

การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น
ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

EVALUATIONS OF THE DAMAGE AND DETERIORATION OF
REINFORCED CONCRETE BUILDINGS DUE TO CARBONATION
IN URBAN AREA OF CHON BURI PROVINCE

สุพจน์ ธรรมนิทา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น
ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

สุพจน์ ธรรมนิทา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ใน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

.....
(นายสุพจน์ ธรรมนิทา)



หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

Evaluations of the Damage and Deterioration of Reinforced Concrete Buildings due to Carbonation in Urban Area of Chon Buri Province

ชื่อ - นามสกุล

นายสุพจน์ ธรรมนิทา

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.

ปีการศึกษา

2563

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

.....
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ, Ph.D.)

.....
..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.)

.....
..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 14 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี
ชื่อ-นามสกุล	นายสุพจน์ ธรรมนิทา
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะพบปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ส่งผลเสียต่อความสามารถด้านกำลังรับแรง และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลงด้วย ดังนั้นการประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้นสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบการเกิดคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยทำการวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม วัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมและประเมินกำลังอัดประลัยของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก พร้อมเจาะเก็บชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความเสี่ยงการเกิดสนิมและทำนายอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้สมการของ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนชั้นของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.1332-55)

ผลการศึกษาพบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี มีค่าระหว่าง 31 ถึง 43 มิลลิเมตร และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าระหว่าง 225 ถึง 367 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ยของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรีมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 53 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.18 ถึง 2.73 มิลลิเมตร/ปี^{1/2} สุดท้ายด้วยวิธีการตามสมการ Fick's first law of diffusion และมยพ.1332-55 สามารถวิเคราะห์ความเสี่ยงและทำนายอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของอาคารที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนชั้นตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

คำสำคัญ: อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนชั้น อายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซม จังหวัดชลบุรี

Thesis Title	Evaluations of the Damage and Deterioration of Reinforced Concrete Buildings due to Carbonation in Urban Area of Chon Buri Province
Name-Surname	Mr. Suphot Tamnitar
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Academic Year	2020

ABSTRACT

Reinforced concrete (RC) structures exposed to carbon dioxide environment causes rust of the reinforcing steel. Consequently, it reduces the ability to withstand loads and shortens the service life of the concrete structures. Therefore, the assessment of the risk of rust caused by carbonation can be used for designing, planning, and maintaining RC structures.

This research aimed to investigate carbonation depth of RC buildings in urban area of Chon Buri province. Carbon dioxide (CO₂) concentration and relative humidity (RH) of the environment, cover thickness and compressive strength of RC buildings, and carbonation depth of RC buildings were measured. The samples of RC buildings in urban area of Chon Buri province were used for this study. The data were used to analyze the risk of rust caused by carbonation and to predict repair-free service life of RC buildings using Fick's First Law of Diffusion Equation and durability design of carbonation structure of Department of Public Works and Town & Country Planning (DPT 1332-55).

The research results revealed that the RC buildings had the average cover thickness and the compressive strength of 31-43 mm and 225-367 kg/cm², respectively. Besides, the average carbonation depth and coefficient of RC buildings were 5-53 mm and 0.18-2.73 mm/year^{0.5}, respectively. Finally, the proposed method of Fick's First Law of Diffusion Equation and DPT 1332-55 could predict and calculate the repair-free service life of RC buildings exposed to CO₂. The results of this study could be used for designing, planning and maintaining RC building exposed to the carbonation environment as well as preventing damages that would occur in the future.

Keywords: reinforced concrete building, carbonation, repair-free service life, Chon Buri province

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษางานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการสอบ รวมถึงขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ทวีชัย สำราญวานิช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภักวีวัฒน์ แสนเจริญ และรองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยนี้ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ รวมถึงภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และขอขอบคุณบุคลากรเจ้าหน้าที่ของภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยเล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากงานวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สุพจน์ ธรรมนิทา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(15)
บทที่ 1 บทนำ.....	19
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	19
1.2 วัตถุประสงค์.....	20
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	20
1.4 ประโยชน์ของการศึกษา.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	57
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	61
3.1 อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ที่ศึกษาในครั้งนี้.....	62
3.2 การตรวจพินิจอาคาร.....	64
3.3 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์.....	64
3.4 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก.....	65
3.5 การหาตำแหน่งเหล็กเสริมและวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม.....	66
3.6 การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น.....	67
3.7 การหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น.....	69
3.8 การวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นและการทำนายอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองจังหวัดชลบุรี.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	73
4.1 ตรวจสอบนิจอาคาร.....	73
4.2 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์.....	75
4.3 กำลังอัดคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก.....	78
4.4 ตำแหน่งเหล็กเสริมและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม.....	78
4.5 การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน.....	81
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน.....	82
4.7 การวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชันและการทำนายอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	102
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
บรรณานุกรม.....	103
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก ระยะเวลาคาร์บอนเนชัน.....	106
ภาคผนวก ข ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มปลอกเหล็ก.....	112
ภาคผนวก ค ข้อมูลปฏิบัติงานภาคสนาม.....	120
ภาคผนวก ง ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick Frist Law.....	145
ภาคผนวก จ ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็กมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง.....	188
ภาคผนวก ฉ รูปภาพการปฏิบัติงาน.....	232
ภาคผนวก ช เอกสารการประชุมวิชาการ.....	238
ประวัติผู้เขียน.....	250

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องคำนึงถึงตามลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อมของโครงสร้าง	38
ตารางที่ 2.2 ค่าแนะนำอายุการใช้งานปลอดภัยของคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทต่างๆ	40
ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (a).....	41
ตารางที่ 2.4 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป.....	42
ตารางที่ 2.5 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม	44
ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด	45
ตารางที่ 2.7 ความกว้างรอยร้าวมากที่สุดที่ยอมรับได้	45
ตารางที่ 2.8 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต	46
ตารางที่ 2.9 สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น.....	48
ตารางที่ 2.10 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น.....	48
ตารางที่ 2.11 รายการวิธีการทดสอบโครงสร้างแบบไม่ทำลาย.....	50
ตารางที่ 3.1 โครงสร้างอาคารและอายุอาคารที่ใช้ในการศึกษา.....	61
ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งพิกัดของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการการศึกษา.....	63
ตารางที่ 3.3 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น	72
ตารางที่ 4.1 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....	76
ตารางที่ 4.2 กำลังอัดประลัย (โดย Schmidt Hammer)และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม.....	79
ตารางที่ 4.3 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยเฉลี่ย (X) ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ย (d) และค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ย (k) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี.....	82
ตารางที่ 4.4 ระยะคาร์บอนเนชั่นและสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีต.....	83
ตารางที่ 4.5 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ.....	86
ตารางที่ ก.1 ระยะคาร์บอนเนชั่นของอาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย.....	105

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ก.2 ระยะคาร์บอนเนชั่นของอาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล.....	107
ตารางที่ ก.3 ระยะคาร์บอนเนชั่นของอาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส.....	107
ตารางที่ ก.4 ระยะคาร์บอนเนชั่นของอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย.....	108
ตารางที่ ก.5 ระยะคาร์บอนเนชั่นของอาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี.....	108
ตารางที่ ก.6 ระยะคาร์บอนเนชั่นของอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี.....	108
ตารางที่ ก.7 ระยะคาร์บอนเนชั่นของอาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี.....	109
ตารางที่ ก.8 ระยะคาร์บอนเนชั่นของอาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี.....	109
ตารางที่ ก.9 ระยะคาร์บอนเนชั่นของอาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์).....	109
ตารางที่ ก.10 ระยะคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์เฉลิมไทย.....	110
ตารางที่ ก.11 ระยะคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี.....	110
ตารางที่ ก.12 ระยะคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส.....	110
ตารางที่ ก.13 ระยะคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี.....	111
ตารางที่ ก.14 ระยะคาร์บอนเนชั่นของสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย.....	111
ตารางที่ ข.1 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย.....	113
ตารางที่ ข.2 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล.....	113
ตารางที่ ข.3 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส.....	114
ตารางที่ ข.4 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย.....	114
ตารางที่ ข.5 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี.....	115
ตารางที่ ข.6 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี.....	115
ตารางที่ ข.7 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี.....	116
ตารางที่ ข.8 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารห้างสรรพสินค้าพอรัมพลาซ่าชลบุรี.....	116
ตารางที่ ข.9 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์).....	117
ตารางที่ ข.10 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยก เฉลิมไทย.....	118
ตารางที่ ข.11 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้าม วท.อาชีวศึกษา ชลบุรี.....	118

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ข.12 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	118
ตารางที่ ข.13 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาล ชลบุรี.....	119
ตารางที่ ข.14 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	119
ตารางที่ ค.1 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารไปรษณีย์ สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 1	121
ตารางที่ ค.2 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคาร ไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 2	123
ตารางที่ ค.3 ค่า Rebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคารไปรษณีย์ สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 3.....	125
ตารางที่ ค.4 ค่า Rebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคารไปรษณีย์ สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 4.....	127
ตารางที่ ค.5 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคาร โรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 1.....	129
ตารางที่ ค.6 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคาร โรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 2.....	131
ตารางที่ ค.7 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคาร โรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 3.....	133
ตารางที่ ค.8 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 4.....	135
ตารางที่ ค.9 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส จุดทดสอบที่ 1.....	137
ตารางที่ ค.10 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส จุดทดสอบที่ 2.....	139
ตารางที่ ค.11 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคาร โรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส จุดทดสอบที่ 3.....	141

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ค.12 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคาร โรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส จุดทดสอบที่ 4.....	143
ตารางที่ ง.1 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 0 ปี.....	146
ตารางที่ ง.2 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 5 ปี.....	148
ตารางที่ ง.3 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 10 ปี.....	150
ตารางที่ ง.4 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 15 ปี.....	152
ตารางที่ ง.5 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 20 ปี.....	154
ตารางที่ ง.6 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 25 ปี.....	156
ตารางที่ ง.7 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 30 ปี.....	158
ตารางที่ ง.8 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 35 ปี.....	160
ตารางที่ ง.9 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 40 ปี.....	162
ตารางที่ ง.10 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 45 ปี.....	164
ตารางที่ ง.11 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 50 ปี.....	166
ตารางที่ ง.12 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 55 ปี.....	168
ตารางที่ ง.13 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 60 ปี.....	170
ตารางที่ ง.14 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 65 ปี.....	172
ตารางที่ ง.15 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 70 ปี.....	174
ตารางที่ ง.16 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 75 ปี.....	176
ตารางที่ ง.17 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 80 ปี.....	178
ตารางที่ ง.18 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 85 ปี.....	180
ตารางที่ ง.19 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 90 ปี.....	182
ตารางที่ ง.20 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 95 ปี.....	184
ตารางที่ ง.21 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 100 ปี.....	186
ตารางที่ จ.1 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 0 ปี.....	189
ตารางที่ จ.2 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 5 ปี.....	191

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และออโตจีเนียส	24
รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	28
รูปที่ 2.3 รวบรวมคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชัน.....	34
รูปที่ 2.4 แบรีเออร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชัน.....	34
รูปที่ 2.5 สภาพผิวของถังก่อนการที่เสียหายเนื่องจากคาร์บอนเนชัน ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนออกเห็นเหล็กเสริม ซึ่งทำให้มีโอกาสเกิดสนิมได้เร็วขึ้น เพราะน้ำและออกซิเจน สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ง่าย.....	35
รูปที่ 2.6 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน.....	48
รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่แก้วลอยในวัสดุประสาน.....	49
รูปที่ 2.8 เครื่องมือทดสอบ Schmidt Hammer	51
รูปที่ 2.9 เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กเสริม	53
รูปที่ 2.10 เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ Extech รุ่น CO ₂ 50.....	53
รูปที่ 2.11 การทดสอบและวัดระยะคาร์บอนเนชัน	54
รูปที่ 2.12 โค้งการแจกแจงแบบปกติ	55
รูปที่ 2.13 ผลต่างค่าเฉลี่ยตัวอย่างจากประชากร.....	57
รูปที่ 3.1 แผนภาพการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	61
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการศึกษา.....	63
รูปที่ 3.3 สภาพแวดล้อมโดยรอบของสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย.....	64
รูปที่ 3.4 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณที่อาคารตั้งอยู่.....	65
รูปที่ 3.5 การทดสอบกำลังอัดของโครงสร้างคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ.....	66
รูปที่ 3.6 การหาตำแหน่งเหล็กและการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม.....	67
รูปที่ 3.7 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่านหัวเจาะแบบ Hole Saw.....	67
รูปที่ 3.8 แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะเพื่อทดสอบระยะการเกิดคาร์บอนเนชัน.....	68
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบ UTM และการผ่าซีกตัวอย่างเพื่อทดสอบระยะการเกิดคาร์บอนเนชัน...	68
รูปที่ 3.10 แท่งตัวอย่างคอนกรีตหลังฉีดพ่นด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาลิน.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 การวัดระยะการเกิดคาร์บอนเนชั่น.....	69
รูปที่ 3.12 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น	72
รูปที่ 3.13 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่ถ้ำลอยในวัสดุประสาน.....	72
รูปที่ 4.1 การแตกร้าวและหลุดร่อนของปูนฉาบบริเวณใต้ท้องคานชั้นที่ 1 ของอาคาร โรงเรียนชลกันยานุกูล.....	73
รูปที่ 4.2 การแตกร้าวและหลุดร่อนของโครงสร้างต่อม่อของสะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี.....	74
รูปที่ 4.3 ปัญหาน้ำฝนรั่วซึมและการหลุดร่อนของสีอาคารของวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี.....	74
รูปที่ 4.4 รอยร้าวพื้นและผนังชั้นที่ 4 ของอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี.....	75
รูปที่ 4.5 ท้องพื้นชั้น 5 เกิดกะเทาะเห็นเหล็กเสริมเป็นสนิมของอาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันทนุสรณ์).....	75
รูปที่ 4.6 ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	77
รูปที่ 4.7 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....	77
รูปที่ 4.8 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต.....	80
รูปที่ 4.9 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	81
รูปที่ 4.10 ระยะการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารที่ศึกษา.....	84
รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารที่ศึกษา.....	84
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุ โครงสร้างของอาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย.....	87
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุ โครงสร้างของอาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล.....	87
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุ โครงสร้างของอาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส.....	88
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุ โครงสร้างของอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย.....	88
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุ โครงสร้างของอาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนกับอายุ โครงสร้างของอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี.....	89
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนกับอายุ โครงสร้างของอาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี.....	91
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนกับอายุ โครงสร้างของอาคารห้างสรรพสินค้าพอร์มล่าซ่าชลบุรี.....	91
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนกับอายุ โครงสร้างของอาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันทนุสรณ์).....	91
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนกับอายุ โครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย.....	91
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนกับอายุ ของโครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี.....	92
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนกับอายุ โครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส.....	92
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนกับอายุ โครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี.....	93
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนชั้นกับอายุ โครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย.....	93
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุการใช้งานตลอดการ ซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของ จังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion.....	95
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นกับอายุการใช้งานตลอดการ ซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของ จังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion.....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลดการ ซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของ จังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสผิวสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันรุนแรง.....	97
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลดการ ซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของ จังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสผิวสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันรุนแรง.....	98
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลดการ ซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของ จังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อ ผิวคอนกรีตไม่สัมผัสผิวสความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง	99
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลดการ ซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมือง ของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสผิวสความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันทั่วไป	100
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลดการ ซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมือง ของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมืองกรณี เมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสผิวสความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง...	100
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลดการ ซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมือง ของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสผิวสความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันทั่วไป..	101

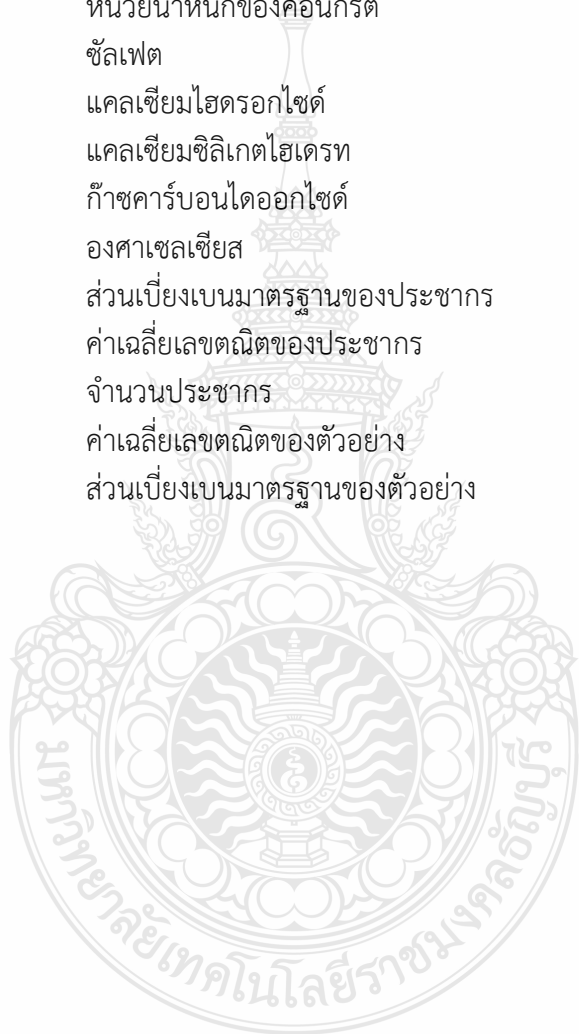
สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ฉ.1 หาดำแหน่งของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา.....	190
รูปที่ ฉ.2 สภาพของอาคารที่เลือกทำการศึกษา.....	191
รูปที่ ฉ.3 ทำการวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของ อากาศ.....	191
รูปที่ ฉ.4 การหาดำแหน่งเหล็กและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม.....	192
รูปที่ ฉ.5 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ.....	192
รูปที่ ฉ.6 การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่าง.....	193
รูปที่ ฉ.7 นำตัวอย่างคอนกรีตมาผ่าซีกด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)	193
รูปที่ ฉ.8 ทำการฉีดยาละลายฟีนอล์ฟราลีน.....	194
รูปที่ ฉ.9 ทำการวัดระยะการเกิดคาร์บอนเนชั่น.....	194



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_0	ระยะหุ้มเหล็กเสริม
C_{\min}	ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้คงทน
F'_c	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต
w/b	ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
erf	สมการ error function
P_{concrete}	หน่วยนำหนักของคอนกรีต
SO_4^{2-}	ซัลเฟต
Ca(OH)_2	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
C-S-H	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
CO_2	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
σ	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร
μ	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของประชากร
N	จำนวนประชากร
X	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของตัวอย่าง
S	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารทั้งอาคารที่พักอาศัยทั่วไป จนถึงอาคารขนาดใหญ่ อาคารสูง และอาคารสาธารณะ ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างอาคาร คอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะคำนึงถึงเรื่องของความปลอดภัยในการต้านแรงจากภายนอกที่กระทำต่อตัวอาคารหรือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อองค์อาคารและวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างอาคาร เช่น ปูน ทราย หิน สารผสมเพิ่ม และน้ำยาผสมคอนกรีตเป็นหลัก แต่ในส่วนของความคงทนและอายุการใช้งานนั้นไม่ได้มีการตระหนักถึง โดยสังเกตได้จากข้อกำหนดของการออกแบบที่ไม่ได้เน้นในส่วนของความคงทนของโครงสร้างอาคารต่อสภาวะแวดล้อมและกำลังของคอนกรีตในระยะยาว ถึงแม้กรมโยธาธิการและผังเมืองจะได้กำหนดมาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน (มยพ.1332-55) เพื่อใช้ประกอบในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทนและมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมต่างๆ เพื่อให้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานที่เหมาะสม แต่ในทางปฏิบัติมาตรฐานดังกล่าวจะไม่ค่อยได้รับการใส่ใจเท่าที่ควรเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานงานก่อสร้างทั่วไป โดยปกติอายุการใช้งานปลอดภัยของอาคารจะอยู่ในช่วง 20-50 ปี ขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดของอาคาร แต่ถ้าหากอาคารเหล่านั้นตั้งอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอาคาร ก็อาจจะส่งผลให้อายุการใช้งานของอาคารเหล่านั้นน้อยกว่าที่ควรจะเป็น อันจะส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมก่อนเวลาอันควรหรืออาจจะต้องระงับการใช้งานอาคารเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานอาคารนั้น

สภาวะแวดล้อมที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของอาคารหรือสภาวะแวดล้อมที่มีการทำลาย เช่น สิ่งแวดล้อมบริเวณชายทะเล หรือสิ่งแวดล้อมที่มีปริมาณซัลเฟตสูง สิ่งแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง ล้วนส่งผลให้โครงสร้างของอาคารเกิดความเสียหาย อีกทั้งยังเร่งอัตราการเสื่อมสภาพของอาคารหากไม่ได้รับการป้องกันที่ถูกต้อง ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมในองค์อาคาร โดยการทำให้เกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริมส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านน้ำหนักบรรทุกของตัวอาคาร อันจะส่งผลให้อายุการใช้งานของอาคารสั้นลง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อาคารแต่ละประเภทนอกจากมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจแตกต่างกัน เช่น เชื้อเพลิง ถ่านหิน สนิมบิน โครงสร้างพื้นฐาน เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อเศรษฐกิจแตกต่างกัน เช่นเดียวกันหากต้องเกิดการปิดเพื่อการซ่อมแซม ยกตัวอย่างเช่น อาคารที่พักอาศัยจะมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศน้อยกว่าอาคารสาธารณะหากต้องทำการปิดเพื่อการจะไม่ว่าด้วยสาเหตุใดๆก็ตาม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการพิจารณาถึงความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมโดยรอบอาคารนั้นมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของตัวอาคารเช่นเดียวกัน

จังหวัดชลบุรีซึ่งตั้งอยู่ในภาคตะวันออกของประเทศไทยและเป็นจังหวัดที่ติดกับชายทะเล นอกจากนี้ยังมีนิคมอุตสาหกรรมตั้งอยู่ในพื้นที่ ด้วยสภาพทางภูมิศาสตร์และเศรษฐกิจของจังหวัด ทำให้อาคารส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีการทำลายสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารบริเวณชายทะเลและอาคารที่อยู่ในบริเวณการจราจรหนาแน่นนั้นมีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของตัวอาคารเนื่องจากสภาวะแวดล้อมดังกล่าว ดังนั้นเพื่อเป็นการรับมือและป้องกันการเสื่อมสภาพของอาคารในพื้นที่จังหวัดชลบุรี

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี เพื่อที่จะได้ทราบถึงการเสื่อมสภาพของอาคารที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการทำลาย และจะได้นำผลการศึกษาไปใช้ในการประเมินความเสี่ยงสำหรับพื้นที่อื่น ๆ ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน นอกจากนี้จะได้สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับความคงทนของอาคารในสภาพแวดล้อมที่มีการทำลายต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1. เพื่อสำรวจเก็บข้อมูลของความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

1.2.2 เพื่อประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

1.2.3 เพื่อทำนายอายุปลอดภัยการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1. พื้นที่ศึกษาคืออาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยมีอาคารจำนวน 9 อาคาร (อาคารของส่วนราชการ) และสะพานลอยคนเดินข้าม 5 สะพาน

1.3.2. สำรวจเก็บข้อมูลของความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

1.3.2.1 วัดความเข้มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณที่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตั้งอยู่

1.3.2.2 วัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และตรวจสอบกำลังอัดของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.3.2.3 เจาะเก็บตัวอย่างของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อวัดการเกิดคาร์บอนเนชั่น

1.3.3. วิเคราะห์ประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

1.3.4. วิเคราะห์อายุปลอดภัยการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

1.4 ประโยชน์ของการศึกษา

1.4.1 ทราบถึงข้อมูลของความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

1.4.2 ทราบถึงความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

1.4.3 ทราบถึงอายุปลอดภัยการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

1.4.4 สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบและการวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และป้องกันความเสียหายที่จะเกิดในอนาคต



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต [1]

การเสื่อมสภาพ (deterioration) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุ เนื่องจากแรง สิ่งแวดล้อมหรืออิทธิพลภายใน ทำให้คอนกรีตหรือเหล็กเสริมภายในคอนกรีต มีความสามารถในการรับน้ำหนักหรือความคงทนต่ำลง เช่น การแตกร้าวของคอนกรีต การหลุดร่อนของคอนกรีต การบวมตัวของคอนกรีต การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การสูญเสียกำลังของคอนกรีต การสูญเสียกำลังของเหล็กเสริม เป็นต้น

ในการที่จะออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการนำสภาวะแวดล้อมโดยรอบอาคารมาพิจารณาด้วยนั้น วิศวกรผู้ออกแบบควรมีความเข้าใจถึงลักษณะการเสื่อมสภาพของคอนกรีตในสภาวะการใช้งานอาคารภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆกันเสียก่อน จึงจะสามารถออกแบบได้อย่างถูกต้องตามสภาพแวดล้อมที่อาคารนั้นตั้งอยู่ โดยการเสื่อมสภาพของคอนกรีตนั้นสามารถจำแนกได้ 5 ชนิดตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพ ดังต่อไปนี้

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

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

3) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) ได้แก่ การขัดสี (Abrasion) การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitation)

4) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวรูป (Biological Deterioration) ได้แก่ การเสื่อมสภาพ โดยตะไคร่ รา รากพืช หรือ แบคทีเรียบางประเภท

5) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (Mixed Process) เช่น การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

2.1.1.1 การหดตัวของคอนกรีตแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) [1]

การหดตัวของคอนกรีตมักจะเกิดขึ้นในซีเมนต์เฟส การหดตัวของคอนกรีตมีหลายประเภทเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน และเกิดขึ้นจากสาเหตุที่แตกต่างกันไป ชนิดของการหดตัวอาจสรุปได้เป็น 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

- การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage หรือ Hydration Shrinkage)
- การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage)
- การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage)
- การเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation)

การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงก่อนการก่อตัว เป็นการหดตัวที่มักไม่ก่อให้เกิดผลเสียหายนต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วและมักไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต เนื่องจากจะเกิดมากในช่วงเวลาเริ่มแรกก่อนเวลาการก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตมักจะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยไม่เกิดหน่วยแรงและลักษณะของการหดตัวจะเป็นการสร้างช่องว่างในเจล (Gel Pores) ของผลิตภัณฑ์ของไฮเดรชัน ซึ่งจะเป็นผลทางจุลภาค (Microscopic Volume Reduction) จึงไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรของคอนกรีตโดยรวม ดังนั้นการหดตัวประเภทนี้ในช่วงก่อนการก่อตัวของคอนกรีตจึงไม่ค่อยได้รับความสนใจมากนัก แต่ส่วนที่หดตัวหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวสุดท้ายแล้ว จะเป็นปัญหาและจะคิดรวมอยู่ในการหดตัวแบบออโตจีเนียส

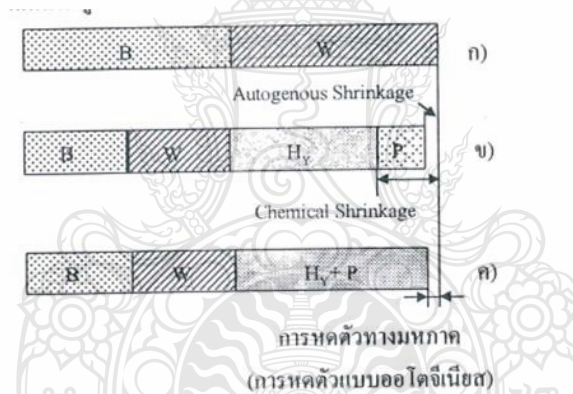
การหดตัวอีก 3 แบบที่เหลือเป็นการหดตัวชนิดที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยรวมของคอนกรีตซึ่งจะนำไปสู่การแตกร้าวได้ถ้ามีการยึดรั้ง และจำเป็นต้องคำนึงถึงในการออกแบบคอนกรีตให้คงทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งรายละเอียดของการหดตัวเหล่านี้จะได้กล่าวถึงต่อไป

กลไกของการหดตัวแบบออโตจีเนียส

การหดตัวแบบออโตจีเนียสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีต รวมกับอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างแคปิลลารี (Capillary Pores) ในเฟสดี เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ ทำให้เกิด (Capillary Suction) ชื้นในช่องว่างแคปิลลารี มีผลให้คอนกรีตหดตัวจากแรง (Capillary Suction) นี้ วัสดุประสานในที่นี้หมายถึงรวมทั้งปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานทั้งหลาย เช่น เถ้าลอย เถ้าตะกอนเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟูม เป็นต้น การหดตัวแบบออโตจีเนียสแตกต่างจากการหดตัวแบบแห้งตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเอง การหดตัวแบบออโตจีเนียสเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติจะมีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลในทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีต ก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยมวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

ในอดีตการหดตัวแบบนี้ไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้กันในอดีตมักเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคัพิลลารี (Capillary Pores) มาก มีขนาดใหญ่และต่อเนื่อง ดังนั้นความชื้นในคอนกรีตจึงสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง และน้ำจากการบ่มก็สามารถเข้าถึงภายในคอนกรีตได้ ทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้มีค่าต่ำจนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบ แต่แนวทางตรงกันข้าม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตชนิดใหม่ๆ ขึ้นมาหลายชนิด ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและมีปริมาณเพสต์มาก เช่น คอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) และคอนกรีตที่ไม่ต้องใช้เครื่องเขย่า (Self-Compacting Concrete) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาแล้ว คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคัพิลลารีที่น้อยกว่า มีขนาดเล็กกว่า และมีความต่อเนื่องของช่องว่างคัพิลลารีน้อยกว่าหรืออีกนัยหนึ่ง มีค่าความชื้นน้ำต่ำมาก ดังนั้นเมื่อความชื้นในช่องว่างคัพิลลารีถูกใช้ไปในปฏิกิริยา จึงเป็นการยากที่ความชื้นจากส่วนอื่น หรือความชื้นจากการบ่มจะเข้ามาเสริมในบริเวณดังกล่าวได้ จึงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้สูงจนไม่สามารถละเลยได้ในการออกแบบ

ซึ่ง B วัสดุประสาน W น้ำ P ช่องว่างที่แทรกตัวอยู่ในผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน H_v ผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน



รูปที่ 2.1 แบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และออโตจีนัส [1]

ในรูปที่ 2.1 อธิบายถึงแบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และออโตจีนัส โดย (ก) ปริมาตรของวัสดุประสานและน้ำ ก่อนทำการผสม (ข) ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์หลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไปแล้วบางส่วน ปริมาตรที่ลดลงทั้งหมดนี้คือการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical Shrinkage) ซึ่งมักไม่มีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต (ค) แสดงส่วนที่หดตัวทางมหภาค โดยส่วนที่หดตัวทางจุลภาคจะเป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นในผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันและไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในคอนกรีต

2.1.1.2 การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) [1]

การหดตัวแบบแห้งเกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำ และเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่

กลไกของการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง มีกลไกการเกิดเช่นเดียวกับการเกิดรอยแตกแบบพลาสติก นั่นคือในคอนกรีตบริเวณผิวสัมผัสกับอากาศ มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องว่างคappelle (Capillary Pores) มาก เนื่องจากสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) ไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคappelle ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลงหรือหดตัวลงจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการหดตัวถูกยึดอีกครั้ง ไม่ว่าจะด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่เกิดการสูญเสียความชื้น รอยแตกร้าวก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยึดครั้งก่อนนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่าสูงกว่ากำลังแรงดึงของคอนกรีตในขณะนั้น การแตกร้าวแบบพลาสติกตรงที่ช่วงเวลาการเกิด

