตุความเสียหายเบื้องต้นได้ดังนี้

1. ความเสียหายที่พบในอาคารเรียน จากตารางที่ 4.19 สรุปความเสียหายที่พบ พบว่าอาคารเรียน A1 (โรงเรียนสมุทรปราการ) และอาคารเรียน A2 (โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง) จะพบปัญหาการแตกร้าวหลุดร่อนปูนฉาบและคอนกรีต ปัญหาการเกิดสนิม ของโครงสร้างเสาและคานเป็นจำนวนมาก

ปัญหาของอาคารเรียนอื่นมีบ้างแต่ส่วนน้อยหรือไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากมีการซ่อมบำรุง มีการทาสีใหม่ เนื่องจากหน่วยงานราชการจะมีงบประมาณซ่อมเกือบทุกปี

2. ความเสียหายที่พบในสะพานลอยเดินข้าม จากตาราง 4.20 พบว่า ความเสียหายส่วนใหญ่เกิดจาก การหลุดร่อนคอนกรีตเนื่องจากการกะเทาะของผิวคอนกรีตเกิดจากเหล็กเสริมเป็นสนิม การแตกร้าวของโครงสร้างบางส่วน ปัญหาน้ำรั่วซึมทางเดินท่อใต้พื้นบางส่วน การหลุดร่อนของสีเนื่องจากขาดการดูแลอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.19 สรุปความเสียหายที่พบในโครงสร้างอาคารเรียน

ความเสียหายที่พบ	โครงสร้างอาคารเรียน								
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
การแตกร้าวในองค์อาคารรับแรง	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
การแตกร้าวของผิวอาคาร ด้านนอก	มาก	มาก	น้อย	น้อย	ปาน กลาง	น้อย	น้อย	มาก	น้อย
การหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบ	มาก	มาก	มาก	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
ปัญหาการเกิดสนิมและการ กะเทาะของคอนกรีตหุ้มเหล็ก	มาก	มาก	มาก	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
น้ำฝนรั่วซึมเข้าในอาคาร	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
การหลุดร่อนของสี	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	น้อย	มาก

**ตารางที่ 4.20** สรุปความเสียหายที่พบในโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม

ความเสียหายที่พบ	โครงสร้างอาคารเรียน								
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
การแตกร้าวในองค์อาคารรับแรง	น้อย	น้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
การแตกร้าวของผิวโครงสร้าง	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก
การหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบ	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ปัญหาการเกิดสนิมและการกะเทาะของคอนกรีตหุ้มเหล็ก	น้อย	น้อย	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
น้ำฝนรั่วซึม ระหว่างพื้นคอสสะพาน	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
การหลุดร่อนของสี	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก	มาก

NA หมายถึง ไม่มีการหลุดร่อนของชั้นปูนฉาบ ของสะพานลอยเดินข้ามเนื่องจากไม่มีการฉาบปูน

**หมายเหตุ :** น้อย หมายถึง จำนวนความเสียหายโครงสร้างน้อยกว่า ร้อยละ 20 ของพื้นที่อาคาร  
 ปานกลาง หมายถึง จำนวนความเสียหายโครงสร้างมากกว่าร้อยละ 20 แต่น้อยกว่า ร้อยละ 30 ของพื้นที่อาคาร

การจำแนกระดับความเสียหายของแต่ละ โครงสร้าง ในตารางที่ 4.19 และ ตารางที่ 4.20 นั้น เป็นการจำแนกระดับเฉลี่ยโดยให้ความสำคัญความเสียหายแต่ละอาคารเท่ากัน และให้ความสำคัญกับร้อยละของความเสียหาย เป็นตัวแปรหลักในการจำแนกระดับ อย่างไรก็ตามจากผลการตรวจสอบพบว่าความเสียหายที่รุนแรงมักจะอยู่ในอาคารที่มีจำนวนความเสียหายประเภทดังกล่าวมาก

ด้วยเหตุนี้การจำแนกระดับความเสียหาย จึงมีความสัมพันธ์ทางอ้อมกับความรุนแรงของความเสียหายแต่ละประเภทในแต่ละ โครงสร้างด้วย

**4.2** กำลังอัดของคอนกรีต

จากการกระจายตัวของค่า Rebound Number (ผลดังแสดงในภาคผนวก ก) สามารถคำนวณค่ากำลังอัดเฉลี่ยตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.8 ได้ค่าตามตารางที่ 4.21 และตารางที่ 4.22

**ตารางที่ 4.21** กำลังอัดเฉลี่ยที่ได้จากความสัมพันธ์ Japan Society of Civil Engineers (JSCE)  
ของโครงสร้างอาคารเรียน

โครงสร้าง	อายุ โครงสร้าง (ปี)	กำลังอัดจากก้อนกระแทก		
		Schmidt Hammer		
		ค่าการสะท้อน RN	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม. <sup>2</sup> )	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
A1 โรงเรียนสมุทรปราการ	44	41.99	346.3	44.0
A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง	30	40.27	324.8	43.2
A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม	29	39.14	310.7	22.4
A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม	20	39.08	310.0	12.4
A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์	16	37.94	295.8	31.7
A6 โรงเรียนนาคคือนุสรณ์	14	38.22	299.3	23.1
A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง	10	37.89	295.2	19.3
A8 โรงเรียนวัดแพรกษา	5	36.93	283.2	27.2
A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์	5	36.84	282.1	10.0

**ตารางที่ 4.22** กำลังอัดเฉลี่ยที่ได้จากความสัมพันธ์ Japan Society of Civil Engineers (JSCE)  
ของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม

โครงสร้าง	อายุ โครงสร้าง (ปี)	กำลังอัดจากก้อนกระแทก		
		Schmidt Hammer		
		ค่าการสะท้อน RN	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม. <sup>2</sup> )	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
B1 กม. 27+789	18	43.06	359.6	55.30
B2 กม. 31+580	18	40.44	326.9	48.03
B3 กม. 36+443	16	40.99	333.8	44.11
B4 กม. 34+080	15	41.08	334.9	48.55
B5 กม. 30+244	11	42.65	354.4	25.30
B6 กม. 23+118	11	40.55	328.3	20.14
B7 กม. 27+390	6	38.71	305.4	10.23
B8 กม. 29+220	4	37.04	284.6	5.98
B9 กม. 30+640	4	37.40	289.0	13.33



การทดสอบโดยใช้เครื่องมือรีบาวด์แฮมเมอร์ แท้จริงแล้ว เป็นการทดสอบความแข็งของผิวหน้าคอนกรีต สามารถวัดความแข็งของผิวหน้าได้ลึกไม่เกิน 30 มม. [34-35] สำหรับกรณีที่คอนกรีตสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และมีความชื้นที่เหมาะสม จะทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ทำลายความเป็นด่างของเนื้อคอนกรีตโดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ในคอนกรีต จะทำปฏิกิริยากับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) ซึ่งทำให้เนื้อคอนกรีตบริเวณผิวหน้ามีความแน่นยิ่งขึ้นเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต และส่งผลให้ความแข็งของผิวหน้าของคอนกรีตสูงขึ้นไปด้วย [24] ทำให้แนวโน้มของค่ากำลังอัดจาก Schmidt Hammer มีค่าเพิ่มมากขึ้น ตลอดจนคอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นตามอายุการใช้งาน

นอกจากนี้ในการทดสอบกำลังอัด ด้วยเครื่องมือรีบาวด์แฮมเมอร์ นั้นมีความอ่อนไหวต่อปัจจัยจากจุดทดสอบเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการทดสอบใกล้บริเวณที่มีหินภายในคอนกรีต หรือแม้แต่การทดสอบบริเวณใต้ผิวคอนกรีตมีเหล็กเสริมซึ่งทำให้แสดงค่าการสะท้อนกลับสูงกว่าปกติถึงกว่าร้อยละ 30 เทียบกับบริเวณที่เป็นคอนกรีตปกติ [36] ซึ่งสอดคล้องกับค่าการกระจายตัว Rebound Number

แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดที่ได้จากความสัมพันธ์ของ (JSCE) ของโครงสร้างที่ทำการตรวจสอบทั้งหมด มีการใช้ค่าการกระจายตัวของ Rebound Number ที่ทดสอบ ซึ่งบางครั้งก็อาจจะทำให้การบ่งบอกผลด้านกำลังอัดและคุณภาพของคอนกรีตไม่ชัดเจนยิ่งขึ้น ค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย พบว่ามีค่าสูงกว่าเกณฑ์ออกแบบมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 240 กก./ $cm^2$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลกำลังอัดมีค่ามาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดกำลังอัด
2. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการอ่านค่ากำลังอัด

ซึ่งจากสองสาเหตุดังกล่าวนี้ทำให้ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลกำลังอัดดังกล่าวเกิดการสะสม จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลกำลังอัดมีค่ามาก

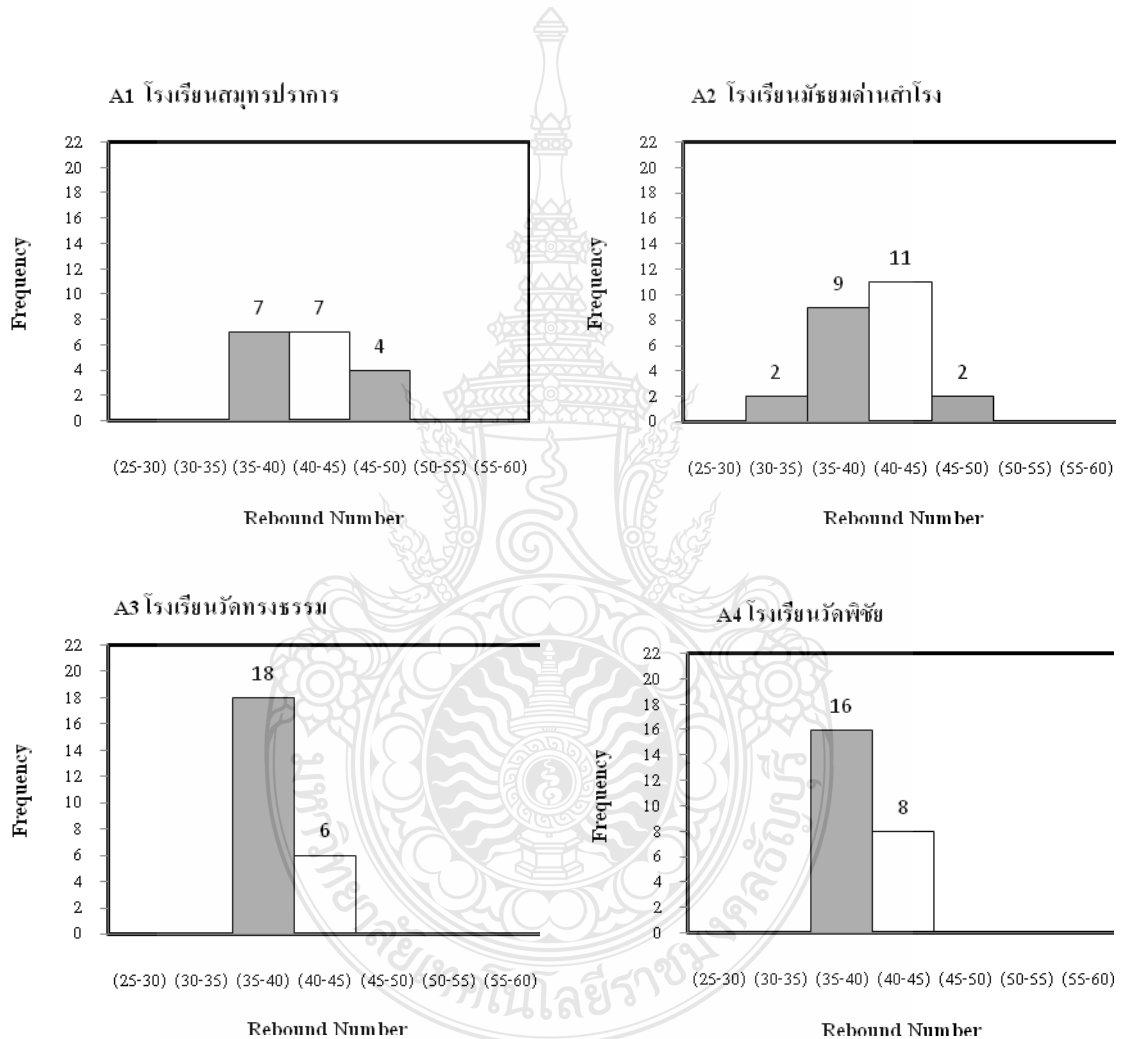
และพบว่าค่ากำลังอัดเฉลี่ยของโครงสร้างอาคารเรียนกับโครงสร้างสะพานลอยนั้น ไม่แตกต่างกันมากนักทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยและสาเหตุ ดังนี้

1. อายุการใช้งานของโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลทำให้คอนกรีตที่ก่อสร้างก่อนเกิดการเสื่อมสภาพมากกว่าโครงสร้างที่ก่อสร้างภายหลัง
2. สภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน คือ มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อมได้เร็วขึ้น

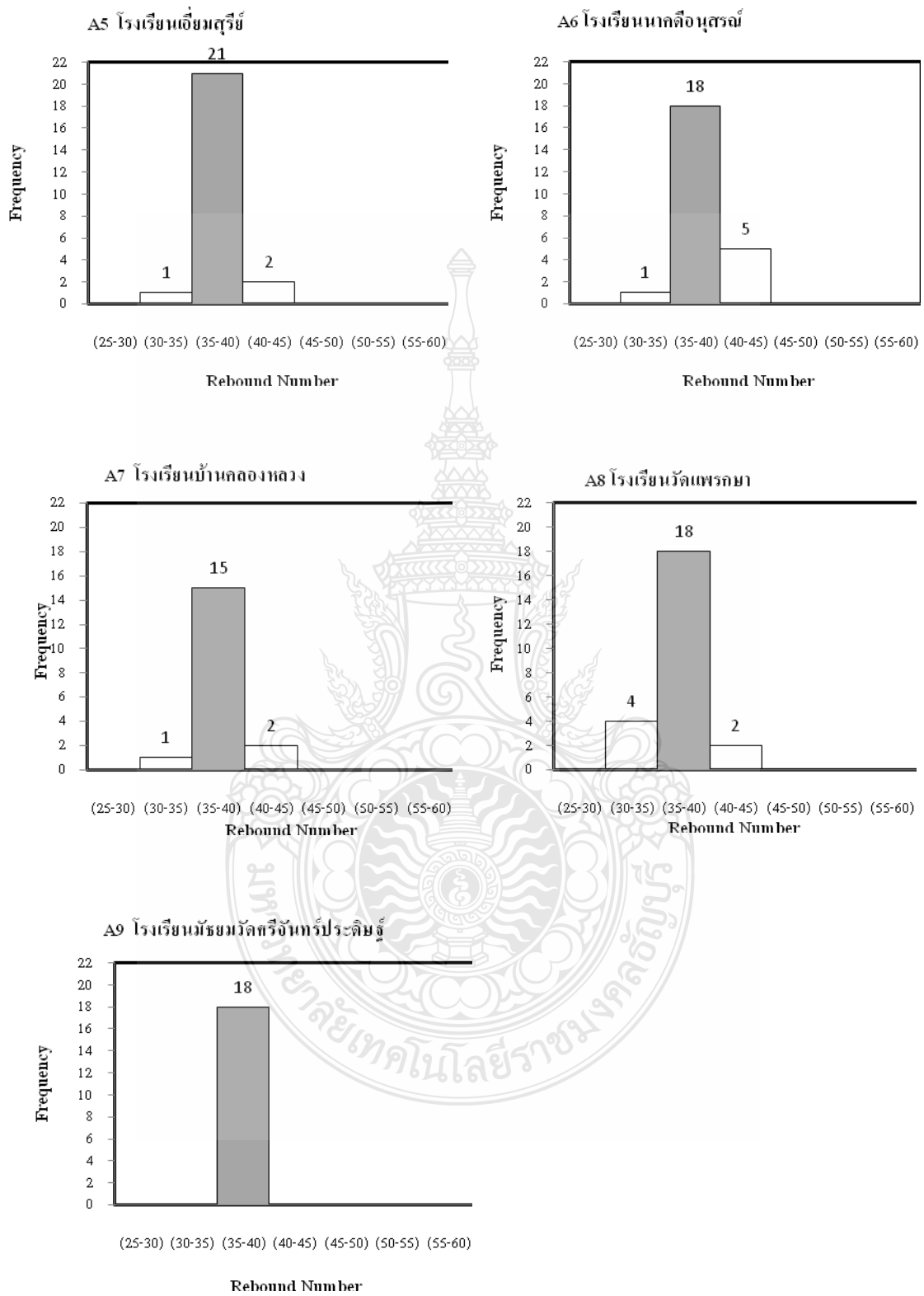
3. คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้าง

4. ขั้นตอนและการควบคุมขณะการก่อสร้าง

แต่อย่างไรก็ตามในอนาคตข้างหน้าความลึกคาร์บอนนั้นจะเพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งานจนถึงเหล็กเสริมภายในคอนกรีต มีผลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมจนทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งอาจจะมีผลทำให้กำลังอัดลดน้อยลงแตกต่างกันไป



รูปที่ 4.1 ค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่วัดได้จากโครงสร้างอาคารเรียน A1-A9



รูปที่ 4.1 ค่าการกระจายตัวของการสะท้อนที่วัดได้จากโครงสร้างอาคารเรียน A1-A9 (ต่อ)

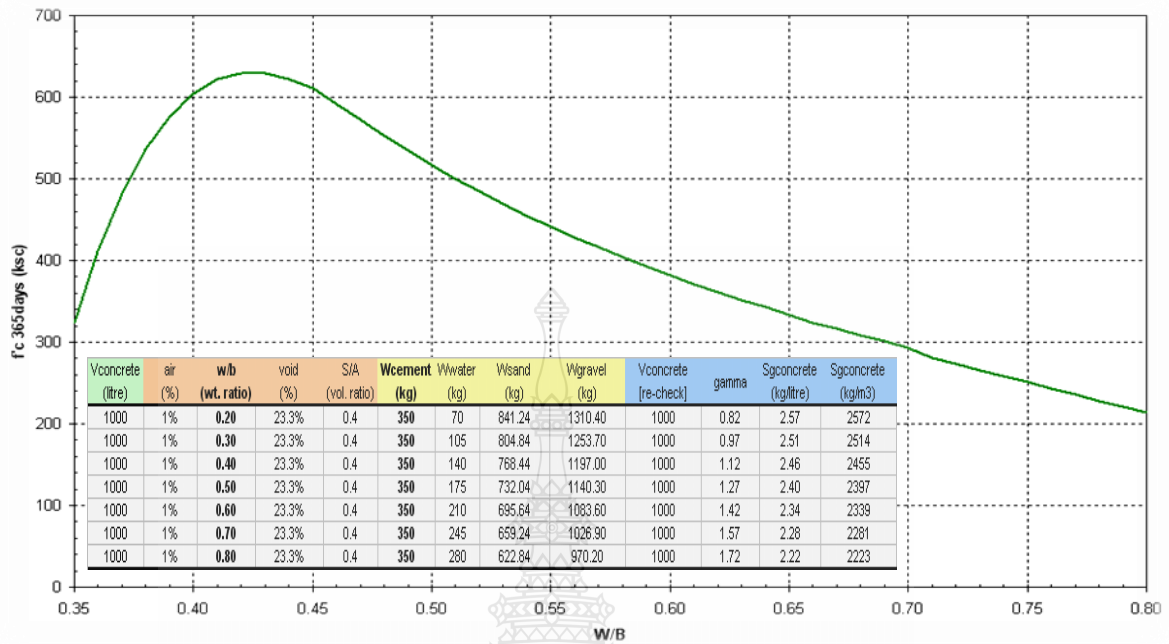
จากข้อมูลซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.21 และตารางที่ 4.22 เมื่อทราบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมเพื่อทำการวิเคราะห์ย้อนกลับคำนวณหาค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดย

สมมติ	คอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างทุกสถานที่ใช้ ซีเมนต์ล้วน เป็นวัสดุประสาน
ใช้ ปูนซีเมนต์	เท่ากับ 350 กก/ม <sup>3</sup>
หิน	เท่ากับ 1100 กก/ม <sup>3</sup>
ทราย	เท่ากับ 800 กก/ม <sup>3</sup>

และ คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด มากกว่า 300 กก/ม<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน ให้ใช้สารลดปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสมของคอนกรีต และ คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด น้อยกว่า 300 กก/ม<sup>2</sup> ที่อายุ 28 วัน จะไม่ใช้สารลดปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ทำการวิเคราะห์ย้อนกลับ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ “FACOMP T2.0” โดยจะพิจารณาถึงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปี ทำโดยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆกัน ซึ่งจะได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีอายุ 1 ปี ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 และ จากผลการสำรวจอายุการใช้งานของโครงสร้างแต่ละแห่งนั้นมีอายุของโครงสร้างมากกว่า 1 ปี แต่ในการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อายุมากขึ้น ให้ใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปีในการวิเคราะห์ เนื่องจากการพัฒนากำลังของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เมื่ออายุของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนชั่นจะมีความพรุนน้อยลง โดยแคลเซียมคาร์บอเนตจากปฏิกิริยา คาร์บอนเนชั่น จะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ทำให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นตามอายุการใช้งาน

โดยกำหนดให้ทุกช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างทั้งหมด 18 แห่ง ที่ดำเนินการตรวจสอบให้ลดค่ากำลังอัดของคอนกรีตของโครงสร้างลง โดยกำหนดค่ากำลังอัดคอนกรีตช่วง 321-360 กก./ชม<sup>2</sup>. ลดค่ากำลังอัดคอนกรีตลงร้อยละ 15 , ช่วงกำลังอัด 301-320 กก./ชม<sup>2</sup>. ลดค่ากำลังอัดลงร้อยละ 10 และช่วงกำลังอัด 280-300 กก./ชม<sup>2</sup>. ให้ลดกำลังอัดลงร้อยละ 5 ตามตารางที่ 4.23 และตารางที่ 4.24 สามารถหาค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) โดยเทียบค่าจากกราฟ ตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 ปี และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ได้จากการคำนวณโดย “FACOMP T2.0”

ตารางที่ 4.23 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตของโครงสร้างอาคารเรียน

โครงสร้าง	อายุ (ปี)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม. <sup>2</sup> )	ปรับลด (%)	กำลังอัดเฉลี่ยปรับลด (กก./ซม. <sup>2</sup> )	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)
A1 โรงเรียนสมุทรปราการ	44	346.3	15	294.31	0.701
A2 โรงเรียนวัดด่านสำโรง	30	324.8	15	276.09	0.717
A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม	29	310.7	10	279.67	0.719
A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม	20	310.0	10	279.03	0.718
A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์	16	295.8	5	281.04	0.712
A6 โรงเรียนนาคคือนุสรณ์	14	299.3	5	284.31	0.708
A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง	10	295.2	5	280.45	0.711
A8 โรงเรียนวัดแพรกษา	5	283.2	5	269.07	0.725
A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์	5	282.1	5	268.01	0.726

ตารางที่ 4.24 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม

โครงสร้าง	อายุ (ปี)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. <sup>2</sup> )	ปรับลด (%)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม. <sup>2</sup> ) ปรับลด	อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน (W/B)
B1 กม. 27+789	18	359.6	15	305.62	0.688
B2 กม. 31+580	18	326.9	15	277.85	0.715
B3 กม. 36+443	16	333.8	15	283.69	0.709
B4 กม. 34+080	15	334.9	15	284.68	0.708
B5 กม. 30+244	11	354.4	15	301.21	0.69
B6 กม. 23+118	11	328.3	15	279.06	0.712
B7 กม. 27+390	6	305.4	10	274.83	0.72
B8 กม. 29+220	4	284.6	5	270.39	0.725
B9 กม. 30+640	4	289.0	5	274.58	0.72

#### 4.3 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

ในส่วนของผลการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก ตามตารางที่ 4.25 และตารางที่ 4.26 พบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเฉลี่ยที่ได้มีค่ามากกว่า 25 มิลลิเมตร ทุกโครงสร้าง (ข้อมูลรายละเอียดแสดงใน ภาคผนวก ก) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่กำหนดไว้ คือ โครงสร้างที่ไม่สัมผัสกับดิน ต้องมีระยะหุ้มเหล็กที่ 25 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าระบบการควบคุมการก่อสร้างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งจะสามารถช่วยชะลอคาร์บอนชั้นที่จะเข้าไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริม จนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลง ใกล้เคียงหรือต่ำกว่าระดับวิกฤติ

ตารางที่ 4.25 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและปูนฉาบฉาบ (อาคารเรียน)

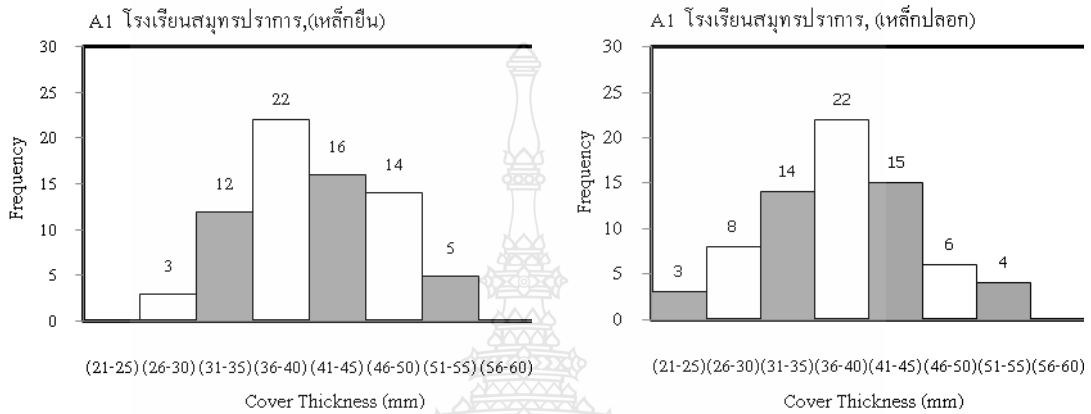
โครงสร้าง	ระยะปูนฉาบ		ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม			
			เหล็กยื่น		เหล็กปลอก	
	ระยะเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ระยะเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ระยะเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
A1	14	1.6	41	6.0	38	7.1
A2	14	1.4	40	7.7	38	7.7
A3	16	1.7	41	7.1	39	8.8
A4	14	1.9	44	5.4	41	5.9
A5	13	4.5	45	6.4	43	6.9
A6	15	1.5	47	6.9	44	7.2
A7	15	0.9	44	6.3	41	5.8
A8	18	1.6	54	8.1	52	9.6
A9	15	1.4	53	8.1	52	10.4

ตารางที่ 4.26 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (สะพานลอยเดินข้าม)

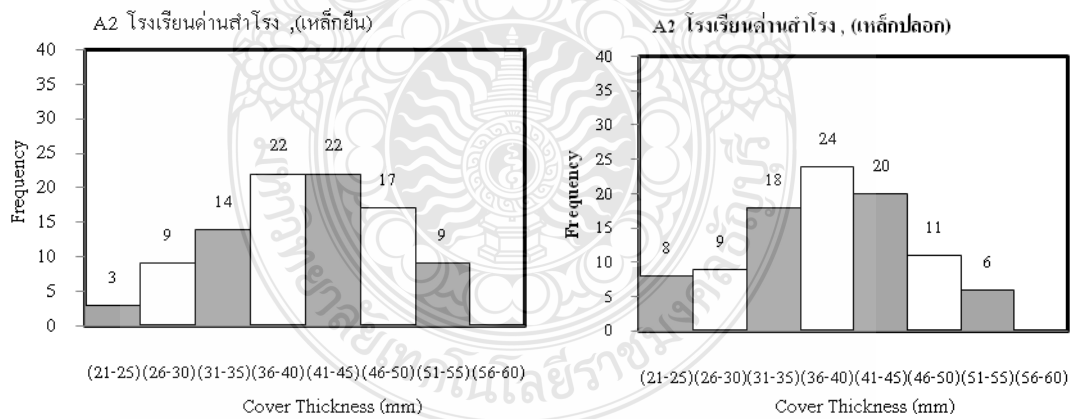
โครงสร้าง	ระยะปูนฉาบ		ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม			
			เหล็กยื่น		เหล็กยื่น	
	ระยะเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ระยะเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ระยะเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
B1	NA	NA	41	5.3	37.	3.9
B2	NA	NA	46	4.7	38	2.2
B3	NA	NA	46	4.4	41	2.9
B4	NA	NA	41	6.3	32	2.2
B5	NA	NA	53	6.2	41	6.4
B6	NA	NA	41	4.5	38	4.5
B7	NA	NA	54	7.5	42	6.1
B8	NA	NA	47	6.8	34	6.7
B9	NA	NA	38	5.7	34	6.4

NA หมายถึง ไม่มีระยะปูนฉาบของสะพานลอยเดินข้าม เนื่องจากไม่มีการฉาบปูน

สำหรับในรูปที่ 4.3 ถึง 4.20 แสดงค่าการกระจายตัวคอนกรีตหุ้มเหล็กยื่นและเหล็กปลอกของโครงสร้างอาคารเรียน 9 แห่ง และโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม 9 แห่ง ตามลำดับ ซึ่งมีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) เช่นกัน

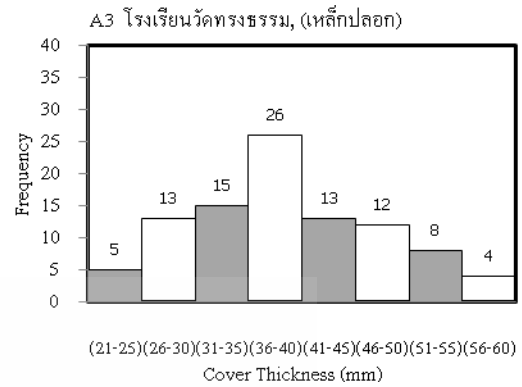
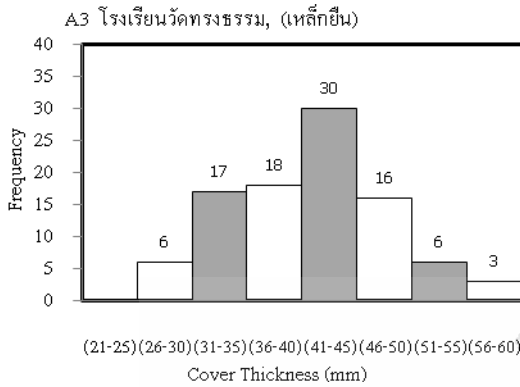


**รูปที่ 4.3** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A1  
โรงเรียนสมุทรปราการ

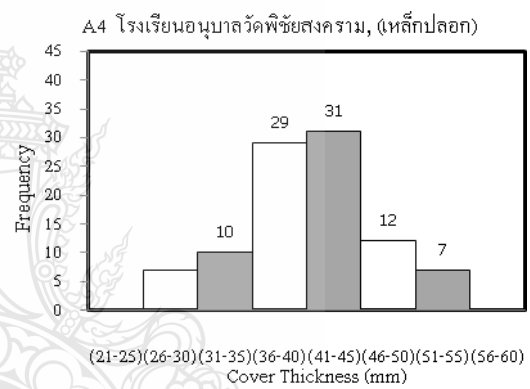
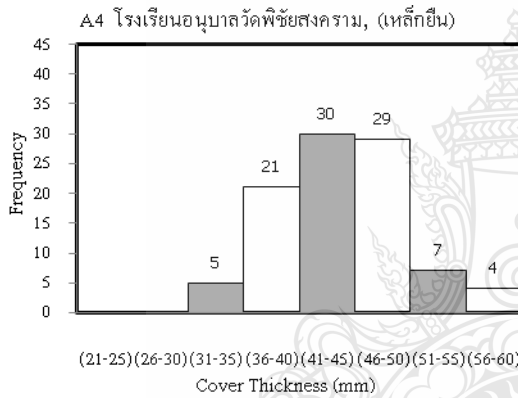


**รูปที่ 4.4** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A2  
โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง

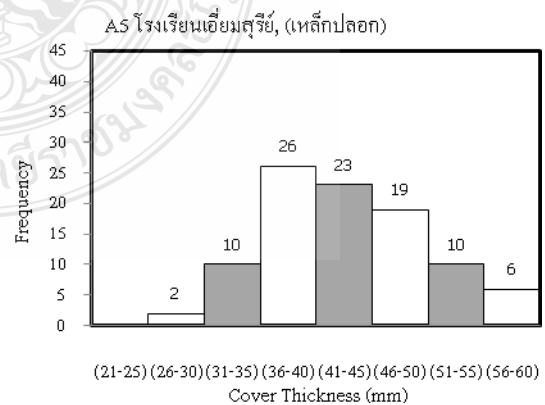
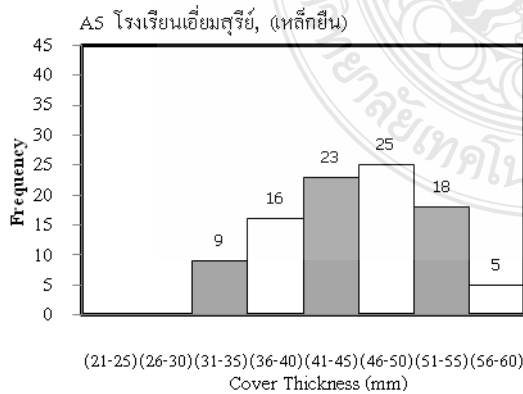




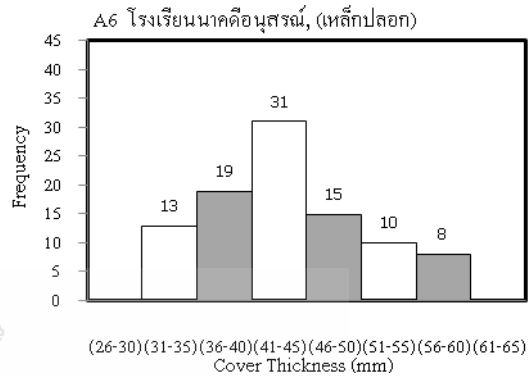
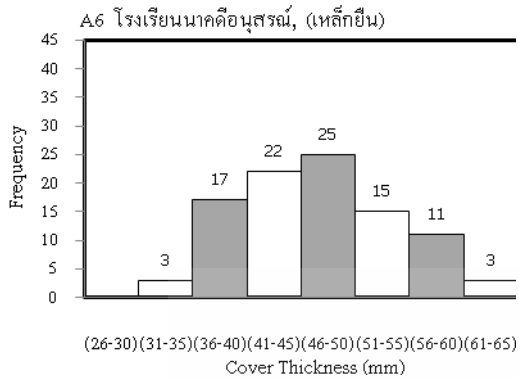
รูปที่ 4.5 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A3  
โรงเรียนวัดทรงธรรม



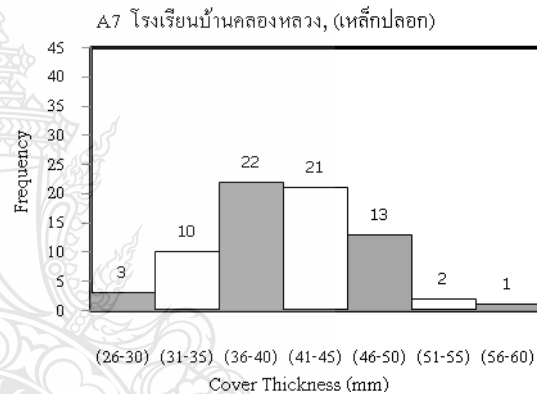
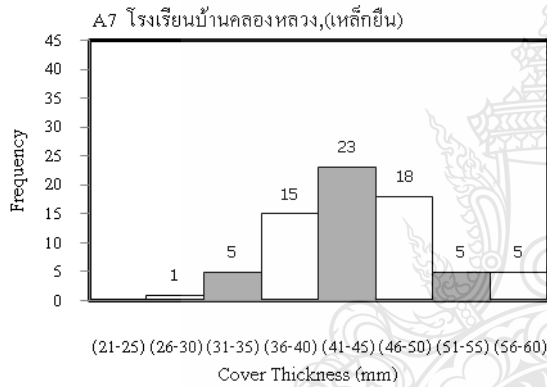
รูปที่ 4.6 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A4  
โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม



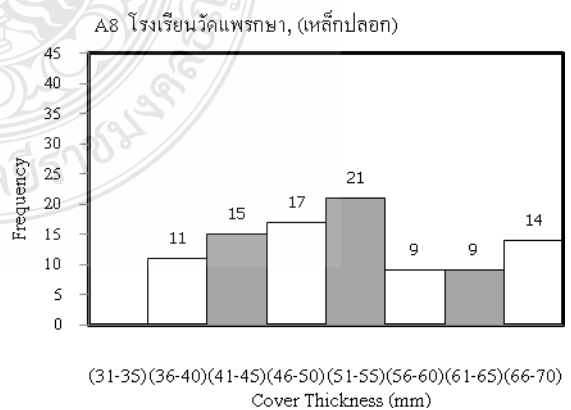
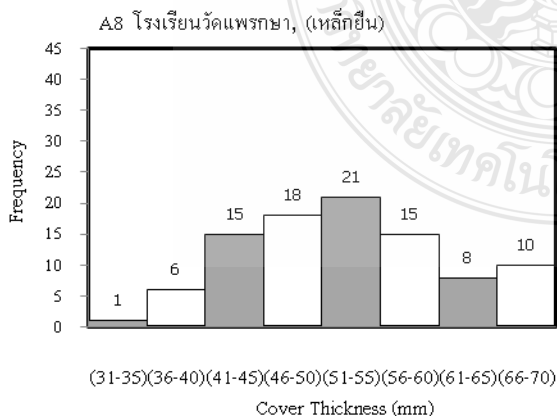
รูปที่ 4.7 ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A5  
โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์



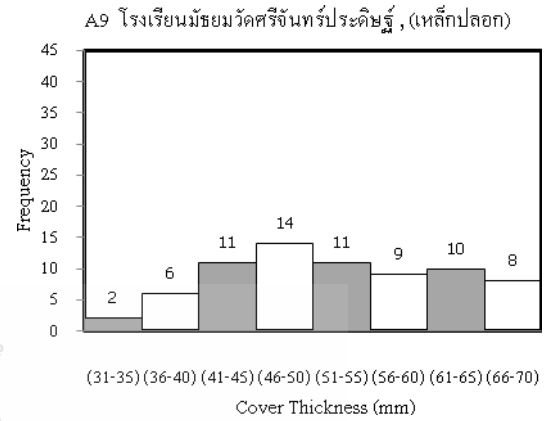
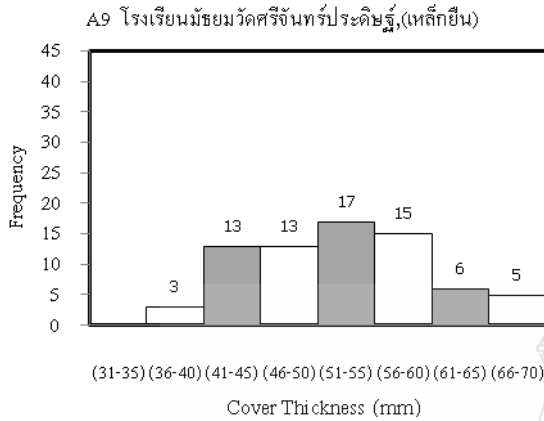
**รูปที่ 4.8** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A6  
โรงเรียนนาคคีอนุสรณ์



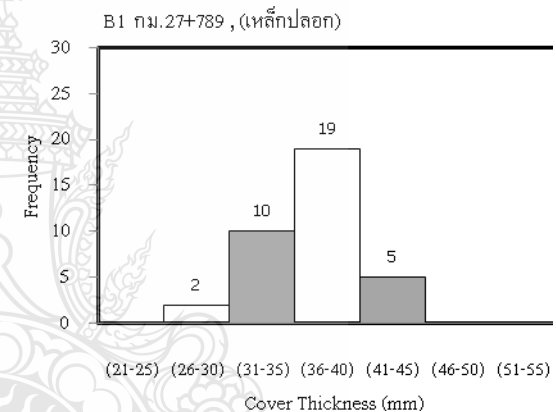
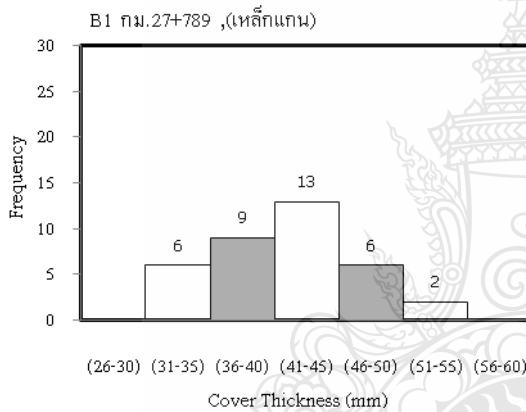
**รูปที่ 4.9** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A7  
โรงเรียนบ้านคลองหลวง



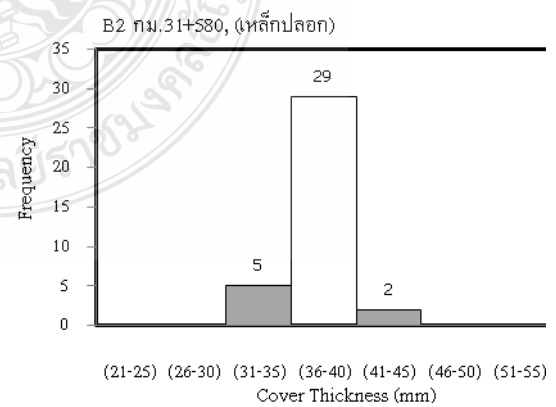
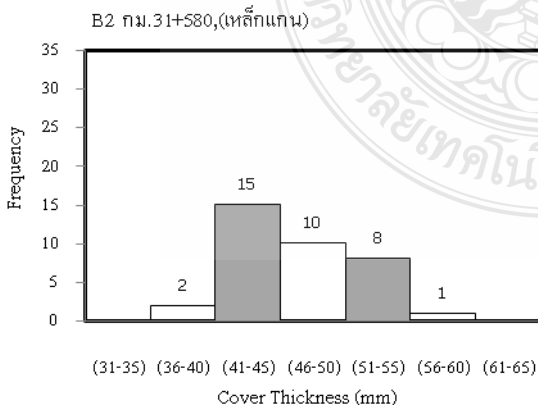
**รูปที่ 4.10** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A8  
โรงเรียนวัดแพรกษา



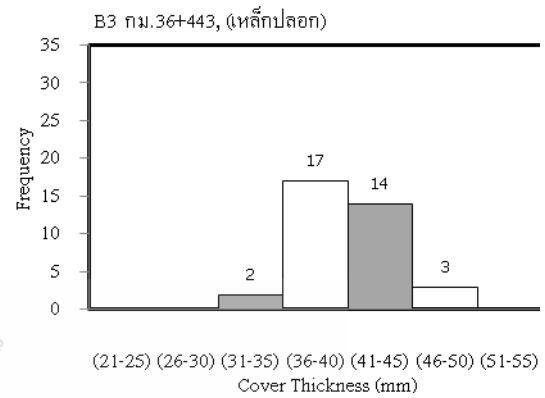
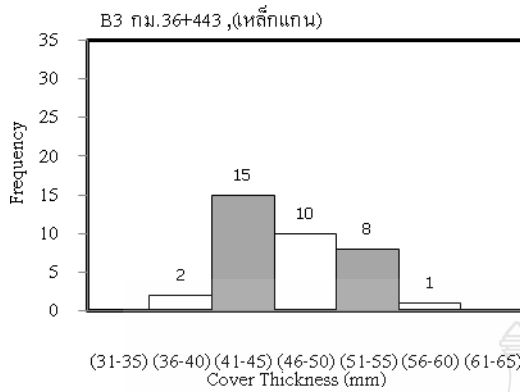
**รูปที่ 4.11** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างอาคารเรียน A9  
โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์



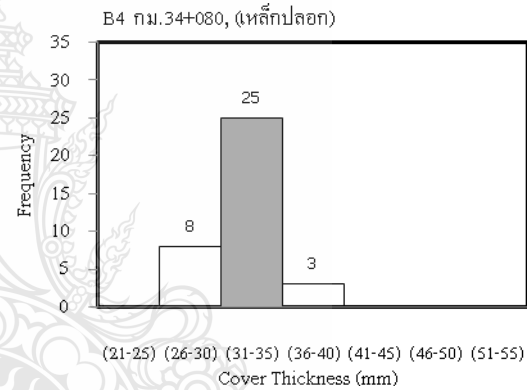
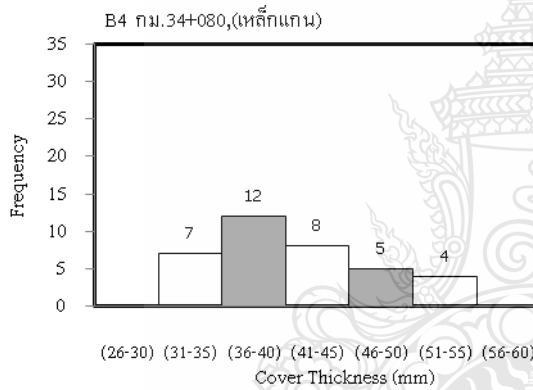
**รูปที่ 4.12** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B1  
กม.27+789



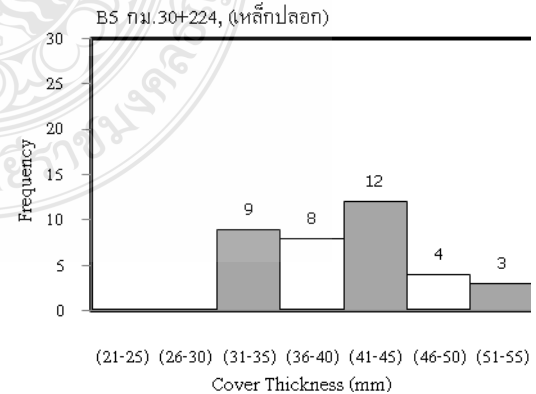
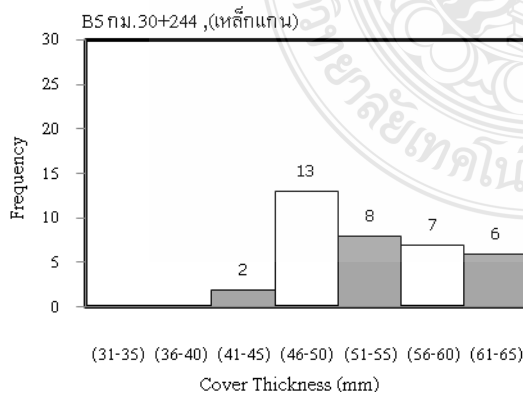
**รูปที่ 4.13** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B2  
กม.31+580



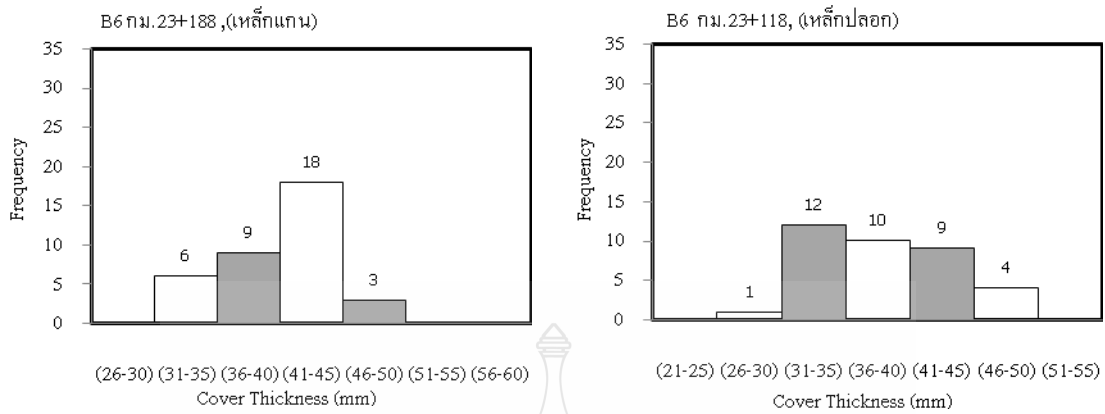
**รูปที่ 4.14** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B3  
กม.36+443



**รูปที่ 4.15** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B4  
กม.34+080



**รูปที่ 4.16** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B5  
กม.30+244



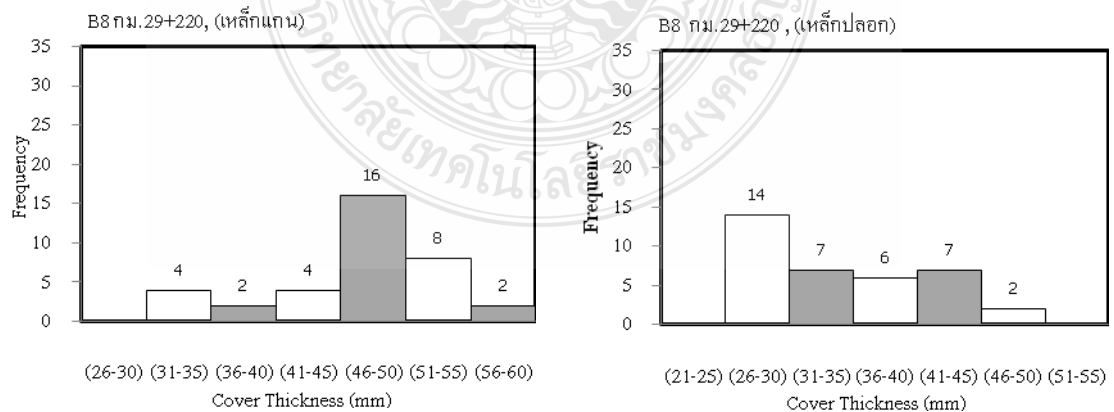
**รูปที่ 4.17** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B6

กม.23+118



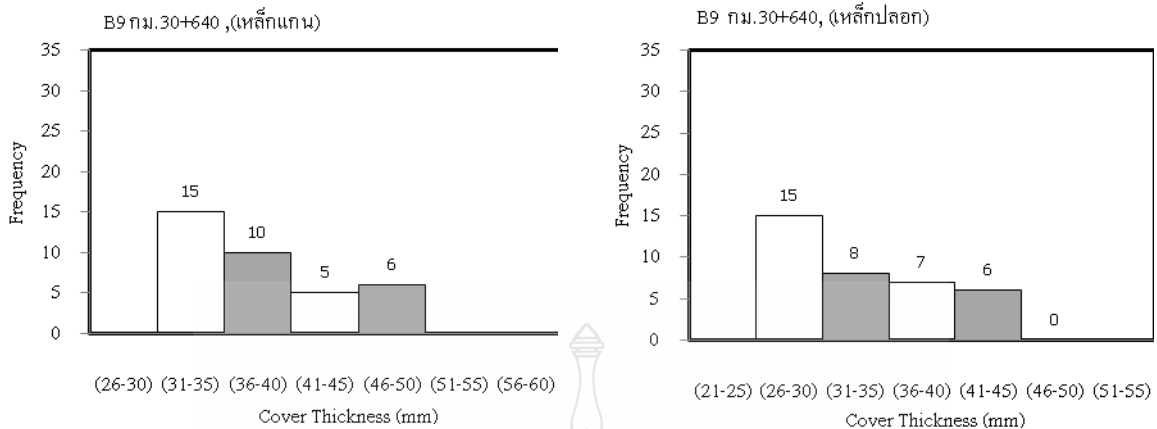
**รูปที่ 4.18** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B7

กม.27+390



**รูปที่ 4.19** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B8

กม. 29+220

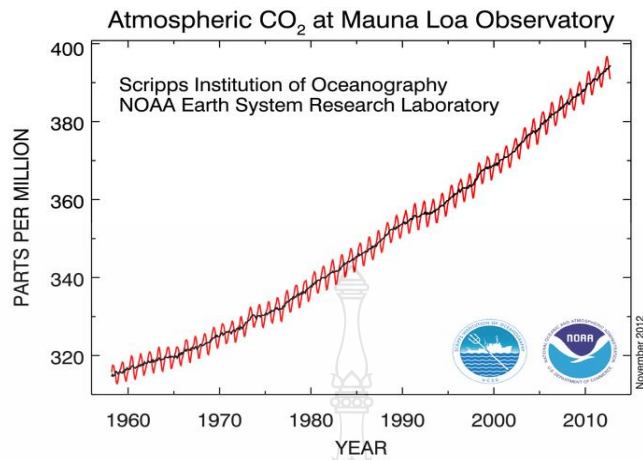


**รูปที่ 4.20** ค่าการกระจายตัวระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B9  
กม. 30+640

#### 4.4 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์

ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.27 และตารางที่ 4.28 นั้น เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การพัฒนาความสึกกร่อนชั้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีค่าอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-Dry) คือความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 จะเป็นปัจจัยที่ทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความคงทนเกี่ยวกับคาร์บอนไดร็อกไซด์ได้เร็วขึ้น แต่ในภาพรวมแล้วความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของโครงสร้างอาคารทั้งหมด 18 แห่ง มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ ใกล้เคียงกัน เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวอยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน และโครงสร้างอาคารที่เลือกในการศึกษาครั้งนี้ มีภาวะความเสี่ยงต่อการเกิดความสึกกร่อนชั้นค่อนข้างสูงเช่นเดียวกัน

แต่อย่างไรก็ตามปัจจุบัน ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และข้อมูลการศึกษาดังกล่าวเป็นข้อมูลในช่วงเวลาหนึ่งที่ทำการศึกษาเท่านั้น (พ .ศ.2556) ซึ่งในอนาคต ข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ สมควรที่จะศึกษาในอนาคตต่อไป



เส้นสีแดง แทนปริมาณ CO<sub>2</sub> ค่าเฉลี่ยรายเดือน  
 เส้นสีดำ แทนปริมาณ CO<sub>2</sub> หลังการคำนวณตามฤดูกาลเฉลี่ย

รูปที่ 4.21 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปีโดย NOAA [37]

ตารางที่ 4.27 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของสิ่งแวดล้อม (อาคารเรียน)

โครงสร้าง	อายุ โครงสร้าง (ปี)	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )		ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)	
		ความเข้มข้น เฉลี่ย(ppm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์เฉลี่ย (ร้อยละ)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
A1	44	606.42	39.12	48.15	6.66
A2	30	580.44	20.73	52.95	6.84
A3	29	580.08	27.32	46.22	9.82
A4	20	626.58	69.25	60.95	5.49
A5	16	581.14	19.56	63.04	7.50
A6	14	580.44	14.05	63.29	5.68
A7	10	595.53	14.55	56.83	6.52
A8	5	594.39	45.11	65.04	4.24
A9	5	583.86	14.42	61.39	5.30

ตารางที่ 4.28 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของสิ่งแวดล้อม (สะพานลอยเดินข้าม)

โครงสร้าง	อายุ โครงสร้าง (ปี)	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )		ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)	
		ความเข้มข้น เฉลี่ย(ppm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์เฉลี่ย (ร้อยละ)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
B1	18	615.31	14.01	60.95	4.68
B2	18	600.33	10.27	58.37	3.73
B3	16	605.61	30.74	56.90	7.92
B4	15	602.44	19.65	59.35	9.18
B5	11	598.22	6.07	57.14	4.49
B6	11	594.06	9.55	63.82	3.77
B7	6	594.78	6.35	63.04	5.82
B8	4	601.47	10.45	59.36	6.65
B9	4	598.72	20.84	60.70	5.41

#### 4.5 ความลึกคาร์บอนเนชั่น

กระบวนการของการแพร่กระจาย CO<sub>2</sub> สามารถจำลองตามกฎข้อที่หนึ่งของ Fick รูปแบบที่เริ่มต้นในการทำนายความลึกคาร์บอนเนชั่น จะขึ้นอยู่กับกฎการแพร่กระจายและเห็นว่าอัตราการความลึกคาร์บอนเนชั่น เป็นสัดส่วนกับรากที่สองของเวลาของการสัมผัสกับ CO<sub>2</sub> [38]

$$d = k\sqrt{t} \quad (4.1)$$

- โดยที่
- d คือ ค่าความลึกคาร์บอนเนชั่น (มม.)
  - k คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น (มม./ปี<sup>1/2</sup>)
  - t คือ อายุของโครงสร้าง (ปี)

จากอายุของโครงสร้างและความลึกคาร์บอนเนชั่น จากตารางที่ 4.29 และตารางที่ 4.30 สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นได้จากสมการ 4.1