การแตกร้าวแบบพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก และสามารถแก้ไขได้ง่าย โดยการตกแต่งผิวคอนกรีตก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว ส่วนแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ซึ่งไม่สามารถจะตกแต่งผิวใหม่ได้แล้ว

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง

เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งเกิดจากการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีตไปสู่บรรยากาศแวดล้อม ดังนั้นปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีต จึงมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งทั้งสิ้น ปัจจัยดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

1. ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรต่อคอนกรีต คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตมาก จะมีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) มาก น้ำอิสระเป็นน้ำที่สามารถจะระเหยออกจากคอนกรีตไปได้

2. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง จะทำให้มีช่องว่างคappelle (Capillary Pores) มาก ปริมาณน้ำอิสระก็จะมากด้วย การที่คอนกรีตมีช่องว่างคappelle มาก จะทำให้ระเหยน้ำออกจากคอนกรีตได้สะดวก

3. ปริมาณมวลรวม โดยปกติแล้วการหดตัวจะเกิดในซีเมนต์เฟส ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เฟสน้อยหรืออีกนัยหนึ่ง มีปริมาณมวลรวมมาก ก็จะทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง

4. ชนิดและคุณรูปของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมมักจะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของปริมาตร ดังนั้นมวลรวมจึงมีคุณสมบัติที่จะช่วยต่อต้านการหดตัวในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามวลรวมมีโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง การแตะกันของมวลรวมเป็นกลไกที่สำคัญอันหนึ่งของการต้านทานการหดตัวซึ่งเกิดจากซีเมนต์เฟสได้ มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก ก็มักจะก่อให้เกิดการหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตมากตามไปด้วย ตัวอย่างมวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก เช่น มวลรวม(Light Weight

AGGREGATE) เป็นต้นซึ่งปกติแล้วมวลรวมที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงก็มักจะมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำด้วย ทำให้แรงต้านทานการหดตัวต่ำตามไปด้วย ขนาดคละของมวลรวมที่ดี ก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้การหดตัวของคอนกรีตลดลงเนื่องจากจะทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลง

5. ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้สารปอซโซลาน หรือวัสดุบางชนิด ก็มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น ถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต และถ้าถ้าลอยบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อย ทำให้ชดเชยการหดตัวบางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้เนื่องจากช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้กับคอนกรีต การใช้ผงฝุ่นหินก็อาจช่วยลดการหดตัวแบบแห้งด้วยเช่นกัน ถ้าการใช้นั้นไม่เป็นการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต เป็นต้น

6. อุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น

7. มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็ว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ง่าย

2.1.1.3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริม (Corrosion of steel Reinforcement) [1]

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างสูงของคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะของความเป็นด่างสูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Process) ได้ นั่นคือเหล็กจะไม่เกิดการแตกตัวออกเป็นไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ($2e$) ได้เลย ความเป็นด่างในคอนกรีต โดยปกติมีอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12.5 ถึง 13.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสม และส่วนผสมของคอนกรีต คุณรูปของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมก็เป็นปัจจัยที่สำคัญของการควบคุมการเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย

กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ ก็ต่อเมื่อเงื่อนไขทั้ง 3 ประการดังต่อไปนี้ต้องเกิดขึ้น

1. ความแตกต่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Process) สามารถเกิดได้ ซึ่งความแตกต่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤต (Critical Level) ของความแตกต่าง ความแตกต่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยหลายสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ คาร์บอนเนชั่น (Carbonation) การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต หรือแม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุนมาก ซึ่งกลไกของการทำให้ความแตกต่างลดลงโดยแต่ละสาเหตุได้แยกอธิบายเป็นหัวข้อต่างหากต่อไปนี้

2. มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ไอออนของเหล็ก(Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และพอเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นจะมีเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว

3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่าง แต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยมาก ดังนั้น คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาอาจจะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม

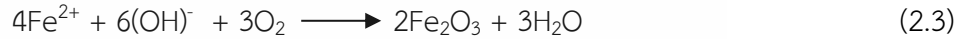
กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม รูปที่ 2.1 ในคอนกรีตจะเริ่มต้นด้วยการที่ความแตกต่างของคอนกรีตในบริเวณที่หุ้มรอบๆเหล็กเสริมอยู่ มีค่าความแตกต่างลดลง จนถึงระดับวิกฤต และบริเวณรอบๆเหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้นดังสมการต่อไปนี้



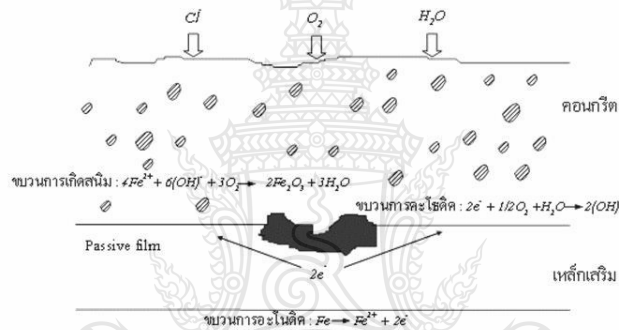
โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic Process) ต่อจากนั้น $2e^-$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนบริเวณเดียวกัน หรือบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ดังสมการต่อไปนี้



ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแคโทดิก (Cathodic Process) หลังจากนั้นปฏิกิริยาการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



โดยที่ Fe_2O_3 ก็คือเฟอริกออกไซด์ หรือสนิมนั่นเอง ซึ่งปฏิกิริยาที่ (2.3) นั้นอาจจะเกิดต่างบริเวณกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิกก็ได้ ซึ่งก็หมายความว่าสนิมอาจเกิดคนละบริเวณกับบริเวณที่สูญเสียเนื้อเหล็กก็ได้



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [1]

ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตสูญเสียกำลังรับแรงลงไปจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีอยู่ 2 ประการ คือ

1) ขนาดของเหล็กบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอน) จะเล็กลงเนื่องจากเนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน (e^-) ทำให้พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงในบริเวณดังกล่าวลดลงตามขนาดของเหล็กที่ลดขนาดลง

2) การเกิดสนิมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาณมากกว่าเหล็กเดิมที่สลายตัวเข้าสู่สารละลาย ซึ่งในบางกรณีสนิมเหล็กอาจจะมีปริมาณมากกว่า 6 เท่าของเหล็กเดิม ถ้าปริมาณน้ำและออกซิเจนมีมาก และบริเวณที่เกิดสนิมอาจเป็นบริเวณข้างเคียงบริเวณที่เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนก็ได้ ดังนั้นจะทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ (Splitting Crack)

2.1.1.4 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์ (Steel Corrosion due to Chloride) [1]

กลไกการมีคลอไรด์ในคอนกรีตและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (chloride ion) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีต ที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด (วสท.1014-40) แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือทะเลที่ใช้สารละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing Salt) ซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตโดยวิธีดังต่อไปนี้

- 1) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction)
- 2) การแพร่ของไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต
- 3) การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานัก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash Zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริม น้อยมาก

ในบริเวณใต้น้ำทะเล ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีต เป็นช่องว่างอิมมิดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย

2.1.1.5 การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) [1]

เกลือซัล (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟตที่พบมากธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เป็นต้น

แหล่งของเกลือซัลเฟต

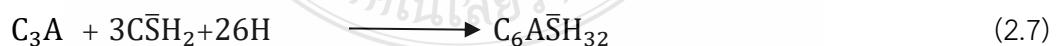
เกลือซัลเฟตจะมีมากอยู่ในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในดินบริเวณทะเล หรือ ดินทั่วไป เกลือซัลเฟตชนิดที่พบมากที่สุดมักจะเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือแมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังมักพบอยู่ในน้ำเสียจากบ้านเรือน หรือตามแหล่งน้ำพุตามธรรมชาติ

กลไกของการทำลายโดยซัลเฟต

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟต สามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์สมอร์ต้าหรือคอนกรีตไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต หรือแคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต(NS) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MS) แทน เมื่อสารทั้งสองดังกล่าวปรากฏอยู่ใน ดิน น้ำทะเล น้ำเสีย ก็มีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจกลไกการทำลายโดยซัลเฟต เพื่อที่จะได้ป้องกันโครงสร้างคอนกรีตจากสิ่งแวดล้อมที่อันตรายดังกล่าว

กลไกการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

กลไกนี้เริ่มต้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต(NS) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์(CH) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการ (2.4) ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์(NH) ซึ่งทำให้ค่า pH ของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นเป็น 13.5 ซึ่งมากกว่าค่า pH ของสารละลาย CH อิมตัวที่มีค่าเพียง 12.4 ดังนั้นจึงเป็นการรักษาเสถียรรูปของ C-H-S และ Ettringite ($C_6A\bar{S}H_{32}$) ไม่ให้ทำปฏิกิริยากลายไปเป็นผลผลิตอื่น สารยิปซั่ม (CSH_2) ที่ได้จากสมการ (2.4) จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต($C_4A\bar{S}H_{12}$) และ/หรือไตรแคลเซียมอลูมิเนต(C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้ Secondary Ettringite อีก ดังแสดงในสมการ (2.5) ถึง (2.7) เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นผลที่เกิดจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต

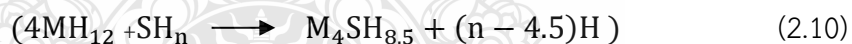


โดยที่ C คือ C_3O , N คือ NA_3O , M คือ M_3O , S คือ S_1O_2 , \bar{S} คือ SO_3 , H คือ H_2O

กล่าวโดยสรุป การทำลายโดยโซเดียมซิลเฟตนั้นขึ้นอยู่กับเกิดการ Secondary Ettringite ดังแสดงในสมการ (2.5) ถึง (2.7) สารตั้งต้นในสมการดังกล่าวมีองค์ประกอบของอลูมิเนียมตม ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์ต้านโซเดียมซิลเฟต จึงมีเหตุผลที่ต้องจำกัดปริมาณ C_3A ให้น้อยกว่าร้อยละ 5 ถ้าปริมาณ C_3A มีอยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 8 การทำลายโดยโซเดียมซิลเฟต มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น และถ้าปริมาณ C_3A มีมากกว่าร้อยละ 8 การทำลายน่าจะเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอีกสองประการ ที่มีอิทธิพลต่อการทำลายในลักษณะนี้คือ ปริมาณ C_4AF ซึ่งแม้ว่าจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลเฟตได้น้อยกว่า C_3A แต่มีกลไกการพัฒนาลายกับการเกิด Ettringite แต่มีการขยายตัวน้อยกว่า ส่วนองค์ประกอบอีกประการหนึ่งคือ NH ที่เป็นผลผลิตจากสมการ (2.4) ซึ่งทำให้ Ettringite มีเสถียรรูป ดังนั้นจึงทำให้การขยายตัวมีมากขึ้น นอกจากนี้ยิปซั่มที่ได้จากสมการ (2.4) ยังมีปริมาณมากกว่าสารตั้งต้น ดังนั้นถ้าต้องการผลิตปูนซีเมนต์ที่ต้านทานซิลเฟต ต้องลดปริมาณ CH ลง พร้อมกับจำกัดปริมาณ C_3A และ C_4AF ในการลดปริมาณ CH ทำโดยการลดอัตราส่วน C_3S/C_2S ลง หรือใช้ปูนซีเมนต์ผสม

กลไกการทำลายโดยแมกนีเซียมซิลเฟต

กลไกการทำลายเริ่มต้นจากปฏิกิริยาในสมการ (2.8) อย่างไรก็ตาม MH ที่เกิดขึ้นนี้ไม่เหมือนกับ NH ตรงที่มีความสามารถในการละลายน้ำที่น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่า 10.5 ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่มีเสถียรรูป

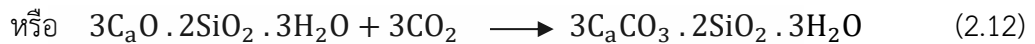
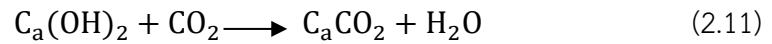


ดังนั้นกลไกในการทำลายโดยแมกนีเซียมซิลเฟตจะเริ่มต้นจากสมการ (2.9) ถึง (2.10) โดยการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย การทำลายดังกล่าวจะทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของผิวซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว และเกิดการสะสมของยิปซั่มและ Brucite อย่างไรก็ตาม ในที่สุด Brucite จะถูกเปลี่ยนไปเป็น M-S-H ดังแสดงในสมการ (2.10) โดยที่ไม่เกิดการขยายตัวมากอย่างกรณีการทำลายโดยโซเดียมซิลเฟต

2.1.1.6 การเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation) [1]

คาร์บอนเนชันเป็นขบวนการที่เปลี่ยนผลผลิตบางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งโดยปกติมักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนเนต โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลไกของการเกิดคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชันเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮดรท (C-S-H) บริเวณผิวหน้าหรือใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ตามสมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.11) และ (2.12)



ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยา (2.11) มากกว่า (2.12) และในความเป็นจริงแล้วทั้งสองปฏิกิริยาก็ต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาพของสารละลาย คอนกรีตที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลงเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอนเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังนั้นคาร์บอนเนชันจะค่อยๆ คืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น

เนื่องจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิทจะไม่เกิดคาร์บอนเนชัน เนื่องจากในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทก็ไม่มีน้ำในการทำปฏิกิริยา ดังนั้น คาร์บอนเนชันจะรุนแรง ในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-Dry) นั่นคือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาก

ผลของคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชันทำให้เกิดผลที่สำคัญ 3 ประการ คือ

- 1) ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง
- 2) ทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนเนชันเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤต
- 3) ทำให้เกิดการหดตัว (Carbonation shrinkage) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ภายใต้หน่วยแรงอัด ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ผลของคาร์บอนเนชันทั้ง 3 กรณีนี้ ในกรณีที่ 2 คือ กรณีที่ทำให้ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ ทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนเนชันจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชัน

- 1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ชื้นและแห้งเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอนเนชันรุนแรง
- 2) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ยิ่งมากก็จะทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันรุนแรง
- 3) อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันดำเนินไปเร็ว
- 4) ความพรุนของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำต่ำจะเกิดคาร์บอนเนชันได้เร็วและมาก
- 5) การใช้สารปอซโซลานบางชนิด จะทำให้เกิดคาร์บอนเนชันมากขึ้นถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไป

การป้องกันการเกิดคาร์บอนเนชัน

- 1) ออกแบบให้คอนกรีตมีความพรุนต่ำ เช่น ใช้ปริมาณน้ำน้อย อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ หรือใช้วัสดุเติมช่องว่าง (Filler) เช่น ซิลิกาฟูม จะช่วยให้คอนกรีตมีอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันลดลง
- 2) บ่มคอนกรีตให้ดี การบ่มคอนกรีตให้ยาวนานขึ้นจะทำให้คอนกรีตบริเวณผิวและใกล้ผิวคอนกรีตมีความทึบน้ำดีขึ้น
- 3) สำหรับการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก ควรออกแบบคอนกรีตหุ้มเหล็กให้หนาขึ้นถ้าทราบ ว่าโครงสร้างดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่คาร์บอนเนชันรุนแรง

รูปที่ 2.3 ถึง 2.5 แสดงตัวอย่างความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตที่เกิดจากคาร์บอนเนชัน โดยราวสะพานและแบรีเออร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ริมถนน ซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีความชื้นสัมพัทธ์พอประมาณ ทำให้เกิดคาร์บอนเนชันได้ง่าย เมื่อความเป็น

ต่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤติแล้ว จะทำให้เกิดการเป็นสนิมในเหล็กเสริมขึ้น ทำให้คอนกรีต หุ้มเหล็กเสริมกะเทาะออกตามแนวเหล็กเสริม ส่วนรูปที่ 2.5 สภาพผิวของถังน้ำคอนกรีตที่เสียหาย เนื่องจากคาร์บอนเนชั่น ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนออกเห็นเหล็กเสริม ซึ่งทำให้มีโอกาสเกิด สนิมได้เร็วขึ้น เพราะน้ำและออกซิเจนสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ง่าย



รูปที่ 2.3 รวบรวมภาพคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น [1]



รูปที่ 2.4 แบรีเออร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น [1]



รูปที่ 2.5 สภาพผิวของถ้ำน้ำคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากคาร์บอนเนชัน ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนออกเห็นเหล็กเสริม ซึ่งทำให้มีโอกาสเกิดสนิมได้เร็วขึ้น เพราะน้ำและออกซิเจนสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ง่าย [1]

2.1.2 มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน [2]

“การเสื่อมสภาพ (deterioration)” หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุ เนื่องจากแรง สัมผัสหรืออิทธิพลภายใน ทำให้คอนกรีตหรือเหล็กเสริมภายในคอนกรีต มีความสามารถในการรับน้ำหนักหรือความคงทนต่ำลง เช่น การแตกร้าวของคอนกรีต การหลุดร่อนของคอนกรีต การบวมตัวของคอนกรีต การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การสูญเสียกำลังของคอนกรีต การสูญเสียกำลังของเหล็กเสริม เป็นต้น

“การหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage)” หมายถึง การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นจากคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงด้านความยาวหรือปริมาตร

“การหดตัวแบบออโตจีนัส (autogenous shrinkage)” หมายถึง ผลรวมของการหดตัวทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (chemical shrinkage) และการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างแคปิลลารีในเพสต์ ทำให้เกิดแรงดึงแคปิลลารี (capillary tension) ขึ้นในช่องว่างแคปิลลารี ซึ่งมีผลให้คอนกรีตหดตัว (physical shrinkage due to self-desiccation) ทั้งนี้ไม่รวมการหดตัวแบบแห้งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นให้กับสิ่งแวดล้อม

“ความคงทน (durability)” หมายถึง ความสามารถของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในการต้านทานการเสื่อมสภาพ

“ความลึกคาร์บอนเนชัน (carbonation depth)” หมายถึง ระยะที่วัดจากผิวของคอนกรีตเข้าไปข้างในเนื้อคอนกรีตจนถึงแนวแบ่งแยกระหว่างส่วนที่เกิดคาร์บอนเนตและยังไม่เกิดคาร์บอนเนต จากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

“คาร์บอนเนชัน (carbonation)” หมายถึง ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสิ่งแวดล้อมกับสารละลายไฮดรอกไซด์ในเพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีต ได้ผลลัพธ์เป็นสารประกอบคาร์บอนเนต

“ปลอดการซ่อมแซม (repair-free)” หมายถึง การที่ไม่ต้องทำการซ่อมแซมองค์อาคารของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งนี้ไม่รวมถึงการตรวจสอบต่างๆในด้านวิศวกรรมโยธา

“ระยะหุ้มเหล็กเสริม (covering)” หมายถึง ระยะที่วัดจากผิวคอนกรีตถึงผิวนอกสุดของเหล็กปลอกเดี่ยว หรือเหล็กปอกเกลียว หรือเหล็กลูกตั้ง ในกรณีไม่มีเหล็กดั่งกล่าว ให้วัดถึงผิวของเหล็กเสริมที่อยู่ใกล้กับผิวนอกที่สุด

“วัสดุเติมเต็ม (filler)” หมายถึง วัสดุผงที่สามารถใช้ทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์หรือใส่เติมเพิ่มเข้าไปในวัสดุประสาน แต่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือพอลิเมอไรเซชันได้ เช่น ผงหินปูน, ผงแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

“วัสดุประสาน (binder)” หมายถึง วัสดุผงที่ใช้ประสานมวลรวมเข้าด้วยกัน อาจเป็นปูนซีเมนต์ไฮเดรต สารพอลิเมอร์ หรือผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ ที่ก่อตัวเป็นคอนกรีตมอร์ตาร์

“อายุการใช้งาน (service life)” หมายถึง ระยะเวลาในการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตโดยที่โครงสร้างคอนกรีตดังกล่าวยังมีความแข็งแรงและความปลอดภัยในระดับที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบได้

“อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซม (repair free service life)” หมายถึง ระยะเวลาในการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงนับตั้งแต่วันที่สร้างเสร็จภายใต้มาตรฐานการก่อสร้างที่ดีและมีการใช้งานและบำรุงรักษาถูกต้องตามหลักวิชาการและวัตถุประสงค์ในการออกแบบโดยไม่จำเป็นต้องได้รับการซ่อมแซมโครงสร้าง ทั้งนี้ไม่รวมถึงการตรวจสอบด้านวิศวกรรมโยธาที่จำเป็นต้องตรวจสอบเป็นประจำอยู่แล้ว โครงสร้างคอนกรีตอาจมีรอยร้าวได้แต่ต้องมีขนาดรอยร้าวไม่เกินกว่าที่มาตรฐานนี้กำหนด ยกเว้นรอยร้าวที่เกิดจากการใช้งานผิดวัตถุประสงค์หรืออุบัติเหตุหรือภัยพิบัติทางธรรมชาติ

2.1.2.1 สมบัติของคอนกรีตเมื่อพิจารณาเรื่องความคงทน [2]

สถานะของคอนกรีตก็เป็นสิ่งสำคัญที่วิศวกรควรทราบ เนื่องจากในสถานะที่แตกต่างกันความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตก็แตกต่างกันเช่นเดียวกัน โดยคอนกรีตสามารถแบ่งออกเป็น 5 สถานะตามอายุของคอนกรีตดังต่อไปนี้

1) คอนกรีตสด (Concrete in Fresh State) หมายถึง คอนกรีตหลังจากการผสมแล้ว จนถึงช่วงเสร็จสิ้นการเทคอนกรีตแล้ว

2) คอนกรีตในสถานะพลาสติก (Concrete in Plastic State) หมายถึง คอนกรีต หลังจากเสร็จสิ้นการเท จนถึงเวลาที่คอนกรีตก่อตัวขั้นสุดท้าย

3) คอนกรีตในสถานะอายุเริ่มต้น (Concrete in Early Age State) หมายถึง คอนกรีต ช่วงหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายจนถึงช่วงเวลาที่คอนกรีตจะพัฒนากำลังรับแรงได้ถึงค่ากำลังที่ออกแบบไว้

4) คอนกรีตในสถานะแข็งตัวแล้ว (Concrete in Hardened State) หมายถึง คอนกรีต หลังจากพัฒนากำลังได้ถึง หรือเกินค่ากำลังที่ออกแบบไปแล้ว

5) คอนกรีตในสภาวะยาวนาน (Concrete in Long-Term State) หมายถึง คอนกรีต ในสภาวะ แข็งตัวแล้วโดยมีอายุเกินกว่าอายุที่ใช้ออกแบบกำลัง และต้องคงทนเป็นเวลายาวนานใน สภาวะแวดล้อม

คอนกรีตในสภาพแวดล้อมต่างๆ

ในอดีตที่ผ่านมาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการกำหนดข้อกำหนดของคอนกรีต เป็นลักษณะเดียวกัน แม้ว่าสภาพแวดล้อมของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ใน สภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้น ในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้ พิจารณาถึงปัญหาด้านความคงทนที่จะต้องเผชิญในแต่ละลักษณะสภาวะแวดล้อม ดังในตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องคำนึงถึงตามลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อมของ
โครงสร้าง [2]

ลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อม	การออกแบบให้คำนึงถึงหัวข้อความคงทนต่อไปนี้เป็นหลัก
1. น้ำจืด	การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ก) ใต้น้ำ	การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และ/หรือ การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ข) เฉลิมรั่วจักรเปิกสลับแห้ง	
ค) บรรยากาศบริเวณที่สัมผัสละอองน้ำได้	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมทั่วไป
2. น้ำกร่อย	การต้านทานซัลเฟต และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริม
ก) ใต้น้ำ	เนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล และ/หรือ การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ข) เฉลิมรั่วจักรเปิกสลับแห้ง	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล และ/หรือ การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ค) บรรยากาศบริเวณที่สัมผัสละอองน้ำได้	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล
3. น้ำทะเล	การต้านทานซัลเฟต และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริม
ก) ใต้น้ำ	เนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล และ/หรือ การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ข) เฉลิมรั่วจักรเปิกสลับแห้ง	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล และ/หรือ การสึกกร่อนของผิวคอนกรีต
ค) บรรยากาศบริเวณที่สัมผัสละอองน้ำได้	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น และ/หรือ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์จากน้ำทะเล
4. น้ำเสีย	การต้านทานกรดซัลฟูริก และ การต้านทานซัลเฟต หรือ สารเคมีอื่นๆ
5. ใต้ดิน และใต้พื้นที่องทะเล	การต้านทานซัลเฟต
ก) มีซัลเฟต	ไม่มี
ข) ไม่มีซัลเฟต	

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องคำนึงถึงตามลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อมของ
โครงสร้าง [2] (ต่อ)

ลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อม	การออกแบบให้คำนึงถึงหัวข้อความคงทนต่อไปนี้เป็นหลัก
6. ดินผิวดิน (เช่น ตอม่อ คานคอดิน โครงสร้างบริเวณดินผิวดิน) ก) สัมผัสคลอไรด์ ข) ไม่สัมผัสคลอไรด์	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในดิน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมทั่วไป
7. ในบรรยากาศที่ต้องสัมผัสกับก๊าซ ออกไซด์ (ใกล้โรงงาน ใกล้ถนนที่มี การจราจรหนาแน่น อุโมงค์ทางลอด)	การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเข่น
8. ในบรรยากาศที่ต้องคำนึงถึงการหดตัว แบบแห้ง (กลางแจ้ง หรือ มีลมพัดแรง)	การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง
9. โครงสร้างคอนกรีตหลาย เช่น เชื้อน ฐาน รากขนาดใหญ่ และโครงสร้างที่มีความ หนามาก	การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ หรือ การแตกร้าวเนื่องจากการ หดตัว
10. ชั้นส่วนบางต่อเนื่องที่มีการยึดรั้ง	การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว
11. โครงสร้างคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานต่ำ มีความทึบน้ำสูง	การหดตัวแบบออโตจีนัส
12. งานก่อสร้างที่สัมผัสสารเคมีอื่น	ความสามารถในการต้านทานสารเคมีที่เกี่ยวข้อง

อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมขั้นต่ำของโครงสร้างคอนกรีต [2]

อาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ละประเภทความสำคัญและส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากต้องปิดการใช้อาคารเพื่อการซ่อมแซม ตัวอย่างโครงสร้างที่มีผลกระทบต่อเศรษฐกิจมาก ได้แก่ เชื้อน สนามบิน โรงไฟฟ้า ทางด่วน โครงสร้างระบบขนส่งมวลชน และสะพานขนาดใหญ่ เป็นต้น จึงกำหนดข้อเสนอแนะอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมขั้นต่ำสำหรับอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าแนะนำอายุการใช้งานปลอดภัยซ่อมแซมขั้นต่ำของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทต่างๆ [2]

ประเภทของอาคาร	อายุการใช้งานปลอดภัยซ่อมแซมขั้นต่ำ (ปี)
1. อาคารที่จำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชนและอาคารสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ เช่น อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย อาคารศูนย์สื่อสาร ท่าอากาศยาน โรงไฟฟ้า โรงผลิตและเก็บน้ำประปา เขื่อน อ่างเก็บน้ำ	50
2. โครงสร้างทางด้านการคมนาคมขนาดใหญ่ เช่น สะพานข้าม แม่น้ำขนาดใหญ่ ทางด่วน	40
3. โครงสร้างทางด้านการคมนาคมขนาดเล็ก เช่น สะพานข้ามคลอง สะพานข้ามแยก	30
4. อาคารสูง อาคารขนาดใหญ่พิเศษ อาคารชุมนุมคน อาคารชุด โรงแรมที่มีห้องพักตั้งแต่ 80 ห้องขึ้นไป	20
5. อาคารสถานที่ราชการทุกประเภท	20
6. อาคารสำนักงาน โรงมหรสพ สถานบริการ โรงงาน สถานศึกษา โรงแรมที่มีห้องพักน้อยกว่า 80 ห้อง	20
7. อาคารเพื่อการพักอาศัยที่สร้างขึ้นสำหรับจำหน่าย เช่น หมู่บ้านจัดสรร อาคารพาณิชย์ เป็นต้น	20
8. อาคารที่เจ้าของสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการพักอาศัยเอง	ไม่มีกำหนด
9. อาคารที่ไม่ใช่เพื่อการพักอาศัย เช่น ป้ายโฆษณา	ไม่มีกำหนด

2.1.2.2 ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบเมื่อพิจารณาจากความคงทน [2]

ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยที่สุด

ในการออกแบบคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยที่สุด ซึ่งระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยที่สุดสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.13) และ (2.14) ต่อไปนี้

$$C \geq C_{min} \quad (2.13)$$

$$C_{min} = \alpha \cdot C_o \quad (2.14)$$

โดยที่	C_0	คือ	ค่าแนะนำสำหรับระยะหุ้มเหล็กเสริม ดูตารางที่ 2.4-ก และ 2.4-ข
	α	คือ	ขึ้นอยู่กับคุณรูปของคอนกรีต หรือกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ ดูตารางที่ 3
	C_{min}	คือ	ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยที่สุดที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้คงทน สำหรับทุกสภาพสิ่งแวดล้อม
	C	คือ	ค่าที่ได้จากการคำนวณให้พิเศษเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเต็มครั้งละ 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α) [2]

ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) หรือ กำลังอัดประลัย (f'_c) ทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน	ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม
$w/b > 0.65$ หรือ $f'_c < 20$ เมกกะปาสกาล	1.2
$0.45 < w/b \leq 0.65$ หรือ $20 < f'_c \leq 40$ เมกกะปาสกาล	1.0
$w/b \leq 0.45$ หรือ $f'_c > 40$ เมกกะปาสกาล	0.9*

หมายเหตุ *กรณีที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไปไม่เกิน 20 มม. หรือกรณีที่ต้องเผชิญกับกรดหรือเผชิญกับสภาวะซัลเฟตตั้งแต่ระดับปานกลางขึ้นไป ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 1.0

ตารางที่ 2.4 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
คอนกรีตหล่อในที่(ไม่อัดแรง)	
(ก) คอนกรีตที่หล่อติดกับดินโดยใช้ดินเป็นแบบ และผิวคอนกรีตสัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน	75
(ข) คอนกรีตที่สัมผัสกับดิน หรือถูกแดดฝน	
สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	60
สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 20 มม. ถึง 36 มม.	50
สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 16 มม. และเล็กกว่า	40
(ค) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือ ไม่ถูกแดดฝน ในผนัง แผ่นพื้น และตง	
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	40
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 20 มม. ถึง 36 มม.	30
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 16 มม. และเล็กกว่าในคาน และเสา	20
-เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้งในคาน	40
-เหล็กเสริมหลัก เหล็กปลอกเดี่ยวหรือเหล็กปลอกเกลียวในเสาในหลังคาเปลือกบางและแผ่นพื้นพับจีบ	40
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 20 มม. ขึ้นไป	20
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 16 มม.และเล็กกว่า	13
2. คอนกรีตหล่อในที่ (อัดแรง)	
(ก) คอนกรีตที่หล่อติดกับดินโดยใช้ดินเป็นแบบ และผิวคอนกรีตสัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน	75
(ข) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือ ถูกแดดฝน ในผนัง แผ่นพื้น และตงในองค์อาคารอื่น	25
(ค) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน ในผนัง แผ่นพื้น และ ตงในคาน และเสา	40
-เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้งในคาน	20

ตารางที่ 2.4 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป (ต่อ)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
-เหล็กเสริมหลัก เหล็กปลอกเดี่ยวหรือเหล็กปลอกเกลียวในเสา	40
ในหลังคาเปลือกบางและแผ่นพื้นทับจิบ	25
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดอื่นๆ	10
3. คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน) ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง	
(ก) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน ในแผ่นผนัง	
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 20 มม. ถึง 36 มม.	40
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 16 มม. และเล็กกว่าในองค์อาคารอื่น	30
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 20 มม. ถึง 36 มม.	20
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 16 มม. และเล็กกว่า	50
(ข) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดินหรือไม่ถูกแดดฝน	
ในผนัง แผ่นพื้น และตง	
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 20 มม. ถึง 36 มม.	30
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 16 มม. และเล็กกว่าในคาน และเสา	
-เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้งในคาน	30
-เหล็กเสริมหลัก เหล็กปลอกเดี่ยวหรือเหล็กปลอกเกลียวในเสาในหลังคาเปลือกบางและแผ่นพื้นทับจิบ	20
-สำหรับลวดอัดแรง (Prestressing tendons)	
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 20 มม. ขึ้นไป	16
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 16 มม. และเล็กกว่า	25
-สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 16 มม. และเล็กกว่า	10

ตารางที่ 2.4 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป (ต่อ)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
4. คอนกรีตที่หล่อในน้ำ	100
5. เหล็กเสริมมัดรวมกันเป็นกำ	

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นเดี่ยวซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับเหล็กทั้งกำรวมกัน แต่ไม่จำเป็นต้องมากกว่า 50 มม. ยกเว้นกรณีคอนกรีตที่สัมผัสผิวดิน ระยะหุ้มต่ำสุดต้องเท่ากับ 75 มม.