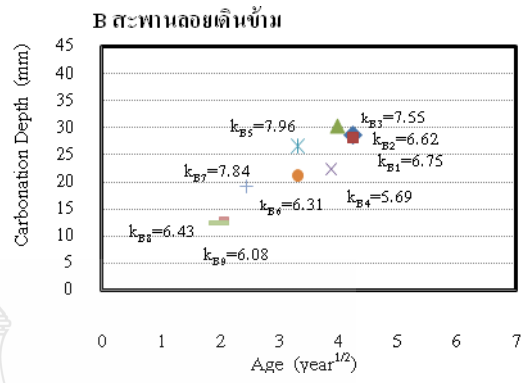
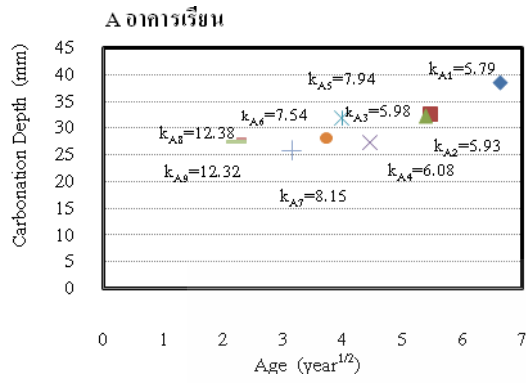


ตารางที่ 4.29 ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของ โครงสร้างอาคารเรียน

โครงสร้าง	อายุ (ปี)	ระยะความลึกคาร์บอนชั้น		สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น	
		ความลึกเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	k (มม./ปี <sup>1/2</sup> )	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
A1	44	38.4	7.74	5.79	1.17
A2	30	32.5	6.24	5.93	1.14
A3	29	32.2	4.56	5.98	0.85
A4	20	27.2	3.41	6.08	0.76
A5	16	31.8	4.40	7.94	1.10
A6	14	28.2	3.77	7.54	1.01
A7	10	25.8	2.87	8.15	0.91
A8	5	27.7	1.71	12.38	0.76
A9	5	27.6	2.68	12.32	1.20

ตารางที่ 4.30 ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของ โครงสร้างสะพานลอย  
เดินข้าม

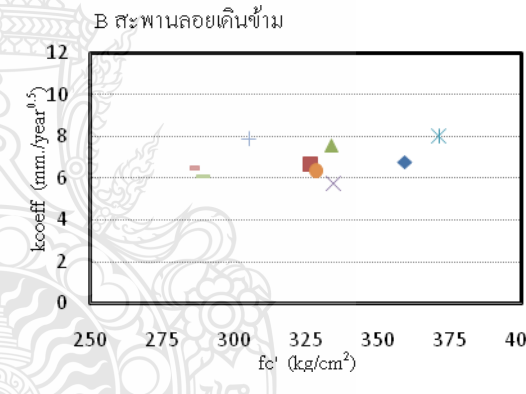
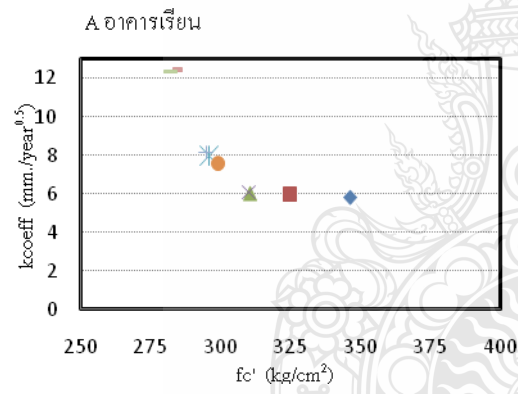
โครงสร้าง	อายุ โครงสร้าง (ปี)	ความลึกคาร์บอนชั้น		สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น	
		ความลึกเฉลี่ย (มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	k (มม./ปี <sup>1/2</sup> )	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
B1	18	28.6	5.05	6.75	1.19
B2	18	28.1	4.56	6.62	1.08
B3	16	30.2	4.86	7.55	0.43
B4	15	22.1	6.86	5.69	1.77
B5	11	26.4	6.02	7.96	0.52
B6	11	20.9	4.63	6.31	1.40
B7	6	19.2	3.84	7.84	1.57
B8	4	12.9	1.51	6.43	0.76
B9	4	12.2	2.81	6.08	1.41



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชันเฉลี่ยกับอายุของโครงสร้าง



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันเฉลี่ยกับกำลังอัดของโครงสร้าง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างทั้ง 18 แห่งจากตารางที่ 4.29 และ 4.30 พบว่าโครงสร้างที่มีอายุน้อย จะมีความลึกของคาร์บอนเนชัน น้อยกว่า โครงสร้างที่มีอายุมาก เนื่องจากสภาวะความคงทนของคอนกรีตมีการถูกทำลายสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ในทางกลับกันจากรูปที่ 4.22 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันที่ได้โครงสร้างที่มีอายุน้อยจะมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ความลึกบอเนชันสูงกว่าโครงสร้างที่มีอายุมากกว่า และจากรูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่ากำลังอัดสูงขึ้น ของโครงสร้าง จึงเป็นผลทำให้ความลึกคาร์บอนเนชันมีระยะที่เพิ่มมากขึ้น

ไปด้วย ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น สามารถรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นได้ดังต่อไปนี้

- 1) อายุของโครงสร้างแตกต่างกัน
- 2) สภาพแวดล้อมและการใช้งานที่แตกต่างกัน
- 3) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้าง

จากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนขึ้น แต่อาจจะมีปัจจัยด้านอื่นๆที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนขึ้นอยู่บ้างในระดับที่น้อย เช่น ทิศทางลม สภาพอากาศ เป็นต้น ซึ่งถือว่าปัจจัยส่วนนี้ถูกรวมคลุมจากปัจจัยหลักของการเกิดคาร์บอนขึ้นอยู่แล้ว แต่ปัจจัยส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้นเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด คือ สภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในอนาคต ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้น ( $k$ ) ก็อาจมีการเปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นการศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้น อย่างต่อเนื่องในอนาคต จะทำให้ ค่าสัมประสิทธิ์ของคาร์บอนขึ้นเกิดความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

#### 4.6 การประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นของโครงสร้างคอนกรีต

##### เสริมหลัก

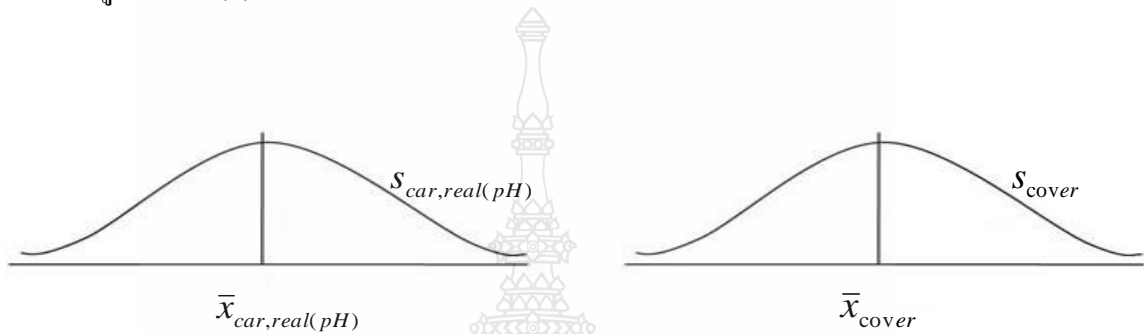
การประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) หมายถึง การจำแนกและพิจารณาจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงที่มีอยู่ โดยการประเมินจากโอกาสที่จะเกิด (Likelihood) และผลกระทบ (Impact)

- โอกาสที่จะเกิด (Likelihood) เป็นการพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยงในช่วงเวลาหนึ่ง หรือจะเรียกว่า ความถี่หรือโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยงก็ได้
- ผลกระทบ (Impact) ระดับความรุนแรงของผลเสียหายที่เกิดขึ้น จากความเสี่ยงและมีผลกระทบต่อโครงสร้าง ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างนั้นๆเสียหาย

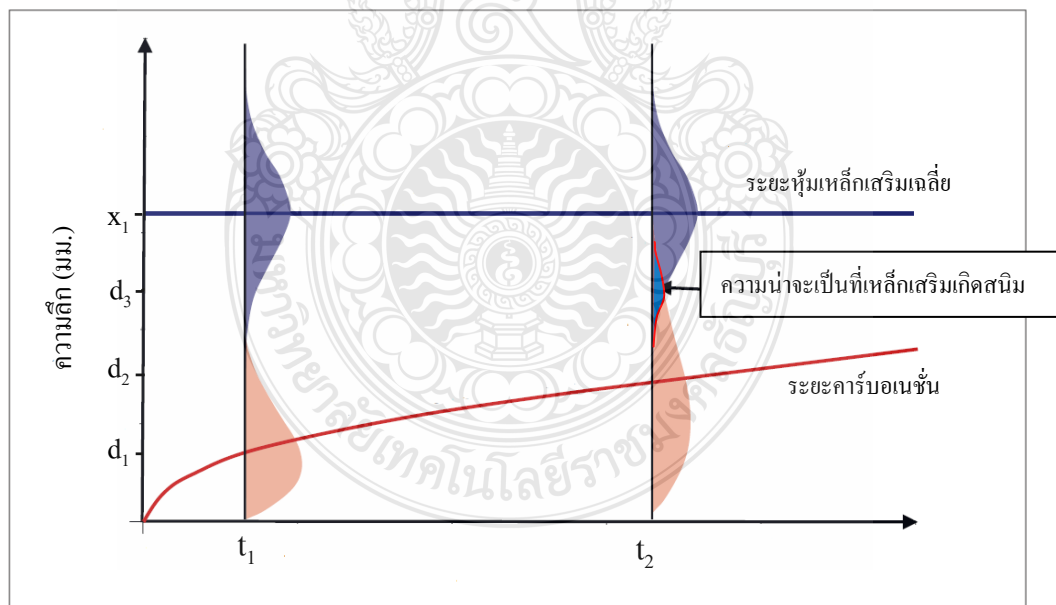
จากรูปที่ 4.25 (ก) แสดงแบบจำลองโค้งปกติของความลึกคาร์บอนขึ้นและระยะหุ้มเหล็กเสริมซึ่งข้อมูลทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นเมื่ออายุโครงสร้างมากขึ้น ความสัมพันธ์ของโค้งปกติของความลึกคาร์บอนขึ้นจะซ้อนทับโค้งปกติของระยะหุ้มเหล็กเสริม ทำให้โค้งปกติของข้อมูลทั้งสองเกิดส่วนที่ซ้อนทับกันขึ้น ดังแสดงในรูปที่รูปที่ 4.25 (ข) ซึ่งเป็นการแสดงแบบจำลองความเสี่ยงที่เหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีโอกาสเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้น โดยการแปรผันตามอายุของโครงสร้าง ซึ่งรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ความน่าจะเป็นของระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย  $x_1$  จะมีค่าคงที่ตลอดอายุการใช้งาน ในขณะที่พื้นที่ความน่าจะเป็นของความลึก

คาร์บอนชั้นจะเพิ่มขึ้นทุกช่วงอายุการใช้งานจาก  $d_1$  ไป  $d_2$  หรือ  $d_3$  เป็นต้น จนกระทั่ง ณ ช่วงอายุหนึ่งของโครงสร้าง ความน่าจะเป็นของความลึกคาร์บอนชั้นจะซ้อนทับกับความน่าจะเป็นของระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งส่วนที่ซ้อนทับก็คือความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น

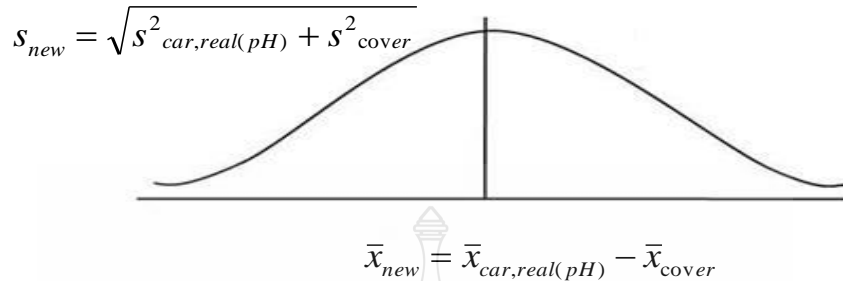
จากการซ้อนทับของระยะหุ้มเหล็กเสริมและความลึกคาร์บอนชั้นทำให้เกิดค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตัวใหม่ของข้อมูลความลึกคาร์บอนชั้นและระยะหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งแสดงออกมาในรูปที่ 4.25 (ค)



(ค) แผนภาพจำลองโค้งปกติของความลึกคาร์บอนชั้นและระยะหุ้มเหล็กเสริม



(ข) แผนภาพจำลองความเสี่ยงของความลึกคาร์บอนชั้นและระยะหุ้มเหล็กเสริมที่มีการแปรผันตามอายุโครงสร้าง [39]



(ก) แผนภาพจำลองโค้งปกติที่เกิดจากการซ้อนทับของความลึกคาร์บอนชั้นและระยะหุ้มเหล็กเสริม

รูปที่ 4.24 กลไกความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นตามหลักความน่าจะเป็นทางสถิติ

จากข้อมูลในตารางที่ 4.25-4.29 และ 4.26-4.30 สามารถทำการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดสนิมตามอายุต่างๆของโครงสร้างได้โดยประยุกต์หลักทางสถิติเกี่ยวกับการแจกแจงความน่าจะเป็นต่อเนื่อง [16] เข้ามาทำการวิเคราะห์ ตามแบบจำลองรูปที่ 4.25 (ก),(ข),(ค) อาศัยความสัมพันธ์ของการแจกแจงของผลต่างค่าเฉลี่ยของระยะหุ้มเหล็กเสริมและความลึกคาร์บอนชั้น โดยความลึกคาร์บอนชั้นที่จะนำมาสร้างความสัมพันธ์วิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นจะมีการบวกระยะเพิ่มเข้าไป 10 มิลลิเมตร ทุกระยะคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้างตามมาตรฐาน JSCE (2006) [40] ที่ระบุไว้ว่าระยะคาร์บอนชั้นที่วัดระยะจากโครงสร้างโดยการนิตสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ ไปยังตัวอย่างคอนกรีตนั้น สารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์จะมีการเปลี่ยนสีที่ค่า pH ประมาณ 9.2 แต่ในทางทฤษฎีพบว่าโอกาสที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมจะมีค่ามากกว่าค่า pH ที่ 9.2 ซึ่งอยู่ระหว่างค่า pH ที่ 9.2-13 ดังนั้นมาตรฐาน JSCE จึงมีการบวกความลึกคาร์บอนชั้นเพิ่มไปอีก 10 มม. เพื่อความปลอดภัยของโครงสร้าง ดังสมการที่ 4.3 สำหรับสมการที่ 4.2 คือสมการพื้นฐานของการหาความลึกคาร์บอนชั้น [38]

$$x_{car,real} = k\sqrt{t_0} \quad (4.2)$$

$$x_{car,real(pH)} = k\sqrt{t} + 10 \quad (4.3)$$

โดยที่	$x_{car,real}$	คือ ความลึกคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้าง ณ อายุที่ทำการทดสอบ (มม.)
	$x_{car,real(pH)}$	คือ ความลึกคาร์บอนชั้นที่มีการบวกเพิ่ม 10 มม.ตามมาตรฐาน JSCE
	$k$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น ( มม./ ปี <sup>1/2</sup> )
	$t_0$	คือ อายุของโครงสร้าง ณ เวลาที่ทำการทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น (ปี)
	$t$	คือ อายุของโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์ (ปี)

อย่างไรก็ตามจากสมการที่ 4.2 เป็นการคำนวณหาระยะคาร์บอนชั้น ณ อายุที่ทำการทดสอบเท่านั้น  $t_0$  ในกรณีที่จะหาระยะคาร์บอนชั้นที่มีการแปรผันตามอายุโครงสร้าง จะต้องมีการเปลี่ยนค่า  $t_0$  ใน สมการที่ 4.2 เป็น  $t_{1,2,3...n}$  โดย 1,2,3...n คืออายุโครงสร้างที่มีการแปรผันตามเวลาที่ต้องการพิจารณา

จากแผนภาพจำลองความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นดังแสดงใน รูปที่ 4.24 (ก),(ข),(ค) ต้องมีการหาตัวแปรที่จะนำไปวิเคราะห์ตามหลักสถิติเพื่อหาความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น ประกอบด้วย

1. ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสมมุติให้ค่าทั้งสองค่าดังกล่าวคงที่ตลอดอายุการใช้งาน

2. ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความลึกคาร์บอนชั้นจะมีการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวแตกต่างกันคือ

2.1 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐาน (Z) แบบการกระจายตัวคงที่ โดยให้ค่าเฉลี่ยของความลึกคาร์บอนชั้นจะมีการแปรผันตามเวลาของอายุโครงสร้าง สำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยจะสมมุติให้คงที่ตลอดอายุการใช้งาน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐาน (Z) ของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นโดยอาศัยสมการ ที่ 4.4 ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นผลของ ช่วงอายุใดอายุหนึ่งของโครงสร้างเท่านั้น ถ้าต้องการให้ตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐาน (Z) อายุโครงสร้างที่มีการแปรผันไปตามเวลา จึงจำเป็นต้องอาศัยสมการที่ 4.3 ที่มีตัวแปรเกี่ยวกับอายุโครงสร้างอยู่ด้วย สำหรับที่จะทำการแปรผันอายุโครงสร้างให้ได้ค่าความลึกคาร์บอนชั้นที่อายุโครงสร้าง ต่างๆกัน จึงทำให้ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นที่ได้หลากหลายอายุมากยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์ตามหลักสถิติเพื่อหาความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่

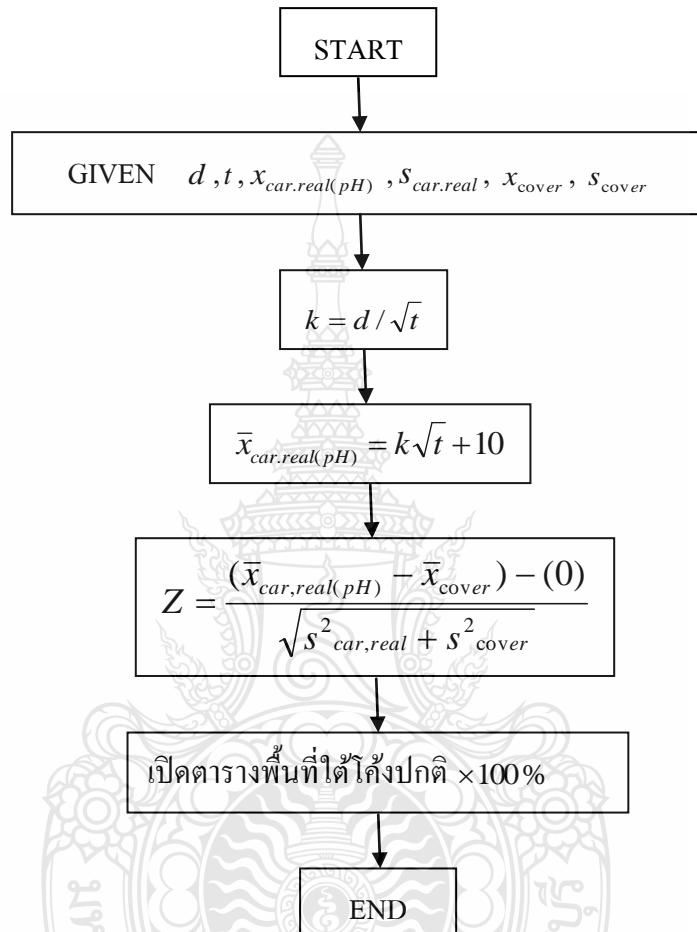
$$Z = \frac{(\bar{x}_{car,real(pH)} - \bar{x}_{cover}) - (0)}{\sqrt{s^2_{car,real} + s^2_{cover}}} \quad (4.4)$$

โดย	Z	คือ ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐาน (นำไปเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้ง) ของการ เกิดสนิม เนื่องจากคาร์บอนชั้น
	0	คือ สมมติค่าผลต่างของข้อมูลความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยและ ระยะหุ้มเหล็กเสริม เฉลี่ยที่ทำให้เหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิม โดยที่ $\bar{x}_{car,real(pH)} > \bar{x}_{cover}$
	$\bar{x}_{cover}$	คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย (มม.)
	$\bar{x}_{car,real(pH)}$	คือ ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยที่มีการบวกเพิ่ม 10 มม. ตามมาตรฐาน JSCE
	$s_{car,real}$	คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ย
	$s_{cover}$	คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย (เหล็กปลอก)

เมื่อได้ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐาน (Z) ของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแล้ว นำค่าดังกล่าวมาเปิด ตารางพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐาน ซึ่งพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐานนี้คือความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม

ขั้นตอนการวิเคราะห์สามารถดำเนินการได้ตามผังการวิเคราะห์ตามรูปที่ 4.25 โดยนำข้อมูลจากตารางที่ 4.25 กับ ตารางที่ 4.29 เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียน และนำข้อมูลจากตารางที่ 4.26 กับตารางที่ 4.30 เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม

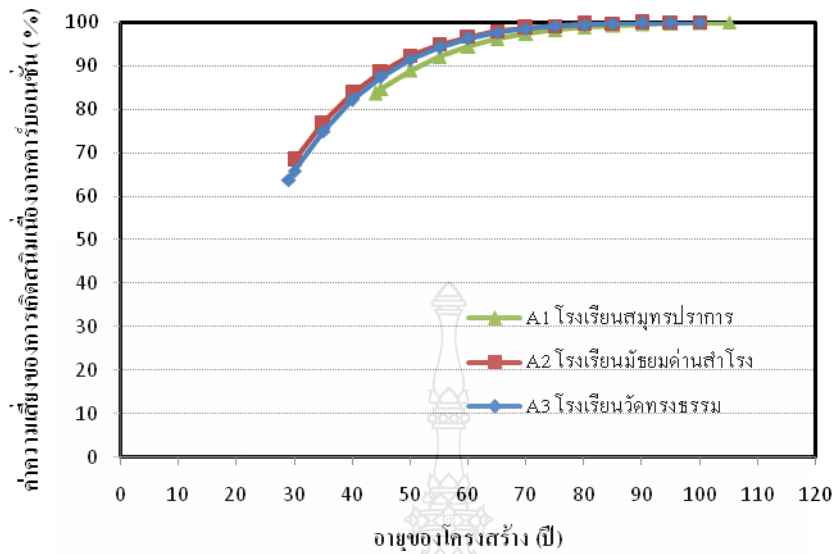
ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น  
(ค่าการกระจายตัวคงที่)



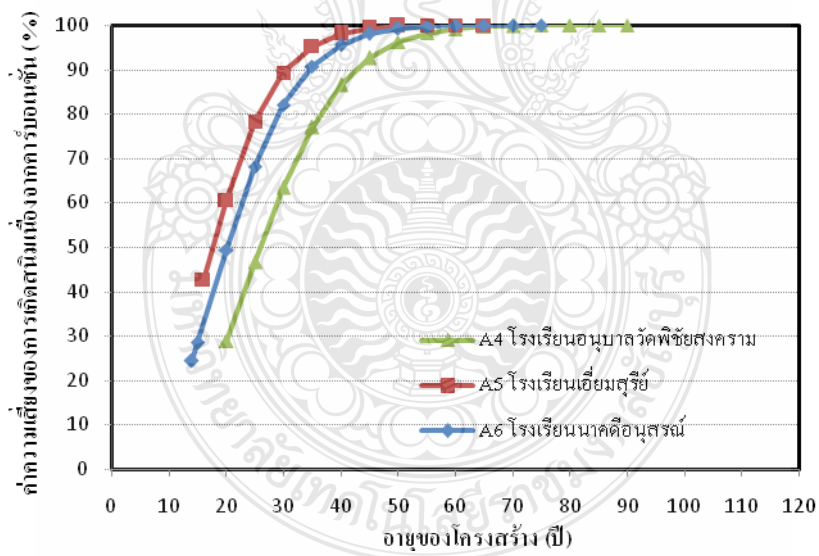
รูปที่ 4.25 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น  
แบบการกระจายตัวคงที่

จากรูปที่ 4.27 ถึง รูปที่ 4.32 แสดงความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของ  
โครงสร้างอาคารเรียนและ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามที่ได้จากการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เหล็กเสริม  
จะมีโอกาสเกิดสนิมตามอายุต่างๆของ โครงสร้าง

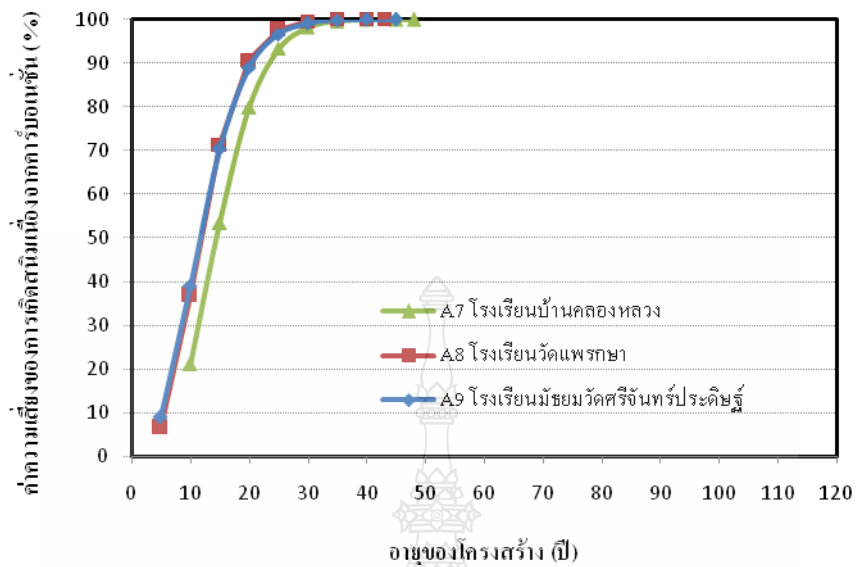




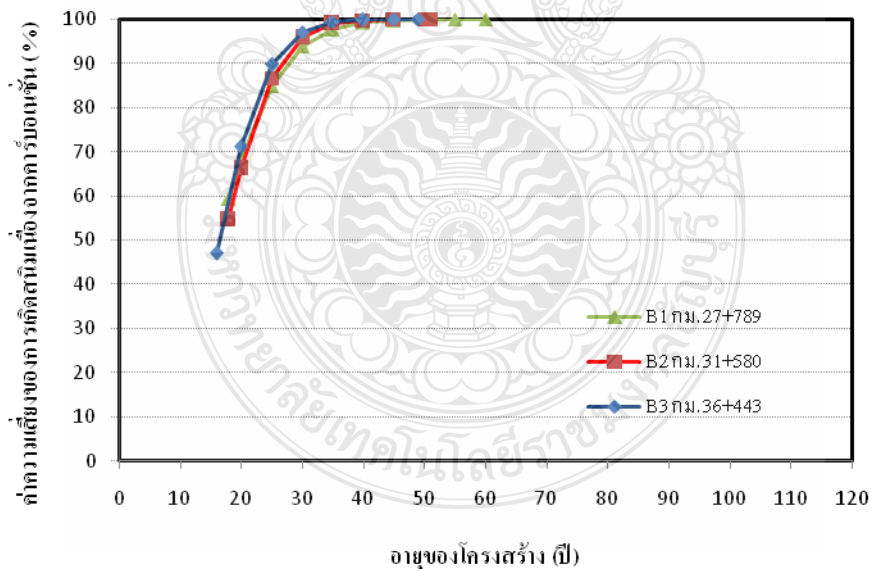
รูปที่ 4.26 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากการรับออกซิเจนของ โครงสร้างอาคารเรียน ช่วงอายุโครงสร้างมากกว่า 24 ปี ขึ้นไป (A1,A2,A3)



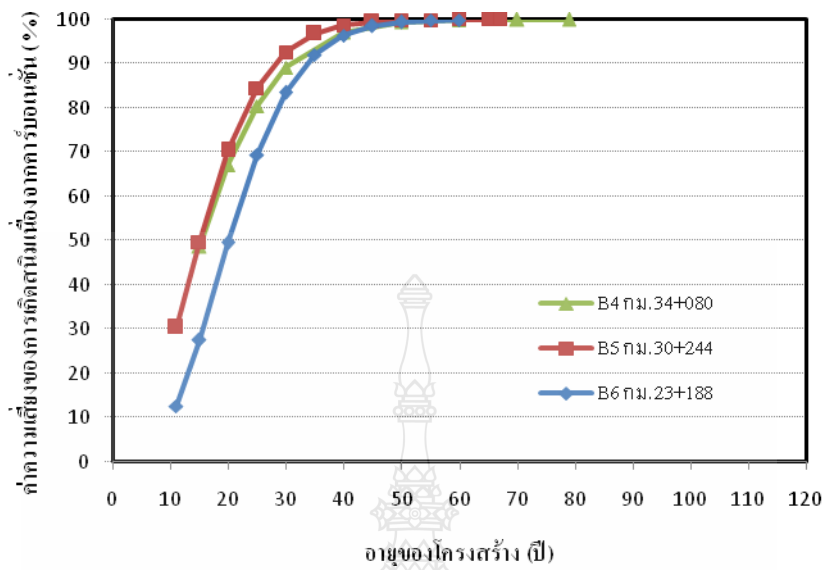
รูปที่ 4.27 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากการรับออกซิเจนของ โครงสร้างอาคารเรียน ช่วงอายุโครงสร้าง ระหว่าง 12-24 ปี(A4,A5,A6)



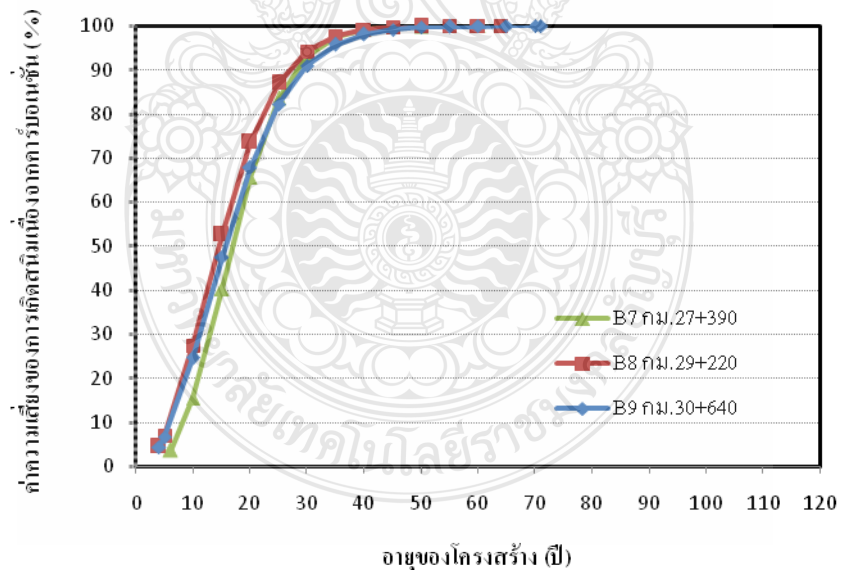
รูปที่ 4.28 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนมอนอกไซด์ของโครงสร้างอาคารเรียน ช่วงอายุโครงสร้าง ระหว่าง 0-12 ปี (A7,A8,A9)



รูปที่ 4.29 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนมอนอกไซด์ของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม ช่วงอายุโครงสร้างมากกว่า 15 ปี ขึ้นไป (B1,B2,B3)



รูปที่ 4.30 ความเสียหายของการเกิดสั่นเนื่องจากการรับอนเซ็นของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม ช่วงอายุโครงสร้าง ระหว่าง 10-15 ปี (B4,B5,B6)



รูปที่ 4.31 ความเสียหายของการเกิดสั่นเนื่องจากการรับอนเซ็นของสะพานลอยเดินข้าม ช่วงอายุโครงสร้างระหว่าง 0-10 ปี (B7,B8,B9)

**ตารางที่ 4.31** ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียน ณ เวลาที่ทำ  
การทดสอบ (พ.ศ.2556) ที่อายุการใช้งาน 50 ปี และ 100 ปี

โครงสร้าง	อายุโครงสร้าง (ปี)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. <sup>2</sup> )	ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น(%)		
			ณ เวลาที่ ทดสอบ	ที่อายุการใช้งาน 50 ปี	ที่อายุการใช้งาน 100 ปี
A1	44	346.3	83.58	88.85	99.77
A2	30	324.8	68.25	92.30	99.92
A3	29	310.7	63.80	91.43	99.91
A4	20	310.0	28.90	96.16	100 ตั้งแต่ 90 ปี
A5	16	295.8	42.66	99.73	100 ตั้งแต่ 68 ปี
A6	14	299.3	24.40	99.16	100 ตั้งแต่ 80 ปี
A7	10	295.2	21.02	100 ตั้งแต่ 48 ปี	-
A8	5	283.2	6.57	100 ตั้งแต่ 43 ปี	-
A9	5	282.1	8.95	100 ตั้งแต่ 47 ปี	-

**ตารางที่ 4.32** ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม ณ  
เวลาทำการทดสอบ (พ.ศ.2556) ที่อายุการใช้งาน 50 ปี และ 100 ปี

โครงสร้าง	อายุโครงสร้าง (ปี)	กำลังอัด เฉลี่ย (กก./ซม. <sup>2</sup> )	ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น		
			ณ เวลาที่ ทดสอบ	ที่อายุการใช้งาน 50 ปี	ที่อายุการใช้งาน 100 ปี
B1	18	359.6	59.29	99.94	100 ตั้งแต่ 60 ปี
B2	18	326.9	54.60	99.99	100 ตั้งแต่ 51 ปี
B3	16	333.8	47.06	100 ตั้งแต่ 49 ปี	-
B4	15	334.9	48.77	99.37	100 ตั้งแต่ 79 ปี
B5	11	371.6	30.51	99.81	100 ตั้งแต่ 70 ปี
B6	11	328.3	12.65	99.44	100 ตั้งแต่ 72 ปี
B7	6	305.4	3.66	99.94	100 ตั้งแต่ 60 ปี
B8	4	284.6	4.52	99.64	100 ตั้งแต่ 76 ปี
B9	4	289.0	4.42	99.69	100 ตั้งแต่ 71 ปี

เมื่อพิจารณาโครงสร้างอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสึกกร่อนชั้นของโครงสร้างที่มีอายุน้อยจะมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ความสึกกร่อนชั้นสูงกว่าโครงสร้างที่มีอายุมากกว่า จะเห็นได้ชัดเจนในส่วนของโครงสร้างอาคารเรียน แต่เมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของโครงสร้างที่อายุ 50 ปีและ 100 ปีเท่ากัน พบว่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจาก คาร์บอนชั้นที่อายุโครงสร้างน้อยจะมีเปอร์เซ็นต์ความเสี่ยงการเกิดสนิมค่อนข้างสูง

เนื่องจากผลการวิเคราะห์พบว่า กระบวนการเกิดคาร์บอนชั้นในอดีตกับปัจจุบันแตกต่างกันพอสมควรเนื่องจากสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนไป ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นการเกิดคาร์บอนชั้นในโครงสร้างปัจจุบันจึงมีค่าสูงกว่านั้นเองจึงเป็นสาเหตุทำให้โครงสร้างที่มีอายุการใช้งานน้อยจึงมีโอกาสเกิดสนิมหรือความเสี่ยงการเกิดสนิมค่อนข้างสูง ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ และสาเหตุและปัจจัยอื่น ดังนี้

1) ระยะเวลาคาร์บอนชั้นที่วัดได้จาก โครงสร้างอาคารเรียน ได้รวมระยะปูนฉาบเข้าไปด้วย ซึ่งปูนฉาบมีอัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนชั้นสูงกว่าคอนกรีต จึงเป็นผลทำให้อัตราการเกิดระยะคาร์บอนชั้นมีมาก

2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ต่างกันย่อมส่งผลให้ระยะคาร์บอนชั้นเข้าทำลายคอนกรีตจนส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมภายในคอนกรีตได้เร็วขึ้น

3) คุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างของแต่ละพื้นที่ต่างกัน

4) อายุของโครงสร้างต่างกัน

และการควบคุมการก่อสร้างก็มีผลต่ออายุของโครงสร้างเช่นเดียวกัน การให้รายละเอียดของเหล็กเสริมหรือระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ไม่ดี โดยไม่คำนึงถึงความเป็นไปได้ในการเทคอนกรีตที่ดี การก่อสร้างที่ไม่มีการควบคุมที่ดี ปล่อยให้มีการเทคอนกรีตไม่เต็มหรือคอนกรีตหุ้มเหล็กไม่เพียงพอที่ดี ล้วนแต่นำไปสู่ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานสั้นลงกว่าที่ควรจะเป็นทั้งสิ้น

แต่อย่างไรก็ตาม ในอนาคตเปอร์เซ็นต์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างต่างๆ ที่ตรวจสอบทั้งหมดอาจมีความไม่แน่นอนอยู่ในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอายุโครงสร้างที่เพิ่มมากขึ้น อัตราการเกิดคาร์บอนชั้นอาจมีการเพิ่มขึ้นจากเดิม (ณ วันที่ตรวจสอบ) ไม่มากนักน้อย เนื่องจากระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนไป

2.2 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐาน (Z) แบบการกระจายตัวแปรเปลี่ยนตามเวลา ตามสมการที่ 4.5 จะอาศัยสมการที่ 4.4 เช่นเดียวกันกับการหาตัวแปรสุ่มมาตรฐานแบบการกระจายตัวคงที่ แต่ตัวแปรของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคาร์บอนเนชั่น ( $s_{car,real}$ ) ให้ใช้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมประสิทธิ์ของคาร์บอนเนชั่นแปรผันตามเวลาแทน กล่าวคือ

$$Z = \frac{(\bar{x}_{car,real(PH)} - \bar{x}_{cover}) - (0)}{\sqrt{s_{kt,car,real}^2 + s_{cover}^2}} \quad (4.5)$$

โดยที่  $s_{kt,car,real}$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นที่แปรผันไปตามเวลา

การวิเคราะห์ตามหลักสถิติเพื่อหาความเสี่ยงที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นแบบการกระจายตัวแปรเปลี่ยนตามเวลานั้น จากสมการที่ 4.5 พบว่า

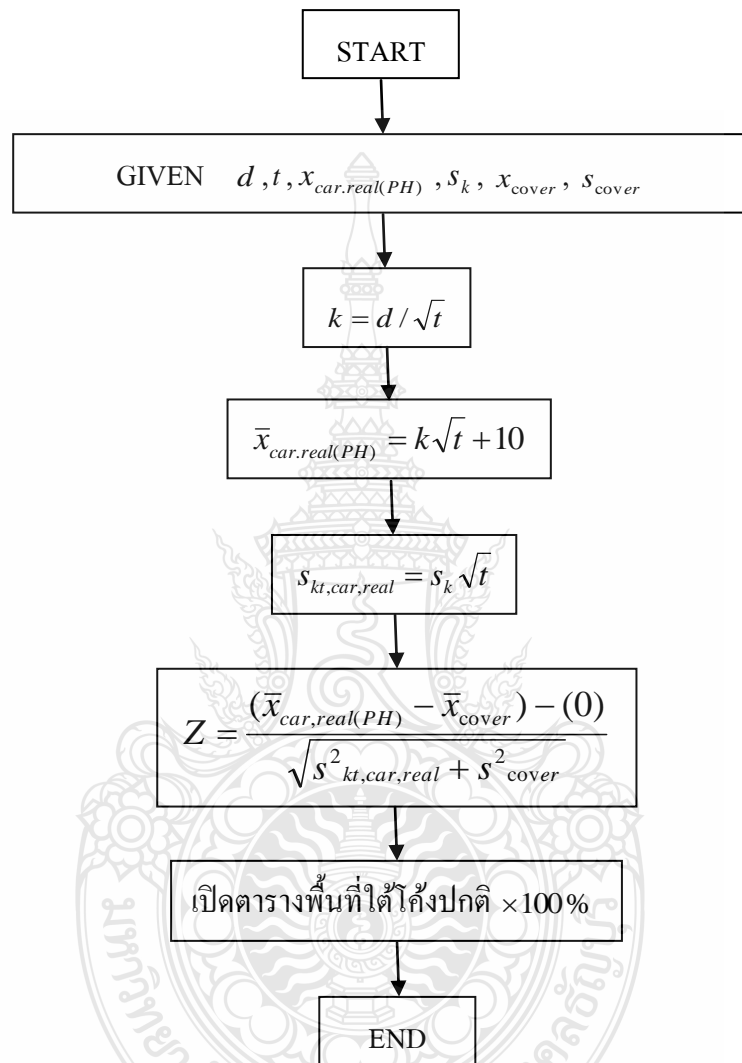
$$s_{kt,car,real} = s_k \sqrt{t} \quad (4.6)$$

โดยที่  $s_k$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น  
 $t$  คือ อายุของโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์ (ปี)

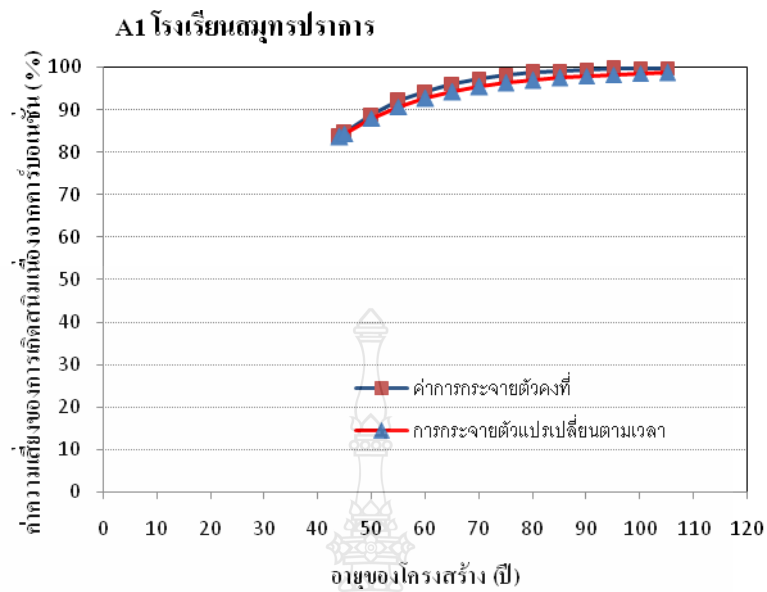
จากรูปที่ 4.33 ถึง รูปที่ 4.51 แสดงความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น โดยการเปรียบเทียบระหว่างความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างทั้งหมด 18 แห่ง ที่ได้จากการวิเคราะห์ความเสี่ยงตามอายุของโครงสร้างที่ดำเนินการวิเคราะห์

ในส่วนของขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นแบบค่าการกระจายตัวแปรเปลี่ยนเวลานั้น สามารถคำนวณได้ตามขั้นตอน ตามรูปที่ 4.32

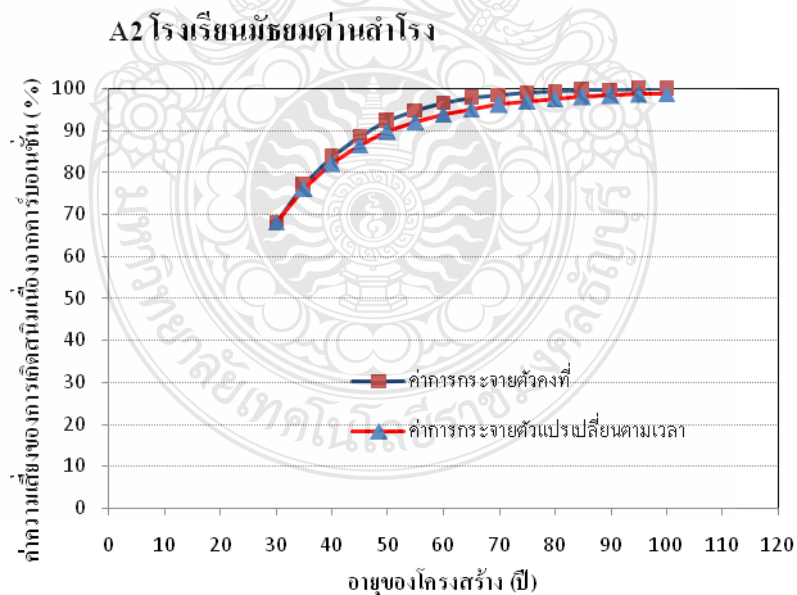
ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น  
(แบบแปรเปลี่ยนตามเวลา)



รูปที่ 4.32 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าความเสี่ยง การเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น  
แบบแปรเปลี่ยนตามเวลา



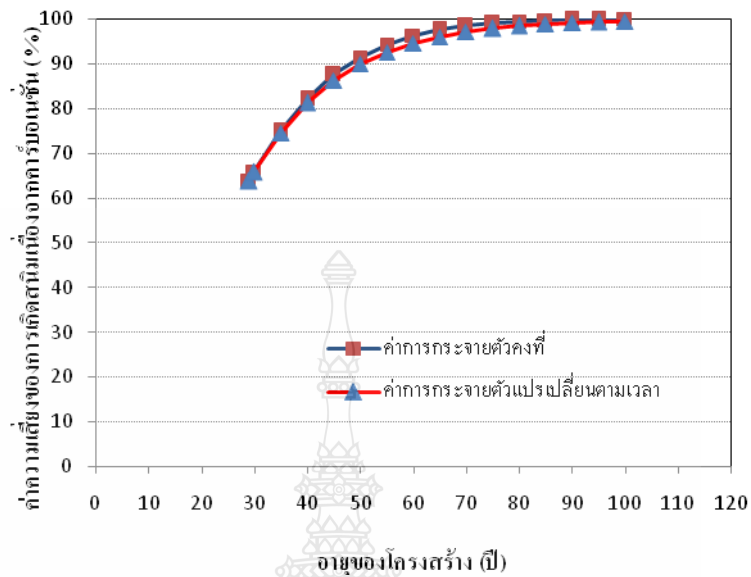
รูปที่ 4.33 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากรับอนุพันธ์แบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A1 โรงเรียนสมุทรปราการ



รูปที่ 4.34 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากรับอนุพันธ์แบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง

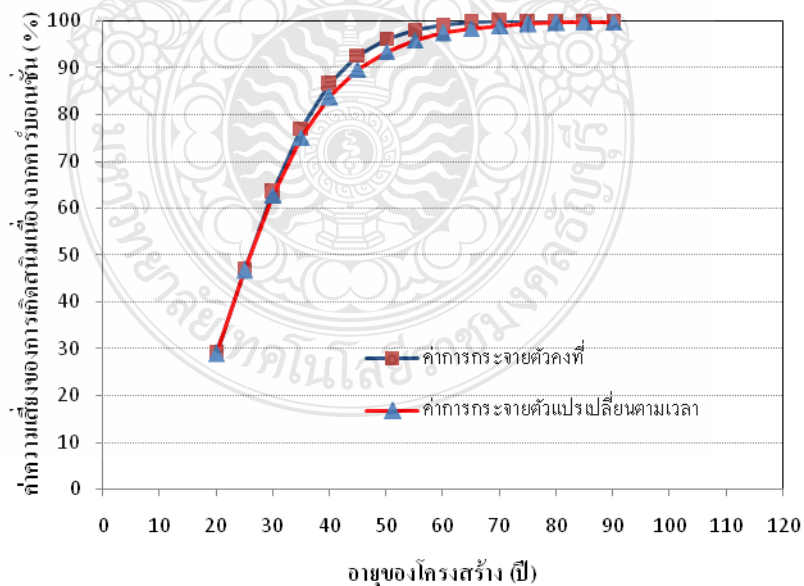


A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม

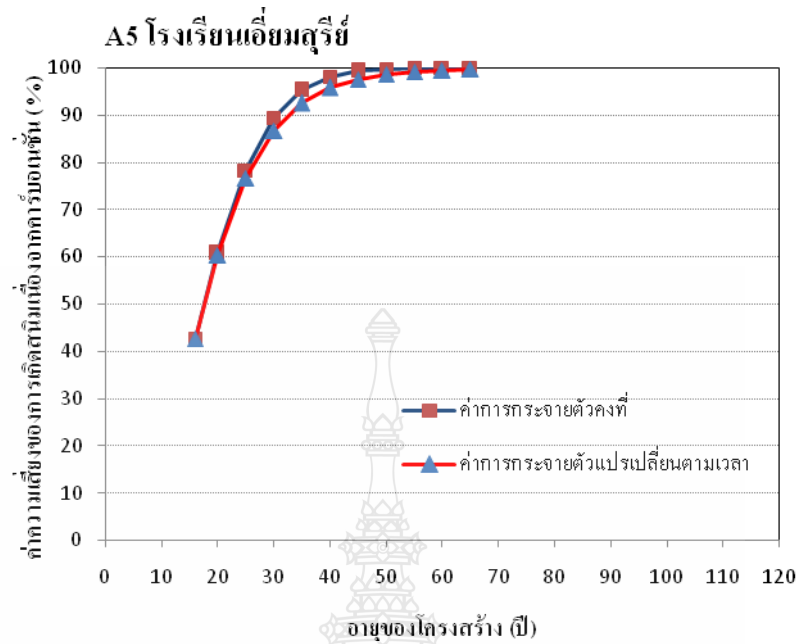


รูปที่ 4.35 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเพิ่มขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของ โครงสร้างอาคารเรียน A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม

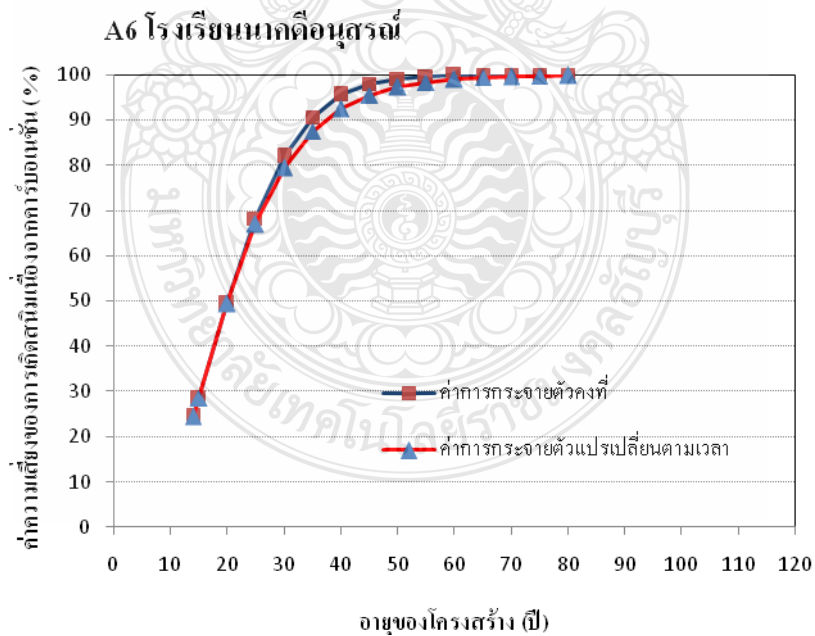
A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม



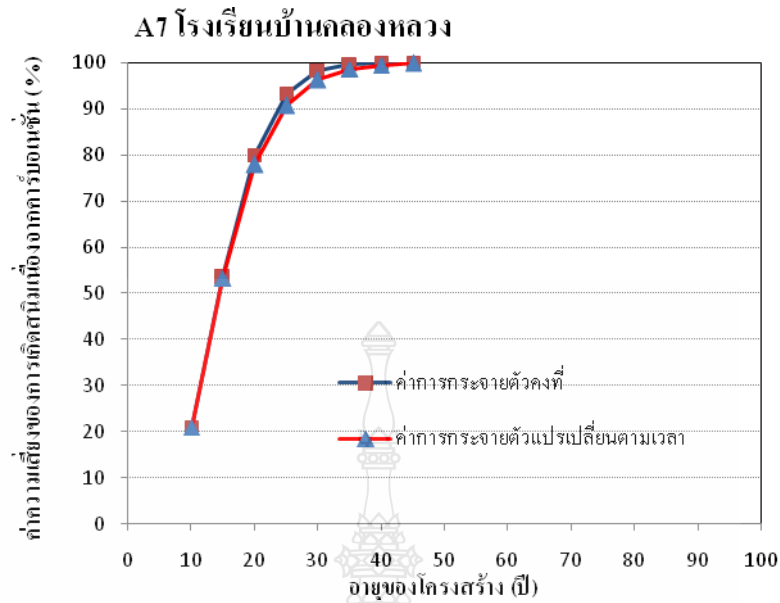
รูปที่ 4.36 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเพิ่มขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของ โครงสร้างอาคารเรียน A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม



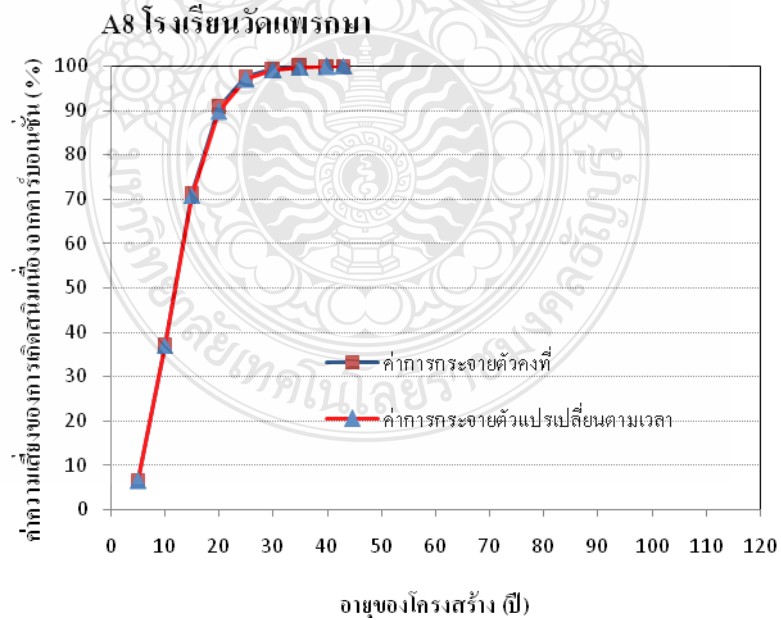
รูปที่ 4.37 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากระบบคาร์บอนไดออกไซด์แบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์



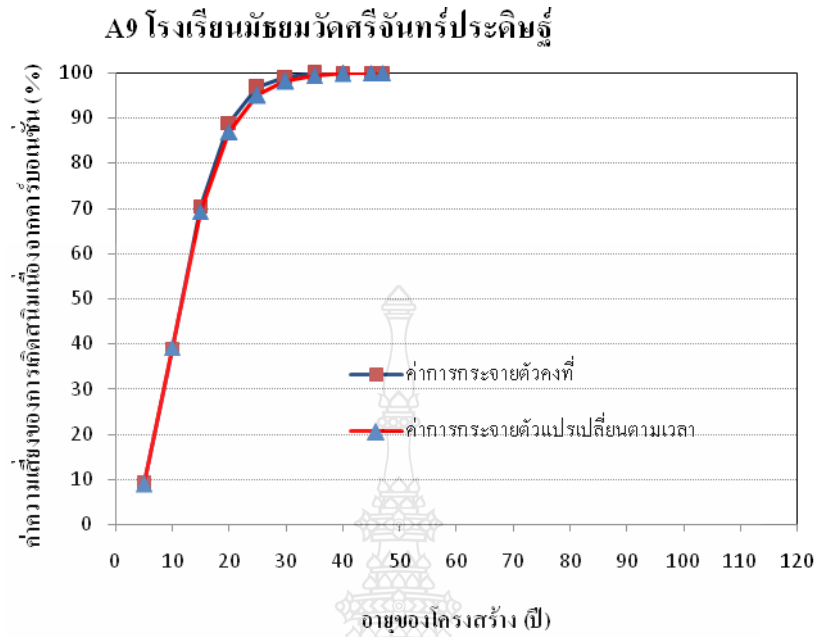
รูปที่ 4.38 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากระบบคาร์บอนไดออกไซด์แบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A6 โรงเรียนนาคคีอนุสรณ์