ตารางที่ 2.5 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_0) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม [2]

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
1. คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง	
แผ่นพื้น และผนัง	50
องค์อาคารอื่น	65
2. คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน) ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง	
แผ่นพื้น และผนัง	40
องค์อาคารอื่น	50

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด

โดยปกติจะกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตาม ถึงแม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จะสูงกว่ากำลังอัดที่ต้องการในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบก็ตาม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด [2]

คอนกรีตในสภาวะต่างๆ	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด
1. โครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการความทึบน้ำ	0.50
2. โครงสร้างคอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีต ระดับปานกลาง	0.50
3. โครงสร้างคอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีต ระดับรุนแรง	0.45

ความกว้างรอยร้าวมากที่สุดที่ยอมรับได้

ในบางโอกาส องค์กรบางประเภท เช่น คาน อาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงรอยร้าวดังเช่น รอยร้าวที่เกิดจากโมเมนต์ดัดได้ ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้มักไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงขององค์กรถ้าองค์กรนั้นไม่ได้มีการเสื่อมสภาพ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องควบคุมขนาดความกว้างของรอยร้าวไม่ให้มากเกินไป ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด สำหรับโครงสร้างในสภาพแวดล้อมทั่วไป หรือในสภาพแวดล้อมที่เผชิญต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ความกว้างรอยร้าวมากที่สุดที่ยอมรับได้ [2]

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

หมายเหตุ หากระยะหุ้มเหล็กเสริม (C) เกิน 100 มม. ในการคำนวณหาความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลง และเมื่อปริมาณคลอไรด์บริเวณเหล็กเสริมถึงระดับวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมปริมาณคลอไรด์ตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตคอนกรีต จึงควรกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อม) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต [2]

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรดที่ยอมให้ในส่วนผสมคอนกรีต (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)
1. คอนกรีตอัดแรง	0.08 %
2. คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัสกับคลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น (Sea-Retaining Walls)	0.20 %
3. คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะใช้งานมีการป้องกันความชื้น	1.00 %
4. คอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	0.30 %

หมายเหตุ การทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายในกรดได้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1152/ C 1152M : Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

2.1.3 การเกิดสนิมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน [2]

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลงจนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ตัวอย่างของสภาพแวดล้อมที่มีคาร์บอนเนชัน เช่น โครงสร้างที่จอดรถ โครงสร้างริมถนนหรือใต้สะพานบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น โครงสร้างใต้สะพานที่เผชิญกับเขม่าควันต่างๆ ตลอดจนในอาคารที่มีผู้คนอยู่มาก เป็นต้น เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและมีอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-free service life) ตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ความลึกคาร์บอนเนชันในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมมีค่าน้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการ (2.15) ต่อไปนี้ในการออกแบบ

$$X_c \leq c \quad (2.15)$$

โดยที่ c จากการคำนวณทางวิศวกรรมโครงสร้างและ หัวข้อ 2.1.2.2 ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดใน
ในมาตรฐานฉบับนี้

X_c สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.16)

$$X_c = a_1 \cdot a_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_r} \quad (2.16)$$

โดยที่ a_1 สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 2.11

a_2 สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 2.12 และรูปที่ 2.6 กรณีที่ไม่สามารถหาข้อมูลใดๆของ
สิ่งแวดล้อมได้ตามรูปที่ 2.5 ให้ใช้เกณฑ์ดังนี้ โครงสร้างอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิด CO_2 (เช่น
ถนน โรงงานอุตสาหกรรม) ไม่เกิน 100 ม. จัดเป็นสิ่งแวดล้อมเสียงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง
อยู่ห่างมากกว่า 100 ม. แต่ไม่เกิน 500 ม. จัดเป็นสิ่งแวดล้อมเสียงต่อคาร์บอนชั้นปาน
กลาง อยู่ห่างมากกว่า 500 ม. จัดเป็นสิ่งแวดล้อมเสียงต่อคาร์บอนชั้นน้อย

t_r จากการกำหนดโดยเจ้าของอาคาร ให้พิจารณาจากประเภทของอาคาร ดังตารางที่ 2.2

k ที่คำนวณได้จากสมการ (2.16) จะถูกใช้ในการกำหนดสัดส่วนผสมคอนกรีตระดับความ
รุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 2.6 โดยขึ้นอยู่กับ
ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่
จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น (k) สามารถ
คำนวณได้จาก สมการ (2.17) ดังต่อไปนี้

$$k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3 \quad (2.17)$$

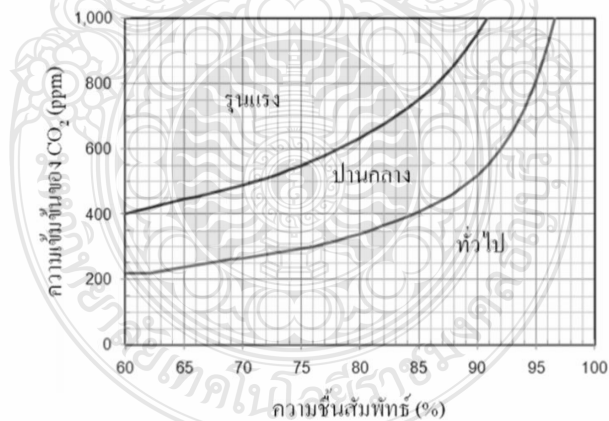
โดยที่ k_r กรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าเท่ากับ 1 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยกำหนดค่าโดยใช้รูปที่
2.7 ขึ้นอยู่กับชนิดและสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าลอย (เถ้าลอยชนิด 2 ก และ
2 ข ตามมาตรฐาน มอก. 2135 หรือ ว.ส.ท. 1014) [2]

ตารางที่ 2.9 สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น [2]

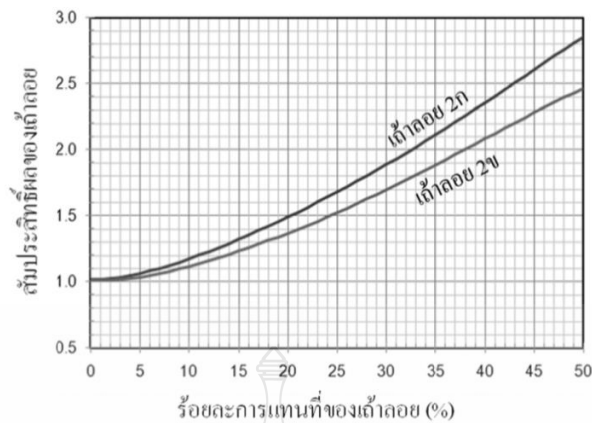
ลักษณะการสัมผัสความเปียกชื้น	สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น (a_1)
1. ผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกชื้นในขณะที่ใช้งาน เช่น ผิวคอนกรีตที่อยู่ในร่มภายในอาคาร	1.0
2. ผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกชื้นในขณะที่ใช้งาน เช่น ผิวคอนกรีตที่อยู่กลางแจ้งสามารถสัมผัสกับฝนได้	0.95

ตารางที่ 2.10 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนขึ้น [2]

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนขึ้น (a_2)
1. เสี่ยงต่อคาร์บอนขึ้นน้อย	0.65
2. เสี่ยงต่อคาร์บอนขึ้นปานกลาง	0.85
3. เสี่ยงต่อคาร์บอนขึ้นรุนแรง	1.00



รูปที่ 2.6 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนขึ้น [2]



รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่แฉะลอยในวัสดุประสาน [2]

2.1.4 การตรวจพินิจ

การตรวจพินิจ หรือการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) หมายถึง การตรวจสอบและประเมินความเสียหายของโครงสร้างด้วยตาเปล่า โดยปราศจากการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความซับซ้อนมาใช้ในการตรวจสอบ แต่จะใช้เพียงอุปกรณ์พื้นฐานที่หาได้ทั่วไป เช่น ไม้บรรทัด เทปวัดระยะทาง แวนขยาย เป็นต้น มาใช้ประกอบในการตรวจสอบ การตรวจพินิจถือเป็นขั้นตอนแรกของการตรวจสอบโครงสร้างที่มีความสำคัญมาก เพราะจะทำให้ทราบถึงข้อมูลหลายๆอย่าง เพื่อใช้ในการประเมินสภาพความเสียหายของโครงสร้าง และประเมินการทดสอบในขั้นต่อไปได้เหมาะสมมากขึ้น ขั้นตอนของการตรวจพินิจโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีแนวทางดังต่อไปนี้

2.1.4.1 การรวบรวมข้อมูลของอาคารที่ทำการตรวจสอบ เช่น ประวัติการใช้งาน อายุอาคาร แบบแปลนการก่อสร้างอาคาร ลักษณะการใช้งานอาคาร สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกอาคาร เป็นต้น

2.1.4.2 การสำรวจการเสื่อมสภาพของอาคารด้วยการตรวจพินิจ อาจใช้อุปกรณ์พื้นฐานที่หาได้ทั่วไปมาใช้ประกอบการสำรวจและเก็บข้อมูล เช่น ไม้บรรทัด สายวัดระยะ กล้องถ่ายรูป เป็นต้น

2.1.4.3 การตรวจสอบเพิ่มเติมด้วยการทดสอบแบบทำลาย เช่น การเจาะตัวอย่างคอนกรีตไปตรวจสอบ และการทดสอบแบบไม่ทำลาย เช่น การทดสอบการรับกำลังของคอนกรีตด้วย Schmidt hammer เพื่อใช้ประกอบกับการประเมินสภาพอาคาร

2.1.4.4 การประเมินลักษณะความเสียหาย สาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหาย และระดับความรุนแรงของความเสียหายจากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ

2.1.4.5 การวางแผนการหยุดความเสียหาย หรือการวางแผนการซ่อมแซมที่เหมาะสม

2.1.5 การทดสอบแบบไม่ทำลาย [3]

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non destructive Tests) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบสภาพของโครงสร้างหรือเก็บข้อมูลของโครงสร้างโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง หรือมีความเสียหายเกิดขึ้นน้อยที่สุด ทั้งนี้ต้องไม่มีการซ่อมแซมโครงสร้างหลังจากการตรวจสอบ วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นการทดสอบโดยการประเมินผลการวัดค่าต่างๆที่มีความสัมพันธ์หรือเกี่ยวข้องกับกลไกการเสื่อมสภาพของอาคารแบบต่างๆ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นการประเมินโดยทางอ้อม การทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อ การตรวจสอบคุณรูปร่างก่อนสร้างสำหรับงานก่อสร้างใหม่ การซ่อมแซมโครงสร้างหรือการแก้ปัญหาระหว่างงานก่อสร้าง การตรวจสอบโครงสร้างเพื่อการบำรุงรักษา และการประเมินสภาพอาคารเพื่อการซ่อมแซม การเลือกวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลสมบัติของโครงสร้างที่ทำการตรวจสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.11

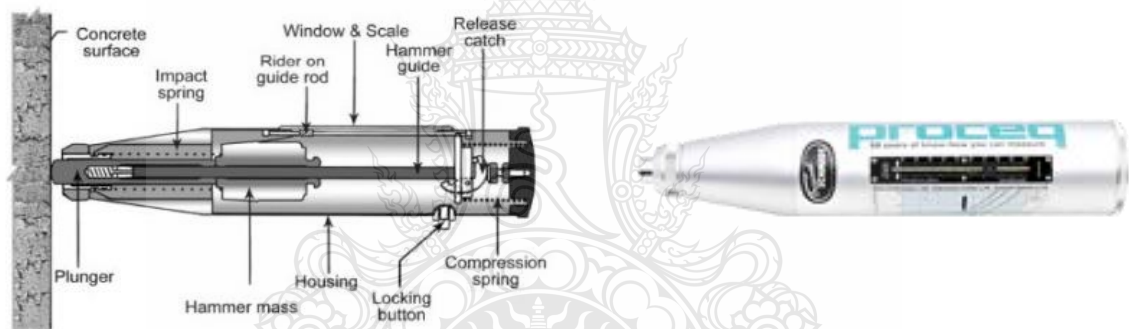
ตารางที่ 2.11 รายการวิธีการทดสอบโครงสร้างแบบไม่ทำลาย

มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้าง	มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้าง	มาตรฐานการตรวจสอบ
1.การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีตรวจพินิจ	ประเมินสาเหตุ และระดับความเสียหาย หรือการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง	มยผ. 1501-51
2. วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ	ประเมินกำลังอัดของคอนกรีต	มยผ. 1502-51
3.วิธีทดสอบประเมินค่ากำลังอัดคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวหยั่งทดสอบ (Penetration Resistance)	ประเมินกำลังอัดของคอนกรีต	มยผ. 1503-51
4.วิธีทดสอบคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity)	ตรวจสอบความคงที่ของคณรูปคอนกรีตในโครงสร้าง หรือค้นหาช่องว่างในโครงสร้างคอนกรีต	มยผ. 1504-51
5. วิธีตรวจสอบหาตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีต (Cover Meter)	ตรวจหาตำแหน่งของเหล็กเสริมในโครงสร้าง และ วัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก	มยผ. 1505-51
6.วิธีทดสอบหาค่าการสึกกร่อนของเหล็กเสริม (Half-Cell Potential Test)	ประเมินโอกาสเกิดสนิมในเหล็กเสริม	มยผ. 1506-51
7. วิธีทดสอบเพื่อประเมินสภาพสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตด้วยคลื่นเรดาร์	ตรวจสอบหาช่องว่างหรือวัตถุแปลกปลอมในโครงสร้างคอนกรีต	มยผ. 1507-51

ในการทดสอบโครงสร้างคอนกรีตแบบไม่ทำลายนั้น เป็นการทดสอบสมบัติของคอนกรีตโดยไม่ให้คอนกรีตเกิดความเสียหาย หรือมีความเสียหายเกิดขึ้นน้อยที่สุด การทดสอบแบบไม่ทำลายที่นิยมใช้ในการทดสอบคอนกรีต มีดังต่อไปนี้

การทดสอบกำลังอัดประลัยคอนกรีตด้วยวิธี Rebound Hammer

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาลำลังอัดประลัยคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือทดสอบเรียกว่า Schmidt Hammer หลักการหาลำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือนี้ คือ การหาค่าความต้านทานของคอนกรีตที่เกิดจากการดันของ Steel Hammer ในเครื่องมือทดสอบกดลงบนหน้าตัดคอนกรีตที่ต้องการทดสอบแล้วเกิดการสะท้อนกลับของพลังงาน ซึ่งจะสามารถหาระยะที่คอนกรีตดัน Steel Hammer ให้สะท้อนกลับเรียกว่าค่า Rebound Number โดยค่าดังกล่าวนี้จะถูกแปลงไปเป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยใช้ค่าดัชนีมาตรฐาน มาตรฐานการทดสอบคอนกรีตนี้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C805 “Rebound Number of Hardened Concrete”



รูปที่ 2.8 เครื่องมือทดสอบ Schmidt Hammer [10]

ค้อนกระแทก (Rebound Hammer) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2.8 ภายในประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ สปริงรับแรงกระแทก (Impact spring) ตั้มน้ำหนัก (Hammer mass) และแท่งเหล็ก (Hammer guide) ประกอบอยู่ในโครงทรงกระบอก (Housing) หลักการที่ใช้ในการหาลำลังอัดประลัยคอนกรีตคือ การดันค้อน (Plunger) เข้าหาผิวคอนกรีตที่ต้องการทดสอบ จากนั้นแท่งเหล็กจะดันมาอัดที่สปริง เมื่อแท่งเหล็กถูกอัดเข้ามาเต็มที่สปริงจะคืนตัวอัตโนมัติ และแท่งเหล็กจะถูกดันเข้ากับค้อนและส่งแรงกระแทกเข้ากับคอนกรีตและจะสะท้อนกลับออกมา ระยะของการสะท้อนกลับดังกล่าวจะสามารถอ่านได้จากค่าตัวชี้วัดบนสเกลของเครื่องมือทดสอบ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0-100 ค่าที่อ่านได้นี้เรียกว่าค่าการสะท้อนกลับ (RN) โดยค่า RN นี้จะแปรผันตามค่าความแข็งแรงหรือความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต คือ หากคอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังอัดได้สูง ค่าการสะท้อนกลับจะมีค่าสูง

ในขั้นตอนการทดสอบ ก่อนทดสอบควรตรวจสอบสภาพพื้นผิวหน้าตัดคอนกรีตที่ต้องการทดสอบ โดยผิวทดสอบควรเป็นผิวเรียบ หากผิวที่ทดสอบจะให้ค่าที่ได้จากการทดสอบสูงกว่าความเป็นจริง ในทางตรงกันข้ามหากผิวทดสอบนูน จะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทดสอบต่ำกว่าความเป็นจริง ในการทดสอบควรทำการทดสอบอย่างน้อย 10 จุดโดยให้จุดที่ทำการทดสอบแต่ละจุดห่างกันอย่างน้อย 25 มม. ในการทดสอบสามารถทดสอบได้ในแนวนอน แนวตั้งแบบยั้งขึ้น หรือแนวตั้งแบบยั้งลง ซึ่งการทดสอบในแต่ละทิศทางจะต้องมีการปรับค่า RN ที่ได้ให้เป็นค่ามาตรฐาน เนื่องจากทิศทางในการกดมีผลต่อค่ากำลังอัดที่ได้ ค่าการสะท้อนกลับ (RN) สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต f'_c ได้ด้วยสมการ 2.18 หรือสมการ 2.19 ขึ้นอยู่กับหน่วยของกำลังอัดคอนกรีตที่ต้องการ

$$f'_c = -18 + [1.27 \times RN] \quad [\text{นิวตัน/มิลลิเมตร}^2] \quad (2.18)$$

หรือ

$$f'_c = -176.4 + [12.446 \times RN] \quad [\text{กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร}] \quad (2.19)$$

การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมและระยะหุ้มเหล็กเสริม

การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมโดยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก เป็นการตรวจสอบที่ใช้ในการหาตำแหน่งของวัตถุที่สามารถเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เช่น เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงระยะหุ้มเหล็กเสริมของคอนกรีต เครื่องมือตรวจสอบดังกล่าวจะอาศัยหลักการของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในเครื่องมือทดสอบเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปใกล้เหล็กเสริมในคอนกรีต

ในการตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมและระยะหุ้มเหล็กเสริมนั้น ขั้นตอนแรกต้องทำการสอบเทียบ (Calibrate) เครื่องมือเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องมือซึ่งขึ้นอยู่กับคำแนะนำในคู่มือจากผู้ผลิตในการใช้งานเครื่องมือให้นำหัววัดของเครื่องมือแนบกับผิวคอนกรีต แล้วเคลื่อนที่ผบผิวคอนกรีตไปในทิศทางที่ต้องการวัด โดยที่ทิศทางของหัววัดควรตั้งฉากกับแนวการวางตัวของเหล็กเสริม เนื่องจากเหล็กเสริมมีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อวางตัวผ่านแกนของขดลวดในหัววัด เมื่อหัววัดวิ่งผ่านตำแหน่งที่มีเหล็กเสริมอยู่ เครื่องวัดจะส่งสัญญาณเตือน เครื่องวัดตำแหน่งเหล็กเสริมและระยะหุ้มเหล็กเสริมแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กเสริม

การวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ [3]

เครื่องมือวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในอากาศ ในปัจจุบันถูกออกแบบให้ใช้งานได้สะดวกพกพาได้ง่าย มีการแสดงผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในหน่วย Part per million (ppm) เครื่องมือที่ใช้ในการวัดนี้คือเครื่องวัดยี่ห้อ Extech รุ่น CO250 การวัดจะทำได้โดยการใช้ตัวเซ็นเซอร์บริเวณส่วนหัวของเครื่องมือในรูปที่ 2.10 ในการตรวจวัดค่า เมื่อต้องการทำการวัดค่าให้ทำการเปิดเครื่อง จากนั้นเครื่องจะใช้ระยะเวลาประมาณ 30 วินาทีในการบู๊ต หลังจากนั้นค่าที่วัดได้ทั้งปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น และอุณหภูมิจะแสดงที่บนจอของเครื่องวัด



รูปที่ 2.10 เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ Extech รุ่น CO₂50

คุณสมบัติของเครื่องวัดดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

- ช่วงการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0 ถึง 5,000 ppm
- ช่วงการวัดอุณหภูมิ -10 ถึง 60 °C ความละเอียด 0.1 °C
- ช่วงการวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 0.1 ถึง 99.99% ความละเอียด 0.1%
- เชื่อมผ่านคอมพิวเตอร์ผ่าน port RS-232
- สามารถหาค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point) และอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb) ได้
- หน้าจอแสดงผลเป็นแบบ LCD
- เซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Non Dispersive Infrared

(NDIR)

การทดสอบปฏิกิริยาคาร์บอนในคอนกรีต

คาร์บอนในคอนกรีตเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทำปฏิกิริยากับความชื้นและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์ ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมซึ่งเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การทดสอบคาร์บอนในคอนกรีตมีวิธีการทดสอบหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ทางเคมี การใช้ X-ray Diffraction เป็นต้น ส่วนวิธีการที่สะดวกและเหมาะสมสำหรับการทดสอบคาร์บอนในคอนกรีตที่แนะนำโดย RILEM คือ การใช้ยาฟีนอล์ฟธาเลอิน (Phenolphthalein) 1 ส่วนผสมแอลกอฮอล์ 100 ส่วนฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่ถูกทำให้แตกออกเพื่อวัดระยะความลึกคาร์บอนในคอนกรีตในส่วนที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่จะปรากฏเป็นสีชมพู ส่วนคอนกรีตที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนในคอนกรีตจะไม่เกิดการเปลี่ยนสีดังแสดงในรูปที่ 2.11 วิธีการนี้จะสามารถบอกระยะความลึกคาร์บอนในคอนกรีตได้โดยประมาณ



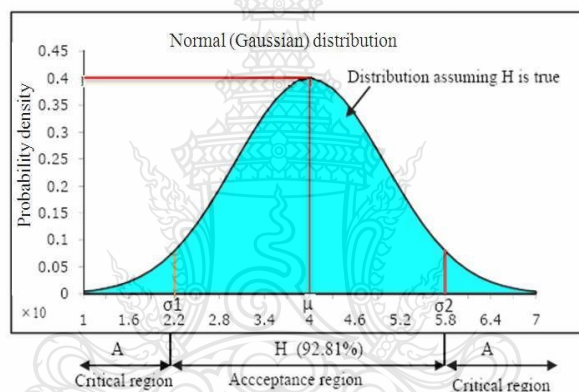
รูปที่ 2.11 การทดสอบและวัดระยะคาร์บอนในคอนกรีต

2.1.6 สถิติและความน่าจะเป็น [4]

ในการเก็บข้อมูลในงานวิจัยนั้นจะทำการวัดค่าค่าต่างๆได้แก่ ค่ากำลังอัดประลัย คอนกรีต ระยะหุ้มเหล็ก ระยะคาร์บอนเนชั่น เป็นต้น ซึ่งในการวัดค่าแต่ละค่าจะต้องทำการวัดหลายๆ ครั้ง ดังนั้นจะต้องนำเอาหลักการทางสถิติมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าตัวแทนที่เหมาะสมของข้อมูล นอกจากนี้ยังต้องมีการตรวจสอบสมมติฐานเพื่อทดสอบว่าตัวแทนของข้อมูลที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใด หลักการทางสถิติเพื่อใช้ในการหาตัวแทนของชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีดังนี้

การแจกแจงปกติ (Normal Distribution)

การแจกแจงปกติเป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง โดยที่ค่าของตัวแปรสุ่มนั้นมีแนวโน้มที่จะอยู่ใกล้ๆกับค่าใดค่าหนึ่ง ค่าฟังก์ชันความหนาแน่น (Probability Density Function) จะมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำหรือเรียกว่า Normal curve หรือ Gaussian Function ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โค้งการแจกแจงแบบปกติ

สมบัติของเส้นโค้งปกติ

- โค้งการแจกแจงปกติเป็นแบบสมมาตร
- มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ μ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ σ
- พื้นที่ใต้โค้งคือความน่าจะเป็นซึ่งพื้นที่รวมใต้เส้นโค้งแบบปกติมีค่าเท่ากับ 1.00 หรือ 100%
- ค่าเฉลี่ยเลขคณิต มัธยฐานและฐานนิยมมีค่าเท่ากันและเป็นค่าที่อยู่ตรงกลางของโค้งซึ่งจะแบ่งพื้นที่ใต้โค้งออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน

เมื่อต้องการเปรียบเทียบข้อมูลตั้งแต่สองชุดข้อมูลขึ้นไปนั้นจะไม่สามารถเปรียบเทียบค่าได้โดยตรง เนื่องจากแต่ละชุดข้อมูลจะมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ไม่เท่ากัน

ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงค่าในแต่ละชุดข้อมูลเป็นค่ามาตรฐานก่อนเพื่อให้ชุดข้อมูลที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบกันได้ การแปลงชุดข้อมูลเป็นค่ามาตรฐานสามารถหาได้จากสมการที่ (2.20) หรือสมการ (2.21)

$$Z_i = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \quad (2.20)$$

เมื่อ	Z_i	คือ	ค่ามาตรฐาน
	X_i	คือ	ค่าที่ i ของตัวแปร X
	μ	คือ	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของประชากร
	σ	คือ	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร
	i	เท่ากับ	$1, 2, 3, \dots, n$
	n	คือ	จำนวนประชากร

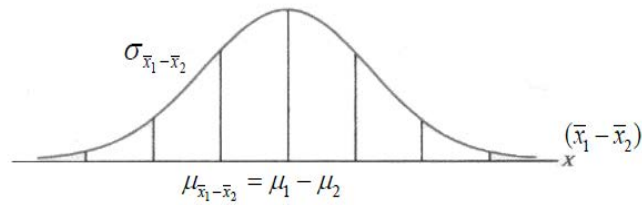
หรือ

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (2.21)$$

เมื่อ	X	คือ	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของตัวอย่าง
	S	คือ	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง

ในการประเมินความเสี่ยงเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันนั้นจะต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว คือ ระยะเวลาการคาร์บอนเนชันและระยะหุ้มเหล็ก ดังนั้นจึงต้องมีการแจกแจงผลต่างของค่าเฉลี่ย ดังนี้คือ

เนื่องจากทราบค่าเฉลี่ย $[\mu_1, \mu_2]$ และความแปรปรวน $[\sigma_1^2, \sigma_2^2]$ ของตัวแปรทั้งสอง คือ ระยะเวลาการคาร์บอนเนชันและระยะหุ้มเหล็ก โดยมีขนาดของตัวอย่างสำหรับชุดข้อมูลทั้งสองเท่ากับ n_1 และ n_2 และการแจกแจงของผลต่างค่าเฉลี่ยของทั้งสองตัวอย่างเป็นแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลต่างค่าเฉลี่ยตัวอย่างจากประชากร

ผลต่างค่าเฉลี่ยตัวอย่างจากประชากรของทั้งสองชุดข้อมูลคือ $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$ จะมีการแจกแจงแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\mu_1 - \mu_2$ และมีความแปรปรวนเป็น $\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$ ดังนั้นจะได้

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

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

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

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Castro et al. [17] ได้ศึกษาเรื่อง “Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings” โดยทำการศึกษาปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตของอาคารที่ระดับความสูง 50, 125 และ 190 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนเนชัน และศึกษาตำแหน่งที่ตั้งของอาคารอยู่ใกล้สภาวะแวดล้อมบริเวณทะเลและเสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนเนชัน งานวิจัยนี้พบว่าตำแหน่งที่ตั้งอาคารห่างจากทะเลประมาณ 100-200 เมตร มีอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันสูงกว่าตำแหน่งที่ไกลออกไปจากทะเล และระดับความสูงเพิ่มขึ้นของอาคารยังมีผลต่ออัตราการเกิดคาร์บอนเนชันสูงขึ้นด้วย

Fattuhi [18] ได้ศึกษาเรื่อง “Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period” โดยการหล่อคอนกรีตตัวอย่างทดสอบแบบเร่งในห้องปฏิบัติการ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7, 0.6 และ 0.4 จากนั้นทำการทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชันที่อยู่คอนกรีต 1, 3, 7, 21 และ 28 วันตามลำดับ ผลจากการศึกษาพบว่าอัตราการเกิดความลึกคาร์บอนเนชันแปรผันตามปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น คืออัตราอาร์บอนเนชันจะสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

Khunthongkeaw et al. [19] ทำการศึกษาเรื่อง “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete” โดยการใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่างกันจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปวางไว้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆกันคือในเมือง ชนบท และชายทะเล การศึกษาพบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO สูงจะมีการเกิดคาร์บอนเนชันต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชันของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้พบว่า การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์เป็นการเร่งอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันให้สูงขึ้นตาม

Alexander et al. [20] ศึกษาเรื่อง “Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities,” โดยทำการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างสะพาน 3 แห่งในแอฟริกาใต้ที่มีอายุระหว่าง 11-76 ปี คือสะพานที่อยู่ในพื้นที่ Cape Peninsula, Durban และ Johannesburg ผลการศึกษาพบว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแห้งจะมีการเกิดคาร์บอนเนชันมากกว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง

Haque and Khaiat [21] ศึกษาเรื่อง “Carbonation of Concrete Structures in Hot Dry Coastal Regions,” ได้ทำการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งใกล้กับทะเล และมีการเก็บตัวอย่างคอนกรีตของโครงสร้างผนังและเสาเพื่อทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนเนชัน รวมถึงการวัดค่ากำลังอัดของโครงสร้าง ผลการศึกษาพบว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางระหว่าง 0.5-2 กม. มีอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันสูงกว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางที่ไกลออกไป ผลของการทดสอบกำลังอัดพบว่าความลึกคาร์บอนเนชันแปรผกผันกับค่ากำลังอัด

Keun Kim et al. [22] ศึกษาเรื่อง “Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete” โดยทำการการหล่อคอนกรีตที่กำลังสูง กลาง และต่ำ จากนั้นทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชันที่อายุ 1,2,3 และ 4 ปีในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการวัดค่ากำลังอัดของคอนกรีตผลการศึกษาพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันมีค่าสูงขึ้นตามอายุคอนกรีตที่มากขึ้น และคอนกรีตที่มีกำลังต่ำจะมีอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันสูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่สูงกว่า

Cengiz Duran Atis [23] ได้ศึกษาเรื่อง “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash,” โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยทดสอบในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 65 และร้อยละ 100 และทำการทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชันและค่า กำลังอัดคอนกรีตที่ 3,7,28 และ 90 วัน ผลการศึกษาพบว่า การแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณมากขึ้นส่งผลให้การอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันสูงกว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณน้อยกว่า และในส่วนของกำลังอัดพบว่าความลึกคาร์บอนเนชันมีการแปรผกผันกับค่ากำลังอัด

Haque et al. [24] ได้ศึกษาเรื่อง “Climatic zone-A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf ” โดยศึกษาถึงความคงทนของโครงสร้างที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ทะเลอาราเบีย และได้ศึกษาถึงการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ซัลเฟต และคาร์บอนเนชัน ในส่วนผลการทดสอบคาร์บอนเนชันพบว่าตำแหน่งที่ของอาคารที่ใกล้กับทะเลมีอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันสูงกว่าตำแหน่งที่ของอาคารที่ไกลออกไปจากทะเล

Khayat [25] ได้ศึกษาเรื่อง “Concrete carbonation in arid climate ” โดยทำการหล่อคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ระหว่าง 0.45-0.80 ผลการศึกษาพบว่า อัตราการเกิดคาร์บอนเนชันจะมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงขึ้น และผลการศึกษาในส่วนของการกำลังอัดพบว่าความลึกคาร์บอนเนชันแปรผกผันกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต

บุรฉัตร ฉัตรวิระ และทวิสันท์ คงทรัพย์ [26] ได้ศึกษาเรื่อง “ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว” โดยทำการศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำร้อยละ 20 และ 40 โดยอัตราส่วนปริมาตรของซีเมนต์เฟสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2 1.4 และ 1.6 ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำ

วิจน์วงศ์ และคณะ [27] ได้ศึกษาเรื่อง “การสำรวจ ทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสาและโครงสร้างทางรถไฟยกระดับ” โดยทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยการ Coring เพื่อทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชันของโครงสร้างทางด่วนสายเหนือจากสถานีรถไฟหัวลำโพงถึงท่าอากาศยานนานาชาติดอนเมือง สายตะวันออก และสายตะวันตก มีระยะระหว่าง 2.00-19.40 มม. และ ผลการศึกษาพบว่าความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าเฉลี่ยที่ 10.90 มม. และอาคารมีอายุการใช้งานเฉลี่ย 65 ปี

Jiranuwat Banjongratc et al. [28] ทำการศึกษาเรื่อง “Effect of Plastering Mortar and Paint On Carbonation Resistance of Concrete” โดยการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 โดยตัวอย่างคอนกรีตมีการทาสี ไม่ทาสี ฉาบปูนและไม่ฉาบปูนที่ภายนอกของแท่งตัวอย่างคอนกรีต จากนั้นทำการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชันสูงขึ้น และผลการศึกษาพบว่าสีและปูนฉาบมีส่วนช่วยในการป้องกันและลดอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันได้

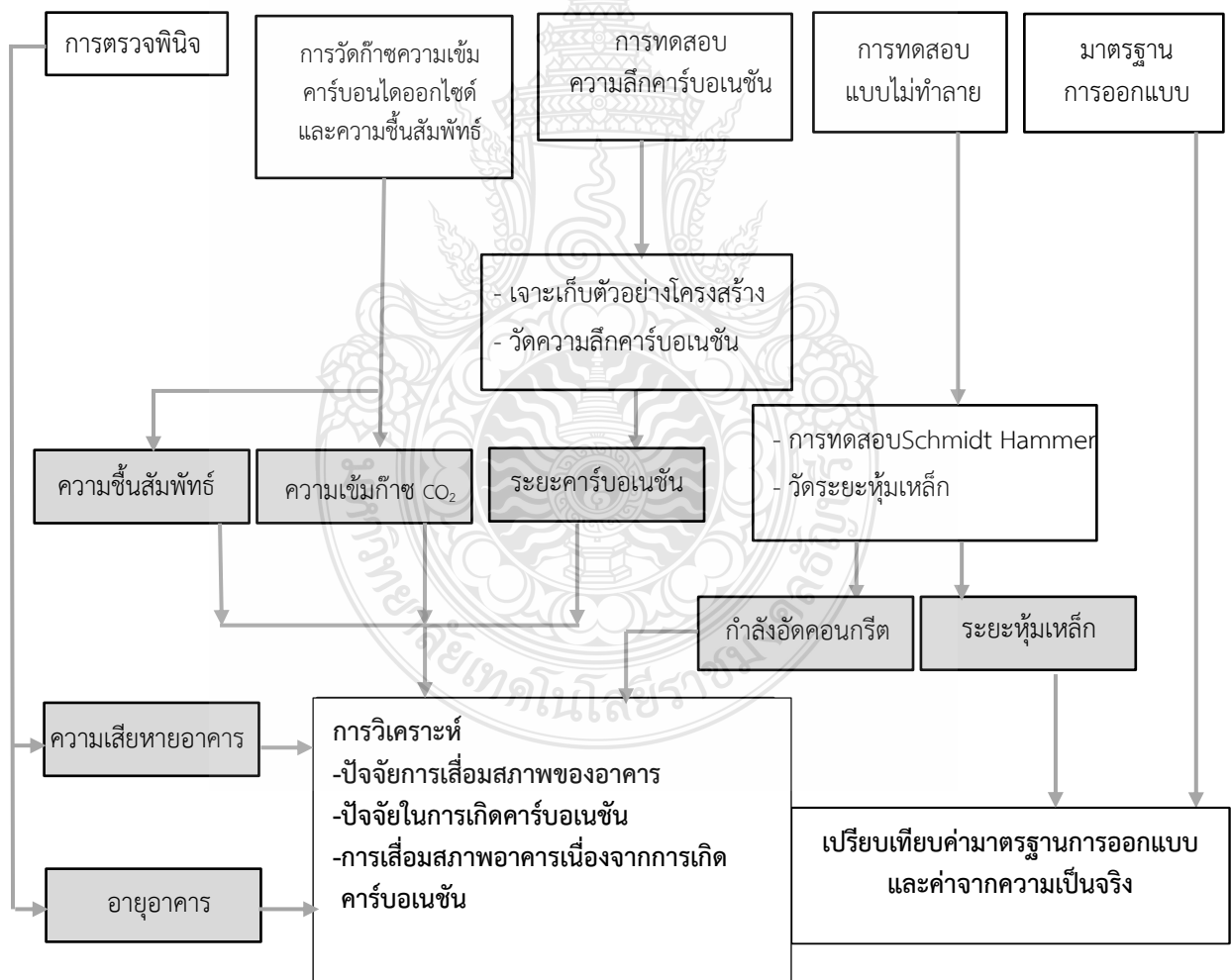
ปัญญติ วารินทร์ไพลและคณะ [29] ได้ศึกษาเรื่อง “การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารที่พักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชน” โดยทำการตรวจสอบพินิจ ทดสอบ และประเมินค่ากำลังอัด วัฏระยยะหุ้มเหล็ก วัฏระยยะความหนาปูนฉาบในกรณีที่มีชั้นปูนฉาบ และเจาะเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบระยยะคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารที่พักอาศัยจำนวน 9 โครงการในเขตชุมชน ผลการศึกษาพบว่า อัตราการเกิดระยยะคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารที่ตั้งใกล้กับทางด่วนมีค่าสูงกว่าอาคารที่ไกลทางด่วน และตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างอาคารในเขตกรุงเทพมหานครมีอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าในเขตปริมณฑล และโครงสร้างอาคารชั้นส่วนสำเร็จนั้นมีแนวโน้มว่าอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำกว่าโครงสร้างอาคารแบบหล่อในที่เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน

วีรยุทธ์ คชนทร [30] ได้ประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารเรียน และสะพานลอยคนเดินข้ามเนื่องจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ โดยการทดสอบกำลังอัดประลัยคอนกรีต ระยยะหุ้มเหล็กเสริม และความลึกคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 18 อาคาร ผลการศึกษาพบว่า ระยยะหุ้มคอนกรีตและกำลังอัดประลัยคอนกรีตมีค่าสูงกว่าค่าออกแบบ โรงสร้างที่มีอายุการใช้งานนานจะมีระยยะคาร์บอนเนชั่นที่สูงกว่าอาคารที่มีอายุน้อยกว่า และระยยะความลึกคาร์บอนเนชั่นที่วัดได้จริงในโครงสร้างที่ทำการตรวจสอบมีค่ามากกว่าความลึกคาร์บอนเนชั่นที่คำนวณตามมาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อความคงทนของกรมโยธาธิการและผังเมือง



บทที่ 3 วิธีการศึกษา

ในการศึกษาเพื่อประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรีนี้ เป็นการเก็บข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย การตรวจพินิจอาคาร การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก การหาค่าแห่งเหล็กเสริมและวัฏระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น การหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น และการวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นและการทำนายอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองจังหวัดชลบุรี ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.1 อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ที่ศึกษาในครั้งนี้

โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการศึกษานี้ เป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยเป็นอาคารส่วนราชการจำนวน 9 อาคาร และสะพานลอยคนเดินข้ามอีก 5 สะพาน ซึ่งอาคารเหล่านี้เป็นอาคารที่ตั้งอยู่ในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี และมีการจราจรค่อนข้างหนาแน่น ทั้งนี้เพื่อทำการศึกษาถึงอิทธิพลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ต่อระยะการเกิดคาร์บอนชั้นในโครงสร้างคอนกรีต นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงกำลังอัดของโครงสร้างคอนกรีตดังกล่าว เพื่อประเมินการเสื่อมสภาพและทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยรายละเอียดของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ส่วนรูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการศึกษา ในขณะที่รูปที่ 3.3 แสดงสภาพแวดล้อมโดยรอบของสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย

ตารางที่ 3.1 โครงสร้างอาคารและอายุอาคารที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	รหัสอาคาร	ชื่ออาคาร	ระบบโครงสร้าง	อายุอาคาร [ปี]
1	B1	อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย	ระบบหล่อในที่	67
2	B2	อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	ระบบหล่อในที่	59
3	B3	อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส	ระบบหล่อในที่	51
4	B4	อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย	ระบบหล่อในที่	50
5	B5	อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	ระบบหล่อในที่	41
6	B6	อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี	ระบบหล่อในที่	37
7	B7	อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	ระบบหล่อในที่	34
8	B8	อาคารห้างสรรพสินค้าพอร์มเพลซ่า ชลบุรี	ระบบหล่อในที่	31
9	B9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	ระบบหล่อในที่	20
10	P1	สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	ระบบหล่อในที่	38
11	P2	สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	ระบบหล่อในที่	30
12	P3	สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	ระบบหล่อในที่	28
13	P4	สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	ระบบหล่อในที่	24
14	P5	สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	ระบบหล่อในที่	21

หมายเหตุ : อายุอาคารนับจากปีที่ก่อสร้างแล้วเสร็จถึงปีที่ทำการตรวจสอบ (พุทธศักราช 2562)

ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งพิกัดของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการศึกษ

ลำดับ	รหัสอาคาร	ชื่ออาคาร	พิกัดภูมิศาสตร์อาคาร	
			ละติจูด	ลองจิจูด
1	B1	อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย	13°21'45.3"	100°59'7.1"
2	B2	อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	13°21'39.5"	100°58'57.8"
3	B3	อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส	13°21'32.6"	100°59'12.0"
4	B4	อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย	13°22'12.3"	100°59'34.1"
5	B5	อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	13°21'43.6"	100°59'7.2"
6	B6	อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี	13°21'39.5"	100°59'7.2"
7	B7	อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	13°21'43.2"	100°59'23.8"
8	B8	อาคารห้างสรรพสินค้าฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	13°21'51.8"	100°59'23.6"
9	B9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	13°21'16.6"	101° 0'10.7"
10	P1	สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	13°22'13.0"	100°59'33.4"
11	P2	สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	13°21'43.3"	100°59'22.0"
12	P3	สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	13°21'30.3"	100°59'13.2"
13	P4	สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	13°21'43.6"	100°59'7.2"
14	P5	สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	13°22'15.5"	100°59'34.3"



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการศึกษ



รูปที่ 3.3 สภาพแวดล้อมโดยรอบของสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย

3.2 การตรวจพินิจอาคาร

การตรวจพินิจเป็นการตรวจสอบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเบื้องต้น ด้วยการใช้ตาเปล่าร่วมกับอุปกรณ์วัดพื้นฐาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบสภาพความเสียหายเบื้องต้นของอาคาร เช่น การทรุด การแตกร้าวของตัวอาคาร เป็นต้น โดยการตรวจพินิจในการเก็บข้อมูลสามารถทำได้ดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบรูปแบบและลักษณะการใช้งานอาคาร การให้น้ำหนักต่อองค์อาคาร สภาพแวดล้อมรอบ ๆ อาคาร ว่าอาคารมีความเสี่ยงในการเสื่อมสภาพจากปัจจัยภายนอกมากน้อยเพียงใด

3.2.2 การเดินตรวจสอบทั้งภายในและภายนอกอาคาร โดยสำรวจสภาพโครงสร้างอาคาร ในขั้นตอนนี้ควรมีการจดบันทึกข้อมูลที่ระบุถึงตำแหน่งและลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอาคาร รวมไปถึงการถ่ายรูปตำแหน่งที่เกิดความเสียหายของอาคาร เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ข้อมูล ในการจดบันทึกข้อมูลควรบันทึกให้ชัดเจนและทำความเข้าใจได้ง่าย

3.2.3 การรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับตัวอาคารที่ทำการตรวจสอบ เช่น ข้อมูลการซ่อมแซมอาคารก่อนหน้าการตรวจสอบ และการตรวจสอบแบบแปลนโครงสร้างอาคาร เป็นต้น

3.2.4 นำข้อมูลที่ได้มาทำการจำแนกลักษณะความเสียหาย และวิเคราะห์ถึงสาเหตุและสรุปสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอาคาร การตรวจพินิจโครงสร้างอาคาร

3.3 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์

ในการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณอาคารที่ทำการตรวจสอบนั้น ใช้เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความละเอียดสูงยี่ห้อ Extech รุ่น CO₂50 โดยทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์เป็นเวลาทั้งหมด 3 วัน โดยที่ในแต่ละวันจะแบ่งช่วงเวลาในการวัดเป็น 3 ช่วง คือ

- 1) ช่วงเช้า เวลา 9.00 ถึง 10.00 นาฬิกา
- 2) ช่วงกลางวัน เวลา 12.00 ถึง 13.00 นาฬิกา
- 3) ช่วงเย็น เวลา 17.00 ถึง 18.00 นาฬิกา

โดยรูปที่ 3.4 แสดงการวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณที่อาคารตั้งอยู่



รูปที่ 3.4 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณที่อาคารตั้งอยู่

3.4 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตในงานโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการตรวจสอบสามารถประเมินได้จากการทดสอบด้วยค้อนกระแทก (Schmidt Hammer) ซึ่งเป็นการวัดค่าการสะท้อนกลับ (Rebound Number) ของคอนกรีตเพื่อแปลงเป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยการทดสอบนี้จะเก็บค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีตจำนวน 36 ค่าต่อ 1 ตำแหน่งการทดสอบ ซึ่งจุดที่ทำการวัดค่าสะท้อนในแต่ละครั้งจะต้องห่างกัน 2.5 เซนติเมตรโดยประมาณ โดยแต่ละอาคารจะทำการเก็บข้อมูลอาคารละ 4 ตำแหน่ง โดยที่ตำแหน่งการทดสอบนั้นพิจารณาในส่วนที่เป็นโครงสร้างหลัก คือ โครงสร้างเสา และโครงสร้างคาน ดังนั้นจะมีจำนวนชุดข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบอาคารทั้งหมดในทั้งสิ้น 56 ชุดข้อมูล โดยการเก็บข้อมูลด้วยค้อนกระแทก แสดงในรูปที่ 3.5 ในส่วนของค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดของโครงสร้างคอนกรีต โดยอ้างอิงการประมาณค่าตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (3.1) ของ Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2005) หรือ สมการที่ (3.2)

$$f_{c'} = -18 + (1.27 \times RN) \quad (3.1)$$

โดยที่ $f_{c'}$ คือ ค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต (นิวตัน/มิลลิเมตร²)
RN คือ ค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer

$$f_{c'} = -176.4 + (12.446 \times RN) \quad (3.2)$$

โดยที่ $f_{c'}$ คือ ค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต (กิโลกรัม/เซนติเมตร²)
RN คือ ค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer



รูปที่ 3.5 การทดสอบกำลังอัดของโครงสร้างคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก

3.5 การหาตำแหน่งเหล็กเสริมและวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

การหาระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมคอนกรีตในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ Profometer ในการตรวจสอบหาระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม โดยตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบจะเป็นโครงสร้างเสาหรือคานที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่มีการเจาะเก็บตัวอย่าง (Coring) การเก็บข้อมูลระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม จะทำการวัดค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม จำนวน 4 ค่าในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัด โดยรูปที่ 3.6 แสดงการหาตำแหน่งเหล็กและการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม



รูปที่ 3.6 การหาตำแหน่งเหล็กและการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

3.6 การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น

3.6.1 การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่าง

ในการทดสอบหาระยะการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จะต้องทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยจะต้องทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่านหัวเจาะแบบ Hole Saw ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะประมาณ 5 เซนติเมตร เจาะลึกเข้าไปในโครงสร้างอาคารที่ทำการตรวจสอบประมาณ 4 ถึง 5 เซนติเมตร (รูปที่ 3.8) โดยการเจาะเก็บตัวอย่างจะเก็บในส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักของอาคาร คือ โครงสร้างเสาและโครงสร้างคาน และทำการเจาะเก็บตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่าง ในโครงสร้างเดียวกันของแต่ละอาคาร



รูปที่ 3.7 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่านหัวเจาะแบบ Hole Saw



รูปที่ 3.8 แท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะเพื่อทดสอบระยะการเกิดคาร์บอนเนชัน

ก่อนตัวอย่างคอนกรีตที่ได้มาจากการเจาะ จะถูกนำมาผ่าซีกด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) เพื่อทำการทดสอบวัฏระยะการเกิดคาร์บอนเนชัน และแท่งตัวอย่างคอนกรีตหลังฉีกด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ แสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ)



ก) เครื่องทดสอบ UTM



ข) การผ่าซีกตัวอย่างด้วยเครื่อง UTM

รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบ UTM และการผ่าซีกตัวอย่างเพื่อทดสอบระยะการเกิดคาร์บอนเนชัน



รูปที่ 3.10 แท่งตัวอย่างคอนกรีตหลังฉีกด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์

3.6.2 การวัฏระยะการเกิดคาร์บอนเนชัน

ในการทดสอบวัฏระยะการเกิดคาร์บอนเนชัน ใช้สารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์พ่นไปยังคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้ว ถ้าผิวของคอนกรีตที่ถูกฉีกเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มแสดงว่ายังไม่เกิดปฏิกิริยาการคาร์บอนเนชัน หาก

คอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน จากนั้นวัดค่าระยะคาร์บอนเนชันจากระยะความหนาของคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่ไปจุดรอยต่อ (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 การวัดระยะการเกิดคาร์บอนเนชัน

3.7 การหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน

โดยสมการ Fick's first law of diffusion เมื่อทราบอายุของโครงสร้างและความลึกคาร์บอนเนชัน สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันได้จากสมการที่ (3.3)

$$d = k\sqrt{t} \quad (3.3)$$

โดยที่ d คือ ค่าความลึกคาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร)

t คือ อายุของโครงสร้าง (ปี) และ

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร / ปี^{1/2})

3.8 การวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชันและการทำนายอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองจังหวัดชลบุรี

3.8.1 การประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชัน

- โดยใช้สมการของ Fick's first law of diffusion (สมการที่ 3.4 และ 3.5)

$$1) \quad d = k\sqrt{t} \quad (3.4)$$

$$2) \quad Z = \frac{(\bar{X}_{car,real(pH)} - \bar{X}_{cover}) - (0)}{\sqrt{S_{car,real}^2 + S_{cover}^2}} \quad (3.5)$$

โดยที่ Z คือ ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานนำไปเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้งของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชัน

0 คือ ค่าผลต่างของข้อมูลระยะคาร์บอนเนชันเฉลี่ยและระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ยที่ทำให้เหล็กเสริมมีโอกาสเกิดสนิม ($\bar{X}_{car,real(pH)} > \bar{X}_{cover}$)

\bar{X}_{cover} คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย (มม.)

$\bar{X}_{car,real(pH)}$ คือ ระยะคาร์บอนเนชันเฉลี่ย

$S_{car,real}^2$ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะคาร์บอนเนชันเฉลี่ย

S_{cover}^2 คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย

3) เปิดตารางพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐาน ซึ่งพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐานนี้คือความน่าจะเป็นที่เหล็กเสริม เกิดสนิม

4) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชัน (ร้อยละ) กับอายุโครงสร้าง (ปี)

- โดยใช้สมการของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) (สมการที่ 3.6 และ 3.7)

$$1) \quad x_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} \quad (3.6)$$

$$2) \quad Z = \frac{(\bar{X}_{car,real(pH)} - \bar{X}_{cover}) - (0)}{\sqrt{S_{car,real}^2 + S_{cover}^2}} \quad (3.7)$$

โดยที่

d, x_c คือ ระยะคาร์บอนเนชันเฉลี่ย

k คือ สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน

t คือ อายุโครงสร้างในขณะทำการทดสอบ

α_1 คือ สัมประสิทธิ์สัมผัสน้ำความเปียกชื้น

สำหรับผิวคอนกรีตสัมผัสน้ำความเปียกชื้น $\alpha_1 = 1$

สำหรับผิวคอนกรีตสัมผัสน้ำความเปียกชื้น $\alpha_1 = 0.95$

α_2 คือ สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน

3.8.2 การทำนายอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

- ตามสมการ Fick's first law of diffusion

เมื่อพิจารณาโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง โครงสร้างเหล่านี้มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนชั้นในอัตราที่สูงซึ่งปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง และส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ในที่สุด จนทำให้โครงสร้างเกิดความวิบัติขึ้นตามมา การวางแผนเพื่อจะให้โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น อย่างไรก็ตามโดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion (สมการที่ 3.8) เมื่อทราบสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นก็สามารถทำนายอายุโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้

$$d = k\sqrt{t} \quad (3.8)$$

- ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

มาตรฐานการออกแบบของกรมโยธาธิการและผังเมืองเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถในการทำนายอายุโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้โดยใช้ (สมการที่ 3.9) [2]

$$x_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} \quad (3.9)$$

โดยที่ x_c คือ ความลึกคาร์บอนชั้น (มิลลิเมตร) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ

α_1 คือ สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้นโดย

เท่ากับ 1.00 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น และ

เท่ากับ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น

α_2 คือ สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น พิจารณาได้จากตารางที่ 3.3 และ t คืออายุของโครงสร้าง (ปี) โดยระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 3.12 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต

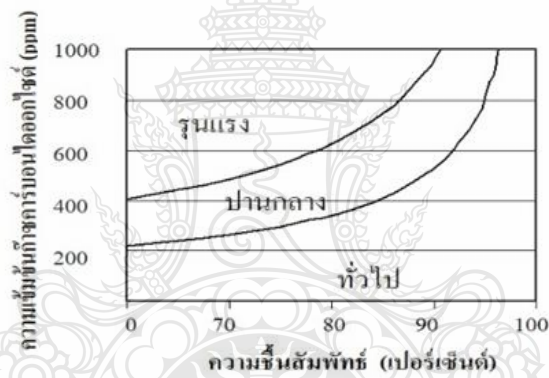
k คือ สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น ดังสมการที่ (3.10)

$$k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3 \quad (3.10)$$

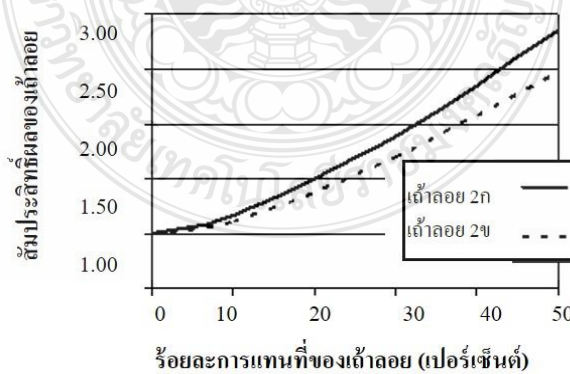
เมื่อ w/b คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
 โดย k_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุ
 ประสาน (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ วสท. 1014-46)
 ดังรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.3 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอน [2]

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	α_2
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง	1.00



รูปที่ 3.12 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอน [2]



รูปที่ 3.13 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน [2]

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

ผลการศึกษาและวิเคราะห์การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ซึ่งมีจำนวน 14 อาคาร มีรายละเอียดดังนี้ 1) ตรวจพินิจอาคาร 2) ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 3) กำลังอัดคอนกรีต 4) ตำแหน่งเหล็กเสริมและวัตรระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 5) การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน 6) สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน 7) วิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชัน เพื่อประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชัน และการทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของอาคารเนื่องจากคาร์บอนเนชันของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

4.1 ตรวจพินิจอาคาร

จากการตรวจพินิจหรือการตรวจสอบด้วยตาเปล่าได้บันทึกร่องรอยของความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรีเนื่องจากการเกิดคาร์บอนเนชัน จำนวน 14 อาคารนั้น พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันและไม่แตกต่างกันมากนัก โดยได้ทำการแยกประเภทเป็นความเสียหายภายนอกอาคารและความเสียหายภายในอาคาร

4.1.1 ความเสียหายภายนอกอาคาร

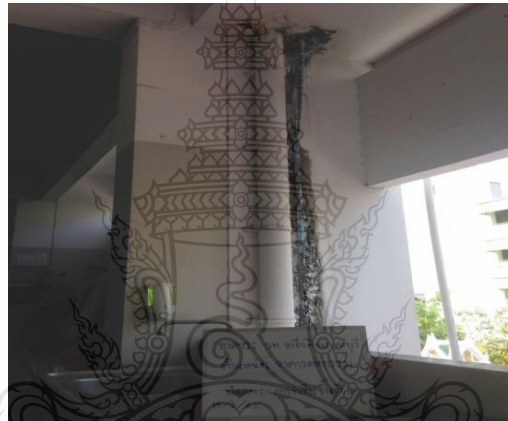
รูปที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงความเสียหายของอาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี และอาคารของวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นที่ภายนอกอาคาร ซึ่งการเสียหายเกิดลักษณะ



รูปที่ 4.1 การแตกร้าวและหลุดร่อนของปูนฉาบบริเวณใต้ท้องคานชั้นที่ 1 ของอาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล



รูปที่ 4.2 การแตกร้าวและหลุดร่อนของโครงสร้างตอม่อของสะพานลอยคนเดินข้าม
วิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี



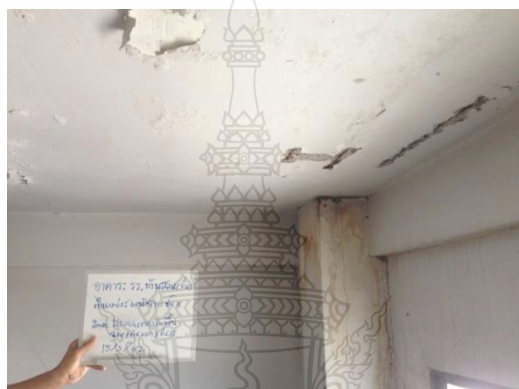
รูปที่ 4.3 ปัญหาน้ำฝนรั่วซึมและการหลุดร่อนของสีอาคารของวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี

4.1.2 ความเสียหายภายในอาคาร

รูปที่ 4.4 ถึง 4.5 แสดงความเสียหายรอยร้าวของพื้นและผนังชั้นที่ 4 ของอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี และปัญหาที่เกิดกับห้องพื้นชั้น 5 เกิดกะเทาะเห็นเหล็กเสริมเป็นสนิมของอาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันทนุสรณ์) ตามลำดับ ซึ่งเป็นความเสียหายเกิดขึ้นที่ภายในอาคาร



รูปที่ 4.4 รอยร้าวพื้นและผนังชั้นที่ 4 ของอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี



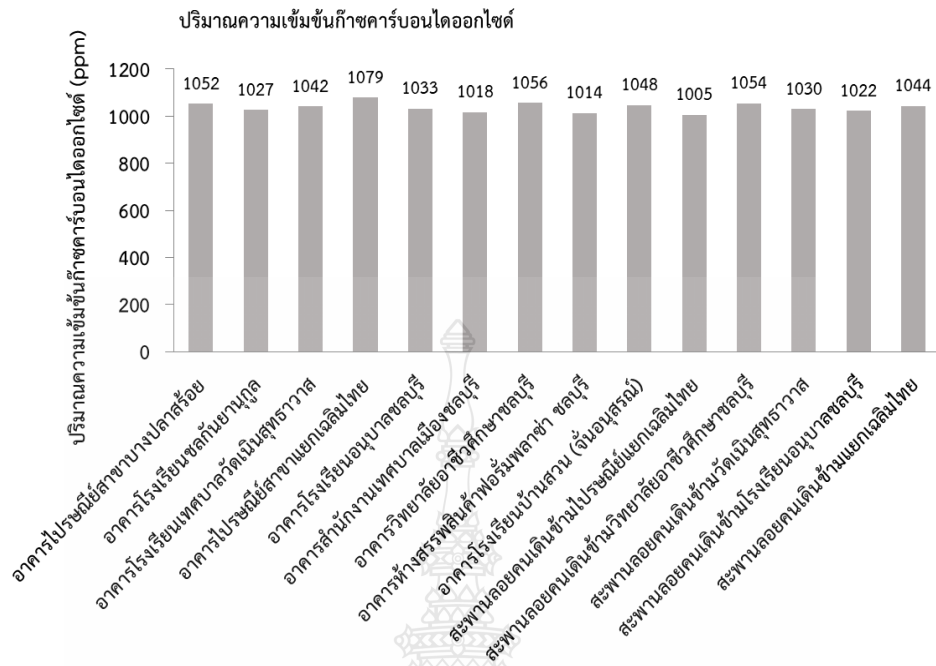
รูปที่ 4.5 ท้องพื้นชั้น 5 เกิดกะเทาะเห็นเหล็กเสริมเป็นสนิมของอาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันทอนุสรณ์)