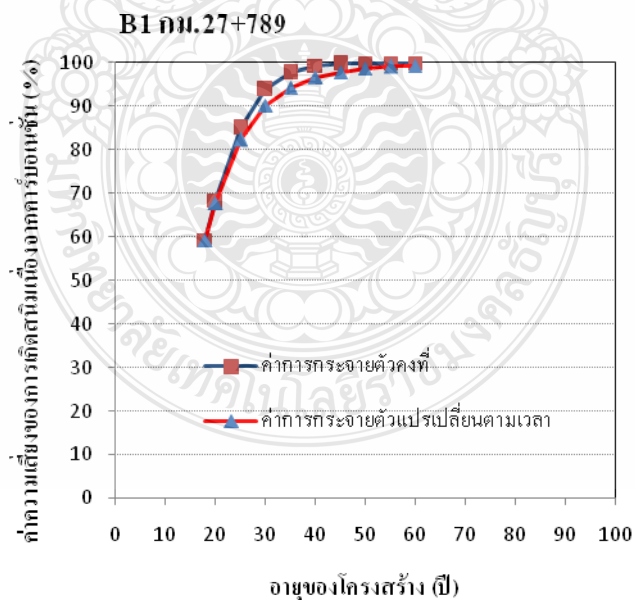
รูปที่ 4.39 ความเสี่ยงการเกิดสัณนิมเนื่องจากรับอนเซ็นชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง



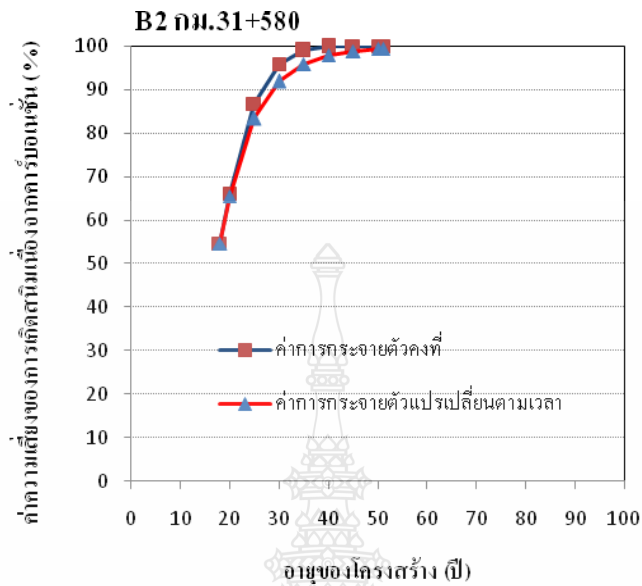
รูปที่ 4.40 ความเสี่ยงการเกิดสัณนิมเนื่องจากรับอนเซ็นชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A8 โรงเรียนวัดแพทยา



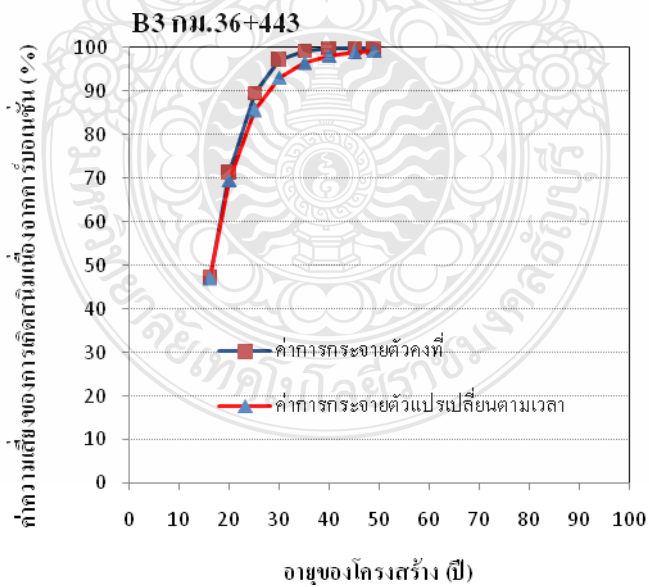
**รูปที่ 4.41** ความเสี่ยงการเกิดสั่นเนื่องจากการรับน้ำหนักแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างอาคารเรียน A8 โรงเรียนวัดแพทกษา



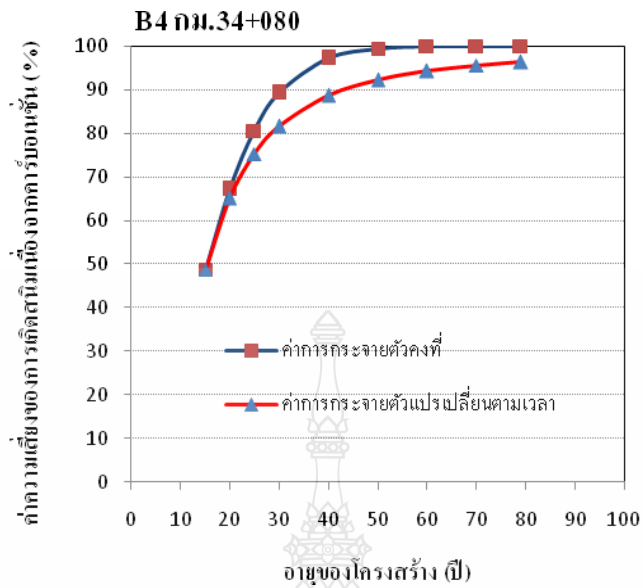
**รูปที่ 4.42** ความเสี่ยงการเกิดสั่นเนื่องจากการรับน้ำหนักแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B1 กม.27+789



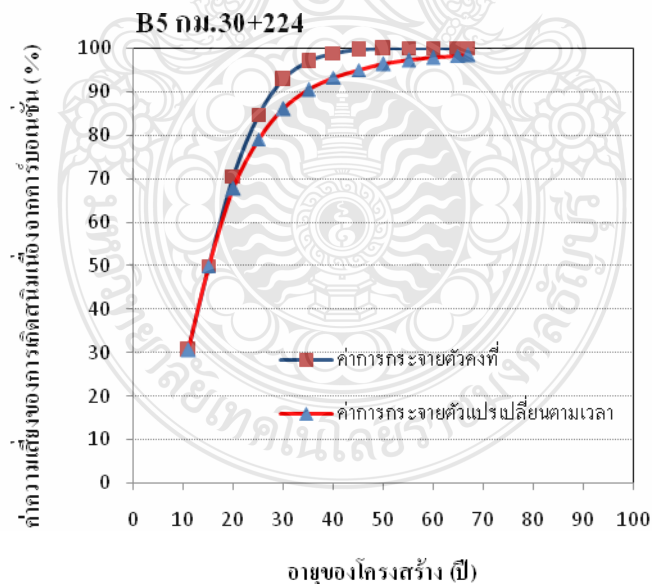
รูปที่ 4.43 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B2 กม.31+580



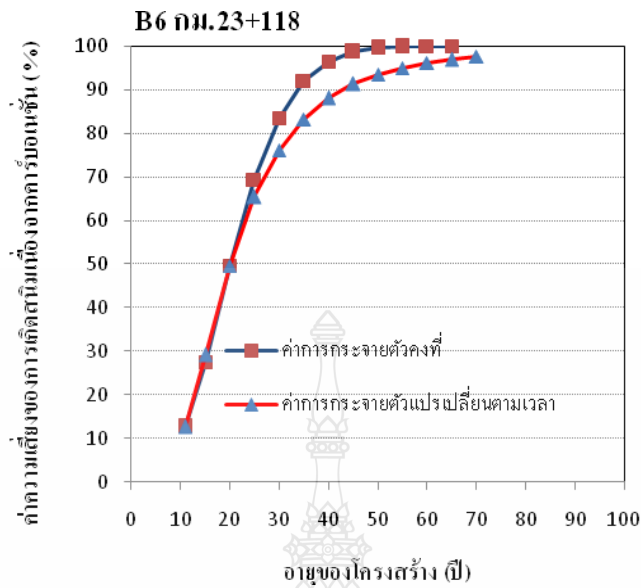
รูปที่ 4.44 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B3 กม.36+443



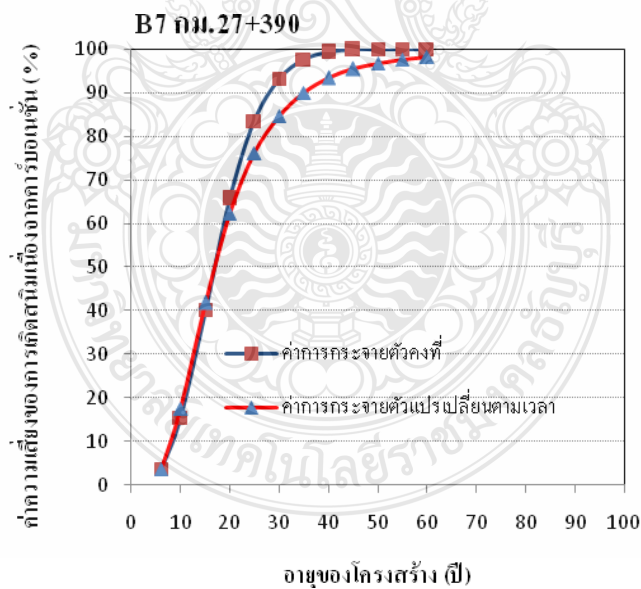
รูปที่ 4.45 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากการร่อนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B4 กม.34+080



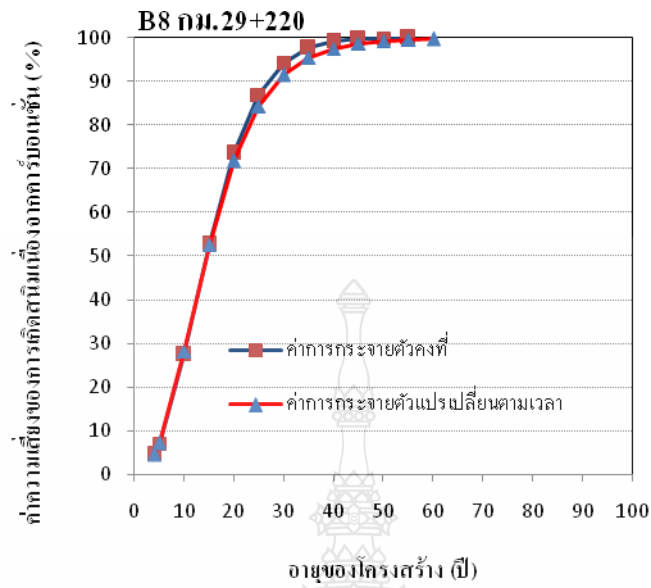
รูปที่ 4.46 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากการร่อนชั้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B5 กม.30+224



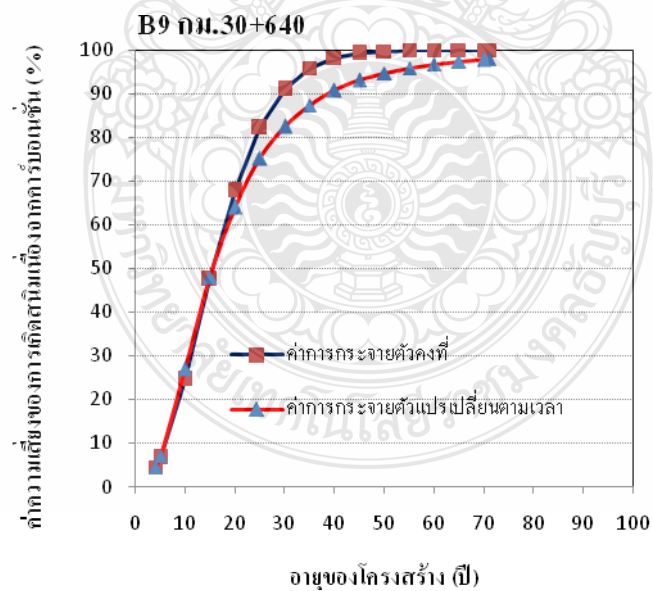
รูปที่ 4.47 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากการคาร์บอนเนชันแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B6 กม.23+118



รูปที่ 4.48 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากการคาร์บอนเนชันแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B7 กม.27+390



รูปที่ 4.49 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B8 กม.29+220



รูปที่ 4.50 ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นแบบการกระจายตัวคงที่กับแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม B9 กม.30+640



จากรูปที่ 4.33-4.50 ค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้น จากการใช้ค่าการกระจายตัวแปรเปลี่ยนตามเวลาของโครงสร้างที่เกิดขึ้น พบว่า อัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนขึ้นค่อนข้างช้าหรือต่ำกว่าการใช้ค่าความเสี่ยงแบบการกระจายตัวคงที่ แต่ความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นจากการใช้ค่าการกระจายตัวแปรเปลี่ยนตามเวลาความเสี่ยงเริ่มต้น จะมีค่าสูงกว่าค่าความเสี่ยงที่ใช้การกระจายตัวคงที่เล็กน้อย ในช่วงที่อายุของโครงสร้างใช้งานน้อย แต่เมื่ออายุของโครงสร้างมีการใช้งานมากขึ้น ค่าความเสี่ยงการใช้ค่าการกระจายตัวที่แปรเปลี่ยนตามเวลา มีแนวโน้มการพัฒนาคาร์บอนขึ้นในคอนกรีตน้อยลง ตลอดทุกโครงสร้าง

ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเสี่ยง การกระจายตัวที่แปรเปลี่ยนตามเวลาจะมีผลของการเสื่อมสภาพของตัววัสดุ ที่เป็นไปตามช่วงเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องตลอดการวิเคราะห์ข้อมูล ณ ช่วงเวลานั้นๆแต่สำหรับการนำค่าการกระจายตัวคงที่มาวิเคราะห์จะมีการนำผลการเสื่อมสภาพของตัววัสดุ ณ ช่วงเวลานั้นรวมทั้งผลความผิดพลาดเนื่องจากการตรวจสอบระยะคาร์บอนขึ้น ณ เวลาดังกล่าวเข้ามาวิเคราะห์เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อโครงสร้างมีอายุการใช้งานมากขึ้น ค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนขึ้นที่มีการใช้ค่าการกระจายตัวคงที่จะมากกว่าโครงสร้างที่มีการนำค่าการกระจายตัวที่แปรเปลี่ยนตามเวลาวิเคราะห์ ย่อมแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างอาคารที่ทำการตรวจสอบทั้งหมดมีระยะปลอดภัยที่สูงกว่าแต่ก็ไม่มากนัก

เปอร์เซ็นต์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมในโครงสร้างอาคารเนื่องจากคาร์บอนขึ้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในระดับหนึ่ง เช่น วางแผนการดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหรือนำไปออกแบบโครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้นและมีอายุการใช้งานที่ปลอดภัยซ่อมแซม เป็นต้น ซึ่งในอนาคตข้างหน้าอาจจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อได้ค่าที่แม่นยำต่อไป

#### 4.7 การเปรียบเทียบความลึกคาร์บอนขึ้นจากโครงสร้างจริงและการออกแบบ

##### 4.7.1 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องเผชิญคาร์บอนขึ้น

หลักการของการออกแบบโครงสร้างที่ดีคือ ออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โดยปกติอายุการใช้งานที่ต้องการของโครงสร้างแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้าง เช่น ขนาด ความสำคัญ สถานที่ ที่โครงสร้างนั้นอยู่ และราคาของโครงสร้างนั้นๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงความคงทนของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างควบคู่ไปกับการออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างนั้นด้วย

ในส่วนการออกแบบอาคารชนิดโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีตและทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการปกป้องเหล็กเสริมจากการเป็นสนิมลดลงจนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและมีอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-Free service life) ตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ความลึกคาร์บอนเนชันในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมมีค่าไม่มากกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการ ที่ 4.7 ในการออกแบบ [6]

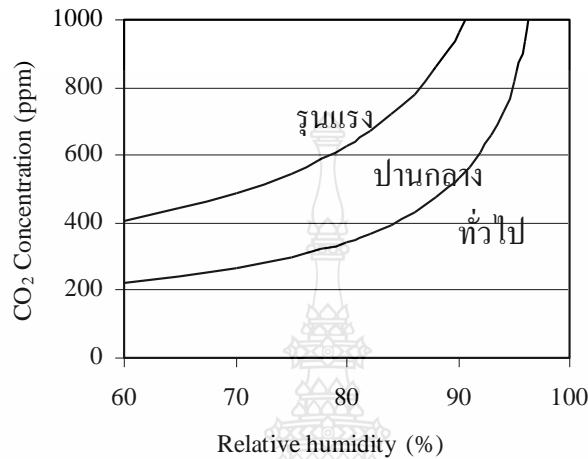
$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t} \quad (4.7)$$

- $X_c$  คือ ความลึกคาร์บอนเนชัน (มม.) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ
- $\alpha_1$  คือ สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น  
 1.00 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น  
 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น
- $\alpha_2$  คือ สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชันดังตารางที่ 4.33
- $t$  คือ อายุของโครงสร้าง (ปี)

ตารางที่ 4.33 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	$\alpha_2$
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันรุนแรง	1.00

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 4.51 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต

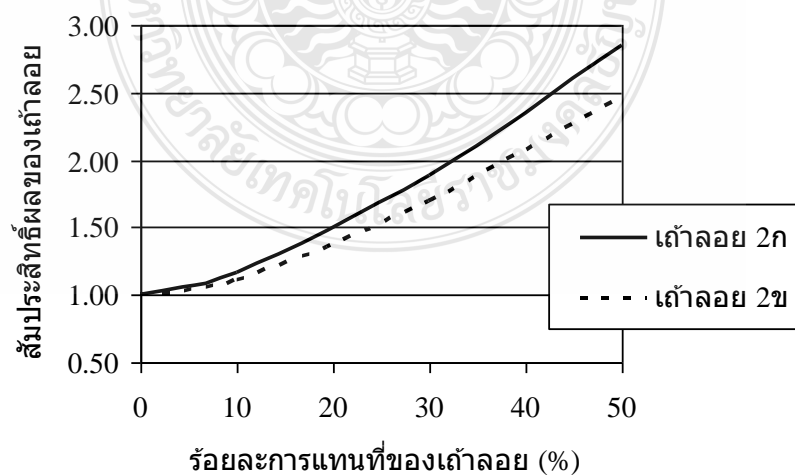


รูปที่ 4.51 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น

$k$  คือ สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชั่น ดังสมการ  $k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3$

$(w/b)$  คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

โดยค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน ( $k_r$ ) (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46) ดังรูป 4.52



รูปที่ 4.52 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน

4.7.2 เปรียบเทียบความลึกคาร์บอนชั้นจากการออกแบบ (ไม่มีผลของสีและความหนาปูนฉาบ) และโครงสร้างจริง (รวมความหนาปูนฉาบและสี) จากรูปที่ 4.53 (ก) กับตารางที่ 4.34 และ รูปที่ 4.53 (ข) กับตารางที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนชั้นที่ได้จากโครงสร้างจริง (รวมความหนาปูนฉาบและสี) เทียบกับการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบความคงทน สำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนชั้น (ไม่มีผลของสีและปูนฉาบ)

พบว่า โครงสร้างอาคารและโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม ทั้ง 18 แห่ง ที่ทำการตรวจสอบ มีค่าความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยที่วัดได้จากโครงสร้างจริงส่วนใหญ่มีระยะความลึกคาร์บอนชั้นสูงกว่าที่ได้จากการออกแบบ ซึ่งทำให้เห็นว่าโครงสร้างจริงมีตัวแปรที่มีส่วนทำให้ความลึกคาร์บอนชั้นสูงกว่า เช่น สภาวะแวดล้อม ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น หรือปัจจัยอื่นที่ทำให้การเสื่อมสภาพสูงขึ้นและการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตไม่ดีพอ เป็นต้น

ตารางที่ 4.34 ความลึกคาร์บอนชั้นที่ได้จากการออกแบบ (ไม่มีผลของสีและความหนาปูนฉาบ) กับ โครงสร้างจริง (รวมความหนาปูนฉาบและสี) อาคารเรียน

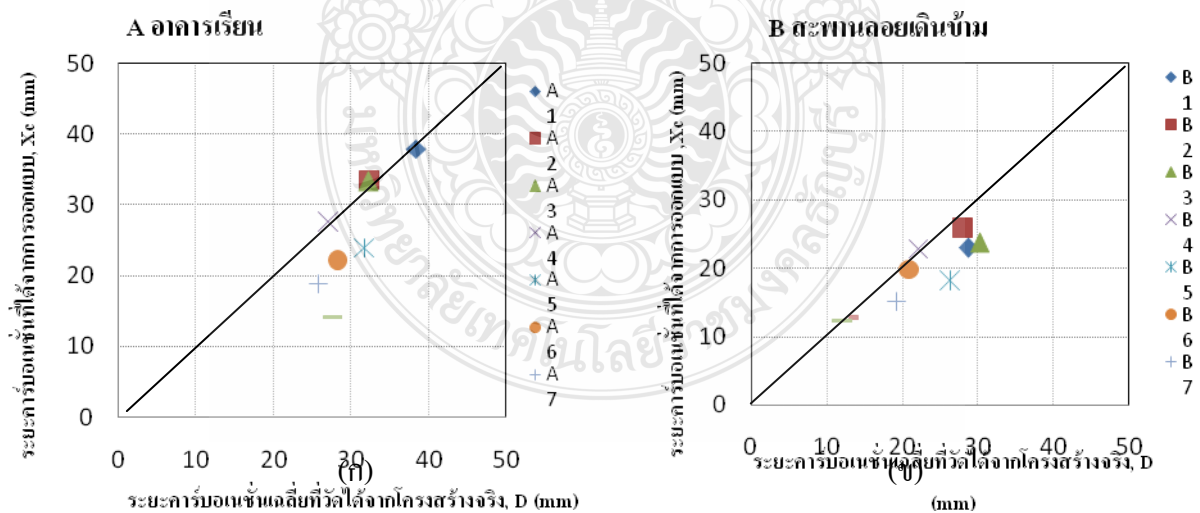
โครงสร้างที่ตรวจสอบ	อายุ (ปี)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\sqrt{t}$	$k$ (มม./ปี <sup>1/2</sup> )	$X_c$ (มม.)	$D$ (มม.)
A1	44	0.95	1.00	6.63	6.03	38.0	38.4
A2	30	0.95	1.00	5.48	6.45	33.6	32.5
A3	29	0.95	1.00	5.39	6.50	33.3	32.2
A4	20	0.95	1.00	4.47	6.48	27.5	27.2
A5	16	0.95	1.00	4.00	6.32	24.0	31.8
A6	14	0.95	1.00	3.74	6.21	22.1	28.2
A7	10	0.95	1.00	3.16	6.29	18.9	25.8
A8	5	0.95	1.00	2.24	6.67	14.2	27.7
A9	5	0.95	1.00	2.24	6.70	14.2	27.6

$D$  คือ ความลึกคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้างจริงรวมความหนาปูนฉาบและสี

ตารางที่ 4.35 ความลึกคาร์บอนชั้นที่ได้จากการออกแบบ (ไม่มีผลของสีและความหนาปูนฉาบ) กับ โครงสร้างจริง สะพานลอยเดินข้าม

โครงสร้างที่ ตรวจสอบ	อายุ (ปี)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\sqrt{t}$	$k$ (มม./ปี <sup>1/2</sup> )	$X_c$ (มม.)	$D$ (มม.)
B1	18	0.95	1.00	4.24	5.70	23.0	28.6
B2	18	0.95	1.00	4.24	6.40	25.8	28.1
B3	16	0.95	1.00	4.00	6.24	23.7	30.2
B4	15	0.95	1.00	3.87	6.21	22.9	22.1
B5	11	0.95	1.00	3.32	5.75	18.1	26.4
B6	11	0.95	1.00	3.32	6.32	19.9	20.9
B7	6	0.95	1.00	2.45	6.53	15.2	19.2
B8	4	0.95	1.00	2.00	6.67	12.7	12.9
B9	4	0.95	1.00	2.00	6.53	12.4	12.2

$D$  คือ ความลึกคาร์บอนชั้นที่วัดได้จากโครงสร้างจริง



รูปที่ 4.53 ความลึกคาร์บอนชั้นที่ได้จากโครงสร้างจริงเทียบกับความลึกคาร์บอนชั้นตามมาตรฐาน การออกแบบความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนชั้น

## บทที่ 5

### สรุปผล

#### 5.1 สรุปผลจากการศึกษางานวิจัย

จากการศึกษาการเสื่อมสภาพและความเสียหายของ โครงสร้างอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามในจังหวัดสมุทรปราการ ทั้ง 18 แห่งนั้น สรุปผลได้ ดังนี้

5.1.1 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ ระหว่างอาคารเรียนกับสะพานลอยเดินข้าม มีค่าเฉลี่ยไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจากสถานะแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 580-620 ppm ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ ประมาณร้อยละ 46-65 พบว่า โครงสร้างที่ดำเนินการตรวจสอบอยู่ในสภาพแวดล้อมการเกิดคาร์บอนขึ้นอยู่ในระดับความรุนแรงสูง

5.1.2 การวัดระยะหุ้มเหล็กเสริมเหล็ก (เหล็กปลอก) ที่วัดได้จากโครงสร้างอาคารเรียน มีค่าความลึก ระหว่าง 38-52 มม. และระยะหุ้มเหล็กเสริมเหล็ก (เหล็กปลอก) ที่วัดได้จากโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม มีค่าความลึก ระหว่าง 32-42 มม. พบว่า ระยะหุ้มเหล็กเสริมเหล็กจากโครงสร้างทั้งหมด 18 แห่ง มีค่ามากกว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม โครงอาคารตามมาตรฐานทั่วไป คือ 25 มม. กรณีโครงสร้างไม่สัมพันธ์กัน

5.1.3 ผลของกำลังอัดของโครงสร้างเฉลี่ย อยู่ระหว่าง 280-405 กก./ชม.<sup>2</sup> ซึ่งพบว่า กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ออกแบบมาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 240 กก./ชม.<sup>2</sup>

5.1.4 ระยะความหนาปูนฉาบที่ได้ทดสอบ พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 13-18 มม. ซึ่งค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงของเกณฑ์ออกแบบไว้ คือ 15 มม.