4.2 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์

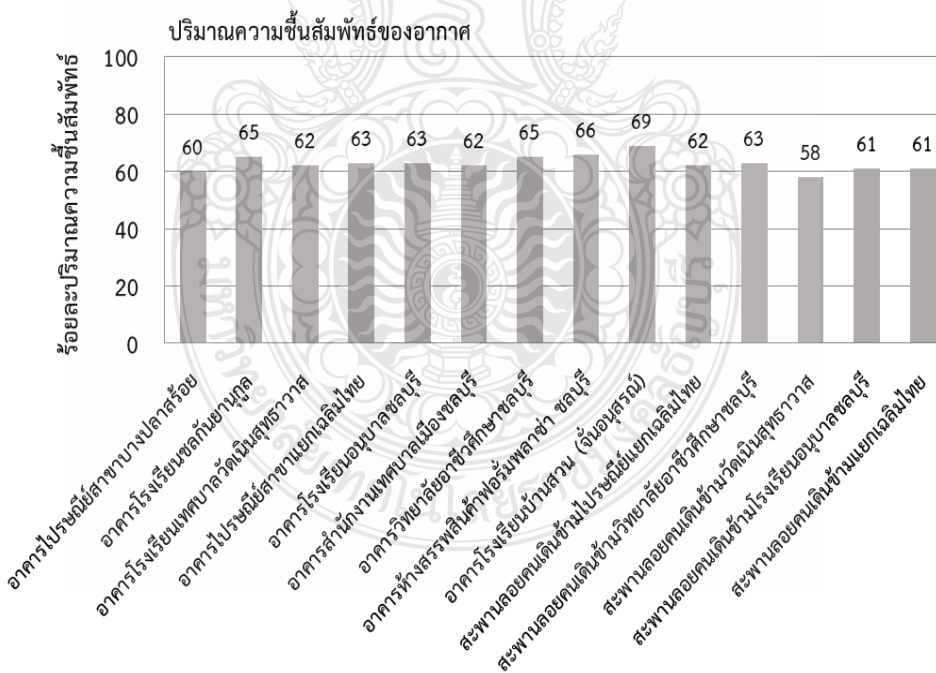
ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การพัฒนาความถี่คาร์บอนเนชันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการเกิดคาร์บอนเนชันนั้น ต้องอาศัยปัจจัยที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โดยค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชันในระดับรุนแรงมีค่าเท่ากับ 400 ppm เป็นต้นไป ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 60 (ความชื้นสัมพัทธ์กึ่งชื้นกึ่งแห้ง) จัดว่าเป็นสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนเนชันรุนแรงเช่นกัน [2] เมื่อปัจจัยทั้งสองด้านมีความเสี่ยงในระดับที่สูงย่อมทำให้การเสื่อมสรุบเนื่องจากคาร์บอนเนชันสูงขึ้นตามลำดับสำหรับโดยรวมของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ซึ่งมีจำนวน 14 อาคาร (ตารางที่ 4.1) พบว่า มีความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างสูง คือ 1,005.27 ถึง 1,079.40 ppm และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่างร้อยละ 46.91 ถึง 57.41 โดยเมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน มยผ. [2] ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีภาวะความเสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนเนชันที่ระดับความรุนแรง

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

อาคารที่ตรวจสอบ	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		ความชื้นสัมพัทธ์	
	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ppm)	ปริมาณเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย	1051.53	85.57	51.22	8.23
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	1026.67	14.04	55.53	7.10
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส	1041.53	37.55	52.85	7.39
อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย	1079.40	66.62	46.91	10.06
อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	1033.47	51.38	52.00	7.26
อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี	1018.47	15.90	53.67	9.28
อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	1055.87	75.26	47.29	12.99
อาคารห้างสรรพสินค้าฟอร์มพลาซ่า ชลบุรี	1013.60	19.26	56.05	8.22
อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	1047.73	21.32	47.90	14.55
สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	1005.27	20.25	57.41	5.92
สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	1054.40	45.40	56.58	4.25
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	1030.20	110.06	53.44	3.22
สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	1021.93	61.31	56.83	2.65
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	1043.67	46.10	58.17	4.99



รูปที่ 4.6 ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.7 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

4.3 กำลังอัดคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ

จากผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยวัดการสะท้อนกลับของผิวของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ (Schmidt Hammer) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ซึ่งมีจำนวน 14 อาคาร พบว่า มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 225 ถึง 367 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ตารางที่ 4.2) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานโครงสร้างทั่วไป

4.4 ตำแหน่งเหล็กเสริมและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

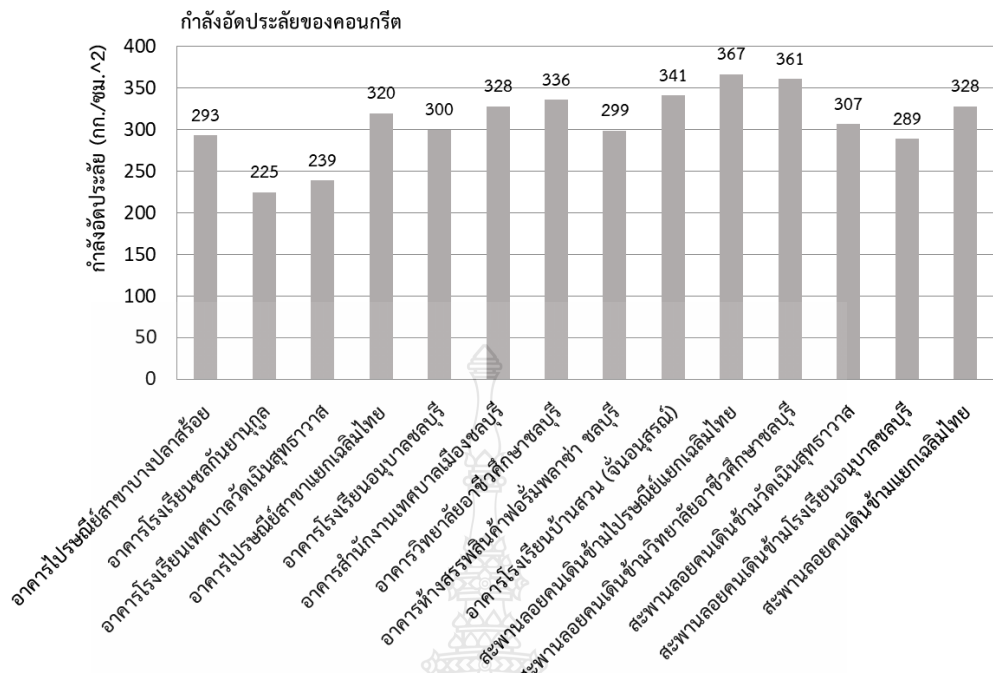
จากผลการทดสอบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ซึ่งมีจำนวน 14 อาคาร มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 31 ถึง 43 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.2) ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ออกแบบมาตรฐานที่กำหนด [3] แสดงให้เห็นว่าการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

จากตารางที่ 4.2 พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่ามากทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุความผิดพลาดของเครื่องวัดกำลังอัด และความผิดพลาดเนื่องจากการอ่านค่ากำลังอัด ซึ่งจากสองสาเหตุดังกล่าวนี้ทำให้ความผิดพลาดของข้อมูลกำลังอัดดังกล่าวเกิดการสะสม จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลกำลังอัดมีค่ามาก ในอนาคตข้างหน้าระยะคาร์บอนชั้นจะเพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งานจนถึงเหล็กเสริมภายในคอนกรีต มีผลทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมจนทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งอาจมีผลทำให้กำลังอัดลดน้อยลงแตกต่างกันไป

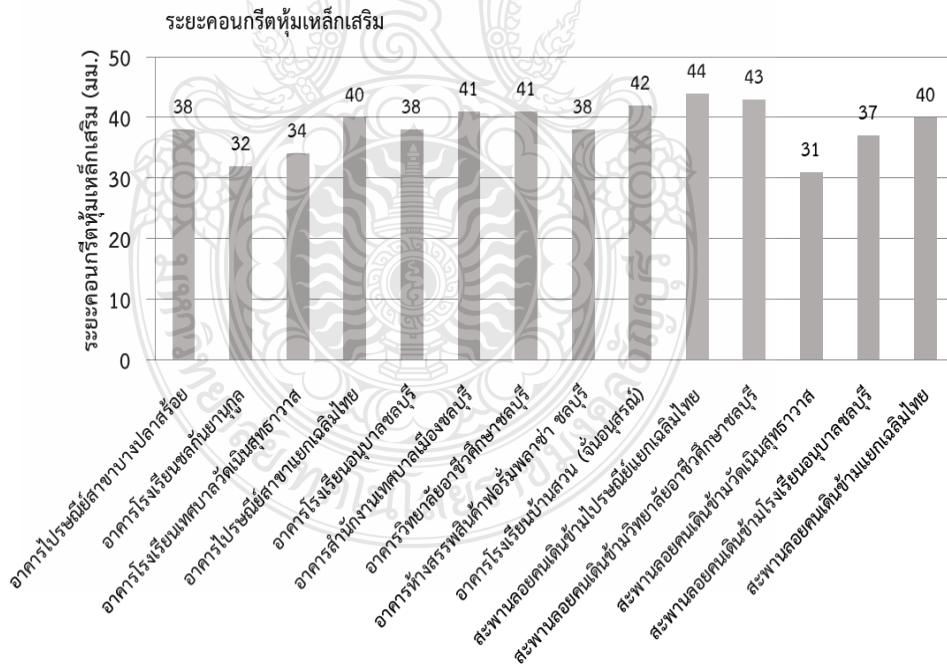


ตารางที่ 4.2 กำลังอัดประลัย (โดย Schmidt Hammer) และระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

อาคารที่ตรวจสอบ	อายุ (ปี)	ระยะคอนกรีต หุ้มเหล็กเสริม		กำลังอัดประลัย	
		ระยะ	ส่วน	กำลังอัด	ส่วน
		เฉลี่ย (มม.)	เบี่ยงเบน มาตรฐาน	เฉลี่ย (ksc)	เบี่ยงเบน มาตรฐาน
อาคารประชณีย์สาขาบางปลาสร้อย	67	37.69	5.55	292.70	4.66
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	59	32.26	12.71	225.05	23.44
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	51	33.61	10.53	238.80	19.63
อาคารประชณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย	50	39.85	11.91	319.54	2.77
อาคารเรียนอนุบาลชลบุรี	41	38.31	6.21	300.44	2.53
อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี	37	40.51	17.35	328.24	5.18
อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	34	41.19	9.77	336.19	7.39
อาคารห้างสรรพสินค้าฟอร์ัมพลาซ่า ชลบุรี	31	38.20	12.96	299.04	2.92
อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	20	41.57	17.88	341.01	8.72
สะพานลอยคนเดินข้ามไปประชณีย์แยก เฉลิมไทย	38	43.70	8.79	367.46	16.06
สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	30	43.22	9.77	361.49	14.40
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนิน สุทธาวาส	28	31.10	9.44	307.38	0.60
สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียน อนุบาลชลบุรี	24	37.40	6.89	289.01	5.70
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	21	40.49	7.19	327.54	4.99



รูปที่ 4.8 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต



รูปที่ 4.9 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

4.5 การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น

ในการทดสอบหาระยะการเกิดคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี จะต้องทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยจะต้องทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่านหัวเจาะแบบ Hole Saw โดยการเจาะเก็บตัวอย่างจะเก็บในส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักของอาคาร คือ โครงสร้างเสาและโครงสร้างคาน และทำการเจาะเก็บตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่าง ในโครงสร้างเดียวกันของแต่ละอาคาร

ในส่วน of ระยะเวลาความลึกคาร์บอนเนชั่น (ตารางที่ 4.3) นั้น พบว่าอาคารห้างสรรพสินค้าฟอร์รัมพลาซ่า ชลบุรี มีค่ามากที่สุด ตามไปด้วย สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันทอนุสรณ์) และอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอายุของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มากนั้น การทำลายคอนกรีตเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ย่อมนานกว่า ส่งผลให้การเกิดคาร์บอนเนชั่นที่มากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากผลของกำลังอัดประลัยของโครงสร้าง ปริมาณความชื้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในบริเวณแต่ละพื้นที่ที่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ตั้งอยู่นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.2) จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ไม่แตกต่าง



ตารางที่ 4.3 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยเฉลี่ย (X) ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นเฉลี่ย (d) และค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ย (k) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

ชื่ออาคารสถานที่	X (มิลลิเมตร)	d (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร/ปี ^{0.5})
อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย	37.69	12.83	0.45
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	32.26	36.21	1.36
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส	33.61	34.08	1.38
อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย	39.85	4.50	0.18
อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	38.31	9.29	0.42
อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี	40.51	39.08	1.85
อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	41.19	13.79	0.68
อาคารห้างสรรพสินค้าฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	38.20	52.58	2.73
อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	41.57	7.54	0.49
สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	43.70	41.17	1.93
สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	43.22	38.63	2.04
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	31.10	33.79	1.84
สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	37.40	12.67	0.75
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	40.49	31.88	2.01

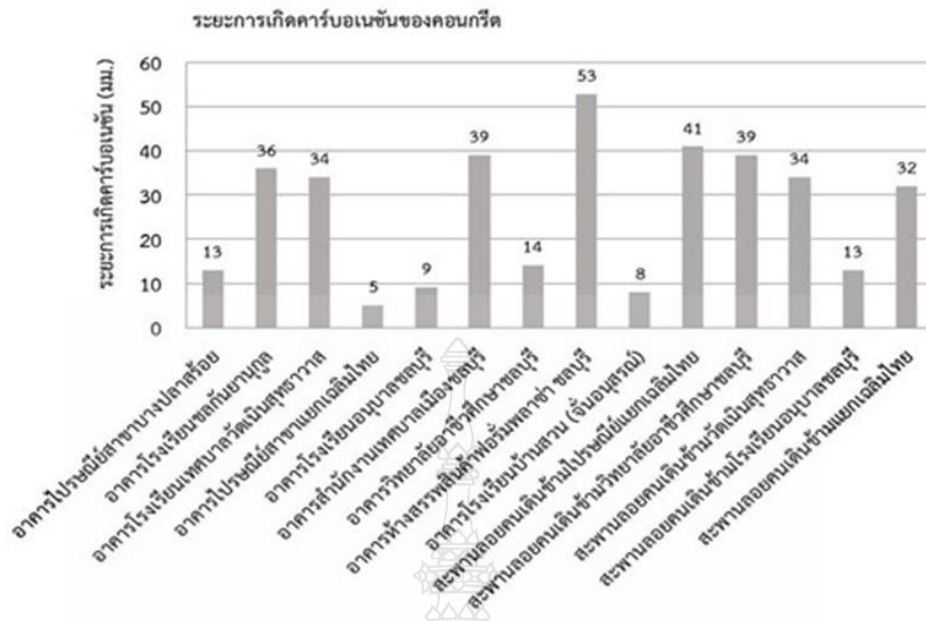
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น

จากผลการทดสอบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นได้ (โดยสมการ Fick's first law of diffusion เมื่อทราบอายุของโครงสร้างและความลึกคาร์บอนชั้น สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นได้จากสมการ $d = k\sqrt{t}$) จากตารางที่ 4.4 พบว่า อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของอาคารห้างสรรพสินค้าฟอรัมพลาซ่าชลบุรี มีค่ามากที่สุด ตามด้วย สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์) อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรีและอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย ตามลำดับ

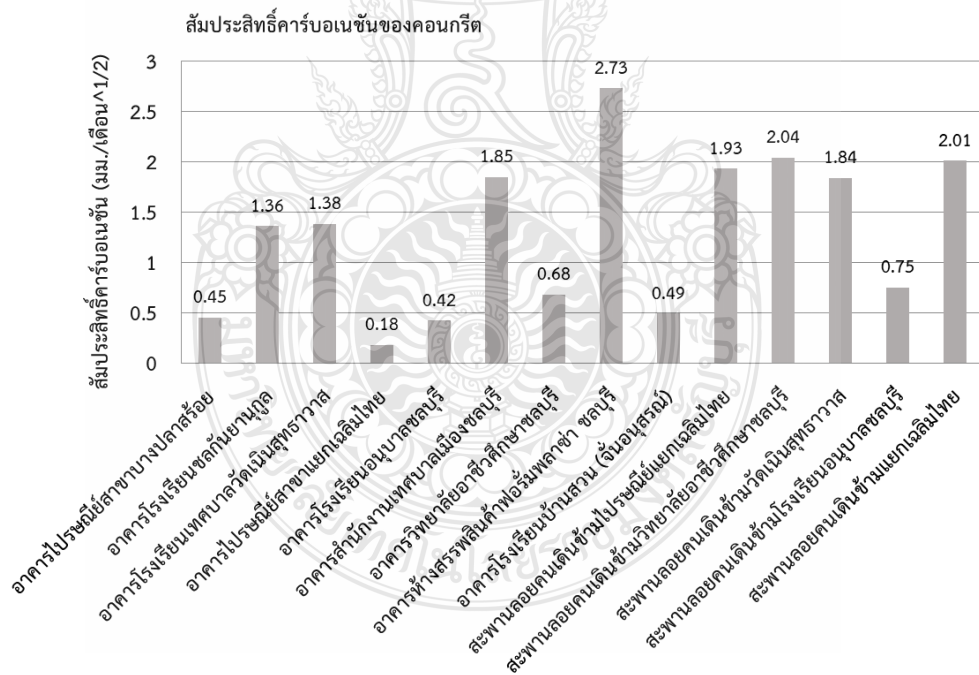
ตารางที่ 4.4 ระยะคาร์บอนชั้นและสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีต

อาคารที่ตรวจสอบ	อายุ (ปี)	ระยะคาร์บอนชั้น		สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น	
		ระยะเฉลี่ย (มม)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	K (มม./เดือน ^{1/2})	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย	67	12.83	6.04	0.45	0.21
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	59	36.21	7.68	1.36	0.29
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส	51	34.08	17.64	1.38	0.71
อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย	50	4.50	1.14	0.18	0.05
อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	41	9.29	3.47	0.42	0.16
อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี	37	39.08	14.67	1.85	0.70
อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	34	13.79	6.98	0.68	0.35
อาคารห้างสรรพสินค้าพอร์มพลาซ่า ชลบุรี	31	52.58	10.04	2.73	0.52
อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	20	7.54	1.93	0.49	0.12
สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิม ไทย	38	41.17	4.68	1.93	0.22
สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	30	38.63	7.32	2.04	0.39
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	28	33.79	13.99	1.84	0.76
สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาล ชลบุรี	24	12.67	10.40	0.75	0.62
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	21	31.88	6.50	2.01	0.41





รูปที่ 4.10 ระยะเวลาเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารที่ศึกษา



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารที่ศึกษา

4.7 การวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนชั้นและการทำนายอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

4.7.1 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนชั้น

จากการศึกษาวิเคราะห์ค่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ดังที่กล่าวแล้ว ประกอบด้วยอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ซึ่งมีจำนวน 14 อาคาร ได้แก่ อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลา อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี อาคารห้างสรรพสินค้าพอรัมพลาซ่าชลบุรี อาคารโรงเรียนบ้านสวน(จันทน์อนุสรณ์) สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย ได้ผลการศึกษาความเสี่ยงที่เหล็กจะเกิดสนิมในโครงสร้าง ตามสมการ fick's first law of diffusion และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) โดยให้ผิวคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้สัมผัสกับความเปียกชื้น และให้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นเฉลี่ย (k) มีค่าคงที่ตลอดอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้าง โดยใช้สมการที่ (3.4) และ (3.5) โดยผลของการคำนวณความเสี่ยงในการเกิดสนิมแสดงดังตารางที่ 4.5

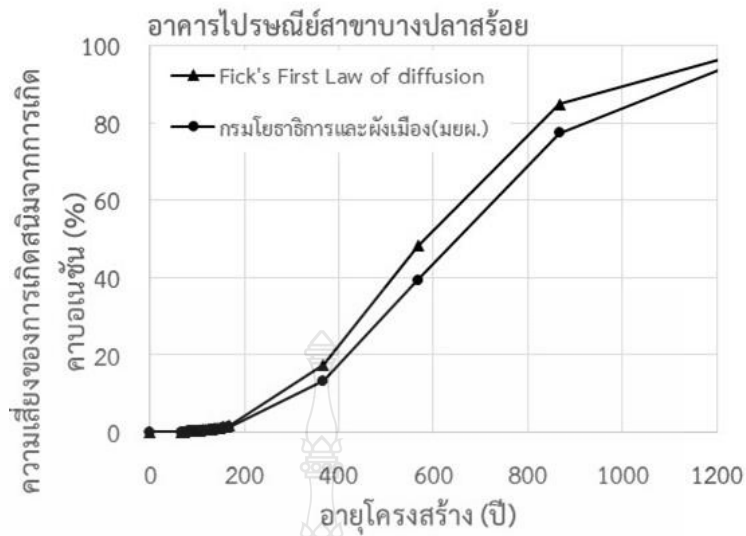
รูปที่ 4.12 ถึง 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคาร เพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของแต่ละอาคารที่ใช้สมการต่างกัน คือ สมการ fick's first law of diffusion และสมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) พบว่า มีค่าความเสี่ยงที่ต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะสมการกรมโยธาธิการและผังเมือง ได้มีการพิจารณาเพิ่มเติมเงื่อนไขของปัจจัยที่มีผลต่อความเสี่ยงการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก กล่าวคือ ได้แบ่งประเภทของโครงสร้างคอนกรีตที่ไม่สัมผัสกับความเปียกชื้นและที่สัมผัสกับความเปียกชื้น รวมทั้งได้แบ่งความรุนแรงของระดับความเข้มของคาร์บอนชั้นไว้ที่ 3 ระดับ (ตารางที่ 3.3) คือ สภาวะทั่วไป สภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง และสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง ซึ่งการคำนวณโดยสมการของ fick's first law of diffusion ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณโดยสมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้พิจารณากรณีที่คอนกรีตไม่สัมผัสกับความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง สำหรับการคำนวณหาความเสี่ยงการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในครั้งนี้ เลือกรณีที่คอนกรีตมีการสัมผัสกับความเปียกชื้นและอยู่ในสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง

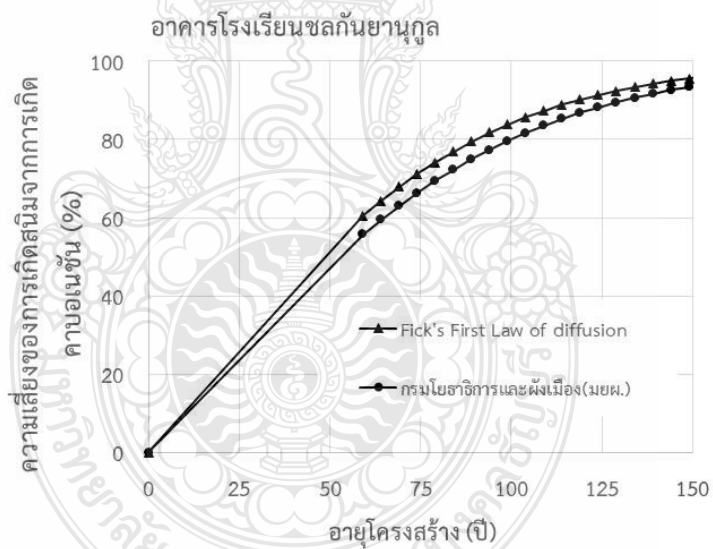
ตารางที่ 4.5 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

ชื่ออาคารสถานที่	อายุโครงสร้าง (ปี)	ความเสี่ยงการเกิดสนิม(%)	
		fick's first law of diffusion	กรมโยธาธิการ และผังเมือง (มยผ.)
อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย	67	0.12	0.09
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	59	60.49	55.73
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส	51	50.19	47.61
อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย	50	0.16	0.15
อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	41	0.00	0.00
อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี	37	47.49	44.08
อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	34	1.12	0.97
อาคารห้างสรรพสินค้าฟอร์หมพลาซ่า ชลบุรี	31	80.98	76.32
อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	20	2.92	2.79
สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	38	39.97	32.25
สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	30	35.35	29.66
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	28	56.33	52.36
สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	24	2.37	2.10
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	21	18.72	14.62

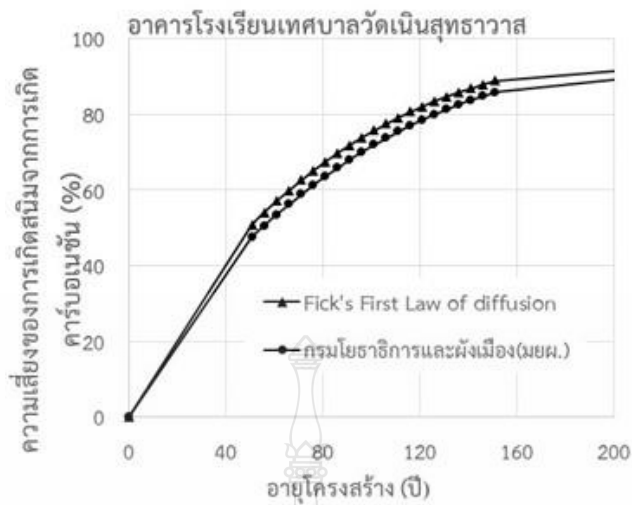




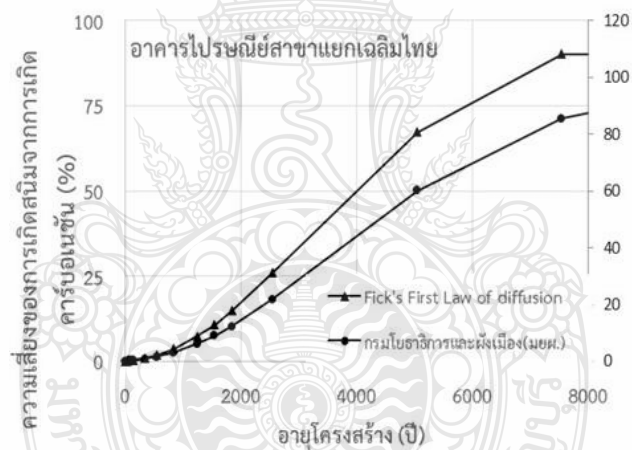
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนขึ้นกับอายุโครงสร้างอาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย



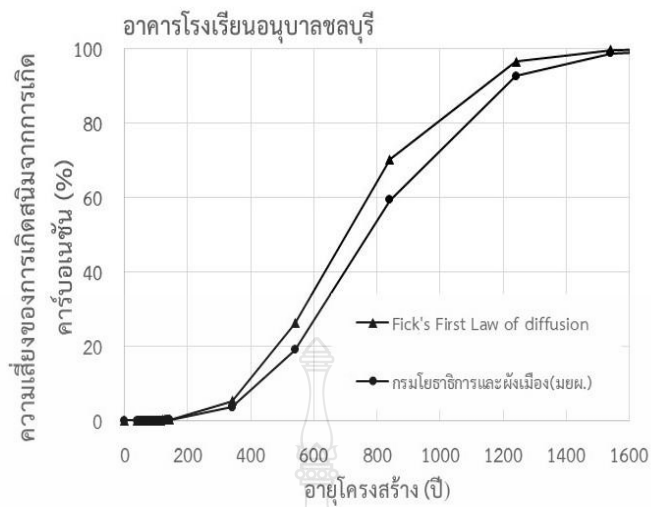
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนขึ้นกับอายุโครงสร้างของอาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล



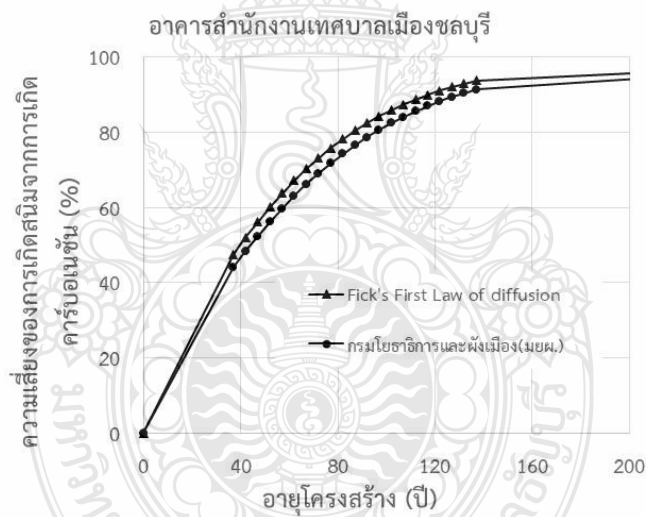
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุโครงสร้างของอาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส



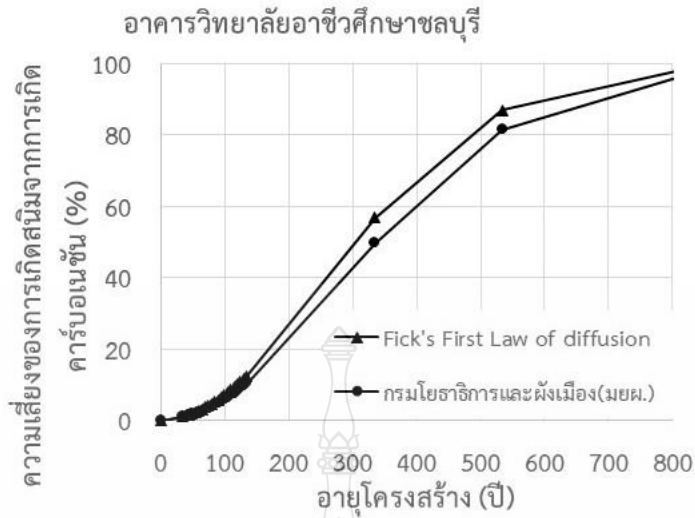
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุโครงสร้างของอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย



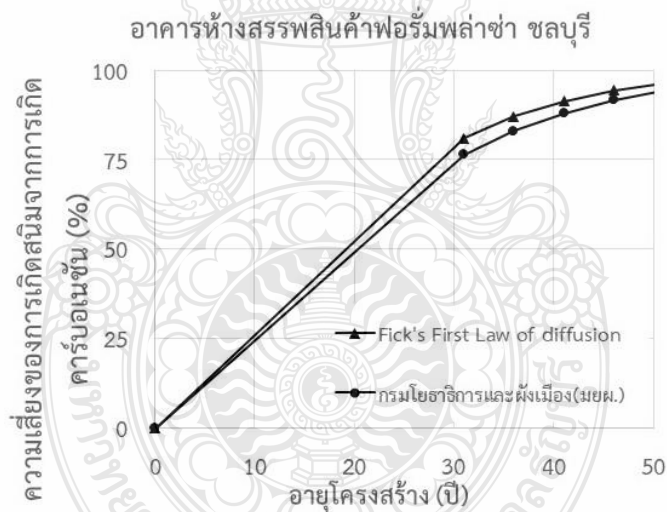
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนขึ้นกับอายุโครงสร้างของอาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี



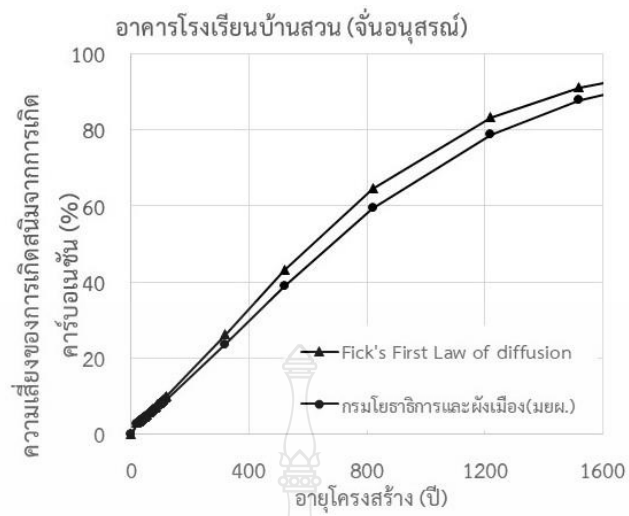
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนขึ้นกับอายุโครงสร้างของอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี



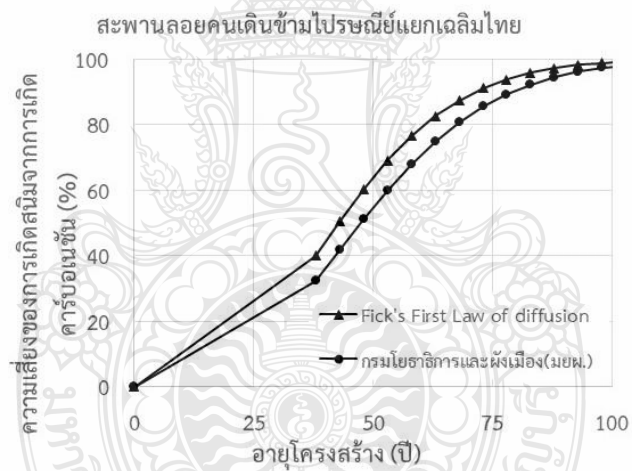
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุโครงสร้างของอาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี



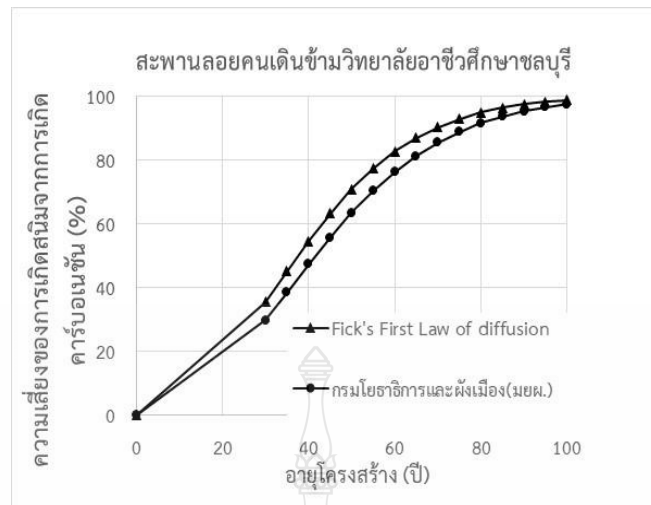
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุโครงสร้างของอาคารห้างสรรพสินค้าฟอร์มพลาซ่าชลบุรี



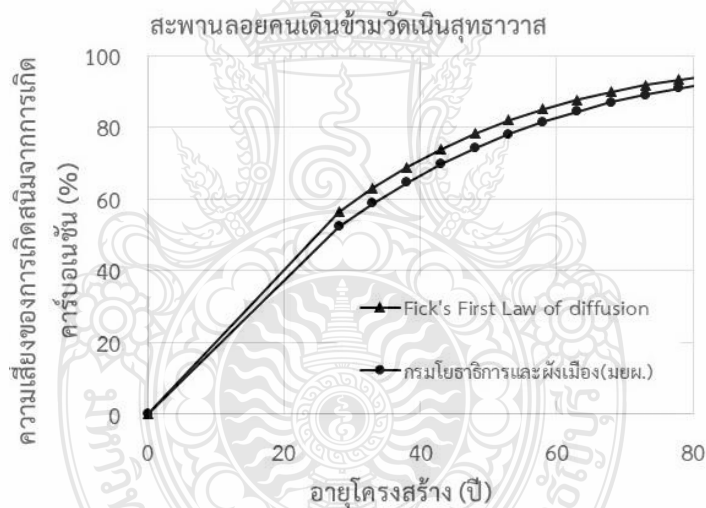
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนขึ้นกับอายุโครงสร้างของอาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันทบุรี)



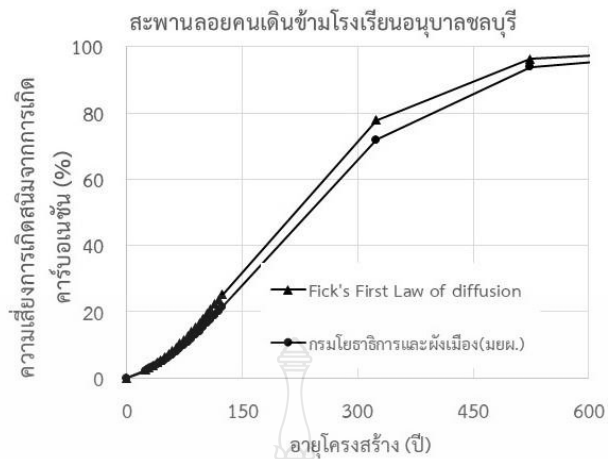
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนขึ้นกับอายุโครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย



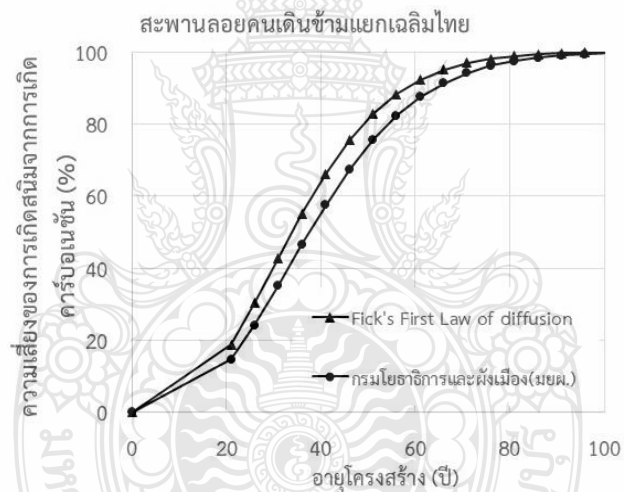
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุโครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุโครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสโมกจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุโครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสโมกจากการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอายุโครงสร้างของสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย

4.7.2 การทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มเนื่องจากคาร์บอนชั้นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

จากการศึกษาการทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มเนื่องจากคาร์บอนชั้นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ได้ผลการทดสอบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ ดังตารางที่ 4.1 ส่วนตารางที่ 4.3 แสดงระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยเฉลี่ย (x) ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นเฉลี่ย (d) และค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ย (k) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี

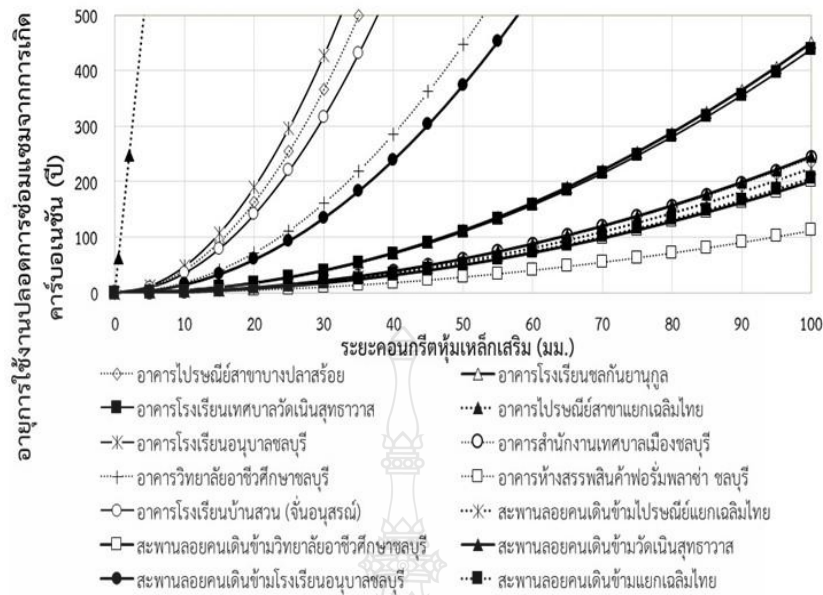
สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ ในส่วนการทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มเนื่องจาก คาร์บอนชั้นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี จะพิจารณาการทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามสมการ fick's first law of diffusion และการทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มเนื่องจากคาร์บอนชั้นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

4.7.2.1 การทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ตามสมการ fick's first law of diffusion

การทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ตามสมการ fick's first law of diffusion โดยสมการคือ $X_c = k \cdot \sqrt{t}$ ได้พิจารณาผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น ที่มีต่อการทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก) ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

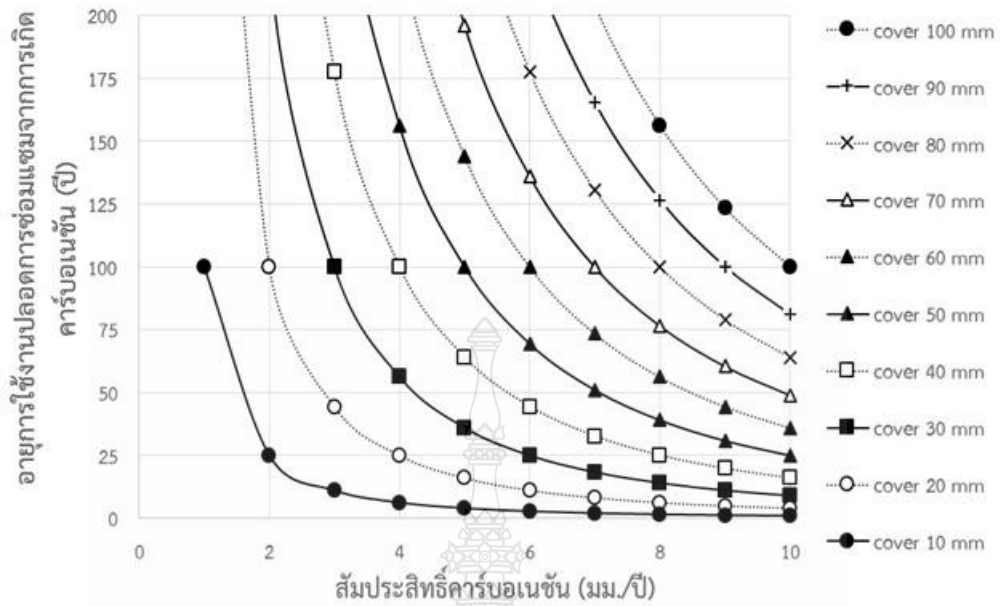
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion พบว่า อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ทั้ง 14 อาคารที่ศึกษาในครั้งนี้ อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย มีแนวโน้มมีอายุใช้งานน้อยที่สุด ในขณะที่อาคารห้างสรรพสินค้าฟอร์รัมพลาซ่าชลบุรี มีแนวโน้มมีอายุการใช้งานปลอดภัยมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะค่าความลึกการเกิดคาร์บอนชั้น (d) และค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น (k) ของอาคารห้างสรรพสินค้าฟอร์รัมพลาซ่าชลบุรีมีค่าที่มากกว่าของอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย (ค่าความลึกการเกิดคาร์บอนชั้น (d) เท่ากับ 52.58 มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น (k) เท่ากับ 2.73 มิลลิเมตร/ปี^{0.5} ของอาคารห้างสรรพสินค้าฟอร์รัมพลาซ่าชลบุรี และ ค่าความลึกการเกิดคาร์บอนชั้น (d) เท่ากับ 4.50 มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น (k) เท่ากับ 0.18 มิลลิเมตร/ปี^{0.5} ของอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระหว่างอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มของอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มากกว่า จะให้ค่าอายุการใช้งานปลอดภัยของหม้อต้มที่นานกว่า



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion

ข) ผลจากสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน

รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion พบว่า อาคารโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันที่น้อย ทำให้อายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนานกว่าของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันมาก และเห็นได้ชัดเจนว่าอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มากกว่า ส่งผลให้อาคารมีอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมนานกว่าของอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion

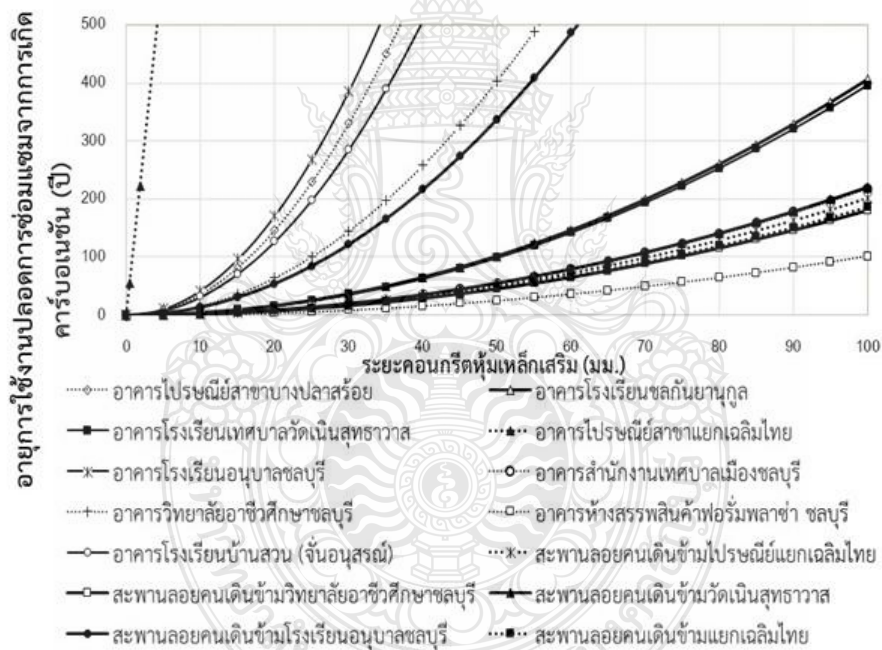
4.7.2.2 การทำนายอายุของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

การทำนายอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ตามสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยสมการคือ $X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t}$ ได้พิจารณาผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน ที่มีต่อการทำนายอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยสัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสรูปแวดล้อมแสดงดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นการแบ่งระดับความรุนแรงของสรูปแวดล้อมคาร์บอนเนชัน

ก) ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

- กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเข้มข้นแรง ซึ่งจะได้ $\alpha_1=1$ และ $\alpha_2=1$ ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี จะได้ค่าเหมือนกับของสมการ fick's first law of diffusion

- กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเข้มข้นแรง ซึ่งจะได้ $\alpha_1=0.95$ และ $\alpha_2=1$ ตามลำดับนั้น โดยรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง พบว่า อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ทั้ง 14 อาคารที่ศึกษา อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย มีแนวโน้มมีอายุใช้งานน้อยที่สุด ในขณะที่อาคารห้างสรรพสินค้าฟอรัมพลาซ่าชลบุรี มีแนวโน้มมีอายุการใช้งานมากที่สุด ให้ผลในทิศทางเดียวกับของสมการ fick's first law of diffusion เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

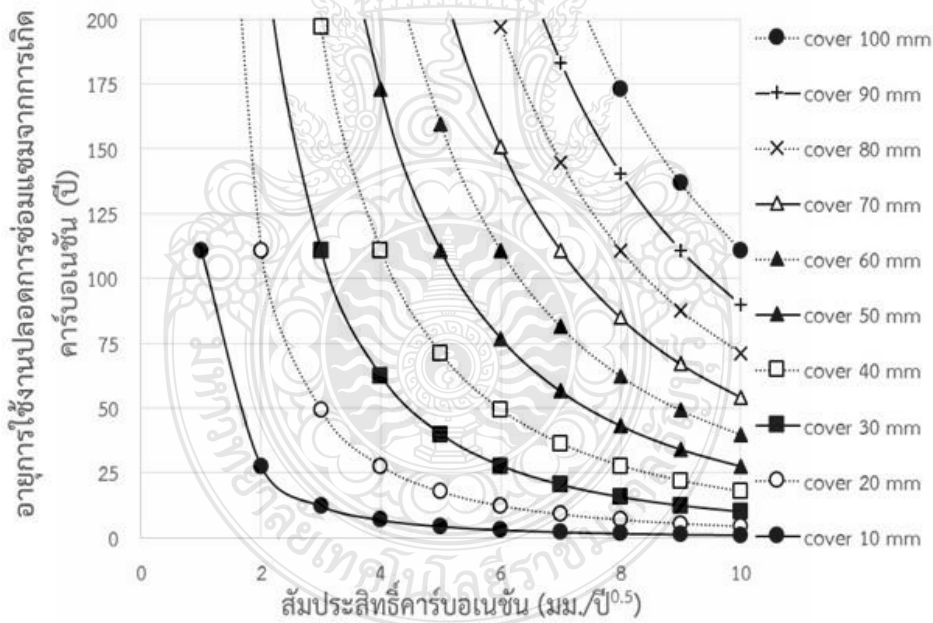


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเข้มข้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเข้มข้นแรง

ข) ผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น

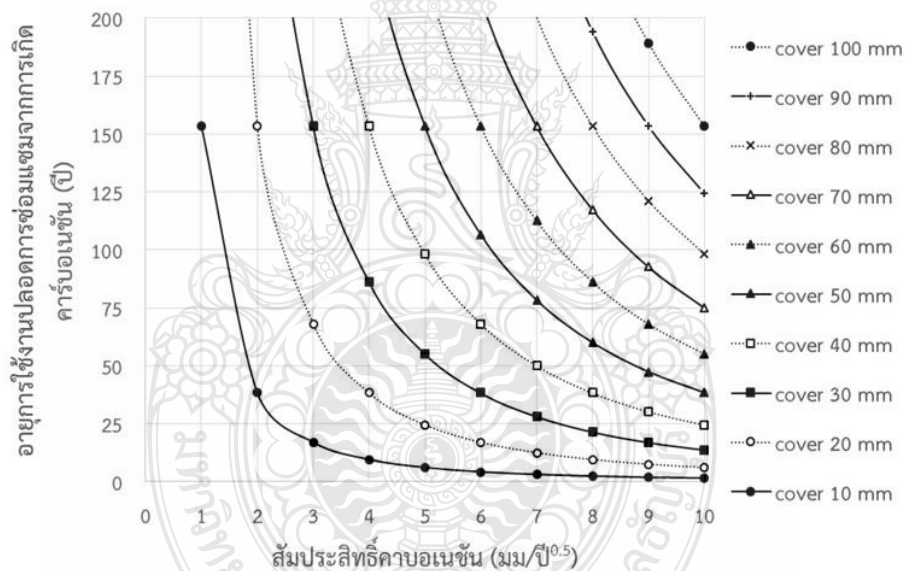
ในทำนองเดียวกันกรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง ซึ่งจะได้ได้ $\alpha_1=1$ และ $\alpha_2=1$ นั้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้นกับอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี จะได้ค่าเหมือนกับของสมการ fick's first law of diffusion

ส่วนรูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้นกับอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง ซึ่งจะได้ $\alpha_1=0.95$ และ $\alpha_2=1$ ตามลำดับ พบว่า อาคารโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้นที่น้อย ทำให้อายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนานกว่าของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้นมาก และเห็นได้ชัดเจนว่าอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มากกว่า ส่งผลให้อาคารมีอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมนานกว่าของอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่น้อยกว่า ให้ผลเช่นเดียวกับวิธีของสมการ fick's first law of diffusion ซึ่งสามารถทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างได้เช่นกัน

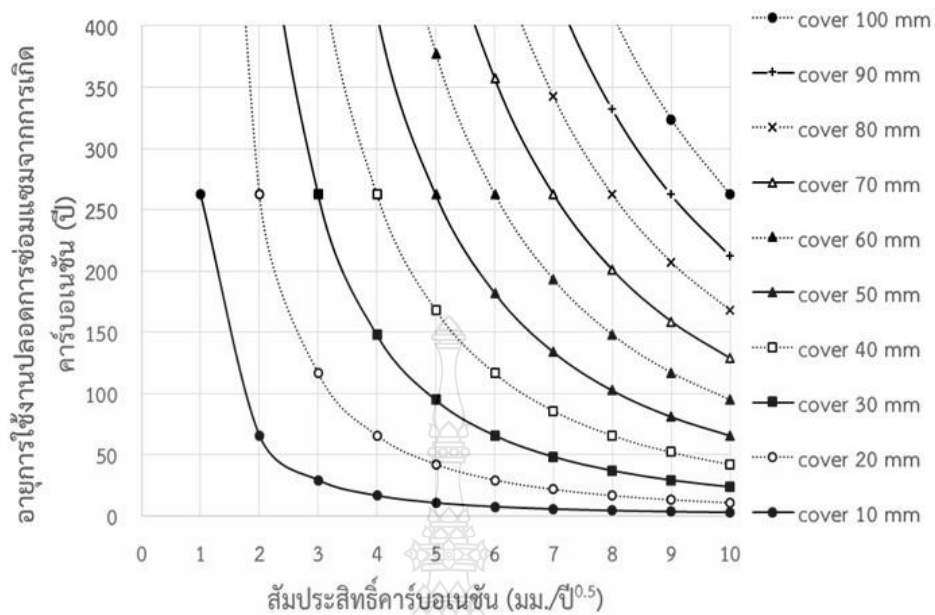


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นกับอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง

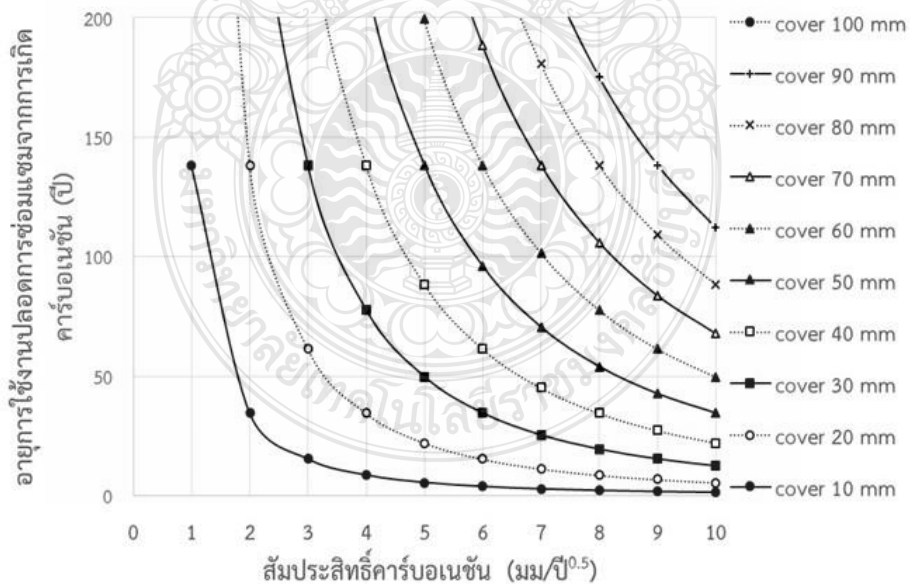
รูปที่ 4.30 และ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง เมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง ซึ่งจะได้ $\alpha_1=1$ และ $\alpha_2=0.85$ และเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันทั่วไป ซึ่งจะได้ $\alpha_1=1$ และ $\alpha_2=0.65$ ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.32 และ รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง เมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง ซึ่งจะได้ $\alpha_1=0.95$ และ $\alpha_2=0.85$ และเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันทั่วไป ซึ่งจะได้ $\alpha_1=0.95$ และ $\alpha_2=0.65$ ตามลำดับ ซึ่งจะให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน



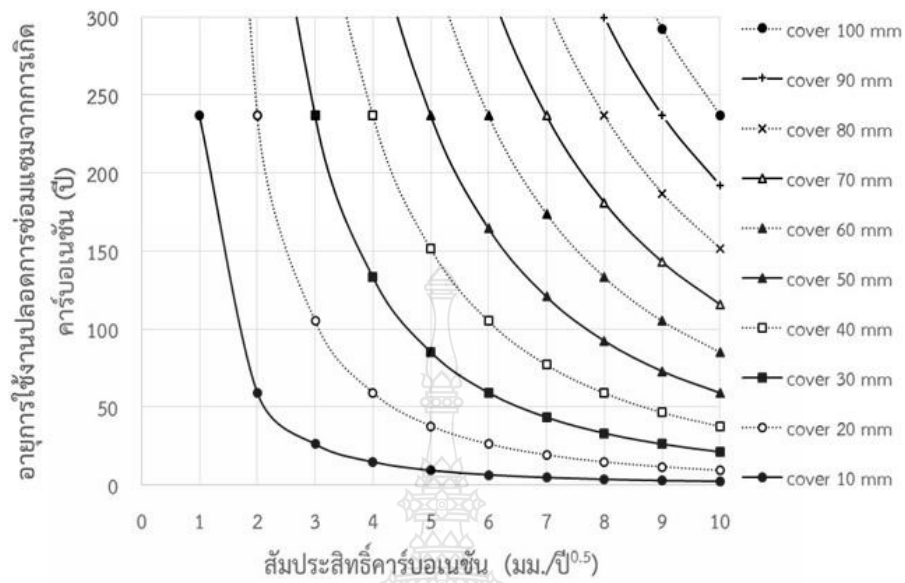
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาบอเนชันกับอายุการใช้งานตลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลอดภัยของคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง
กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสกับความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันทั่วไป



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลอดภัยของคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง
กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสกับความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง
กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสกับความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันทั่วไป



บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ในครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความเสียหายของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันและแตกต่างกันไม่มากนัก โดยความเสียหายส่วนมากที่เกิดขึ้นจากภายนอกมีมากกว่าของที่เกิดขึ้นจากภายใน

2) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรีมีค่ามากกว่า 600 ppm ซึ่งจัดอยู่ในสถานะที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพจากคาร์บอนเนชั่นในระดับรุนแรง

3) ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมและกำลังอัดประลัยของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี มีแนวโน้มเป็นไปตามข้อกำหนดทั่วไป

4) ด้วยวิธีตามสมการ fick's first law of diffusion และมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง สามารถประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นและการทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี ที่สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผลที่ได้สามารถนำไปออกแบบและวางแผนบำรุงรักษาโครงสร้างอาคารและโครงสร้างบริเวณใกล้เคียงได้

5) ผลจากประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นและการทำนายอายุการใช้งานปลอดภัยซ่อมแซมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี โดยวิธีตามสมการ fick's first law of diffusion ได้ความเสี่ยงที่มากกว่าและอายุการใช้งานน้อยกว่าวิธีตามสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ปัจจัยสภาพการจราจรในเขตเมืองของจังหวัดชลบุรี มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นซึ่งจะมีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นกับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้ในอนาคตและควรที่จะได้นำไปศึกษาต่อในอนาคต

2) สภาพแวดล้อมในอนาคตและปัจจัยอื่นๆอาจมีการเปลี่ยนแปลง โดยอาจจะทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งควรที่จะนำไปศึกษาต่อในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.
- [2] มาตรฐาน มยผ. 1332 – 55, มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน, กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- [3] มาตรฐาน มยผ. 1501-51 ถึง มยผ. 1507-51, มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย, กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- [4] P. Castro, E.I. Morenob and J. Genesca, (2000). Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings, Cement and Concrete Research, Vol 30, pp. 1565- 1571.
- [5] Standard drawings, Kingdom of Thailand ministry of transport and communications department of highways. 1994.
- [6] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม. 2547.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมวลผสมคอนกรีต. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม. 2550.
- [8] J. Khunthongkeaw, S.Tangtermsirikul and T.Leelawat, (2006). A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete, Construction and Building Materials, Vol.20, pp. 744-753.
- [9] American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Concrete Aggregates. 2018.
- [10] American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. 2005.
- [11] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2018.
- [12] Standard drawings, Kingdom of Thailand ministry of transport and communications department of highways. 1994.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] Hyung-Min Lee, Han-Seung Lee, Sang-ho Min, Seungmin Lim. and Jitendra Kumar Singh, “ Carbonation-Induced Corrosion Initiation Probability of Rebars in Concrete With/Without Finishing Materials,” **Journal of Sustainability**, 2018
- [14] M.G. Alexander, J.R. Mackechnie. and W. Yam, “Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities,” **Cement & Concrete Composites**, Vol. 29, (February-July 2007) : pp 750–759.
- [15] Andreas Leemann. and Fabrizio Moro, “Carbonation of concrete the role of CO2 concentration, relative humidity and CO2 buffer capacity,” **Journal RILEM**, (August 2016-February 2017): pp 1.
- [16] 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, (June 1996) : pp 261-272.
- [17] 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 , (August 2002) : pp 421-426.
- [18] วัจนวงศ์ กรีพละ, รัฐภูมิ ปรีชาติปรีชา และสรรค์ สยามิภักดิ์, ธนากร “การสำรวจ ทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสาโครงการทางรถไฟยกระดับ,” **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 3**, (ตุลาคม 2550) : หน้า 26-34.
- [19] N.I. Fattuhi, “Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period ,” **Materials et Constructions**, Vol 19 , (March 1986): pp 1-2.
- [20] J. Khunthongkeaw,S. Tangtermsirikul. and T. Leelawat, “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete,” **Construction and Building Materials**, Vol 20, (November 2006) : pp 744-753.
- [21] S.K. Roy, K.B. Poh. and D.O. Northwood, “Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies,” **Building and Environment**, Vol 34 , (September 1999). pp 597-606.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] 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, (February 2009) : pp 139–144.
- [23] Cengiz Duran Atis, “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash,” **Construction and Building Materials**, Vol 17, (April 2003): pp.147–152.
- [24] ปุรฉัตร ฉัตรวีระ และทวิสันท์ คงทรัพย์ “ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว ,” **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**, ปีที่ 25, ฉบับที่ 4, (2545): หน้า 373-389.
- [25] J. Banjongrat, K. Wongpiyachetchai, R. Sahamitmongkol. and S. Tangtermsirikul, “Effect of Plastering Mortar and Paint On Carbonation Resistance of Concrete” **Thailand Concrete Association the 6th Annual Concrete Conference**, (October 2010) : pp.359–364
- [26] P.F. Marques. and A. Costa, “Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs performance-based methodologies” **Construction and Building Materials**, Vol.24, (March 2010): pp 258-265.