5.1.5 ระยะความลึกคาร์บอนขึ้นเฉลี่ย โครงสร้างอาคารเรียนที่ตรวจสอบ มีค่าอยู่ระหว่าง 25-38 มม. และโครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามมีค่าอยู่ระหว่าง 12-30 มม. ทั้งนี้อาจเนื่องจากสภาพอายุการใช้งานของโครงสร้างหรือกำลังอัดคอนกรีตที่แตกต่างกันนั่นเอง

5.1.6 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้นของอาคารเรียน มีค่าอยู่ระหว่าง 5.79 -12.38 มม./ปี<sup>1/2</sup> ส่วนโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม มีค่าอยู่ระหว่าง 5.69-7.96 มม./ปี<sup>1/2</sup> พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้นของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามมีค่าน้อยกว่าอาคารเรียน เนื่องจากคุณภาพของคอนกรีต (กำลังอัดคอนกรีต) ที่แตกต่างกันและยังพบว่า โครงสร้างที่มีอายุมาก มีแนวโน้มที่ความลึกคาร์บอนขึ้นมากกว่าโครงสร้างที่มีอายุน้อย เนื่องจากเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ความลึกคาร์บอนขึ้นสูงมากขึ้นไปด้วย

5.1.7 คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงมีค่าสัมประสิทธิ์การบอบเน่นชั้นต่ำกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน และระยะความลึกการบอบเน่นชั้นที่ได้จากโครงสร้างจริง (รวมความหนาปูนฉาบและสี) เทียบกับการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับ โครงสร้างที่เผชิญการบอบเน่นชั้น (ไม่มีผลของสีและปูนฉาบ) พบว่า ค่าความลึกการบอบเน่นชั้นเฉลี่ยที่วัดได้จากโครงสร้างจริงส่วนใหญ่มีระยะความลึกการบอบเน่นชั้นสูงกว่าที่ได้จากการออกแบบไม่มากนัก ซึ่งทำให้เห็นว่า โครงสร้างจริงมีตัวแปรที่มีส่วนทำให้ความลึกการบอบเน่นชั้นสูงกว่า เช่น สภาวะแวดล้อม ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นหรือปัจจัยอื่นที่ทำให้การเสื่อมสภาพสูงขึ้น เป็นต้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปัจจัยความสูงของอาคารที่มีผลต่อการเกิดการบอบเน่นชั้นของอาคารที่ตรวจสอบ ซึ่งสมควรที่จะนำไปศึกษาต่อไปในอนาคต

5.2.2 สภาวะแวดล้อมในอนาคตอาจมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจจะทำให้อัตราการเกิดการบอบเน่นชั้นมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสมควรที่จะศึกษาต่อไปในอนาคต

5.2.3 โครงสร้างอาคารที่เข้าตรวจสอบนั้นอยู่บริเวณปากแม่น้ำติดกับอ่าวไทย ซึ่งอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับเกลือคลอไรด์ หรือไอทะเลซึ่งเป็นสาเหตุหรือปัจจัยส่วนหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างอาคารที่ศึกษาอยู่นั้นมีโอกาสเกิดสนิมในโครงสร้างได้ ซึ่งสมควรที่จะศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต

5.2.4 โครงสร้างอาคารที่ควรเข้าตรวจสอบการเกิดการบอบเน่นชั้น ได้แก่ อาคารโรงงาน ทางยกระดับ ซึ่งทั้ง 2 โครงการ มีความเสี่ยงการเกิดสนิมค่อนข้างสูงเพราะจากสภาวะแวดล้อมดังกล่าว มีปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับสูง

## รายการอ้างอิง

- [1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา  
“ความ คงทนของคอนกรีต,” พิมพ์ครั้งที่ 1,2543,หน้า 3
- [2] Neville A.M., Brooks J.J., 1987. Concrete Technology, United States: Longman Scientific &  
Technical copublished with John Wiley & Sons; 1987
- [3] ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ และศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, “ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและ  
คอนกรีต,” พิมพ์ครั้งที่ 6,2553.สคท, 2553.
- [4] Dunster AM. Accelerated carbonation testing of cement. London: Construction Research  
Communication, 2000.
- [5] The Constructor Civil Engineering Home, “The Mechanism of Reinforcement Corrosion:  
Carbonation”, (online),2014 Available:  
[http://theconstructor.org/concrete/durability1/reinforcement-corrosion-causes-  
prevention/6179/](http://theconstructor.org/concrete/durability1/reinforcement-corrosion-causes-prevention/6179/) , (18 January 2014).
- [6] มยผ. 1332-50 “ มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน ”  
กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย 2550.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก.15 เล่ม 1-2547: มาตรฐานผลิตภัณฑ์  
อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ, กระทรวงอุตสาหกรรม,  
กรุงเทพ, พ.ศ.2547.
- [8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก.2135: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ้ำลอย  
จากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต, กระทรวงอุตสาหกรรม,กรุงเทพ, พ.ศ.2550.
- [9] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก.566: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม  
มวลผสม
- [10] American Society for Testing and Materials, ASTM C33: Standard Specification for  
Concrete Aggregates.
- [11] American Society for Testing and Materials, ASTM C94/C94M-00: Standard Specification for  
Ready-Mixed Concrete,Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, pp. 43-52.



## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [12] American Society for Testing and Materials, ASTM C494/C494M-99a: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, pp. 261-269.
- [13] American Society for Testing and Materials, ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [14] มยผ. 1501-51 ถึง มยผ. 1507-51 มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ,2551.
- [15] JSCE G504, 2007. Test Method for Test Hammer Strength of Hardened Concrete, JSCE Standards.
- [16] RILEM Committee TC 56, 1998, “Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth”, Draft RILEM Recommendation CPC-18, Material and Structure, Vol. 21 (126), pp. 453.
- [17] คณะกรรมาธิการวิสามัญพิจารณาร่างพระราชบัญญัติว่าด้วยการป้องกันและบรรเทาผลกระทบจากภาวะโลกร้อน สภาผู้แทนราษฎร, ความน่าจะเป็นและสถิติ, พิมพ์ครั้งที่ 8.2537. หจก.พิทักษ์การพิมพ์
- [18] รศ.ดร.นพพร ชนชัยจันทร์, สถิติเบื้องต้นสำหรับงานวิจัย, พิมพ์ครั้งที่ 1.2555. บ.ส.เอเชียเพลส (1989) จำกัด : บ.วิทย์พัฒน์ จำกัด, 2555
- [19] P. Castro, E.I. Morenob and J. Genesca, “Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings,” Cement and Concrete Research ,Vol. 30, 2000.pp. 1565- 1571.
- [20] N.I. Fattuhi, “Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period ,” Materiaux et Constructions, Vol. 19, 1986.
- [21] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul and T. Leelawat , “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete,” Construction and Building Materials, Vol 20, 2006. pp. 744-753.
- [22] M.G. Alexander, J.R. Mackechnie and W. Yam, “Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities,” Cement & Concrete Composites, Vol. 29, 2007. pp. 750 – 759

## รายการอ้างอิง (ต่อ)


- [23] M. N. Haque & H. Al-Khaiat, "Carbonation of Concrete Structures in Hot Dry Coastal Regions," *Cement and Concrete Composites*, Vol 19, 1997. pp. 123-129.
- [24] Jin-Keun Kim, Chin-Yong Kim, Seong-Tae Yi and Yun Lee, "Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete," *Cement & Concrete Composites*, Vol31, 2009 pp 139-144.
- [25] Cengiz Duran Atis, "Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash," *Construction and Building Materials*, Vol 17, 2003, pp.147-152.
- [26] M.N. Haque, H. Al-Khaiat and B. John "Climatic zone-A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf," *Building and Environment*, Vol42, 2007, pp 2410-2416.
- [27] H. Al-Khayat 1, M. N. Haque I and N. I. Fattuhi "Concrete carbonation in arid climate," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 35, 2002. pp 421-426.
- [28] บุรฉัตร ฉัตรวิระ และทวิทัศน์ คงทรัพย์, "ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว," *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, ปีที่ 25 ฉบับที่ 4, 2545, หน้า 373-389.
- [29] วัจนวงศ์ กริพละ, รัฐภูมิ ปริชาติปริชา, สรรค์ สยามิภักดีและธนากร พิระพันธ์ุ, "การสำรวจทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสา โครงกรทางรถไฟยกระดับ," *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี*, ครั้งที่ 3, 2550, หน้า 26-34.
- [30] S. K. Roy t, D. O. Northwood and K. B. Poh, "Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building," *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 4, pp. 261-272, 1996.
- [31] J. Banjongrat, K. Wongpiyachetchai, R. Sahamitmongkol and S. Tangtermsirikul, "Effect of Plastering Mortar and Paint On Carbonation Resistance of Concrete," *Proceedings of the 6 Annual Concrete Conference, Thai Concrete Association, Thailand, 2010.*
- [32] บัญญัติ วารินทร์ไหล, "การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารที่พักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชน, " *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.*

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [33] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, [www.th.wikipedia.org/wiki/จังหวัดสมุทรปราการ](http://www.th.wikipedia.org/wiki/จังหวัดสมุทรปราการ), ( 22 พฤศจิกายน 2556).
- [34] D.C.K. Tay and C.T.Tam, “In situ investigation of the strength of deteriorated concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 10, 1996, pp.17–26.
- [35] J.H. Bungey and S.G. Millard, “Testing of Concrete in Structures”, Third edition, Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, 1996.
- [36] S. Poolsawat and K. Maleese, “The effect of Stirrup Tie and Vertical Reinforcement Steel with the Compressive Strength Derived from Nondestructive Test Method by Schmidt Hammer est,” Proceedings of Annual Concrete Conference 6, Phetchaburi, Thailand, October , 2010, pp. 20-22.
- [37] Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division : <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> ( 4 March 2014).
- [38] Neves R, Branco F, de Brito J, “ Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance,” *Cement & Concrete Composites* 41, 2013, pp.9–15.
- [39] *Concrete in Australia*, Vol. 36, No 3, pp.29-43.
- [40] JSCE Guidelines for Concrete : Standard Specifications for Concrete Structures “Materials and Construction,” No.6,2002.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ข้อมูล การสะท้อนกลับ จากก้อนกระแทก

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

ระยะความลึกคาร์บอนเนชั่น

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์

A1 โรงเรียนสมุทรปราการ

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	45.50	49.38	48.56	44.06	43.94	45.69	46.19
ชั้น 2	41.44	39.31	41.06	37.69	40.94	39.63	40.01
ชั้น 3	41.69	38.50	42.00	39.88	39.56	37.06	39.78
เฉลี่ย							41.99

A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	42.19	41.38	40.25	39.00	37.38	38.00	39.70
ชั้น 2	42.81	39.13	40.06	35.19	33.19	44.00	39.06
ชั้น 3	41.50	42.88	46.50	38.31	44.13	41.88	42.53
ชั้น 4	34.94	37.06	38.06	42.38	46.81	39.50	39.79
เฉลี่ย							40.27

A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	42.63	38.94	37.19	39.44	39.94	39.13	39.54
ชั้น 2	40.06	37.56	39.06	39.13	38.63	37.69	38.69
ชั้น 3	39.75	40.94	38.44	38.69	40.56	37.88	39.38
ชั้น 4	41.19	40.44	37.38	38.88	37.94	37.94	38.96
เฉลี่ย							39.14

A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	40.38	40.00	37.44	38.31	37.63	38.50	38.71
ชั้น 2	38.06	40.06	40.25	37.63	40.00	37.81	38.97
ชั้น 3	41.00	41.63	40.56	38.94	38.69	40.56	40.23
ชั้น 4	40.00	40.25	38.31	37.69	36.94	37.38	38.43
เฉลี่ย							39.08

A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	38.56	40.06	39.50	37.13	38.44	34.06	37.96
ชั้น 2	37.44	38.69	37.50	38.19	37.88	36.94	37.77
ชั้น 3	39.38	40.06	36.56	39.00	36.69	36.00	37.95
ชั้น 4	36.56	38.50	39.69	37.63	38.69	37.50	38.09
เฉลี่ย							37.94

A6 โรงเรียนนาคคีอนุสรณ์

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	40.38	40.50	35.81	40.25	34.38	38.31	38.27
ชั้น 2	39.44	36.44	38.50	37.50	36.13	38.00	37.67
ชั้น 3	36.88	38.06	39.06	38.38	40.13	37.31	38.30
ชั้น 4	39.00	39.63	38.19	38.69	36.19	40.13	38.64
เฉลี่ย							38.22

A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	38.56	40.06	39.50	37.13	38.44	34.06	37.96
ชั้น 2	37.44	38.69	37.50	38.19	37.88	36.94	37.77
ชั้น 3	39.38	40.06	36.56	39.00	36.69	36.00	37.95
เฉลี่ย							37.89

A8 โรงเรียนวัดแพรกษา

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	34.50	39.19	35.69	40.81	37.56	33.13	36.81
ชั้น 2	36.69	38.13	38.31	35.13	37.06	34.81	36.69
ชั้น 3	35.50	40.88	35.31	37.00	38.94	35.25	37.15
ชั้น 4	35.94	39.81	37.50	39.50	33.38	36.31	37.07
เฉลี่ย							36.93

A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	35.56	36.06	37.56	36.69	36.44	38.06	36.73
ชั้น 2	36.56	37.13	37.75	36.38	36.50	35.81	36.69
ชั้น 3	38.56	37.56	36.44	37.13	36.31	36.63	37.10
เฉลี่ย							36.84

B1-B9 โครงสร้างสะพานลอย

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน RN						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
B1	43.94	38.44	41.63	38.50	49.69	46.19	43.06
B2	35.31	38.06	46.88	40.44	41.50	40.44	40.44
B3	43.94	38.44	41.63	38.50	37.25	46.19	40.99
B4	46.38	43.44	38.50	36.19	38.56	43.44	41.08
B5	39.63	43.00	43.06	40.88	44.56	44.75	42.65
B6	42.13	39.94	38.38	42.75	40.38	39.75	40.55
B7	39.56	37.25	38.56	39.19	39.19	38.50	38.71
B8	36.88	36.31	37.25	37.75	37.19	36.88	37.04
B9	38.13	36.06	37.25	38.50	36.19	38.25	37.40



A1 โรงเรียนสมุทรปราการ

ตำแหน่ง	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	27.0	33.0	38.0	30.0	31.0	35.0	32.3
ชั้น 2	41.5	39.0	46.3	41.3	34.5	30.0	38.8
ชั้น 3	50.5	40.8	43.5	45.0	34.3	51.3	44.2
เฉลี่ย							38.4

A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง

ตำแหน่ง	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	29.5	28.5	28.3	29.0	27.0	25.0	27.9
ชั้น 2	33.0	29.3	28.3	30.0	27.0	22.5	28.3
ชั้น 3	35.0	38.5	36.5	36.0	39.8	34.5	36.7
ชั้น 4	39.0	38.5	25.8	34.0	47.5	37.0	37.0
เฉลี่ย							32.5

A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม

ตำแหน่ง	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	32.0	28.0	30.0	33.0	27.0	27.0	29.5
ชั้น 2	31.5	36.0	27.0	29.5	28.0	30.0	30.3
ชั้น 3	30.0	33.5	30.0	38.5	41.5	28.5	33.7
ชั้น 4	32.5	35.0	35.0	30.5	44.5	35.0	35.4
เฉลี่ย							32.2

A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม

ตำแหน่ง	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	22.0	27.5	27.5	33.0	26.0	25.0	26.8
ชั้น 2	26.0	31.0	27.0	24.5	26.0	26.0	26.8
ชั้น 3	24.0	27.0	29.0	24.0	23.8	28.5	26.0
ชั้น 4	25.5	27.5	31.5	29.0	28.5	33.0	29.2
เฉลี่ย							27.2

A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์

ตำแหน่ง	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.) รวมความหนาปูนฉาบ						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	29.5	24.8	21.5	30.0	32.5	29.5	28.0
ชั้น 2	30.5	33.0	36.0	36.0	30.5	31.8	33.0
ชั้น 3	39.0	30.0	27.3	30.5	36.3	35.0	33.0
ชั้น 4	34.0	37.5	33.5	29.5	36.0	28.5	33.2
เฉลี่ย							31.8

A6 โรงเรียนนาคคีอนุสรณ์

ตำแหน่ง	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	23.0	27.0	25.0	28.5	27.0	26.0	26.1
ชั้น 2	28.5	32.0	33.0	25.0	27.5	33.0	29.8
ชั้น 3	26.0	39.0	25.0	32.0	28.0	27.0	29.5
ชั้น 4	25.0	28.5	33.0	26.0	27.0	25.0	27.4
เฉลี่ย							28.2

A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง

ตำแหน่ง	ความลึกคาร์บอนชั้น						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	25.0	22.0	24.5	23.5	25.5	22.5	23.8
ชั้น 2	26.0	23.5	25.5	24.0	27.3	26.0	25.4
ชั้น 3	25.0	34.0	24.5	29.3	29.3	26.5	28.1
เฉลี่ย							25.8

A8 โรงเรียนวัดแพรกษา

ตำแหน่ง	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	28.8	29.5	28.0	27.5	26.0	26.8	27.8
ชั้น 2	25.0	29.0	28.0	27.5	26.0	29.5	27.5
ชั้น 3	27.5	27.0	28.5	28.0	26.8	24.5	27.0
ชั้น 4	25.0	27.0	28.5	29.5	30.5	30.0	28.4
เฉลี่ย							27.7

A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์

ตำแหน่ง	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	
ชั้น 1	26.5	24.5	24.8	25.3	25.5	27.5	25.7
ชั้น 2	27.0	27.5	33.0	27.3	26.8	26.5	28.0
ชั้น 3	33.5	30.8	26.0	26.0	29.0	28.8	29.0
เฉลี่ย							27.6

B1 กม. 27+789 (รร.สมุทรปราการ)

ตำแหน่ง	ความหนาปูน	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)			เฉลี่ย
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
ความสูง	ฉาบ				(มม.)
1.00 -2.50	NA	20.0	24.3	26.5	23.6
2.50 - 4.00	NA	31.0	30.0	30.0	30.3
4.00. -ขึ้นไป	NA	35.5	35.5	25.0	32.0
เฉลี่ย					28.6

B2 กม. 31+580 (โยธา)

ตำแหน่ง	ความหนาปูน	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)			เฉลี่ย
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
ความสูง	ฉาบ				(มม.)
1.00 -2.50	20.0	23.3	27.0	23.4	20.0
2.50 - 4.00	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
4.00. -ขึ้นไป	32.0	35.5	25.0	30.8	32.0
เฉลี่ย					28.1

B3 กม. 36+443 (วัดศรีจันทร์ประดิษฐ์)

ตำแหน่ง	ความหนาปูน	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)			เฉลี่ย
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
ความสูง	ฉาบ				(มม.)
1.00 -2.50	NA	22.5	30.0	34.8	29.1
2.50 - 4.00	NA	35.8	32.5	22.5	30.3
4.00. -ขึ้นไป	NA	29.3	33.5	31.0	31.3
เฉลี่ย					30.2

B4 กม. 34+080 (สามห้วง)

ตำแหน่ง	ความหนาปูน	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)			เฉลี่ย (มม.)
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
ความสูง	ฉาบ				
1.00 -2.50	NA	12.0	17.5	17.5	15.7
2.50 - 4.00	NA	19.5	16.0	27.5	21.0
4.00. -ขึ้นไป	NA	30.0	26.5	32.0	29.5
เฉลี่ย					22.1

B5 กม. 30+244 (การเคหะสมุทรปราการ)

ตำแหน่ง	ความหนาปูน	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)			เฉลี่ย (มม.)
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
ความสูง	ฉาบ				
1.00 -2.50	NA	20.5	16.8	22.3	19.8
2.50 - 4.00	NA	25.8	26.0	26.5	26.1
4.00. -ขึ้นไป	NA	37.3	32.0	30.5	33.3
เฉลี่ย					26.4

B6 กม. 23+118 (บริษัทนมตรางะลิ)

ตำแหน่ง	ความหนาปูน	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)			เฉลี่ย (มม.)
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
ความสูง	ฉาบ				
1.00 -2.50	NA	18.0	16.8	16.3	17.0
2.50 - 4.00	NA	22.3	26.0	26.5	24.9
4.00. -ขึ้นไป	NA	21.0	26.0	15.8	20.9
เฉลี่ย					20.9

B7 ก.ม. 27+390 (โรงเรียนเสฉงยมพิทยานุกูล)

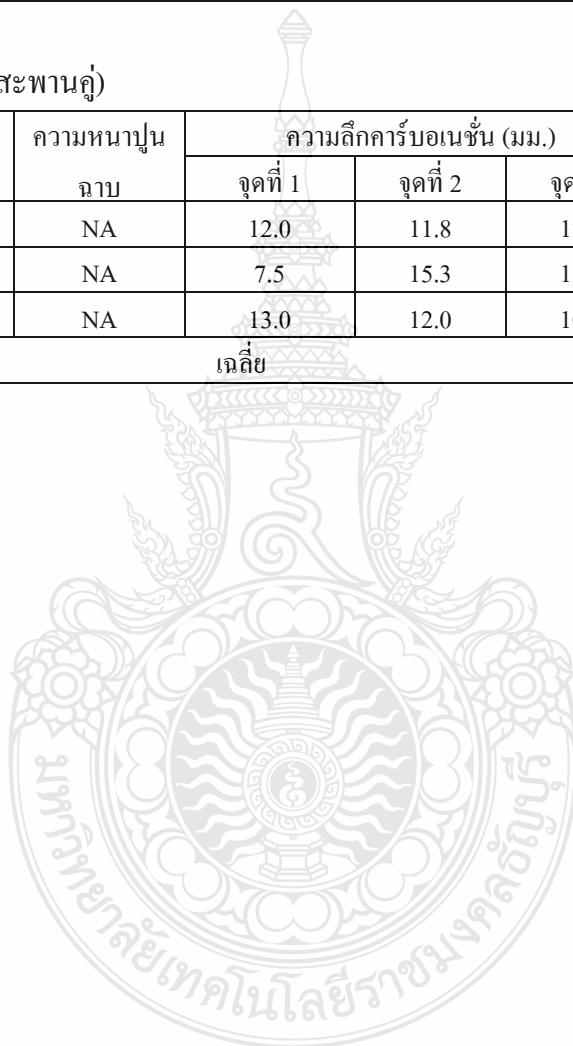
ตำแหน่ง	ความหนาปูน	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)			เฉลี่ย (มม.)
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
ความสูง	ฉาบ				
1.00 -2.50	NA	20.3	19.0	23.8	21.0
2.50 - 4.00	NA	20.0	11.0	16.0	15.7
4.00. -ขึ้นไป	NA	19.0	23.8	20.0	20.9
เฉลี่ย					19.2

B8 กม. 29+220 (ฟาร์มจระเข้)

ตำแหน่ง ความสูง	ความหนาปูน ฉาบ	ความลึกคาร์บอนเนชั่น (มม.)			เฉลี่ย (มม.)
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
1.00 -2.50	NA	13.0	12.8	13.5	13.1
2.50 - 4.00	NA	11.5	11.5	13.5	12.2
4.00. -ขึ้นไป	NA	15.5	12.5	12.0	13.3
เฉลี่ย					12.9

B9 กม. 30+640 (สะพานคู่)

ตำแหน่ง ความสูง	ความหนาปูน ฉาบ	ความลึกคาร์บอนเนชั่น (มม.)			เฉลี่ย (มม.)
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	
1.00 -2.50	NA	12.0	11.8	17.0	13.6
2.50 - 4.00	NA	7.5	15.3	11.0	11.3
4.00. -ขึ้นไป	NA	13.0	12.0	10.0	11.7
เฉลี่ย					12.2



A1 โรงเรียนสมุทรปราการ

โครงสร้าง A1 ตำแหน่ง	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.)			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.)		
	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3
จุดที่ 1	40	43	40	30	34	39
	37	40	43	31	33	43
	46	35	42	32	35	38
	33	34	40	32	35	38
จุดที่ 2	42	34	40	30	21	40
	38	41	46	31	26	37
	53	41	49	34	25	39
	52	39	49	29	24	38
จุดที่ 3	48	46	39	42	46	46
	42	35	36	38	43	45
	42	39	39	41	43	44
	40	36	47	54	42	41
จุดที่ 4	51	45	36	38	51	29
	40	42	37	50	51	34
	49	40	38	44	52	35
	43	48	38	50	50	37
จุดที่ 5	42	34	40	30	38	40
	38	41	46	31	36	37
	45	33	49	34	30	39
	44	32	49	29	38	38
จุดที่ 6	32	43	48	34	36	45
	34	30	53	43	37	44
	33	29	51	36	38	50
	35	30	47	39	42	44
ค่าเฉลี่ย (มม.)	41.6	37.9	43.4	36.8	37.8	40.0
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	41.0			38.2		

A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง

โครงสร้าง A2 ตำแหน่ง/ชั้น	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.)				ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
จุดที่ 1	27	55	40	43	24	34	38	34
	28	50	37	40	25	36	36	33
	28	52	46	38	24	32	36	35
	27	52	33	34	25	32	34	35
จุดที่ 2	42	34	40	30	21	40	30	30
	38	41	46	31	26	37	41	27
	53	41	49	34	25	39	33	32
	52	39	49	29	24	38	53	33
จุดที่ 3	48	43	41	41	31	46	42	46
	53	43	42	36	34	46	38	43
	51	41	43	39	36	47	41	43
	47	41	40	36	31	49	44	42
จุดที่ 4	36	42	41	48	42	37	38	41
	42	44	40	47	28	37	43	41
	37	32	49	48	39	41	44	52
	34	30	43	47	35	45	50	41
จุดที่ 5	44	38	30	36	52	47	27	38
	39	33	38	37	51	47	23	53
	42	32	37	45	53	40	28	44
	44	33	31	40	46	37	27	40
จุดที่ 6	49	46	21	38	38	31	42	46
	54	50	29	33	40	31	38	42
	52	45	23	32	40	32	43	36
	50	48	25	33	48	27	42	40
ค่าเฉลี่ย (มม.)	42.4	41.9	38.0	38.1	34.9	38.7	38.0	39.5
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	40.1				37.8			

A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม

โครงสร้าง A3 ตำแหน่ง/ชั้น	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.)				ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
จุดที่ 1	55	45	34	42	42	37	31	49
	33	46	40	46	28	37	36	53
	56	42	34	56	39	41	36	56
	53	44	40	56	35	55	31	48
จุดที่ 2	55	45	53	28	52	47	51	23
	51	43	50	28	51	47	51	27
	50	42	48	30	53	40	58	26
	50	40	43	32	46	37	58	24
จุดที่ 3	39	33	48	37	38	33	41	34
	43	36	46	37	40	31	44	42
	41	37	47	40	40	31	56	37
	54	36	50	45	48	32	47	34
จุดที่ 4	42	42	34	40	39	36	29	35
	44	41	31	42	42	36	35	37
	32	41	33	41	45	39	36	37
	30	44	34	43	50	43	31	40
จุดที่ 5	38	44	47	35	29	39	52	21
	33	42	48	38	29	37	47	26
	32	41	48	28	29	37	47	25
	33	37	42	26	29	36	46	24
จุดที่ 6	46	36	44	33	41	28	40	31
	50	38	45	34	43	27	48	34
	45	37	43	36	42	27	41	36
	48	34	42	43	45	27	40	31
ค่าเฉลี่ย (มม.)	43.9	40.3	42.7	38.2	40.6	36.7	43.0	34.6
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	41.2				38.7			



A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม

โครงสร้าง A4 ตำแหน่ง/ชั้น	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.)				ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
จุดที่ 1	41	40	34	55	40	37	47	52
	40	39	34	44	47	38	40	48
	40	41	36	41	41	36	41	48
	42	43	36	56	39	33	38	48
จุดที่ 2	47	40	46	49	34	45	46	38
	49	39	42	45	36	42	47	39
	41	41	47	48	34	41	44	36
	48	43	46	46	39	41	41	39
จุดที่ 3	46	45	46	44	45	42	34	54
	47	57	46	46	40	39	35	54
	50	53	48	47	47	40	38	55
	47	56	45	47	41	40	36	53
จุดที่ 4	49	35	44	46	35	42	41	48
	45	33	40	39	34	35	42	44
	43	34	42	39	39	40	41	40
	45	36	42	42	36	40	42	41
จุดที่ 5	41	36	47	45	39	30	34	42
	41	36	45	47	40	30	35	44
	43	38	46	43	44	30	44	30
	46	46	47	45	47	30	45	30
จุดที่ 6	40	40	51	51	40	48	45	30
	39	36	51	48	41	43	47	42
	40	36	54	48	40	42	54	45
	41	41	56	51	42	41	54	38
ค่าเฉลี่ย (มม.)	43.79	41.00	44.63	46.33	40.00	38.54	42.13	43.25
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	43.94				40.98			

A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์

โครงสร้าง A5 ตำแหน่ง/ชั้น	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.)				ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
จุดที่ 1	43	34	45	52	42	32	43	48
	47	33	48	51	40	31	45	48
	42	36	48	51	44	32	45	48
	45	32	42	52	46	30	40	48
จุดที่ 2	34	33	46	52	32	36	43	38
	34	37	45	53	30	36	43	46
	42	40	50	43	40	37	46	43
	40	32	53	46	39	32	45	44
จุดที่ 3	34	40	36	56	36	38	36	35
	46	40	36	56	42	38	38	33
	49	38	38	56	45	36	34	34
	50	39	35	56	55	37	35	56
จุดที่ 4	45	50	40	50	54	38	41	48
	42	47	41	53	50	40	42	46
	54	54	43	52	55	39	48	48
	53	50	41	48	57	40	45	48
จุดที่ 5	41	50	47	49	39	58	47	40
	41	45	45	47	40	56	46	44
	43	46	46	43	39	52	44	47
	39	44	47	45	39	52	45	46
จุดที่ 6	40	50	51	51	40	48	56	46
	39	51	51	51	41	45	56	55
	40	50	54	50	40	42	54	51
	41	41	56	48	42	41	54	52
ค่าเฉลี่ย (มม.)	42.67	42.17	45.17	50.46	42.79	40.25	44.63	45.50
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	45.11				43.29			

A6 โรงเรียนนาคคีอนุสรณ์

โครงสร้าง A6 ตำแหน่ง/ชั้น	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.)				ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
จุดที่ 1	50	55	42	32	56	45	37	39
	53	55	44	38	50	40	37	46
	56	53	47	37	56	45	40	41
	52	55	46	34	50	45	41	41
จุดที่ 2	57	42	46	61	48	46	49	52
	50	50	48	64	55	46	54	42
	55	44	45	55	54	40	52	50
	56	37	53	64	55	37	53	41
จุดที่ 3	48	38	42	48	45	35	56	60
	45	39	45	48	45	38	48	59
	51	42	52	46	45	33	53	60
	50	38	51	47	46	35	47	53
จุดที่ 4	40	40	46	56	47	41	35	34
	40	34	46	56	45	51	35	34
	43	44	39	48	40	33	42	34
	45	44	38	46	40	39	43	36
จุดที่ 5	40	56	39	43	46	41	45	36
	41	47	40	50	38	43	36	50
	43	56	41	57	36	41	42	60
	44	56	42	54	41	47	41	60
จุดที่ 6	56	52	46	56	45	41	35	34
	50	44	39	48	45	33	42	34
	55	45	38	46	43	39	43	36
	46	47	39	43	45	41	45	36
ค่าเฉลี่ย (มม.)	48.58	46.38	43.92	49.04	46.50	40.63	43.79	44.50
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	46.98				43.85			