ภาคผนวก ก

ระยะคาร์บอนเนชั่น



ตารางที่ ก.1 ระยะคาร์บอนชั้นของอาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย

อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย	ระยะคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	16	12	9	8	16	12	12.166
ตำแหน่งที่ 2	11	8	16	12	11	9	11.166
ตำแหน่งที่ 3	8	9	12	16	17	14	12.667
ตำแหน่งที่ 4	16	17	22	17	8	12	15.333
เฉลี่ยรวม							12.833

ตารางที่ ก.2 ระยะคาร์บอนชั้นของอาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล

อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	ระยะคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	23	28	31	37	38	27	30.667
ตำแหน่งที่ 2	48	47	44	41	42	43	44.167
ตำแหน่งที่ 3	34	40	43	42	39	38	39.333
ตำแหน่งที่ 4	28	23	27	28	29	30	30.667
เฉลี่ยรวม							36.208

ตารางที่ ก.3 ระยะคาร์บอนชั้นของอาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส

อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส	ระยะคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	34	31	58	60	36	35	42.333
ตำแหน่งที่ 2	8	13	9	23	9	6	11.333
ตำแหน่งที่ 3	54	55	58	55	53	49	54.000
ตำแหน่งที่ 4	30	29	29	28	28	28	28.667
เฉลี่ยรวม							34.083

ตารางที่ ก.4 ระยะเวลาบอเนชันของอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย

อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย	ระยะเวลาบอเนชัน (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	5	7	4	5	6	5	5.333
ตำแหน่งที่ 2	5	3	4	3	4	4	3.833
ตำแหน่งที่ 3	5	4	4	4	4	3	4.000
ตำแหน่งที่ 4	4	3	7	5	6	4	4.833
เฉลี่ยรวม							4.500

ตารางที่ ก.5 ระยะเวลาบอเนชันของอาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี

อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	ระยะเวลาบอเนชัน (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	9	5	3	7	6	3	5.500
ตำแหน่งที่ 2	8	13	14	13	12	11	11.833
ตำแหน่งที่ 3	5	6	8	14	13	9	9.167
ตำแหน่งที่ 4	11	14	9	10	8	12	10.667
เฉลี่ยรวม							9.292

ตารางที่ ก.6 ระยะเวลาบอเนชันของอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี

อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี	ระยะเวลาบอเนชัน (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	36	41	40	41	37	40	39.167
ตำแหน่งที่ 2	44	42	37	42	44	42	41.833
ตำแหน่งที่ 3	55	56	60	57	65	52	57.500
ตำแหน่งที่ 4	19	18	18	18	18	16	17.833
เฉลี่ยรวม							39.083

ตารางที่ ก.7 ระยะเวลาบ่อนชั้นของอาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี

อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	ระยะเวลาบ่อนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	22	18	19	20	16	32	21.167
ตำแหน่งที่ 2	3	6	4	3	7	3	4.333
ตำแหน่งที่ 3	12	17	16	13	17	18	15.500
ตำแหน่งที่ 4	11	17	15	12	17	13	14.167
เฉลี่ยรวม							13.792

ตารางที่ ก.8 ระยะเวลาบ่อนชั้นของอาคารห้างสรรพสินค้าฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี

อาคารห้างสรรพสินค้าฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	ระยะเวลาบ่อนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	64	63	60	63	64	66	63.333
ตำแหน่งที่ 2	63	59	57	57	59	62	59.500
ตำแหน่งที่ 3	50	48	47	47	48	50	48.333
ตำแหน่งที่ 4	32	38	40	40	45	40	39.167
เฉลี่ยรวม							52.583

ตารางที่ ก.9 ระยะเวลาบ่อนชั้นของอาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันทนุสรณ์)

อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันทนุสรณ์)	ระยะเวลาบ่อนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	5	11	6	6	11	5	7.333
ตำแหน่งที่ 2	9	8	6	8	4	6	6.833
ตำแหน่งที่ 3	9	9	10	8	9	8	8.833
ตำแหน่งที่ 4	5	8	7	6	8	9	7.167
เฉลี่ยรวม							7.542

ตารางที่ ก.10 ระยะคาร์บอนชั้นของสะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์เฉลิมไทย

สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์เฉลิมไทย	ระยะคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	36	36	35	33	33	36	34.833
ตำแหน่งที่ 2	45	49	48	45	48	42	46.167
ตำแหน่งที่ 3	38	45	43	44	43	38	41.833
ตำแหน่งที่ 4	42	39	44	42	41	43	41.833
เฉลี่ยรวม							41.167

ตารางที่ ก.11 ระยะคาร์บอนชั้นของสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี

สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	ระยะคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	32	34	31	33	34	32	32.667
ตำแหน่งที่ 2	30	34	33	28	32	30	31.167
ตำแหน่งที่ 3	43	51	51	45	48	44	47.000
ตำแหน่งที่ 4	41	46	43	45	45	42	43.667
เฉลี่ยรวม							38.625

ตารางที่ ก.12 ระยะคาร์บอนชั้นของสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส

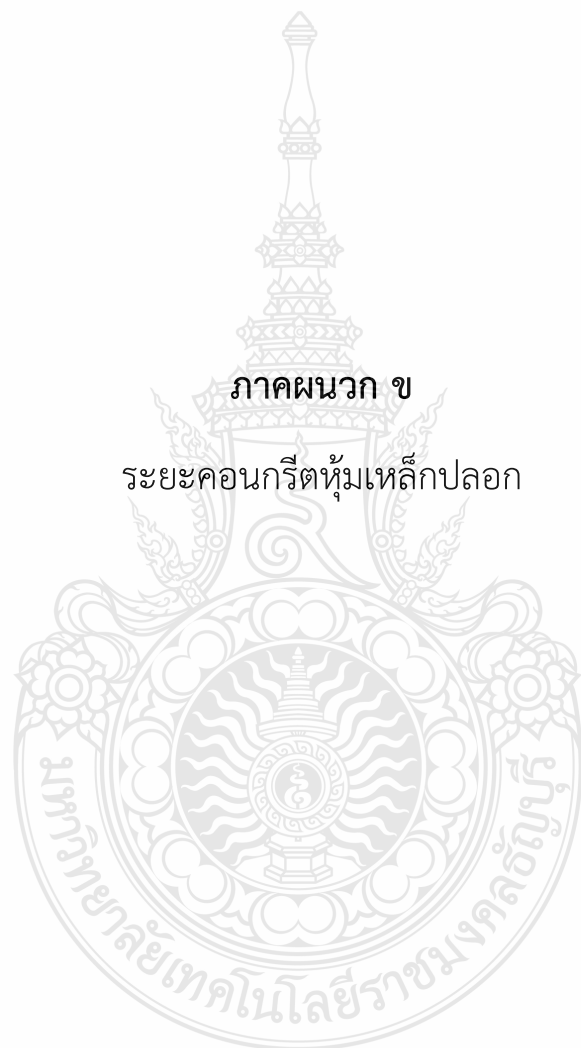
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	ระยะคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	44	45	44	45	47	48	45.500
ตำแหน่งที่ 2	11	13	10	16	12	9	11.833
ตำแหน่งที่ 3	35	37	38	38	38	34	36.667
ตำแหน่งที่ 4	43	48	29	44	50	33	41.167
เฉลี่ยรวม							33.792

ตารางที่ ก.13 ระยะคาร์บอนชั้นของสะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี

สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	ระยะคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	5	4	4	6	5	6	5.000
ตำแหน่งที่ 2	4	3	3	3	3	3	3.167
ตำแหน่งที่ 3	29	27	27	27	25	29	27.333
ตำแหน่งที่ 4	10	14	29	15	12	11	15.167
เฉลี่ยรวม							12.667

ตารางที่ ก.14 ระยะคาร์บอนชั้นของสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย

สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	ระยะคาร์บอนชั้น (มม.)						เฉลี่ย
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	34	37	36	38	36	33	35.667
ตำแหน่งที่ 2	29	30	28	35	38	32	32.000
ตำแหน่งที่ 3	33	41	38	39	40	34	37.500
ตำแหน่งที่ 4	23	21	23	21	23	23	22.333
เฉลี่ยรวม							31.875



ภาคผนวก ข

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก

ตารางที่ ข.1 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
อาคารไปรษณีย์สาขาบางปลาสร้อย	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	79	82	86	83	76	85	81.833
ตำแหน่งที่ 2	73	78	76	72	75	72	74.333
ตำแหน่งที่ 3	71	72	70	70	73	70	71.000
ตำแหน่งที่ 4	69	70	66	63	63	66	66.167
ตำแหน่งที่ 5	76	71	70	70	73	72	72.000
ตำแหน่งที่ 6	70	76	81	72	68	71	73.000
เฉลี่ยรวม (มม)							73.055

ตารางที่ ข.2 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	48	45	47	53	43	43	46.500
ตำแหน่งที่ 2	55	54	55	53	55	57	54.833
ตำแหน่งที่ 3	65	67	66	61	61	65	64.167
ตำแหน่งที่ 4	44	45	47	42	42	40	43.333
ตำแหน่งที่ 5	25	27	24	24	33	30	27.167
ตำแหน่งที่ 6	30	31	35	38	38	35	34.500
เฉลี่ยรวม (มม)							45.083

ตารางที่ ข.3 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	37	38	42	49	46	49	43.500
ตำแหน่งที่ 2	52	56	52	58	55	47	53.333
ตำแหน่งที่ 3	39	32	29	30	21	35	31.000
ตำแหน่งที่ 4	35	32	36	30	26	28	31.167
ตำแหน่งที่ 5	28	26	18	27	28	24	25.167
ตำแหน่งที่ 6	30	33	41	43	43	45	39.167
เฉลี่ยรวม (มม)							37.222

ตารางที่ ข.4 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
อาคารไปรษณีย์สาขาแยกเฉลิมไทย	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	63	65	66	66	60	54	62.333
ตำแหน่งที่ 2	28	31	25	24	38	27	28.833
ตำแหน่งที่ 3	36	30	32	42	40	39	36.500
ตำแหน่งที่ 4	37	35	38	40	39	40	38.167
ตำแหน่งที่ 5	22	40	33	36	40	42	35.500
ตำแหน่งที่ 6	36	36	28	40	27	33	33.333
เฉลี่ยรวม (มม)							39.111

ตารางที่ ข.5 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
อาคารโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	64	64	67	69	66	65	65.833
ตำแหน่งที่ 2	86	70	69	67	63	65	70.000
ตำแหน่งที่ 3	72	75	76	74	71	71	73.167
ตำแหน่งที่ 4	62	67	63	65	67	64	64.667
ตำแหน่งที่ 5	55	64	65	63	66	60	62.167
ตำแหน่งที่ 6	76	80	81	68	67	66	73.000
เฉลี่ยรวม (มม)							68.139

ตารางที่ ข.6 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
อาคารสำนักงานเทศบาลเมืองชลบุรี	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	43	41	40	31	38	32	37.500
ตำแหน่งที่ 2	38	39	35	34	32	35	35.500
ตำแหน่งที่ 3	44	42	45	53	52	50	47.667
ตำแหน่งที่ 4	84	80	73	71	89	70	77.833
ตำแหน่งที่ 5	51	49	50	44	38	34	44.333
ตำแหน่งที่ 6	67	84	75	61	67	69	70.500
เฉลี่ยรวม (มม)							52.222

ตารางที่ ข.7 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
อาคารวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	27	28	27	26	26	25	26.500
ตำแหน่งที่ 2	30	37	33	34	27	27	31.333
ตำแหน่งที่ 3	40	36	31	40	37	20	34.000
ตำแหน่งที่ 4	25	21	35	35	40	28	30.667
ตำแหน่งที่ 5	21	22	21	20	19	19	20.333
ตำแหน่งที่ 6	42	48	44	57	52	44	47.833
เฉลี่ยรวม (มม)							31.778

ตารางที่ ข.8 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารห้างสรรพสินค้าพอรัมพลาซ่าชลบุรี

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
อาคารห้างสรรพสินค้าพอรัมพลาซ่าชลบุรี	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	53	52	44	40	41	52	47.000
ตำแหน่งที่ 2	82	70	68	69	82	75	74.333
ตำแหน่งที่ 3	82	73	69	84	73	68	74.833
ตำแหน่งที่ 4	44	53	62	51	65	61	56.000
ตำแหน่งที่ 5	65	70	75	79	62	82	72.167
ตำแหน่งที่ 6	75	63	63	64	82	86	72.167
เฉลี่ยรวม (มม)							66.083

ตารางที่ ข.9 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	79	79	61	84	83	83	78.167
ตำแหน่งที่ 2	68	65	74	72	68	72	69.833
ตำแหน่งที่ 3	46	49	52	57	59	51	52.333
ตำแหน่งที่ 4	26	29	20	27	22	22	24.333
ตำแหน่งที่ 5	55	53	56	60	61	59	57.333
ตำแหน่งที่ 6	52	46	43	51	55	50	49.500
เฉลี่ยรวม (มม)							55.250

ตารางที่ ข.10 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
สะพานลอยคนเดินข้ามไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	28	53	23	46	41	37	38.000
ตำแหน่งที่ 2	32	29	28	27	29	31	29.333
ตำแหน่งที่ 3	28	25	23	24	29	26	25.833
ตำแหน่งที่ 4	40	37	41	38	34	33	37.167
ตำแหน่งที่ 5	43	46	42	49	39	58	46.167
ตำแหน่งที่ 6	39	29	25	38	30	28	31.500
เฉลี่ยรวม (มม)							34.667

ตารางที่ ข.11 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้าม วท.อาชีวศึกษาชลบุรี

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
สะพานลอยคนเดินข้าม วท.อาชีวศึกษาชลบุรี	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	27	28	27	26	26	25	26.500
ตำแหน่งที่ 2	30	37	33	34	27	27	31.333
ตำแหน่งที่ 3	40	36	31	40	37	20	34.000
ตำแหน่งที่ 4	25	21	35	35	40	28	30.667
ตำแหน่งที่ 5	21	22	21	20	19	19	20.333
ตำแหน่งที่ 6	42	48	44	57	52	44	47.833
เฉลี่ยรวม (มม)							31.778

ตารางที่ ข.12 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	39	19	32	28	17	30	27.500
ตำแหน่งที่ 2	51	42	40	41	37	35	41.000
ตำแหน่งที่ 3	49	55	53	43	37	40	46.167
ตำแหน่งที่ 4	49	48	49	53	49	51	49.833
ตำแหน่งที่ 5	35	31	27	26	35	35	31.500
ตำแหน่งที่ 6	40	44	47	38	41	37	41.167
เฉลี่ยรวม (มม)							39.528

ตารางที่ ข.13 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
สะพานลอยคนเดินข้ามโรงเรียนอนุบาลชลบุรี	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	37	39	36	39	33	26	35.000
ตำแหน่งที่ 2	43	32	38	29	20	29	31.833
ตำแหน่งที่ 3	32	35	41	32	31	25	32.667
ตำแหน่งที่ 4	21	24	20	20	21	23	21.500
ตำแหน่งที่ 5	28	26	31	26	23	22	26.000
ตำแหน่งที่ 6	25	24	26	30	17	19	23.500
เฉลี่ยรวม (มม)							28.417

ตารางที่ ข.14 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกอาคารสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย

ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกในผนังหล่อในที่							
สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย	ระยะหุ้มเหล็กปลอก (มม)						เฉลี่ย (มม)
	1	2	3	4	5	6	
ตำแหน่งที่ 1	28	31	24	35	34	31	30.500
ตำแหน่งที่ 2	45	42	40	40	40	36	40.500
ตำแหน่งที่ 3	24	30	29	33	28	40	30.667
ตำแหน่งที่ 4	28	24	23	22	25	20	23.667
ตำแหน่งที่ 5	38	38	36	39	41	45	39.500
ตำแหน่งที่ 6	40	40	39	41	42	39	40.167
เฉลี่ยรวม (มม)							34.167

ภาคผนวก ค

ข้อมูลปฏิบัติงานภาคสนาม



ตารางที่ ค.1 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารไปรษณีย์สาขา
บางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 1

จุดทดสอบที่ 1	Rebound Number(RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ (RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	32		-3	
2	36		-1	
3	42		7	
4	32		-3	
5	38		3	
6	40		5	
7	33		-2	
8	36		-1	
9	32		-3	
10	38		3	
11	38	34.79	3	256.62
12	40		5	
13	42		7	
14	30		-5	
15	36		-1	
16	32		-3	
17	36		-1	
18	34		-1	
19	34		-1	
20	38		3	

ตารางที่ ค.1 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารไปรษณีย์สาขา
บางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 1 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 1	Rebound Number(RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ (RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	32		-3	
22	34		-1	
23	34		-1	
24	32		-3	
25	30		-5	
26	36		-1	
27	40		5	
28	32		-3	
29	32		-3	
30	38		3	
31	40		5	
32	38		3	
33	30		-5	
34	34		-1	
35	34		-1	
36	32		-3	

ตารางที่ ค.2 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารไปรษณีย์
สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 2

จุดทดสอบที่ 2	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	34		-2	
2	34		-2	
3	36		0	
4	38		2	
5	36		0	
6	38		2	
7	38		2	
8	36		0	
9	36		0	
10	36		0	
11	36	36.19	0	274.02
12	36		0	
13	38		2	
14	36		0	
15	36		0	
16	36		0	
17	36		0	
18	36		0	
19	36		0	
20	38		2	

ตารางที่ ค.2 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารไปรษณีย์
 สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 2 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 2	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	34		-2	
22	34		-2	
23	36		0	
24	38		2	
25	38		2	
26	36		0	
27	36		0	
28	36		0	
29	37		1	
30	36		0	
31	36		0	
32	36		0	
33	36		0	
34	36		0	
35	36		0	
36	36		0	

ตารางที่ ค.3 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคารไปรษณีย์

สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 3

จุดทดสอบที่ 3	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	42		-1	
2	44		2	
3	42		-1	
4	46		4	
5	42		-1	
6	38		-5	
7	44		2	
8	44		2	
9	42		-1	
10	46		4	
11	44	42.50	2	352.56
12	42		-1	
13	44		2	
14	42		-1	
15	44		2	
16	44		2	
17	46		4	
18	44		2	
19	44		2	
20	42		-1	

ตารางที่ ค.3 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคารไปรษณีย์

สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 3 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 3	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	44		2	
22	44		2	
23	44		2	
24	42		-1	
25	42		-1	
26	38		-5	
27	44		2	
28	42		-1	
29	42		-1	
30	40		-3	
31	42		-1	
32	40		-3	
33	42		-1	
34	42		-1	
35	38		-5	
36	38		-5	

ตารางที่ ค.4 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคารไปรษณีย์

สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 4

จุดทดสอบที่ 4	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	36		-1	
2	36		-1	
3	36		-1	
4	36		-1	
5	36		-1	
6	36		-1	
7	40		3	
8	38		1	
9	36		-1	
10	36	37.28	-1	287.59
11	38		1	
12	38		1	
13	38		1	
14	36		-1	
15	38		1	
16	38		1	
17	38		1	
18	38		1	
19	38		1	
20	38		1	

ตารางที่ ค.4 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของอาคารไปรษณีย์

สาขาบางปลาสร้อย จุดทดสอบที่ 4 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 4	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	36		-1	
22	38		1	
23	37		0	
24	36		-1	
25	40		3	
26	40		3	
27	36		-1	
28	37		0	
29	40		3	
30	38		1	
31	38		1	
32	37		0	
33	36		-1	
34	37		0	
35	36		-1	
36	36		-1	

ตารางที่ ค.5 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 1

จุดทดสอบที่ 1	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	30		-1	
2	32		1	
3	30		-1	
4	32		1	
5	30		-1	
6	36		5	
7	30		-1	
8	30		-1	
9	31		0	
10	30	30.94	-1	208.68
11	30		-1	
12	32		1	
13	30		-1	
14	30		-1	
15	30		-1	
16	30		-1	
17	30		-1	
18	36		5	
19	30		-1	
20	32		1	

ตารางที่ ค.5 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 1 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 1	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	30		-1	
22	30		-1	
23	30		-1	
24	34		3	
25	30		-1	
26	30		-1	
27	30		-1	
28	31		0	
29	27		-4	
30	36		5	
31	30		-1	
32	27		-4	
33	30		-1	
34	30		-1	
35	33		2	
36	35		4	

ตารางที่ ค.6 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 2

จุดทดสอบที่ 2	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	34		2	
2	33		1	
3	30		-2	
4	30		-2	
5	32		0	
6	33		1	
7	32		0	
8	32		0	
9	34		2	
10	30	32.19	-2	224.24
11	32		0	
12	32		0	
13	30		-2	
14	35		3	
15	35		3	
16	32		0	
17	33		1	
18	35		3	
19	30		-2	
20	32		0	

ตารางที่ ค.6 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่2 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 2	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	31		-1	
22	32		0	
23	31		-1	
24	37		5	
25	30		-2	
26	30		-2	
27	30		-2	
28	30		-2	
29	30		-2	
30	36		4	
31	32		0	
32	32		0	
33	32		0	
34	32		0	
35	32		0	
36	36		4	

ตารางที่ ค.7 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 3

จุดทดสอบที่ 3	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	34		2	
2	34		2	
3	34		2	
4	34		2	
5	34		2	
6	30		-2	
7	32		0	
8	32		0	
9	32		0	
10	32		0	
11	32	31.64	0	217.39
12	30		-2	
13	30		-2	
14	32		0	
15	32		0	
16	30		-2	
17	30		-2	
18	30		-2	
19	32		0	
20	35		3	

ตารางที่ ค.7 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 3 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 3	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	32		0	
22	30		-2	
23	32		0	
24	30		-2	
25	31		-1	
26	31		-1	
27	31		-1	
28	31		-1	
29	30		-2	
30	30		-2	
31	33		1	
32	32		0	
33	32		0	
34	32		0	
35	30		-2	
36	31		-1	

ตารางที่ ค.8 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่ 4

จุดทดสอบที่ 4	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	32		-2	
2	34		0	
3	34		0	
4	36		2	
5	34		0	
6	35		1	
7	33		-1	
8	33		-1	
9	32		-2	
10	32	34.25	-2	249.88
11	36		2	
12	35		1	
13	36		2	
14	35		1	
15	35		1	
16	37		3	
17	36		2	
18	34		0	
19	36		2	
20	37		3	

ตารางที่ ค.8 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล จุดทดสอบที่4 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 4	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	35		1	
22	36		2	
23	36		2	
24	36		2	
25	34		0	
26	36		2	
27	35		1	
28	33		-1	
29	34		0	
30	33		-1	
31	34		0	
32	34		0	
33	35		1	
34	33		-1	
35	28		-6	
36	29		-5	

ตารางที่ ค.9 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส จุดทดสอบที่ 1

จุดทดสอบที่ 1	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	36		1	
2	36		1	
3	37		2	
4	37		2	
5	36		1	
6	34		-1	
7	35		0	
8	36		1	
9	37		2	
10	37	35.42	2	251.99
11	37		2	
12	36		1	
13	36		1	
14	35		0	
15	38		3	
16	38		3	
17	36		1	
18	32		-3	
19	34		-1	
20	36		1	

ตารางที่ ค.9 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธาวาส จุดทดสอบที่1 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 1	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	36		1	
22	36		1	
23	36		1	
24	34		-1	
25	36		1	
26	34		-1	
27	31		-4	
28	34		-1	
29	36		1	
30	35		0	
31	36		1	
32	36		1	
33	34		-1	
34	34		-1	
35	34		-1	
36	34		-1	

ตารางที่ ค.10 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธารวาส จุดทดสอบที่ 2

จุดทดสอบที่ 2	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	34		1	
2	34		1	
3	34		1	
4	34		1	
5	33		0	
6	32		-1	
7	36		3	
8	34		1	
9	34		1	
10	32	32.91	-1	233.20
11	32		-1	
12	32		-1	
13	34		1	
14	33		0	
15	32		-1	
16	32		-1	
17	32		-1	
18	33		0	
19	34		1	
20	32		-1	

ตารางที่ ค.10 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธารวาส จุดทดสอบที่ 2 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 2	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	36		1	
21	33		0	
22	34		1	
23	32		-1	
24	40		7	
25	37		4	
26	32		-1	
27	30		-3	
28	32		-1	
29	30		-3	
30	36		3	
31	32		-1	
32	30		-3	
33	32		-1	
34	32		-1	
35	34		1	
36	34		-1	

ตารางที่ ค.11 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธารวาส จุดทดสอบที่ 3

จุดทดสอบที่ 3	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	36		2	
2	36		2	
3	36		2	
4	35		1	
5	32		-2	
6	33		-1	
7	37		3	
8	38		4	
9	34		0	
10	32	33.83	-2	244.65
11	32		-2	
12	30		-4	
13	37		3	
14	34		0	
15	33		-1	
16	33		-1	
17	33		-1	
18	34		0	
19	37		3	
20	35		1	

ตารางที่ ค.11 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธารวาส จุดทดสอบที่ 3 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 3	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	36		2	
22	33		-1	
23	32		-2	
24	31		-3	
25	35		1	
26	38		4	
27	39		5	
28	36		2	
29	32		-2	
30	30		-4	
31	32		-2	
32	32		-2	
33	32		-2	
34	32		-2	
35	31		-3	
36	30		-4	

ตารางที่ ค.12 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธารวาส จุดทดสอบที่ 4

จุดทดสอบที่ 4	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
1	33		1	
2	34		2	
3	32		0	
4	32		0	
5	34		2	
6	30		-2	
7	32		0	
8	33		1	
9	32		0	
10	33	32.28	1	225.36
11	32		0	
12	28		-4	
13	32		0	
14	34		2	
15	32		0	
16	34		2	
17	34		2	
18	31		-1	
19	33		1	
20	32		0	

ตารางที่ ค.12 ค่า Rebound Number(RN) และ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ
อาคารโรงเรียนเทศบาลวัดเนินสุทธารวาส จุดทดสอบที่ 4 (ต่อ)

จุดทดสอบที่ 4	Rebound Number (RN)	ค่าเฉลี่ย(RN)	ตรวจสอบ(RN) ± 6	f_c' (ksc)
21	36		2	
22	33		-1	
23	32		-2	
24	31		-3	
25	35		1	
26	38		4	
27	39		5	
28	36		2	
29	32		-2	
30	30		-4	
31	32		-2	
32	32		-2	
33	32		-2	
34	32		-2	
35	31		-3	
36	30		-4	



ภาคผนวก ง

ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low

ตารางที่ ง.1 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 0 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 0)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.452	12.830	-3.03	0.12
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.361	36.210	0.27	60.49
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.378	34.080	0.02	50.91
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.184	4.500	-2.95	0.16
5	อาคารโรงเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.419	9.290	-4.08	0.00
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.855	39.080	-0.06	47.49
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.683	13.790	-2.28	1.12

ตารางที่ ง.1 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 0 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 0\text{ซ})$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.726	52.580	0.88	80.98
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.487	7.540	-1.89	2.92
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.928	41.170	-0.25	39.97
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.036	38.630	-0.38	35.35
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.843	33.790	0.16	56.33
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.747	12.670	-1.98	2.37
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.008	31.880	-0.89	18.72

ตารางที่ ง.2 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 5 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 5$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.452	12.830	-3.03	0.12
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.361	36.210	0.27	60.49
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.378	34.080	0.02	50.91
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.50	1.14	0.184	4.500	-2.95	0.16
5	อาคารโรงเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.419	9.290	-4.08	0.00
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.855	39.080	-0.06	47.49
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.683	13.790	-2.28	1.12

ตารางที่ ง.2 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 5 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 5\text{ปี})$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	56.662	1.13	86.99
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	8.430	-1.84	3.27
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	43.795	0.01	50.38
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	41.725	-0.12	45.13
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	36.683	0.33	62.96
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	14.050	-1.87	3.06
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	35.473	-0.52	30.24

ตารางที่ ง.3 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 10 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ (kvt+10ปี)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	13.754	-2.92	0.18
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	39.159	0.46	67.89
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	37.272	0.18	57.07
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	4.930	-2.92	0.18
5	อาคารโรงเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	10.361	-3.93	0.00
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	44.046	0.16	56.18
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	15.687	-2.12	1.68

ตารางที่ ง.3 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 10 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 10\psi)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอร์ัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	60.469	1.36	91.28
9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	9.235	-1.80	3.61
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	46.271	0.26	60.19
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	44.606	0.11	54.52
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	39.364	0.49	68.78
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	15.213	-1.78	3.77
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	38.734	-0.18	42.81

ตารางที่ ง.4 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 15 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 15\%)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	14.194	-2.86	0.21
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	40.553	0.56	71.17
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	38.769	0.25	59.91
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.131	-2.90	0.19
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	10.857	-3.86	0.01
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	46.329	0.26	60.11
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	16.555	-2.05	2.01

ตารางที่ ง.4 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 15 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 15$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	64.050	1.58	94.26
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	9.974	-1.76	3.95
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	48.621	0.49	68.94
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	47.312	0.34	63.13
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	41.874	0.64	73.84
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	16.293	-1.69	4.53
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	41.741	0.13	55.13

ตารางที่ ง.5 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 20 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 20$)	Z (มม.)	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิด สนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	14.620	-2.81	0.25
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	41.900	0.65	74.19
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	40.211	0.32	62.60
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.324	-2.89	0.20
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	11.332	-3.79	0.01
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	48.506	0.35	63.75
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	17.379	-1.98	2.37

ตารางที่ ง.5 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 20 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 20$)	Z (มม.)	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิด สนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	67.441	1.78	96.28
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	10.663	-1.72	4.28
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	50.863	0.72	76.40
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	49.871	0.54	70.71
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	44.241	0.78	78.19
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	17.306	-1.61	5.36
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	44.545	0.42	66.22

ตารางที่ ง.6 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 25 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 20\phi)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	15.034	-2.76	0.29
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	43.206	0.74	76.95
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	41.603	0.39	65.14
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.511	-2.87	0.21
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	11.787	-3.73	0.01
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	50.588	0.44	67.13
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	18.166	-1.92	2.76

ตารางที่ ง.6 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 25 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 25\phi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	70.670	1.98	97.62
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	11.310	-1.68	4.62
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	53.010	0.93	82.51
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	52.305	0.74	77.16
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	46.489	0.91	81.91
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	18.263	-1.53	6.25
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	47.183	0.69	75.51

ตารางที่ ง.7 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 30 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 25\phi)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	15.437	-2.71	0.33
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	44.473	0.82	79.46
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	42.949	0.45	67.53
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.692	-2.85	0.22
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	12.225	-3.67	0.01
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	52.589	0.53	70.25
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	18.920	-1.85	3.18

ตารางที่ ง.7 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 30 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 30\psi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	73.757	2.17	98.50
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	11.922	-1.65	4.96
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	55.074	1.14	87.33
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	54.631	0.93	82.50
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	48.632	1.04	85.06
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	19.172	-1.46	7.20
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	49.681	0.95	82.85

ตารางที่ ง.8 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 35 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 35\phi)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	15.830	-2.66	0.39
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	45.705	0.91	81.74
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	44.255	0.52	69.78
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.867	-2.84	0.23
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	12.648	-3.61	0.02
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	54.515	0.62	73.12
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	19.645	-1.79	3.64

ตารางที่ ง.8 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 35 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 35$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	76.721	2.35	99.06
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	12.504	-1.62	5.30
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	57.062	1.34	91.02
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	56.862	1.12	86.81
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	50.685	1.16	87.71
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	20.040	-1.39	8.20
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	52.060	1.19	88.37

ตารางที่ ง.9 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 40 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 40$)	Z (มม.)	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิด สนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	16.214	-2.62	0.44
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	46.905	0.99	83.80
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	45.523	0.58	71.90
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.037	-2.83	0.24
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	13.058	-3.55	0.02
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	56.377	0.70	75.75
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	20.344	-1.74	4.13

ตารางที่ ง.9 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 40 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 40$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	79.574	2.52	99.42
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	13.060	-1.59	5.64
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	58.984	1.53	93.76
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	59.008	1.29	90.20
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	52.658	1.28	89.93
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	20.872	-1.32	9.26
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	54.334	1.43	92.34

ตารางที่ ง.10 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 45 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 45\%)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	16.588	-2.57	0.50
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	48.075	1.06	85.66
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	46.757	0.64	73.89
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.203	-2.81	0.25
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	13.455	-3.49	0.02
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	58.178	0.78	78.16
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	21.020	-1.68	4.65

ตารางที่ ง.10 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 45 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 45\phi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	82.328	2.69	99.64
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	13.593	-1.56	5.99
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	60.845	1.72	95.74
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	61.079	1.46	92.83
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	54.560	1.39	91.77
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	21.672	-1.26	10.37
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	56.517	1.65	95.09

ตารางที่ ง.11 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 50 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 50\%)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	16.954	-2.53	0.57
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	49.217	1.14	87.32
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	47.960	0.70	75.76
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.364	-2.80	0.26
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	13.840	-3.44	0.03
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	59.926	0.85	80.36
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	21.675	-1.63	5.21

ตารางที่ ง.11 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 50 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 50\psi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	84.993	2.85	99.78
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	14.106	-1.53	6.34
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	62.651	1.90	97.15
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	63.083	1.63	94.81
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	56.397	1.50	93.31
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	22.443	-1.20	11.53
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	58.619	1.87	96.93

ตารางที่ ง.12 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 55 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 55\text{ช})$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	13.754	-2.92	0.18
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	39.159	0.46	67.89
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	37.272	0.18	57.07
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	4.930	-2.92	0.18
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	10.361	-3.93	0.00
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	44.046	0.16	56.18
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	15.687	-2.12	1.68

ตารางที่ ง.12 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 55 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 55\phi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	87.577	3.01	99.87
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	14.601	-1.50	6.69
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	64.407	2.08	98.12
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	65.024	1.79	96.30
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	58.177	1.60	94.57
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	23.189	-1.14	12.73
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	60.648	2.08	98.12

ตารางที่ ง.13 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 60 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 60$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	17.664	-2.44	0.73
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	51.425	1.29	90.16
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	50.278	0.81	79.14
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.675	-2.77	0.28
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	14.581	-3.34	0.04
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	63.276	1.00	84.18
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	22.929	-1.52	6.42

ตารางที่ ง.13 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 60 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 60$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	90.087	3.16	99.92
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	15.080	-1.47	7.04
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	66.115	2.25	98.78
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	66.909	1.94	97.38
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	59.903	1.71	95.61
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	23.912	-1.08	13.98
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	62.611	2.28	98.88

ตารางที่ ง.14 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 65 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 65$)	Z (มม.)	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิด สนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	18.008	-2.40	0.82
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	52.494	1.36	91.35
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	51.398	0.87	80.67
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.825	-2.76	0.29
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	14.937	-3.29	0.05
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	64.886	1.07	85.83
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	23.531	-1.47	7.07