A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง

โครงสร้าง A7 ตำแหน่ง/ชั้น	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.)			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.)		
	1	2	3	1	2	3
จุดที่ 1	41	54	52	36	48	40
	34	57	45	34	49	46
	37	55	54	39	55	45
	39	56	50	47	40	40
จุดที่ 2	46	56	45	41	35	34
	39	48	41	33	42	34
	38	46	41	39	43	36
	39	43	45	41	45	36
จุดที่ 3	41	40	34	55	40	28
	40	39	34	44	47	29
	40	41	36	41	41	36
	42	43	36	56	39	33
จุดที่ 4	47	40	46	49	34	45
	49	39	42	45	36	42
	41	41	47	48	34	41
	48	43	46	46	39	41
จุดที่ 5	46	45	46	44	45	42
	47	57	46	46	40	39
	50	53	48	47	47	40
	47	56	45	47	41	40
จุดที่ 6	49	29	44	46	28	42
	45	33	40	39	34	45
	43	34	42	39	39	40
	45	36	42	42	33	40
ค่าเฉลี่ย (มม.)	43.04	45.17	43.63	43.50	40.58	38.92
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	43.94			41.00		

A8 โรงเรียนวัดแพกษา

โครงสร้าง A8 ตำแหน่ง/ชั้น	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.)				ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
จุดที่ 1	46	56	41	42	46	42	44	53
	45	54	51	45	54	40	36	52
	47	64	43	43	49	43	39	50
	48	59	43	48	54	37	45	49
จุดที่ 2	49	54	59	50	64	50	69	55
	50	54	50	49	61	49	64	51
	50	58	55	50	63	50	67	43
	55	54	59	52	57	52	66	56
จุดที่ 3	54	54	58	68	60	68	65	42
	52	43	44	69	60	69	67	46
	47	36	45	64	68	64	64	42
	47	50	39	67	54	67	69	42
จุดที่ 4	51	51	59	68	58	44	62	47
	48	43	60	46	51	46	57	39
	46	51	60	64	59	46	53	41
	44	52	67	65	51	49	52	41
จุดที่ 5	54	42	60	52	67	52	56	39
	60	54	56	48	63	48	53	43
	62	64	63	53	55	53	54	47
	59	65	66	53	60	53	55	42
จุดที่ 6	58	56	66	67	45	38	68	48
	55	57	68	40	40	36	68	51
	56	57	70	44	41	48	68	52
	55	59	61	42	40	39	70	48
ค่าเฉลี่ย (มม.)	51.58	53.63	55.96	53.71	55.00	49.29	58.79	46.63
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	53.72				52.43			

A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์

โครงสร้าง A9 ตำแหน่ง/ชั้น	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน (มม.)			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (มม.)		
	1	2	3	1	2	3
จุดที่ 1	46	56	41	42	44	53
	45	54	51	40	34	52
	47	64	43	43	39	50
	48	59	43	37	45	49
จุดที่ 2	49	54	59	50	57	55
	50	54	50	49	64	51
	50	58	55	50	67	43
	55	50	59	52	50	56
จุดที่ 3	54	54	41	68	65	42
	52	43	36	69	65	46
	47	36	45	64	64	48
	47	50	39	67	69	42
จุดที่ 4	51	51	59	68	62	47
	48	43	60	46	57	39
	46	51	60	64	53	41
	44	52	67	65	60	41
จุดที่ 5	54	42	60	52	60	39
	60	54	56	48	68	43
	62	64	63	53	65	47
	59	65	66	53	65	42
จุดที่ 6	58	44	66	67	56	48
	55	41	68	36	56	51
	56	43	70	31	57	52
	55	59	61	25	57	48
ค่าเฉลี่ย (มม.)	51.58	51.71	54.92	51.63	57.46	46.88
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	52.74			51.99		

B1 กม. 27+789 (โรงเรียนสมุทรปราการ)

โครงสร้าง B1 ตำแหน่ง/ความสูง (ม.)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก		
	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50
จุดที่ 1	51	48	31	39	45	28
	50	46	33	34	45	29
	51	41	34	36	41	32
	47	42	38	34	39	32
จุดที่ 2	47	43	38	38	40	34
	44	44	36	39	39	36
	50	44	34	34	35	33
	45	43	35	38	43	34
จุดที่ 3	43	40	37	40	40	36
	42	39	37	38	42	35
	43	41	38	38	39	37
	42	40	35	39	39	37
ค่าเฉลี่ย (มม.)	46.25	42.58	35.50	37.25	40.58	33.58
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	41.44			37.14		

B2 กม. 31+580 (โยธา)

โครงสร้าง B2 ตำแหน่ง/ความสูง (ม.)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก		
	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50
จุดที่ 1	52	45	51	35	38	38
	51	48	48	36	35	34
	49	56	51	38	38	40
	50	47	53	36	38	36
จุดที่ 2	36	51	42	31	39	37
	38	43	41	36	39	38
	44	51	41	38	38	40
	43	53	45	36	36	38
จุดที่ 3	42	48	46	35	38	40
	41	49	43	38	38	38
	41	49	43	42	41	40
	45	48	43	40	36	36
ค่าเฉลี่ย (มม.)	44.33	49.00	45.58	36.75	37.83	37.92
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	46.31			37.50		

B3 กม. 36+443 (วัดศรีจันทร์ประดิษฐ์)

โครงสร้าง B3 ตำแหน่ง/ความสูง (ม.)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก		
	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50
จุดที่ 1	52	46	41	42	44	41
	51	47	44	40	42	39
	49	47	45	43	42	40
	51	47	41	41	41	40
จุดที่ 2	51	50	43	47	47	47
	43	51	43	42	41	42
	51	52	44	42	40	40
	53	56	47	43	43	40
จุดที่ 3	38	47	40	35	38	38
	41	45	41	35	38	37
	41	47	43	38	39	38
	45	49	43	38	39	40
ค่าเฉลี่ย (มม.)	47.17	48.67	42.92	40.50	41.17	40.17
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	46.25			40.61		

B4 กม. 34+080 (สามห่วง)

โครงสร้าง B4 ตำแหน่ง/ความสูง (ม.)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก		
	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50
จุดที่ 1	40	36	45	32	32	34
	40	38	45	34	34	32
	42	35	44	34	34	34
	42	36	44	34	36	34
จุดที่ 2	36	34	41	33	31	32
	36	34	40	32	33	34
	35	36	49	28	29	30
	37	36	44	28	29	30
จุดที่ 3	35	50	52	29	32	32
	31	49	51	31	32	36
	37	49	51	33	35	36
	35	50	51	29	32	32
ค่าเฉลี่ย (มม.)	37.17	40.25	46.42	31.42	32.42	33.00
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	41.28			32.28		



B5 กม. 30+244 (การเคหะสมุทรปราการ)

โครงสร้าง B5 ตำแหน่ง/ความสูง (ม.)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก		
	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50
จุดที่ 1	55	50	64	40	43	31
	50	52	64	40	44	32
	48	56	62	41	38	32
	50	58	51	42	42	32
จุดที่ 2	51	57	48	38	38	45
	50	57	46	34	36	42
	51	58	46	34	34	41
	50	55	47	35	34	41
จุดที่ 3	54	64	47	43	50	45
	56	46	46	40	54	47
	57	64	45	39	55	47
	55	65	45	41	55	46
ค่าเฉลี่ย (มม.)	52.25	56.83	50.92	38.92	43.58	40.08
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	53.33			40.86		

B6 กม. 23+118 (บริษัทนมตราหมี)

โครงสร้าง B6 ตำแหน่ง/ความสูง (ม.)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก		
	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50
จุดที่ 1	45	43	41	38	35	42
	44	43	42	40	36	42
	45	38	38	42	40	38
	42	42	36	42	42	30
จุดที่ 2	38	42	45	38	38	41
	34	36	42	34	36	42
	34	34	41	34	34	41
	35	38	41	35	34	41
จุดที่ 3	43	43	33	40	47	35
	40	40	39	32	47	36
	42	50	33	33	46	34
	44	50	48	33	46	35
ค่าเฉลี่ย (มม.)	40.50	41.58	39.92	36.75	40.08	38.08
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	40.67			38.31		

B7 ก.ม. 27+390 (โรงเรียนเสด็จวิทยานุกูล)

โครงสร้าง B7 ตำแหน่ง/ความสูง (ม.)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก		
	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50
จุดที่ 1	46	50	64	40	43	46
	50	52	64	40	44	46
	48	53	62	46	38	47
	50	55	51	42	42	47
จุดที่ 2	51	63	48	38	38	45
	50	62	45	34	36	42
	51	63	44	34	34	41
	53	60	45	35	34	41
จุดที่ 3	55	64	41	43	55	45
	56	64	43	40	54	31
	57	64	41	39	55	44
	56	65	46	41	55	42
ค่าเฉลี่ย (มม.)	51.92	59.58	49.50	39.33	44.00	43.08
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	53.67			42.14		

B8 ก.ม. 29+220 (เขื่องฟาร์มจระเข้)

โครงสร้าง B8 ตำแหน่ง/ความสูง (ม.)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก		
	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50
จุดที่ 1	58	49	54	26	28	30
	57	50	47	27	32	32
	53	50	52	26	38	35
	50	49	39	26	42	32
จุดที่ 2	49	50	44	28	42	42
	42	49	42	30	36	42
	45	53	53	30	34	41
	52	50	34	32	38	41
จุดที่ 3	48	48	37	28	28	38
	49	49	32	29	36	39
	50	55	34	30	50	33
	50	51	32	26	45	48
ค่าเฉลี่ย (มม.)	50.25	50.25	41.67	28.17	37.42	37.75
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	47.39			34.44		

B9 กม. 30+640 (สะพานคู่)

โครงสร้าง B9 ตำแหน่ง/ความสูง (ม.)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กแกน			ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก		
	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50	1.00-1.50	3.00-3.50	4.00-5.50
จุดที่ 1	31	46	36	27	44	32
	31	37	38	26	40	32
	32	41	44	26	38	30
	31	37	40	26	35	38
จุดที่ 2	33	41	31	31	40	29
	39	48	34	32	45	30
	36	49	32	30	45	30
	38	48	35	37	45	29
จุดที่ 3	36	46	35	26	38	30
	32	45	36	30	45	32
	33	45	34	28	44	34
	33	46	35	27	40	33
ค่าเฉลี่ย (มม.)	33.75	44.08	35.83	28.83	41.58	31.58
ค่าเฉลี่ยรวม (มม.)	37.89			34.00		



A1 โรงเรียนสมุทรปราการ

A1 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	624	38.8	57.0	719	27.2	59.7	621	27.4	57.5
	607	29.7	58.2	616	28.0	54	620	27.4	54.7
	574	30.1	58.8	603	27.4	56.6	617	27.2	54.1
	563	31.1	53.0	611	28.1	53.7	621	28.2	51.8
กลางวัน	574	34.6	44.2	620	30.2	45.4	608	31.5	41.1
	555	33.4	45.9	572	29.5	49.7	618	33.5	38.0
	552	33.0	46.4	618	29.2	48.6	619	33.0	37.3
	553	34.3	44.3	691	29.5	50.3	611	32.1	42.1
เย็น	563	32.1	48.8	642	29.8	49.2	574	32.3	43.5
	561	33.5	42.0	673	26.5	48.4	591	33.0	40.9
	573	34.7	43.6	665	28.9	44.7	586	33.4	35.8
	581	31.9	48.8	645	29.8	48.3	590	33.5	36.9
เฉลี่ย	573.33	33.10	49.25	639.58	28.68	50.72	606.33	31.04	44.48
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						606.42 ppm			
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ						48.15			

A2 โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง

A2 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	616	31.8	54.4	573	27.3	43.2	608	29.5	52.6
	572	31.6	50.8	564	27.2	44.3	618	28.8	53.5
	561	31.0	51.1	561	27.5	46.6	589	29.2	50.3
	560	32.1	49.0	619	32.0	56.9	593	32.1	49.0
กลางวัน	557	33.3	46.8	605	31.7	56.5	619	32.0	56.9
	562	32.8	46.0	585	31.8	59.2	605	31.7	56.5
	564	33.0	46.6	587	32.0	61.8	585	31.8	59.2
	601	35.7	48.1	575	32.6	61.0	587	32.0	61.8
เย็น	572	33.6	40.5	564	32.6	61.3	577	32.8	57.4
	589	33.2	53.0	563	32.9	59.8	554	32.9	56.8
	583	33.6	37.8	566	32.6	61.4	551	32.2	56.9
	594	31.9	40.2	569	32.6	60.5	548	32.5	58.5
เฉลี่ย	577.58	32.80	47.03	577.58	31.07	101.9	586.17	31.46	55.78
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						580.44 ppm			
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ						52.95			

A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม

ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	650	28	71.0	638	29.5	52.6	573	27.3	43.2
	623	28.5	70.9	668	28.8	53.5	564	27.2	44.3
	593	28.7	69.4	577	29.2	50.3	561	27.5	46.6
	587	29.3	60.4	565	29.3	50.2	580	28.3	44.5
กลางวัน	589	31.7	50.1	577	29.3	49.8	607	29.1	39.7
	597	32.7	46.7	581	29.7	48.9	584	29.2	38.8
	587	30.5	52.8	568	29.8	48.2	574	28.6	41.6
	575	30.6	51.8	566	30.0	47.3	559	28.5	40.5
เย็น	559	34.0	35.0	553	32.1	30.0	571	30.0	40.0
	554	31.9	40.0	549	31.8	35.0	570	30.8	40.4
	563	32.2	39.2	555	31.8	35.4	568	30.9	39.8
	583	31.7	39.1	552	32.0	37.9	563	31.0	39.0
เฉลี่ย	588.33	30.82	52.20	579.08	30.28	44.93	572.83	29.03	41.53
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						580.08 ppm			
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ						46.66			

A4 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม

A4 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	626	30.2	71.8	559	30.3	65.5	599	30.9	65.8
	663	30.0	71.9	575	30.6	65.8	607	30.7	66.4
	693	29.9	71.7	566	31.1	62.2	606	30.8	61.2
	657	29.8	72.6	573	31.1	62.1	620	30.6	61.1
กลางวัน	607	31.6	63.1	619	32	56.9	589	34.3	53.8
	873	32.1	62.7	605	31.7	56.5	608	33.7	54.6
	742	32.2	64.9	585	31.8	59.2	603	33.5	54.3
	855	32.0	62.7	587	32	61.8	604	32.7	57.9
เย็น	603	33.4	53.9	670	32.6	59.0	588	32.8	58.0
	595	33.4	52.9	659	33.1	59.2	586	33.2	59.0
	585	33.1	57.1	642	32.7	56.3	593	32.7	59.4
	594	33.8	52.0	622	32.1	60.9	599	32.5	60.0
เฉลี่ย	674.42	31.79	63.11	605.17	31.76	60.45	600.17	32.37	59.29
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						626.58 ppm			
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ						60.95			

A5 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์

A5 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	581	31.3	69.8	593	31.8	57.3	642	30.1	78.8
	571	31.1	69.0	587	31.8	58.1	630	30.0	78.6
	553	32.0	68.3	584	32.2	55.6	626	29.8	78.8
	545	32.0	68.1	580	32.2	55.5	610	30.3	78.1
กลางวัน	556	32.3	63.3	580	32.3	59.6	571	32.5	63.0
	557	32.0	64.6	581	32.6	58.2	579	33.2	64.5
	580	31.8	68.8	583	33.1	59.9	580	32.8	61.9
	571	32.0	64.9	578	32.6	58.6	581	33.2	62.0
เย็น	585	31.5	67.7	575	33.4	54.2	571	32.7	57.8
	588	31.4	67.8	576	33.5	51.2	570	32.6	57.0
	584	32.7	61.1	578	34.0	52.6	572	32.8	59.2
	576	33.1	63.5	577	33.3	51.6	570	32.5	60.3
เฉลี่ย	570.58	31.93	66.41	581.00	32.73	56.03	591.83	31.88	66.67
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )		581.14 ppm							
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ		63.04							



A6 โรงเรียนนาคคีอนุสรณ์

A6 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	610	31.1	67.3	593	29.5	73.8	591	31.3	69.5
	595	31.1	65.3	588	29.5	73.6	592	31.2	70.8
	580	31.6	62.0	602	30.9	67.8	588	30.6	72.4
	579	31.8	60.4	583	31.3	67.4	586	31.2	70.5
กลางวัน	573	32.3	56.1	576	34.8	51.1	571	33.2	60.3
	576	32.7	54.3	573	33.2	58.8	568	33.3	61.8
	574	33.0	56.9	570	33.3	58.7	563	33.2	69.5
	572	32.2	58.0	603	34.5	53.6	565	33.6	60.2
เย็น	551	32.1	60.3	604	32.4	63.9	568	32.3	62.9
	560	31.7	61.8	599	32.4	62.9	571	32.7	62.4
	568	32.2	60.3	589	32.1	67.1	572	32.9	68.1
	570	31.8	61.1	597	32.8	62.0	576	32.5	65.7
เฉลี่ย	575.67	31.97	60.32	589.75	32.23	63.39	575.92	32.33	66.18
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						580.44 ppm			
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ						63.29			

A7 โรงเรียนบ้านคลองหลวง

A7 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	598	32.5	54.6	581	32.5	55.2	572	32.1	59.5
	592	31.3	56.1	580	32.5	57.9	575	32.9	58.9
	591	32.1	56.0	586	32.2	59.2	578	32.5	57.5
	596	32.5	54.0	594	32.7	59.4	574	33.6	52.5
กลางวัน	619	34.5	55.5	573	35.2	54.8	614	34.9	57.1
	624	34.3	53.6	584	35.9	52.6	610	34.8	59.1
	618	36.5	50.7	587	35.0	52.0	605	34.1	50.9
	609	34.5	50.8	592	35.9	53.0	611	35.9	59.2
เย็น	573	35.2	52.3	601	32.1	51.1	609	30.9	73.6
	587	35.2	52.7	600	33.5	52.2	610	32.1	76.1
	595	34.5	57.8	599	31.2	50.1	605	31.7	70.9
	588	34.3	56.3	598	32.3	51.1	611	31.9	71.4
เฉลี่ย	599.17	33.95	54.20	589.58	33.42	54.05	597.83	33.12	62.23
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )							595.53 ppm		
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ							56.83		

A8 โรงเรียนวัดแพกษา

A8 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	598	31.6	66	585	31.4	65.4	593	29.5	73.8
	608	30.5	69.9	561	30.6	66.9	588	29.5	73.6
	637	30.7	70.1	560	30.3	70.6	602	30.9	67.8
	658	30.8	70.1	572	31	68.8	583	31.3	67.4
กลางวัน	748	31	63.9	565	31.2	66.9	607	31.6	63.1
	669	30.6	62.3	552	31.3	67.23	603	32.1	62.7
	698	30.6	65.6	555	31	68.23	602	32.2	64.9
	653	30.6	66	555	31.6	66.36	605	32.0	62.7
เย็น	577	32.8	57.4	564	31.9	64.7	595	32.7	62.7
	554	32.9	56.8	555	32.2	61.2	597	32.1	62.5
	551	32.2	56.9	550	31.8	63.4	600	31.9	63.9
	548	32.5	58.5	549	31.8	63.1	601	31.1	59.9
เฉลี่ย	624.92	31.40	63.63	560.25	31.34	66.07	598.00	31.41	65.42
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )		594.36 ppm							
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ		65.04							

A9 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์

A9 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	579	30.9	64.8	584	33.5	52.0	599	30.1	63.9
	607	34.7	65.4	586	32.7	52.5	608	30.9	70.2
	606	30.8	60.2	584	32.8	50.4	602	31.4	70.1
	620	30.6	60.1	582	33.1	53.8	609	31.3	69.2
กลางวัน	596	32.7	65.0	584	33.7	55.5	587	33.2	58.2
	590	32.6	66.8	590	33.4	56.8	589	33.5	57.5
	578	32.6	68.9	579	33	58.3	586	33.8	58.4
	577	32.8	68.7	581	32.3	59.6	585	33.8	56.9
เย็น	567	32.3	62.9	564	32.6	58.3	578	32.2	61.7
	570	32.2	62.4	563	32.9	56.8	571	32.3	64.3
	571	31.9	68.1	566	32.6	61.4	570	32.1	64.5
	575	32.0	65.0	569	32.6	60.5	567	32.5	60.8
เฉลี่ย	586.33	32.18	64.86	577.67	32.93	56.33	587.58	32.26	62.98
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						583.86 ppm			
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ						61.39			

B1 กม. 27+789 (โรงเรียนสมุทรปราการ)

B1 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	665	31.6	68.2	596	31.5	66.7	613	31.9	62.2
	624	31.4	66.8	599	31.2	64.2	615	32.1	67.7
	611	32.0	66.4	601	31.9	62.2	608	32.7	63.5
	607	31.5	63.7	605	32.0	60.1	619	32.5	61.5
กลางวัน	608	34.8	57.3	610	35.9	61.9	605	34.5	57.3
	609	34.9	58.1	615	34.9	63.1	610	34.9	58.1
	613	33.7	52.9	611	33.1	61.5	613	33.5	50.9
	611	34.9	60.1	608	33.9	60.9	608	34.7	59.1
เย็น	615	33.8	62.1	663	31.1	69.9	622	33.8	52.1
	614	33.1	60.2	623	30.9	65.9	613	34.1	59.2
	612	33.8	59.4	622	31.1	63.8	611	34.8	53.4
	619	33.7	59.0	633	31.5	61.9	620	33.7	53.0
เฉลี่ย	617.33	33.27	61.18	615.50	32.42	63.51	613.08	33.60	58.17
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )							615.31 ppm		
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ							60.95		

B2 กม. 31+580 (โยธา)

B2 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	611	33.1	60.7	618	32.3	67.3	597	32.1	57.3
	612	33.4	59.3	622	32.4	66.9	601	32.1	58.5
	614	33.2	59.2	624	31.9	65.9	605	32.9	57.1
	610	33.5	58.0	626	32.3	65.4	602	33.1	58.9
กลางวัน	601	34.8	55.1	595	34.1	56.3	587	34.9	56.2
	599	34.1	56.7	598	34.3	53.8	591	34.2	58.5
	597	34.0	56.2	597	34.3	57.1	599	33.9	55.9
	598	34.6	57.2	594	34.0	58.5	589	34.0	57.1
เย็น	594	33.1	60.2	593	32.7	53.9	585	32.9	56.5
	597	33.5	59.4	594	31.9	51.2	596	32.5	59.9
	596	32.5	61.5	592	30.5	54.1	594	32.7	56.6
	594	32.8	62.3	595	32.2	53.0	595	32.3	59.7
เฉลี่ย	601.92	33.55	58.82	604.00	32.74	58.62	595.08	33.13	57.68
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						600.33	ppm		
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ						58.37			

B3 กม. 36+443 (วัดศรีจันทร์ประดิษฐ์)

ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	619	33.0	51.7	680	29.6	77.8	609	31.9	65.3
	615	33.3	54.3	699	30.8	74.7	608	32.4	65.5
	611	33.2	53.2	682	31.5	71.0	611	32.8	64.0
	607	33.4	51.9	677	30.7	73.2	615	32.3	64.3
กลางวัน	593	34.2	52.4	567	34.6	47.7	596	33.6	55.0
	596	35.7	56.4	573	34.0	52.1	598	34.7	55.4
	594	33.2	58.4	572	34.7	49.8	593	33.1	54.6
	591	34.2	52.0	573	34.7	48.6	596	34.2	55.2
เย็น	595	34.2	51.8	592	34.3	49.3	595	33.4	58.8
	596	34.5	50.7	591	34.4	50.3	592	33.3	60.4
	596	34.9	50.1	593	34.0	50.8	596	33.1	61.4
	597	35.1	50.6	590	34.5	50.7	594	33.0	59.0
เฉลี่ย	600.83	34.08	52.79	615.75	33.15	58.00	600.25	33.15	59.91
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						605.61	ppm		
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ						56.90			

B4 กม. 34+080 (สามห้วง)

B4 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	584	31.7	65.1	599	29.8	79.3	635	32.6	65.0
	592	31.6	61.3	605	30.2	77.6	661	32.1	65.9
	598	32.1	60.0	606	29.1	80.5	656	32.9	65.8
	611	32.5	55.6	614	29.2	84.7	649	32.5	64.1
กลางวัน	592	34.1	52.8	602	33.8	59.2	606	33.6	57.8
	594	36.0	53.4	600	32.0	62.9	607	34.0	56.2
	603	34.3	49.1	598	34.7	53.6	607	33.0	58.0
	604	35.7	49.3	595	33.5	60.4	605	33.8	57.5
เย็น	590	33.8	54.0	588	34.1	50.5	586	33.9	56.5
	581	34.0	52.6	598	33.6	51.4	595	33.5	59.9
	580	34.1	52.9	599	34.0	49.3	596	33.7	56.6
	575	34.5	50.4	582	33.1	47.8	595	33.3	59.7
เฉลี่ย	592.00	33.70	54.71	598.83	32.26	63.10	616.50	33.24	60.25
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )							602.44 ppm		
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ							59.35		



B5 กม. 30+244 (การเคหะสมุทรปราการ)

B5 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	596	34.5	54.6	598	32.9	61.5	600	32.0	54.5
	591	34.3	56.1	592	33.1	62.7	598	31.5	56.0
	590	34.1	56.0	600	32.5	59.1	595	32.8	56.9
	597	34.5	54.0	598	32.9	57.2	599	32.7	55.2
กลางวัน	600	34.5	56.5	593	34.2	63.9	599	34.5	55.4
	595	34.0	59.0	599	34.9	60.1	590	34.7	52.5
	594	35.6	52.7	601	34.5	59.3	598	33.9	56.0
	592	34.7	55.2	603	33.9	52.1	591	34.6	52.7
เย็น	601	32.2	52.1	613	31.1	69.9	598	32.9	61.1
	595	31.5	51.1	610	31.9	65.9	594	33.5	59.1
	602	34.9	52.5	612	31.1	63.8	592	34.6	56.1
	600	33.5	53.1	613	31.5	61.9	597	33.5	51.1
เฉลี่ย	596.08	34.03	54.41	602.67	32.88	61.45	595.92	33.43	55.55
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )							598.22 ppm		
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ							57.14		

B6 ก.ม. 23+118 (บริษัทนมตรางะลิ)

B6 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	595	32.0	63.8	578	29.1	73.2	600	32.2	66.9
	596	32.7	60.6	576	29.5	71.7	606	31.1	68.7
	597	32.6	61.7	597	31.0	66.6	584	32.7	69.2
	592	32.4	62.5	596	31.1	66.2	585	31.7	69.5
กลางวัน	585	34.8	61.7	593	33.4	63.6	583	32.3	66.1
	588	34.2	63.5	607	33.0	64.0	581	32.7	65.1
	581	34.5	63.1	583	32.9	64.3	584	32.5	63.8
	584	34.7	62.7	586	33.3	65.5	596	32.7	58.1
เย็น	600	33.4	60.6	602	32.7	63.1	605	33.2	60.7
	603	33.6	57.7	597	32.1	63.5	603	34.9	62.3
	606	33.7	57.5	599	32.9	62.9	610	35.2	64.3
	599	35.0	56.7	601	32.1	59.9	608	32.2	66.1
เฉลี่ย	593.83	33.63	61.01	592.92	31.93	65.3	595.42	32.78	65.07
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> ) 594.06 ppm									
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ 63.82									

B7 ก.ม. 27+390 (โรงเรียนเสฉิ่งยิมพิทยานุกูล)

B7 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	610	32.0	69.8	593	29.5	73.8	601	31.0	73.3
	596	33.6	63.5	588	29.6	72.6	598	31.1	73.8
	592	32.6	69.5	587	30.2	72.5	607	31.6	69.1
	590	32.6	69.8	583	30.3	68.9	592	32.2	67.7
กลางวัน	591	33.6	57.8	596	33.1	56.5	596	33.3	57.7
	589	33.2	58.7	599	33.3	54.0	598	32.8	57.7
	588	33.8	58.2	598	32.3	57.2	579	32.0	60.4
	593	33.3	61.3	595	32.0	58.6	584	33.2	57.5
เย็น	597	33.2	58.7	599	32.7	62.7	598	33.1	60.7
	595	32.4	59.1	598	32.1	62.5	599	33.6	61.0
	593	32.0	59.8	595	32.9	63.9	600	32.0	61.3
	592	32.2	58.1	602	31.1	59.9	601	32.1	61.8
เฉลี่ย	593.83	32.88	62.03	594.42	31.59	63.59	596.08	32.33	63.50
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						594.78 ppm			
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)						ร้อยละ 63.04			

B8 กม. 29+220 (เขื่องฟาร์มจระเข้)

B8 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	608	31.5	74.6	597	32.4	61.5	593	33.1	57.3
	610	31.3	76.0	593	32.1	62.7	588	32.5	58.1
	607	31.6	72.8	599	32.3	62.1	598	32.3	51.9
	609	31.5	72.4	597	32.5	62.2	597	32.4	51.7
กลางวัน	608	34.1	52.8	594	34.6	58.9	602	33.8	59.2
	621	36.0	53.4	600	34.8	59.1	600	32.0	62.9
	631	34.3	52.1	602	34.9	59.3	598	34.7	53.6
	639	35.7	51.3	604	34.9	52.1	595	33.5	60.4
เย็น	596	35.2	52.7	595	32.7	62.7	598	34.1	60.5
	592	34.4	55.1	597	32.1	62.5	599	33.6	61.4
	591	35.0	52.8	599	31.9	63.9	600	34.0	59.3
	593	32.2	50.1	601	31.1	59.9	602	33.1	57.8
เฉลี่ย	608.75	33.57	59.68	598.17	33.03	60.5	597.50	33.26	57.84
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )							601.47 ppm		
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ							59.36		

B9 กม. 30+640 (สะพานคู่)

B9 ช่วงเวลา	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์								
	วันที่ 1			วันที่ 2			วันที่ 3		
	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %	CO <sub>2</sub> ppm	อุณหภูมิ C°	RH %
เช้า	556	32.7	66.0	590	32.0	59.2	595	32.0	56.4
	560	32.5	71.1	592	32.5	62.2	600	32.5	59.0
	558	33.0	67.6	597	32.9	57.1	594	32.6	53.7
	557	32.6	68.8	591	33.2	52.5	592	34.7	52.7
กลางวัน	596	35.2	52.7	637	34.9	61.9	597	34.8	68.8
	592	34.4	55.1	641	34.5	60.2	596	33.9	71.1
	590	34.1	53.7	639	33.4	62.4	591	35.0	52.8
	591	35.0	52.8	645	34.8	60.8	590	34.5	68.1
เย็น	611	33.2	60.7	608	34.6	60.1	599	34.3	61.5
	610	34.9	62.3	605	34.8	59.3	600	33.1	62.4
	612	35.2	64.3	601	34.2	61.3	603	34.3	60.3
	614	32.2	66.1	603	34.1	61.4	601	33.5	58.8
เฉลี่ย	587.25	33.75	61.77	612.42	33.83	59.87	596.50	33.77	60.47
เฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )						598.72 ppm			
เฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ร้อยละ						60.70			



ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี  
ครั้งที่

9<sup>th</sup>

ANNUAL  
CONCRETE  
CONFERENCE



ในวาระครบรอบ 20 ปี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา

21 - 23 ตุลาคม 2556  
ณ โรงแรมท็อปแลนด์  
อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก



จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย  
ร่วมกับ - คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา  
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 9

ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเต็มสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
คุณอนุชิต	เจริญศุภกุล	บริษัท วิสิทธ์ เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด
ศ.ดร.ชัย	จาตุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิรวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.วีระชาติ	ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.มงคล	นามลักษณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ปิติ	สุคนธ์สุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.เชิดชนินทร์	หมดมลทิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สมิตร	สงัพรียะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ณัฐพงศ์	มกระชัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.กิตติภูมิ	รอดสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วิรัช	เลิศไพฑูรย์พันธ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.วิทิต	ปานสุข	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.ณัฐวัฒน์	จุฑารัตน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศ.ดร.ปริญญา	จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.วันชัย	สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ดร.ธัชวีร์	ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รศ.ดร.สุวิมล	สัจจวานิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.นันทวัฒน์	ขมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.วรางคณา	แสงสร้อย	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.รัตติพงษ์	สหมิตรมงคล	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ผศ.ดร.ปิตินานต์	กร้ามาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จตุพล	ตั้งประกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.นัฐวุฒิ	ทิพย์โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



**บทความวิจัย สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง (MAT) (ต่อ)**

MAT-21	Drying Shrinkage and Thermal Expansion of Lightweight Aggregate Concrete mixed with Synthetic Lightweight Aggregates	MAT-106
MAT-22	Influence of aggregate size and compaction on properties of pervious concrete made of Mekong River's gravel	MAT-113
MAT-23	คอนกรีตบล็อกผสมเศษผนังปูนฉาบ	MAT-120
MAT-26	คุณสมบัติของคอนกรีตผสมมวลรวมเบาฝั่งตัวด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดพาราฟิน	MAT-220
MAT-27	อิทธิพลของการบ่มต่อการหดตัวโดยรวมของคอนกรีต	MAT-128
MAT-28	อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการคืบตัวแบบดึงของคอนกรีต	MAT-135
MAT-29	Evaluation of Cement and Fine Aggregate Replacement with Pulverized Fuel Ash and Rice Husk Ash on the Properties of Self-Compacting Concrete	MAT-141
MAT-30	Compressive Strength of Cellular Lightweight Concrete	MAT-148
MAT-32	คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตบล็อกปูถนนผสมเม็ดยางเสริมเส้นใยเหล็ก	MAT-248
MAT-34	สมบัติของคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมเบา	MAT-156
MAT-35	อิทธิพลของปริมาณแฉ่ายปาล์มน้ำมันต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต	MAT-198
MAT-36	กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมแคลไซต์แทนที่ทราย	MAT-242
MAT-37	การพัฒนาแผ่นใยไม้อัดซีเมนต์จากการประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติจากกากมะพร้าวและต้นข้าวโพด	MAT-164
MAT-38	ปูนฉาบผสมน้ำยางธรรมชาติ	MAT-171
MAT-39	รูปแบบอัตราเร่งและแรงเฉื่อยที่กระทำต่อแผ่นคอนกรีตกันกระสุนแบบสองชั้นทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและคอนกรีตผสมเม็ดยาง	MAT-234
MAT-40	ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริม และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมตะกั่วกันตาถลุงเหล็กบด และผงหินปูน	MAT-227
MAT-41	โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอย	MAT-178
MAT-42	การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น: กรณีศึกษาอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามในจังหวัดสมุทรปราการ	MAT-184
MAT-43	การพัฒนาอิฐดินซีเมนต์โดยใช้ดินตะกอนประปาและดินเหนียว	MAT-192
MAT-44	Water Evaporation from Painted Cement Paste: Experiment and Modeling	MAT-205

การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนชั้น:  
กรณีศึกษาอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามในจังหวัดสมุทรปราการ  
**Evaluation of damages and deteriorations of RC structures due to carbonation: Case study of school  
buildings and pedestrian bridges in Samutprakarn Province**

วีรยุทธ์ กเชนทร (Weerayut Khachenthon)<sup>1</sup>

ปีติสานต์ กร้ามาต (Pitisan Krammart)<sup>2</sup>

ทวีชัย ส้าราญวานิช (Taweechai Sumranwanich)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
wee\_2006@hotmail.com

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
pitisan.k@en.rmutt.ac.th

<sup>3</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา twe@buu.ac.th

**บทคัดย่อ:** บทความนี้มุ่งประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามเนื่องจากการเกิดคาร์บอนชั้นในจังหวัดสมุทรปราการ โดยตรวจสอบกำลังอัดคอนกรีต ระยะเวลาเหล็กเสริม ความหนาปูนฉาบ และความลึกคาร์บอนชั้นของชิ้นส่วนองค์อาคารต่างๆ ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 18 แห่ง จากผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดคอนกรีตและระยะเวลาเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าเฉลี่ยเกินค่าที่ออกแบบไว้ สำหรับผลคาร์บอนชั้นนั้นพบว่า โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะเวลาการใช้งานนานและขาดการบำรุงรักษามีความลึกคาร์บอนชั้นและสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นสูงกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน  
คำสำคัญ: การประเมิน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนชั้น อาคารเรียน สะพานลอยเดินข้าม

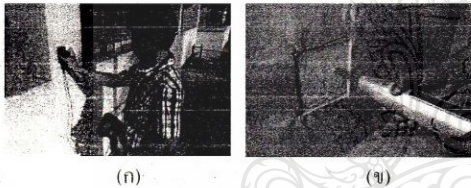
**ABSTRACT:** This paper aims to evaluate the damages and deteriorations of RC structures of school buildings and pedestrian bridges due to carbonation in Samutprakarn province. The compressive strength of concrete, covering depth of reinforcing steel and plastering thickness and carbonation depth of the members in 18-RC structures were examined. From the study, it was found that the compressive strength of concrete and covering depth of reinforcing steel of RC structures were higher than the values in design requirement. For the carbonation results, it was shown that the RC structures with the longer service time and the lack of maintenance had higher carbonation depth and carbonation coefficient than the RC structures in the same environment.

**KEYWORDS:** Evaluation, RC structures, Carbonation, School building, Pedestrian bridge

ทำการหาตำแหน่งเหล็กเสริมและหาระยะหุ้มเหล็กเสริม ด้วยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก ในตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่าง(รูปที่ 2ก) โดยใช้เครื่องมือ Profometer ในการตรวจสอบวัดค่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยแต่ละชั้นของอาคารเรียนได้เก็บข้อมูลชั้นละ 6 ตำแหน่ง ส่วนสะพานลอยเดินข้ามได้เก็บข้อมูลทั้งหมด 12 ตำแหน่ง ต่อ 1 สะพานลอยเดินข้าม

### 2.2.2 การวัดกำลังอัด

ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตครั้งนี้ ใช้ค้อนกระทบแบบชมิทท์ (Schmidt hammer) ในตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่าง ทำการทดสอบวัดค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต (รูปที่ 2ข) เก็บค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต 16 ค่าต่อ 1 ตำแหน่งการทดสอบ โดยแต่ละชั้นของอาคารเรียนได้เก็บข้อมูลชั้นละ 6 ตำแหน่ง ส่วนสะพานลอยเดินข้ามได้เก็บข้อมูลทั้งหมด 6 ตำแหน่งต่อ 1 สะพาน

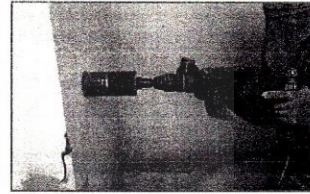


รูปที่ 2 การหาตำแหน่งเหล็กและวัดระยะหุ้มเหล็กและการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ

### 2.2.3 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบ

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้มุ่งตรวจสอบความลึกคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้าม โดยทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยส่วนหัวเจาะแบบ HOLESAW ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร (รูปที่ 3) โดยเก็บจากโครงสร้างเสาและคานของอาคารเรียน บริเวณกันสาดด้านหน้าและด้านหลังอาคารเรียน ชั้นละ 6 ตำแหน่ง ที่ความสูงแต่ละชั้น คือ ชั้น1 ( 1.00-1.50 เมตร ) ชั้น2 ( 3.50-4.00 เมตร ) และชั้น3 ( 6.50-7.00 เมตร ) เป็นต้น ในส่วนของสะพานลอยเดินข้าม ได้เก็บตัวอย่างทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ต่อ 1 โครงสร้างสะพาน ได้เก็บในส่วน

ของโครงสร้างเสาและคานรับบันได ที่ระดับความสูง ที่ 1.00-1.50 เมตร 3.00-3.50 เมตร และ 4.00-5.50 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3 การเจาะเก็บตัวอย่าง

### 2.2.4 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ทำการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์บริเวณ โครงสร้างที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีต ในการตรวจวัดครั้งนี้ใช้เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ High Accuracy รุ่น 77535 โดยวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด 3 วัน โดยในแต่ละวันจะวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงเวลาคือ ช่วงเช้า (เวลา 8:00-9:00 น.) ช่วงกลางวัน (เวลา 12:00-13:00 น.) และช่วงเย็น (เวลา 16:00 -17:00 น.) ในแต่ละ โครงสร้าง ที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ จะเก็บค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โครงสร้างละ 36 ค่า

### ตารางที่ 2 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH)

โครงสร้าง	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย(ppm)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย(%)	โครงสร้าง	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย(ppm)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย(%)
A1	606.42	45.13	B1	615.31	60.95
A2	580.44	52.95	B2	598.22	57.14
A3	580.05	46.22	B3	605.61	56.90
A4	594.39	65.04	B4	602.44	59.35
A5	626.58	60.92	B5	600.33	58.37
A6	583.86	61.39	B6	601.47	59.36
A7	580.44	63.29	B7	598.72	60.70
A8	581.14	63.04	B8	594.78	63.04
A9	595.53	56.83	B9	594.06	63.82

จากตารางที่ 2 พบว่าในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ระหว่างอาคารเรียนกับ

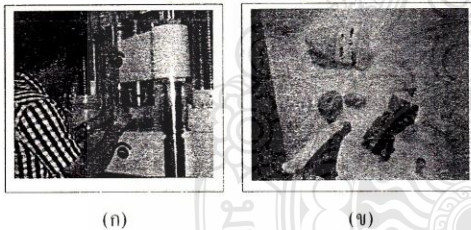
สะพานลอยเดินข้ามมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจากสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงกัน

**2.2.5 การทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชั่น**

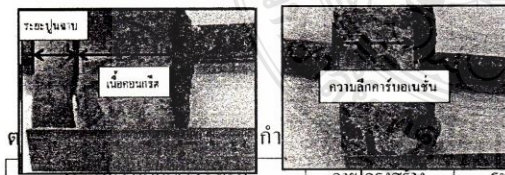
นำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ มาผ่าซีกเพื่อทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชั่น (รูปที่ 4ก) จากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง (โดยทั่วไปค่า pH ของคอนกรีตประมาณ 13) ในการทดสอบนี้ ได้ทำการแยกส่วนที่เกิดคาร์บอนเนชั่นออกจากส่วนที่ยัง

ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น โดยฉีกพื้นด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาไลนไป ยังผิวคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้ว (รูปที่ 4ข) ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงเข้มหาก pH ของคอนกรีตมีค่าน้อย คือประมาณ 9-10

การวัดความลึกคาร์บอนเนชั่น ถ้าเป็นโครงสร้างผิวฉาบปูน (อาคารเรียน) ให้วัดค่าความลึกคาร์บอนเนชั่น จากระยะคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมรวมกับระยะปูนฉาบ ตามรูปที่ 5ก สำหรับโครงสร้างที่ไม่ฉาบปูน (สะพานลอยเดินข้าม) ให้ วัดค่าความลึกคาร์บอนเนชั่น จากระยะคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่ไปจนถึงขอบเส้นของสีม่วงเข้ม ตาม รูปที่ 5ข



รูปที่ 4 การทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชั่น



โครงสร้างที่เขตรวดสอบ	อายุโครงสร้าง		ระยะหุ้มเหล็ก (มม.)		กำลังอัดคอนกรีต (กก.ต่อ ซม. <sup>2</sup> )		ความหนาปูนฉาบ (มม.)	
	(ปี)	(เดือน)	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
A1 โรงเรียนสมุทรปราการ	44	528	40.6	8.0	346.3	44.0	13.2	3.0
A2 โรงเรียนวัดคันลำโรง	30	360	37.4	7.4	324.8	43.2	13.8	3.0
A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม	29	348	39.4	9.4	306.9	22.4	14.8	2.7

MAT-187

(ก) กรณีฉาบปูน (ข) กรณีไม่ฉาบปูน

รูปที่ 5 การวัดความลึกคาร์บอนเนชั่น

**3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล**

จากผลการทดสอบ โครงสร้างอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามทั้ง 18 แห่ง พบว่าระยะหุ้มเหล็กเสริมที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 26-56 มม. ดังแสดงใน ตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4 โดยระยะหุ้มเหล็กเสริมมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ออกแบบมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 25 มม. ส่วนผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยวิธีการวัดแรงสะท้อนกลับของผิวคอนกรีตจากอุปกรณ์ Schmidt Hammer ทั้งหมด 18 แห่ง นั้น สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดคอนกรีต โดยอาศัยข้อมูลความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) [4-5]

$$f'_c = -176.4 + (12.446 \times RN) \dots\dots\dots (1)$$

โดยที่  $f'_c$  คือ กำลังอัดคอนกรีต (กก./ซม.<sup>2</sup>)

RN คือ ค่าการสะท้อน (Rebound number)

โดยผลของกำลังอัดของโครงสร้างเฉลี่ยทั้ง 18 แห่ง อยู่ระหว่าง 280-405 กก./ซม.<sup>2</sup> ดังแสดงใน ตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4 ซึ่งพบว่า กำลังอัดเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ออกแบบมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 240 กก./ซม.<sup>2</sup> สำหรับระยะความหนาปูนฉาบที่ได้ทดสอบ (ตารางที่ 3) พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 13-18 มม. ซึ่งค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงของเกณฑ์ออกแบบไว้คือ 15 มม.

A4 โรงเรียนวัดเพรทกษา	5	60	52.8	11.1	283.2	27.2	17.6	1.6
A5 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม	20	240	46.8	5.8	322.3	12.4	15.0	0.9
A6 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์	5	60	55.4	8.6	282.1	10.0	14.8	1.4
A7 โรงเรียนนาคคือนุสรณ์	14	168	46.8	8.2	303.7	23.1	18.3	3.3
A8 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์	16	192	42.9	8.9	299.9	31.7	15.8	4.5
A9 โรงเรียนบ้านคลองหลวง	10	120	41.0	5.8	309.0	19.3	15.2	0.8

ตารางที่ 4 ระบุหุ้มเหล็กเสริม กำลังอัดคอนกรีตและความหนาของปูนฉาบ ของ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม

โครงสร้างที่เข้าตรวจสอบ	อายุโครงสร้าง		ระบุหุ้มเหล็ก (มม.)		กำลังอัดคอนกรีต (กก.ต่อ ซม.)		ความหนาปูนฉาบ (มม.)	
	(ปี)	(เดือน)	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
B1 กม. 27+789	18	216	37.1	3.9	359.6	55.3	NA	NA
B2 กม. 30+244	11	132	39.2	7.2	371.6	20.0	NA	NA
B3 กม. 36+443	16	192	36.7	4.0	284.1	12.1	NA	NA
B4 กม. 34+080	15	180	37.6	7.6	405.2	55.3	NA	NA
B5 กม. 31+580	18	216	56.9	8.8	326.9	48.0	NA	NA
B6 กม. 29+220	4	48	42.7	7.8	284.6	6.0	NA	NA
B7 กม. 30+640	4	48	43.6	3.3	289.0	13.3	NA	NA
B8 กม. 27+390	6	72	26.4	7.3	305.4	10.2	NA	NA
B9 กม. 23+118	11	132	32.2	7.85	328.3	20.1	NA	NA

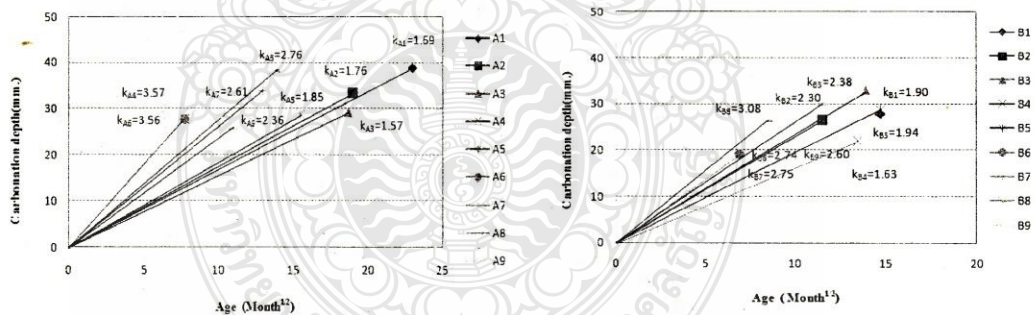
NA หมายถึง ไม่มีข้อมูล เนื่องจากโครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามเป็นคอนกรีตเปลือย ความหนาปูนฉาบจึงมีค่าเท่ากับศูนย์

ตารางที่ 5 ความลึกคาร์บอนเนชั่นและสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารเรียน

โครงสร้างที่เข้าตรวจสอบ	อายุโครงสร้าง		ความลึกคาร์บอนเนชั่น (มม.)		สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น, $k$ (มม./เดือน <sup>1/2</sup> )	
	(ปี)	(เดือน)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
A1 โรงเรียนสมุทรปราการ	44	528	38.8	8.8	1.69	0.38
A2 โรงเรียนวัดคันสำโรง	30	360	33.4	8.4	1.76	0.46
A3 โรงเรียนวัดทรงธรรม	29	348	29.2	4.4	1.57	0.25
A4 โรงเรียนวัดเพรทกษา	5	60	27.7	1.6	3.57	0.22
A5 โรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม	20	240	28.6	2.9	1.85	0.20
A6 โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์	5	60	27.6	2.6	3.56	0.35
A7 โรงเรียนนาคคือนุสรณ์	14	168	33.8	6.0	2.61	0.47
A8 โรงเรียนเอี่ยมสุรีย์	16	192	38.2	6.1	2.76	0.46
A9 โรงเรียนบ้านคลองหลวง	10	120	25.8	2.6	2.36	0.24

ตารางที่ 6 ความลึกคาร์บอนเนชั่นและสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น ของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม

โครงสร้างที่เข้าตรวจสอบ	อายุโครงสร้าง		ความลึกคาร์บอนเนชั่น(มม.)		สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น, $k$ (มม./เดือน <sup>1/2</sup> )	
	(ปี)	(เดือน)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
B1 กม. 27+789	18	216	27.9	5.9	1.90	0.39
B2 กม. 30+244	11	132	26.4	6.2	2.30	0.52
B3 กม. 36+443	16	192	33.0	6.1	2.38	0.43
B4 กม. 34+080	15	180	21.9	7.2	1.63	0.52
B5 กม. 31+580	18	216	28.6	4.4	1.94	0.29
B6 กม. 29+220	4	48	19.0	3.9	2.74	0.61
B7 กม. 30+640	4	48	19.0	3.7	2.75	0.52
B8 ก.ม. 27+390	6	72	26.2	3.6	3.08	0.42
B9 ก.ม. 23+118	11	132	29.9	3.2	2.60	0.30



(ก) โครงสร้างอาคารเรียน

(ข) โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่นและอายุของโครงสร้าง

จากตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 แสดง ความลึกคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ยของอาคารเรียนและสะพานลอยเดินข้ามทั้ง 18 แห่งพบว่า โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุการใช้งานนานมีความลึกคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน

ส่วน รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชั่นและอายุของโครงสร้าง ซึ่งพบว่าความลึกคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ย โครงสร้างอาคารเรียน มีค่าอยู่ระหว่าง 25-38 มม. และ โครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามมีค่าอยู่ระหว่าง 18-32 มม. ทั้งนี้ อาจเนื่องจากสภาพอายุโครงสร้าง (อายุการใช้งาน) ที่แตกต่างกัน

กัน และคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างที่แตกต่างกัน (กำลังอัดคอนกรีต) นั้นเอง

อย่างไรก็ตามจากอายุของโครงสร้างและความลึกคาร์บอนชั้น สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นได้จากสมการที่ (2) [2]

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

โดยที่

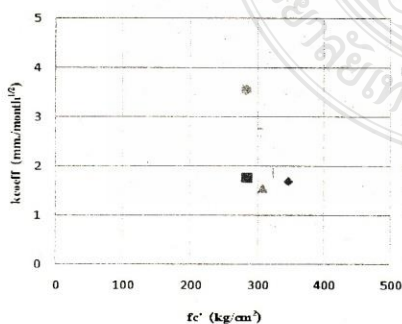
d คือ ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)

t คือ เวลาที่โครงสร้างเผชิญคาร์บอนชั้น ในที่นี้ใช้เท่ากับอายุของโครงสร้าง (เดือน)

k คือ สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (มม./เดือน<sup>1/2</sup>)

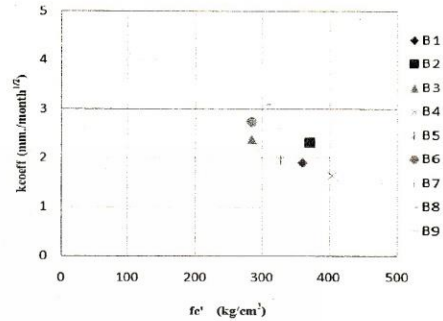
จากผลการทดสอบโครงสร้างสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (k) ได้ค่าดัง ตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 พร้อมได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนชั้นและอายุของโครงสร้าง ดังรูปที่ 6 (ก) และ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของอาคารเรียน มีค่าอยู่ระหว่าง 1.57 - 3.57 มม./เดือน<sup>1/2</sup> ส่วนโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม มีค่าอยู่ระหว่าง 1.63 - 3.08 มม./เดือน<sup>1/2</sup> ซึ่งพบว่า สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามมีค่าน้อยกว่าของอาคารเรียน เนื่องจากคุณภาพของคอนกรีต (กำลังอัดคอนกรีต) ที่แตกต่างกัน และโครงสร้างที่มีอายุมากมีแนวโน้มที่ความลึกคาร์บอนชั้นมากกว่าโครงสร้างที่มีอายุน้อย เนื่องจากเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ความลึกคาร์บอนชั้นเพิ่มมากขึ้นไปด้วย

A อาคารเรียน



(ก) โครงสร้างอาคารเรียน

B สะพานลอยเดินข้าม



(ข) โครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นกับกำลังอัดของโครงสร้าง

และจาก รูปที่ 7 คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นกับกำลังอัดของโครงสร้างพบว่า คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงมีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นต่ำกว่า คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำอย่างเห็นได้ชัด

4. สรุปผล

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากผลการทดสอบโครงสร้างอาคารเรียนและ สะพานลอยเดินข้ามทั้ง 18 แห่ง จากการประเมินกำลังอัดและ ระยะเวลาหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างอาคาร พบว่าค่าเฉลี่ยสูงเกิน ค่าที่ได้ออกแบบไว้
2. ในสภาพแวดล้อมเดียวกันพบว่าอัตราการพัฒนา ความลึกคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารเรียนมีแนวโน้มช้า กว่าของโครงสร้างสะพานลอยเดินข้าม
3. โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะเวลาการใช้งาน นานและขาดการบำรุงรักษามีความลึกคาร์บอนชั้นและ สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นสูงกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน
4. คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงมีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น ต่ำกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่า

[3] N.I Fattuhi, 1986. "Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period", Materials and Structures, Vol. 19, 131-136.

[4] สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล และคณะ 2551. "โครงการศึกษาวิจัยการสึกกร่อนของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดจากน้ำทะเล," ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร (SIIT) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 1-173.

[5] Japan Society of Civil Engineers, 2005. "Standard specifications for concrete structure-2001", Japan, Yotsuya 1-chome.

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาจังหวัดสมุทรปราการเขต 1 สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาเขต 6 ที่ให้ความอนุเคราะห์เข้าตรวจสอบโครงสร้างอาคารเรียน และขอขอบคุณแขวงการทางสมุทรปราการ ที่ให้ความอนุเคราะห์เข้าตรวจสอบโครงสร้างสะพานลอยเดินข้ามสำหรับการศึกษาในครั้งนี้

#### 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.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวีรยุทธ์ คเชนทร
วัน เดือน ปีเกิด	20 มิถุนายน 2518
ที่อยู่	91 หมู่ 7 หมู่บ้านคำปลาฝา ตำบลขมมื่น อำเภอเมืองกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ 64000
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	รับราชการครู ตำแหน่งครูชำนาญการพิเศษ ประจำแผนกวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคสมุทรปราการ
เบอร์โทรศัพท์	08-9304-2150
อีเมล	wee_2006@hotmail.com