ตารางที่ ง.14 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 65 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 65$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	92.528	3.31	99.95
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	15.544	-1.45	7.39
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	67.781	2.42	99.22
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	68.743	2.09	98.17
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	61.582	1.81	96.45
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	24.613	-1.02	15.27
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	64.515	2.48	99.34

ตารางที่ ง.15 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 70 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 70\phi)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	18.346	-2.36	0.92
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	53.542	1.43	92.41
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	52.494	0.92	82.10
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.971	-2.75	0.30
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	15.286	-3.24	0.06
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	66.458	1.14	87.33
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	24.118	-1.42	7.75

ตารางที่ ง.15 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 70 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 70\text{ซ}$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	94.907	3.46	99.97
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	15.995	-1.42	7.75
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	69.407	2.58	99.51
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	70.528	2.24	98.74
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	63.215	1.90	97.15
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	25.295	-0.97	16.59
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	66.364	2.67	99.62

ตารางที่ ง.16 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 75 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 75\psi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	18.678	-2.32	1.02
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	54.570	1.50	93.35
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	53.567	0.97	83.43
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.115	-2.74	0.31
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	15.626	-3.19	0.07
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	67.993	1.21	88.68
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	24.691	-1.37	8.47

ตารางที่ ง.16 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 75 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 75\phi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	97.228	3.60	99.98
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	16.433	-1.40	8.11
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	70.995	2.74	99.69
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	72.270	2.38	99.13
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	64.808	2.00	97.71
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	25.959	-0.92	17.96
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	68.162	2.85	99.78

ตารางที่ ง.17 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 80 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 80$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	19.004	-2.28	1.14
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	55.579	1.57	94.18
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	54.620	1.02	84.68
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.256	-2.72	0.32
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	15.959	-3.14	0.08
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	69.494	1.28	89.90
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	25.251	-1.33	9.22

ตารางที่ ง.17 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 80 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 80\text{ซ}$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	99.495	3.74	99.99
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	16.860	-1.37	8.47
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	72.549	2.90	99.81
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	73.971	2.52	99.41
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	66.362	2.09	98.17
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	26.607	-0.87	19.35
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	69.915	3.04	99.88

ตารางที่ ง.18 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 85 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 85\phi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	19.325	-2.24	1.26
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	56.570	1.64	94.92
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	55.652	1.07	85.84
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.394	-2.71	0.33
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	16.286	-3.10	0.10
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	70.963	1.34	90.99
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	25.799	-1.28	10.00

ตารางที่ ง.18 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 85 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 85\phi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	101.711	3.87	99.99
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	17.276	-1.35	8.84
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	74.070	3.05	99.89
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	75.633	2.66	99.60
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	67.881	2.18	98.53
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	27.239	-0.81	20.77
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	71.624	3.21	99.93

ตารางที่ ง.19 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 90 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 90\text{ช})$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	19.640	-2.20	1.39
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	57.543	1.70	95.57
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	56.666	1.12	86.91
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.530	-2.70	0.35
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	16.606	-3.05	0.11
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	72.403	1.40	91.98
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	26.335	-1.24	10.80

ตารางที่ ง.19 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 90 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 90$)	Z (มม.)	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิด สนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	103.880	4.01	100.00
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	17.683	-1.33	9.20
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	75.560	3.20	99.93
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	77.260	2.79	99.74
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	69.367	2.27	98.83
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	27.856	-0.76	22.21
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	73.294	3.38	99.96

ตารางที่ ง.20 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 95 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 95\%$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	19.950	-2.16	1.53
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	58.501	1.77	96.14
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	57.662	1.17	87.92
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.663	-2.69	0.36
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	16.920	-3.01	0.13
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	73.814	1.47	92.87
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	26.861	-1.19	11.64

ตารางที่ ง.20 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 95 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 95\phi$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	804	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	106.005	4.14	100.00
9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	708	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	18.080	-1.31	9.57
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	612	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	77.022	3.35	99.96
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	600	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	78.853	2.92	99.82
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	492	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	70.821	2.35	99.07
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	444	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	28.461	-0.72	23.68
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	408	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	74.927	3.55	99.98

ตารางที่ ง.21 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 100 ปี

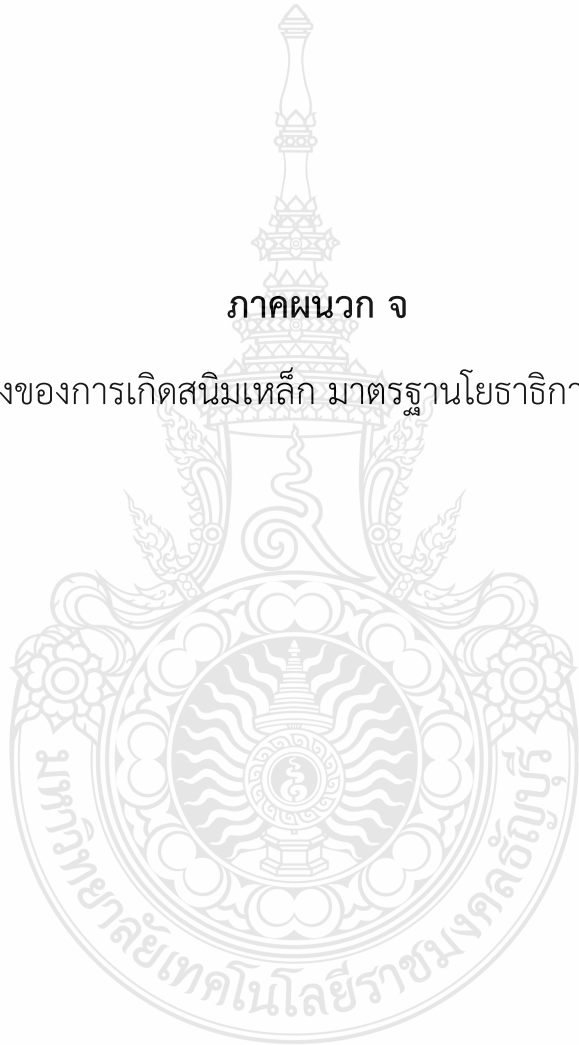
ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(k\sqrt{t} + 100ช)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	20.256	-2.13	1.68
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	59.443	1.83	96.64
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	58.641	1.22	88.85
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.794	-2.68	0.37
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	17.228	-2.96	0.15
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	75.199	1.53	93.66
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	27.376	-1.15	12.50

ตารางที่ ง.21 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก Fick First Low 100 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t} + 100$)	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรัมพลาซ่า ชลบุรี	804	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	108.087	4.26	100.00
9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	708	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	18.469	-1.28	9.95
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	612	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	78.456	3.49	99.98
11	วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	600	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	80.415	3.05	99.88
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	492	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	72.246	2.44	99.26
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	444	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	29.053	-0.67	25.17
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	408	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	76.525	3.72	99.99

ภาคผนวก จ

ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง



ตารางที่ จ.1 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 0 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t})$	Z (มม.)	ความน่าจะเป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	12.19	-3.109	0.09
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	34.40	0.144	55.73
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	32.38	-0.060	47.61
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	4.28	-2.973	0.15
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	8.83	-4.145	0.00
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	37.13	-0.149	44.08
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	13.10	-2.339	0.97

ตารางที่ จ.1 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 0 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t})$	Z (มม.)	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิด สนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	49.95	0.717	76.32
9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	7.16	-1.913	2.79
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	39.11	-0.461	32.25
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	36.70	-0.534	29.66
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	32.10	0.059	52.36
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	12.04	-2.033	2.10
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	30.29	-1.053	14.62

ตารางที่ จ.2 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 5 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover}	S_{cover}	$\bar{X}_{car,real}$	$S_{car,real}$	k	$\bar{X}_{car,real(ph)}$	Z	ความน่าจะเป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
			(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม.)	($\frac{มม.}{เดือน^{1/2}}$)	($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t} + 5$)	(มม.)	
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	12.64	-3.05	0.11
2	อาคารโรงเรียนชลกันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	35.83	0.24	59.49
3	อาคารโรงเรียนเทศบาล วัดเนินสุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	33.93	0.02	50.61
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	4.48	-2.96	0.16
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	9.35	-4.07	0.00
6	อาคารสำนักงานเทศบาล เมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	39.56	-0.04	48.32
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	14.03	-2.26	1.19

ตารางที่ จ.2 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 5 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1, \alpha_2, k\sqrt{t} + 5)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า พอร์มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	53.83	0.95	82.98
9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	8.01	-1.87	3.10
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	41.61	-0.21	41.67
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	39.64	-0.29	38.46
12	สะพานลอยคนเดินข้ามวัด เนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	34.85	0.22	58.79
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	13.35	-1.93	2.69
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	33.70	-0.70	24.18

ตารางที่ จ.3 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 10 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 10)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	13.07	-3.00	0.13
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	37.20	0.33	63.03
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	35.41	0.09	53.49
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	4.68	-2.94	0.16
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	9.84	-4.00	0.00
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	41.84	0.06	52.34
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	14.90	-2.19	1.43

ตารางที่ จ.3 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 10 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 10)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า พอร์มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	57.45	1.17	87.98
9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	8.77	-1.82	3.41
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	43.96	0.03	51.03
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	42.38	-0.07	47.24
12	สะพานลอยคนเดินข้ามวัด เนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	37.40	0.37	64.54
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	14.45	-1.84	3.29
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	36.80	-0.38	35.16

ตารางที่ จ.4 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 15 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 15)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	13.48	-2.95	0.16
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	38.52	0.42	66.34
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	36.83	0.16	56.23
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	4.87	-2.92	0.17
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	10.31	-3.94	0.00
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	44.01	0.15	56.13
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	15.73	-2.12	1.70

ตารางที่ จ.4 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 15 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 15)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	60.85	1.38	91.64
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	9.48	-1.78	3.72
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	46.19	0.25	59.87
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	44.95	0.14	55.62
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	39.78	0.51	69.65
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	15.48	-1.76	3.94
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	39.65	-0.09	46.56

ตารางที่ จ.5 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 20 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 20)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	13.89	-2.90	0.19
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	39.81	0.51	69.43
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	38.20	0.22	58.84
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.06	-2.91	0.18
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	10.76	-3.87	0.01
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	46.08	0.25	59.68
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	13.89	-2.90	0.19

ตารางที่ จ.5 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 20 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 20)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	64.07	1.58	94.27
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	10.13	-1.75	4.02
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	48.32	0.46	67.87
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	47.38	0.34	63.33
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	42.03	0.65	74.14
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	16.44	-1.68	4.65
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	42.32	0.19	57.48

ตารางที่ จ.6 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 25 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 25)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	41.05	0.59	72.29
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	39.52	0.29	61.33
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.24	-2.89	0.19
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	11.20	-3.81	0.01
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	48.06	0.33	63.01
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	17.26	-1.99	2.31
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	41.05	0.59	72.29

ตารางที่ จ.6 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 25 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 25)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	67.14	1.77	96.12
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	10.74	-1.71	4.33
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	50.36	0.67	74.82
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	49.69	0.53	70.19
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	44.16	0.77	78.06
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	17.35	-1.61	5.40
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	44.82	0.45	67.26

ตารางที่ จ.7 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 30 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 30)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	14.67	-2.81	0.25
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	42.25	0.67	74.94
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	40.80	0.35	63.69
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.41	-2.88	0.20
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	11.61	-3.75	0.01
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	49.96	0.42	66.13
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	17.97	-1.93	2.66

ตารางที่ จ.7 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 30 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 30)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	70.07	1.94	97.41
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	11.33	-1.68	4.63
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	52.32	0.87	80.66
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	51.90	0.71	76.14
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	46.20	0.89	81.45
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	18.21	-1.54	6.20
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	47.20	0.69	75.55

ตารางที่ จ.8 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 35 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1, \alpha_2, k\sqrt{t} + 35)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	15.04	-2.76	0.29
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	43.42	0.75	77.38
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	42.04	0.41	65.93
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.57	-2.86	0.21
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	12.02	-3.70	0.01
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	51.79	0.50	69.02
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	18.66	-1.88	3.03

ตารางที่ จ.8 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 35 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 35)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	72.88	2.12	98.28
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันทอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	11.88	-1.65	4.94
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	54.21	1.06	85.44
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	54.02	0.88	81.18
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	48.15	1.01	84.38
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	19.04	-1.47	7.05
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	49.46	0.93	82.25

ตารางที่ จ.9 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 40 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{mm}{\text{เดือน}^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 40)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	15.40	-2.72	0.33
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	44.56	0.83	79.62
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	43.25	0.47	68.05
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.74	-2.85	0.22
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	12.40	-3.64	0.01
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	53.56	0.57	71.71
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	19.33	-1.82	3.43

ตารางที่ จ.9 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 40 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 40)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	75.59	2.28	98.87
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	12.41	-1.62	5.24
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	56.04	1.24	89.23
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	56.06	1.05	85.35
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	50.03	1.12	86.89
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	19.83	-1.41	7.95
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	51.62	1.15	87.45

ตารางที่ จ.10 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 45 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 45)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	15.76	-2.67	0.38
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	45.67	0.90	81.68
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	44.42	0.53	70.06
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	5.89	-2.84	0.23
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	12.78	-3.59	0.02
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	55.27	0.65	74.20
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	19.97	-1.77	3.86

ตารางที่ จ.10 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 45 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 45)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	78.21	2.44	99.27
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	12.91	-1.59	5.55
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	57.80	1.42	92.16
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	58.03	1.21	88.74
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	51.83	1.23	89.03
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	20.59	-1.35	8.89
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	53.69	1.36	91.34

ตารางที่ จ.11 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 50 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 50)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	16.11	-2.63	0.43	37.69
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	46.76	0.98	83.55	32.26
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	45.56	0.58	71.96	33.61
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.05	-2.83	0.24	39.85
5	อาคารโรงเรียนอนุบาล ชลบุรี	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	13.15	-3.54	0.02	38.31
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	56.93	0.72	76.51	40.51
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	20.59	-1.72	4.31	41.19

ตารางที่ จ.11 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 50 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 50)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	80.74	2.60	99.53
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันทนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	13.40	-1.57	5.86
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	59.52	1.59	94.39
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	59.93	1.37	91.44
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	53.58	1.33	90.85
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	21.32	-1.29	9.87
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	55.69	1.57	94.16

ตารางที่ จ.12 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 55 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 55)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	16.45	-2.59	0.48
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	47.82	1.05	85.26
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	46.68	0.64	73.76
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.20	-2.81	0.25
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	13.50	-3.49	0.02
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	58.54	0.79	78.63
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	21.20	-1.67	4.79

ตารางที่ จ.12 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 55 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 55)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	83.20	2.74	99.70
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	13.87	-1.54	6.18
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	61.19	1.76	96.05
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	61.77	1.52	93.57
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	55.27	1.43	92.39
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	22.03	-1.23	10.90
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	57.62	1.77	96.14

ตารางที่ จ.13 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 60 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 60)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	16.78	-2.55	0.54
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	48.85	1.12	86.81
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	47.76	0.69	75.46
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.34	-2.80	0.25
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	13.85	-3.44	0.03
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	60.11	0.86	80.59
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	21.78	-1.62	5.30

ตารางที่ จ.13 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 60 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 60)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	85.58	2.89	99.81
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	14.33	-1.51	6.49
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	62.81	1.92	97.25
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	63.56	1.67	95.22
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	56.91	1.53	93.69
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	22.72	-1.18	11.96
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	59.48	1.96	97.50

ตารางที่ จ.14 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 65 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 65)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	17.11	-2.51	0.61
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	49.87	1.19	88.22
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	48.83	0.74	77.06
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.48	-2.79	0.26
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	14.19	-3.39	0.03
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	61.64	0.93	82.38
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	22.35	-1.57	5.84

ตารางที่ จ.14 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 65 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 65)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	87.90	3.03	99.88
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	14.77	-1.49	6.81
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	64.39	2.08	98.11
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	65.31	1.81	96.48
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	58.50	1.62	94.78
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	23.38	-1.12	13.06
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	61.29	2.15	98.41

ตารางที่ จ.15 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 70 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 70)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	17.43	-2.47	0.68
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	50.87	1.25	89.49
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	49.87	0.79	78.57
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.62	-2.78	0.27
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	14.52	-3.34	0.04
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	63.13	1.00	84.03
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	22.91	-1.52	6.40

ตารางที่ จ.15 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 70 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 70)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	90.16	3.17	99.92
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	15.20	-1.47	7.12
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	65.94	2.23	98.72
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	67.00	1.95	97.43
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	60.05	1.72	95.69
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	24.03	-1.07	14.19
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	63.05	2.33	99.00

ตารางที่ จ.16 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 75 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 75)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	17.74	-2.43	0.75
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	51.84	1.32	90.64
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	50.89	0.84	79.98
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.76	-2.77	0.28
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	14.84	-3.30	0.05
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	64.59	1.06	85.54
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	23.46	-1.48	6.98

ตารางที่ จ.16 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 75 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 75)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	92.37	3.30	99.95
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	15.61	-1.44	7.44
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	67.45	2.38	99.14
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	68.66	2.08	98.14
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	61.57	1.81	96.45
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	24.66	-1.02	15.36
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	64.75	2.50	99.38

ตารางที่ จ.17 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 80 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 80)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	18.05	-2.39	0.83
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	52.80	1.38	91.67
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	51.89	0.89	81.32
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	6.89	-2.75	0.29
5	อาคารโรงเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	15.16	-3.25	0.06
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	66.02	1.12	86.92
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	23.99	-1.43	7.60

ตารางที่ จ.17 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 80 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 80)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	94.52	3.44	99.97
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	16.02	-1.42	7.77
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	68.92	2.53	99.43
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	70.27	2.22	98.67
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	63.04	1.89	97.08
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	25.28	-0.97	16.56
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	66.42	2.68	99.63

ตารางที่ จ.18 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 85 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 85)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	18.36	-2.36	0.92
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	53.74	1.45	92.60
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	52.87	0.94	82.57
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.02	-2.74	0.30
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	15.47	-3.21	0.07
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	67.42	1.18	88.18
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	24.51	-1.39	8.24

ตารางที่ จ.18 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 85 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 85)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	96.63	3.56	99.98
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	16.41	-1.40	8.09
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	70.37	2.68	99.63
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	71.85	2.35	99.05
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	64.49	1.98	97.60
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	25.88	-0.92	17.78
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	68.04	2.84	99.78

ตารางที่ จ.19 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 90 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1, \alpha_2, k\sqrt{t} + 90)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	18.66	-2.32	1.02
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	54.67	1.51	93.43
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	53.83	0.98	83.75
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.15	-2.73	0.31
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	15.78	-3.17	0.08
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	68.78	1.24	89.33
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	25.02	-1.35	8.90

ตารางที่ จ.19 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 90 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 90)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	372	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	98.69	3.69	99.99
9	อาคารโรงเรียนบ้าน สวน (จันอนุสรณ์)	240	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	16.80	-1.38	8.42
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	456	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	71.78	2.82	99.76
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	360	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	73.40	2.47	99.33
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	336	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	65.90	2.06	98.04
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	288	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	26.46	-0.88	19.03
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	252	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	69.63	3.01	99.87

ตารางที่ จ.20 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 95 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1, \alpha_2, k\sqrt{t} + 95)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	18.95	-2.28	1.12
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	55.58	1.57	94.18
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	54.78	1.03	84.86
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.28	-2.72	0.32
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	16.07	-3.13	0.09
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	70.12	1.30	90.38
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	25.52	-1.31	9.59

ตารางที่ จ.20 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 95 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $\left(\frac{\text{มม.}}{\text{เดือน}^{1/2}}\right)$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1, \alpha_2, k\sqrt{t} + 95)$	Z (มม.)	ความน่าจะเป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	804	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	100.70	3.81	99.99
9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	708	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	17.18	-1.36	8.75
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	612	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	73.17	2.96	99.85
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	600	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	74.91	2.60	99.53
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	492	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	67.28	2.14	98.40
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	444	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	27.04	-0.83	20.31
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	408	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	71.18	3.17	99.92

ตารางที่ จ.21 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 100 ปี

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1, \alpha_2, k\sqrt{t} + 100)$	Z (มม.)	ความน่าจะ เป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
1	อาคารไปรษณีย์สาขา บางปลาสร้อย	804	37.69	5.55	12.83	6.04	0.45	19.24	-2.25	1.23
2	อาคารโรงเรียนชล กันยานุกูล	708	32.26	12.71	36.21	7.68	1.36	56.47	1.63	94.85
3	อาคารโรงเรียน เทศบาลวัดเนิน สุทธาวาส	612	33.61	10.53	34.08	17.64	1.38	55.71	1.08	85.90
4	อาคารไปรษณีย์สาขา แยกเฉลิมไทย	600	39.85	11.91	4.5	1.14	0.18	7.40	-2.71	0.33
5	อาคารเรียนอนุบาล ชลบุรี	492	38.31	6.21	9.29	3.47	0.42	16.37	-3.08	0.10
6	อาคารสำนักงาน เทศบาลเมืองชลบุรี	444	40.51	17.35	39.08	14.67	1.85	71.44	1.36	91.33
7	อาคารวิทยาลัย อาชีวศึกษาชลบุรี	408	41.19	9.77	13.79	6.98	0.68	26.01	-1.26	10.30

ตารางที่ จ.21 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมเหล็ก มาตรฐานโยธาธิการและผังเมือง 100 ปี (ต่อ)

ลำดับ	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการ ทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มม.)	S_{cover} (มม.)	$\bar{X}_{car,real}$ (มม.)	$S_{car,real}$ (มม.)	k $(\frac{มม.}{เดือน^{1/2}})$	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t} + 100)$	Z (มม.)	ความน่าจะเป็นที่เหล็กจะ เกิดสนิม (%)
8	อาคารห้างสรรพสินค้า ฟอรั่มพลาซ่า ชลบุรี	804	38.2	12.96	52.58	10.04	2.73	102.68	3.93	100.00
9	อาคารโรงเรียนบ้านสวน (จันอนุสรณ์)	708	41.57	17.88	7.54	1.93	0.49	17.55	-1.34	9.08
10	สะพานลอยคนเดินข้าม ไปรษณีย์แยกเฉลิมไทย	612	43.7	8.79	41.17	4.68	1.93	74.53	3.10	99.90
11	สะพานลอยคนเดินข้าม วิทยาลัยอาชีวศึกษา ชลบุรี	600	43.22	9.77	38.63	7.32	2.04	76.39	2.72	99.67
12	สะพานลอยคนเดินข้าม วัดเนินสุทธาวาส	492	31.1	9.44	33.79	13.99	1.84	68.63	2.22	98.69
13	สะพานลอยคนเดินข้าม โรงเรียนอนุบาลชลบุรี	444	37.4	6.89	12.67	10.4	0.75	27.60	-0.79	21.61
14	สะพานลอยคนเดินข้าม แยกเฉลิมไทย	408	40.49	7.19	31.88	6.5	2.01	72.70	3.32	99.96

ภาคผนวก ฉ

รูปภาพการปฏิบัติงาน





รูปที่ ฉ.1 หาดำเนินของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ ฉ.2 สภาพของอาคารที่เลือกทำการศึกษา



รูปที่ ฉ.3 ทำการวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ



รูปที่ ฉ.4 การหาตำแหน่งเหล็กและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม



รูปที่ ๑.5 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ



รูปที่ ๑.6 การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่าง



รูปที่ ๑.7 นำตัวอย่างคอนกรีตมาผ่าซีกด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)



รูปที่ ๑.8 ทำการฉีกปูนสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์



รูปที่ ๑.๑ ทำการวัดระยะการเกิดคาร์บอนเนชั่น



ภาคผนวก ข

เอกสารการประชุมวิชาการ





การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25

15 – 17 กรกฎาคม 2563

NCCE 25

The 25th National Convention on Civil Engineering

ONLINE CONFERENCE

วิศวกรรมโยธากับโครงการ เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน

*Civil Engineering and Eastern Economic Corridor
for Sustainable Development*



จัดการประชุมโดย

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

thaince.org/ncce25



เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25
The 25th National Convention on Civil Engineering (NCCE 25)



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25

ภายใต้หัวข้อประชุม

วิศวกรรมโยธากับโครงการเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออกเพื่อการพัฒนอยั่งยืน
Civil Engineering and Eastern Economic Corridor for Sustainable Development
15 – 17 กรกฎาคม 2563
Online Conference

จัดการประชุมโดย

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา



ตารางเวลานำเสนอบทความ

วันพฤหัสบดีที่ 16 กรกฎาคม 2563

ห้องประชุม 3 - II หลมอบัว

เวลา 9:00 - 10:30 น.

สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง (STR)

ประธานห้องประชุม : ศศ.ดร.วิเชียร ชาลี

ลำดับ	เวลา	รหัสบทความ	หัวข้อบทความ	ผู้นำเสนอ / ผู้แต่ง
1	9:00 - 9:15 น.	STR-INV1	สถานการณ์กฎกระทรวงและมาตรฐาน ฐานอาคารในประเทศไทย	ศศ.เอก ศิริพานิชกร
2	9:15 - 9:30 น.	STR06	การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ที่มีส่วนโลหะจากกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรไฟฟ้าเป็นส่วนผสม	กาญจนาวรรณ ปัญญาวิธ, สุปัต ครอบงามกุล, เปรมกฤดี กาญจนปิยะ
3	9:30 - 9:45 น.	STR08	การพัฒนาคอนกรีตพูนจากส่วนโลหะที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	กชกร ศรีวัฒนกุล, สุปัต ครอบงามกุล, เปรมกฤดี กาญจนปิยะ, จักรพันธ์ เทือกดี
4	9:45 - 10:00 น.	STR38	การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้คอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลแบบย้อยข้า	คณุตม์ สมบูรณ์ปัญญา, กุษิต บุณยฤกษ์, วงศกร สิมมา, ชัชวณพศ์ สุรัมย์
5	10:00 - 10:15 น.	STR41	การใช้ตะกอนปะปา ไนโมรติอาร์ทีคร่าทิ้งต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป	ตะวัน เพชรอาวุธ, จตุพล ตั๊ปปาคิต
6	10:15 - 10:30 น.	STR43	การสำรวจอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี	สุพจน์ ธรรมนิทา, ปิติศานต์ กระจ่างตา

รหัสบทความ	ชื่อหัวข้อบทความ	ผู้แต่ง	หน้า
STR40	กำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็กภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์แบบวัฏจักรเปียกสลับแห้ง	สัณห์ ปริก, ทวีชัย สำราญวานิช	1233 - 1237
STR41	การใช้ตะกอนประปา ในมอร์ตาร์อิฐก่อรอยต่อผิวทางคอนกรีตสำเร็จรูป	ตะวัน เพชรอาวุธ, จตุพล ตั้มปกาศิต	1238 - 1244
STR42	คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของประตูปะบายน้ำล้น	ราชินีย์ ชินทกสิกรรม, พุทธรักษ์ วิชาพันธ์กุล, ชยานนท์ หรรษภักดิ์ญู	1245 - 1252
STR43	การสำรวจอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี	สุพจน์ ธรรมนิภา, เป็ดศานต์ กร้ามาตธ	1253 - 1259
STR44	คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเกาป่าลมน้ำนินบดละเอียดในปริมาณสูง	เทพฤทธิ์ วิชาญสุข, วีรชาติ ตั้วจักรกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล	1260 - 1265
STR45	การต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียว	อมรชัย ใจวงศ์, ชานนท์ ทวางเจริญ	1266 - 1274
STR46	พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดด้วยสายรัดเหล็กแบบไฟเบอร์	อัคริพล พัสชญไธริน, สายันต์ ศิริมนตรี, ชบะชัย ทองโงม	1275 - 1280
STR47	Seismic Strengthening of Soft-Story RC Moment Frames	Wongsa Wararuksajja, Sutat Leelataviwat, Pennung Warnitchai, Li Bing, Hasan Tariq, Nattakan Naiyana	1281 - 1287

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

สุพจน์ ธรรมนิทา^{1*} และ ปิติศานต์ กร้ามาต²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี

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

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการตรวจสอบการเกิดคาร์บอนขึ้นของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี โดยทำการวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม วัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมและประเมินกำลังอัดประลัย พร้อมเจาะเก็บชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนขึ้นของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนของจังหวัดชลบุรี โดยเลือกใช้โครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม 4 สะพาน ข้อมูลที่ได้นำมาหาการเกิดคาร์บอนขึ้นและทำนายอายุของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม โดยใช้สมการของ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนขึ้นของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) ผลการศึกษาพบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 31 ถึง 44 มิลลิเมตร และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 307 ถึง 367 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความลึกคาร์บอนขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 32 ถึง 41 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.4 ถึง 7.1 มิลลิเมตร/ปี^{1/2} สุดท้ายด้วยวิธีการตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐาน มยผ. สามารถทำนายและคำนวณอายุปลอดภัยของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรีที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนขึ้น ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

คำสำคัญ: โครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม, คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนขึ้น, การทำนายอายุปลอดภัยของโครงสร้าง, จังหวัดชลบุรี

Abstract

This article was an investigation on the carbonation depth of pedestrian bridge structures in Chonburi community area. Carbon dioxide (CO₂) concentration and relative humidity (RH) of the environment, and cover thickness, compressive strength

and carbonation depth of concrete of pedestrian bridge structures were measured. In this study, the pedestrian bridge structures used 4 bridges in Chonburi community area. The study results were analyzed the occurrence on the carbonation depth of pedestrian bridge structures. The predict for free service life of pedestrian bridge structures in both by Fick's first law of diffusion equation and durability design of carbonation structure of Department of Public Works and Town & Country Planning were considered. The results indicated that the pedestrian bridge structures had the average of the cover thickness and the average of the compressive strength as 31-44 mm and 307-367 kg/cm², respectively. Besides, the average of the carbonation depth and the average of the carbonation coefficient of pedestrian bridge structures were 32-41 mm and 6.4-7.1 mm/year^{0.5}, respectively. Finally, the proposed method to Fick's first law of diffusion equation and durability design of carbonation structure of Department of Public Works and Town & Country Planning can predict and calculate the free service life of the pedestrian bridge structures exposed to CO₂. The result can be used in the design, planning and maintenance of pedestrian bridge structures faced by the carbonation environment as well as preventing damage that will occur in the future.

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

1. บทนำ

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

ให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตแตกต่างกัน ซึ่งสภาพแวดล้อมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพเนื่องจากปัญหาความคงทนได้ เช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนซัน คลอไรด์ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในเขตที่มีการจราจรหนาแน่น หรือในเขตเมืองจะมีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในปริมาณที่สูง ก๊าซ CO₂ ดังกล่าวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตดังสมการ $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาคาร์บอนซัน ซึ่งทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ จากผลการวิจัยในอดีตพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนซันในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น จากผลงานวิจัยในอดีตของ Roy et al [1] พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอนซัน โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 ถึง 75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนซันสูง ส่วนในกรณีของ Castro et al [2] พบว่าตำแหน่งที่ตั้งอาคารห่างจากทะเลประมาณ 100 ถึง 200 เมตร มีแนวโน้มอัตราการเกิดคาร์บอนซันสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และระดับความสูงเพิ่มขึ้นของอาคาร ตัวอย่างทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนซันสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ Khunthongkeaw et al [3] พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอนซัน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอนซันได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอกโซลาน ซึ่งต่างก็มีส่วนทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) จึงทำให้ความสึกกร่อนคาร์บอนซันมากขึ้น อย่างไรก็ตามยังไม่มีการตระหนักอย่างเพียงพอถึงการวางแผนและการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีผลกระทบเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนซันอย่างจริงจัง รวมถึงการนำมาตราฐานการออกแบบต่าง ๆ ที่ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพให้อยู่ในเกณฑ์ที่ป้องกันได้ในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ มาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตที่แพร่หลาย จึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนซัน เป็นผลให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลงตามลำดับ

จังหวัดชลบุรีซึ่งตั้งอยู่ในภาคตะวันออกของประเทศไทยและเป็นจังหวัดที่ติดกับชายทะเล นอกจากนี้ยังมีนิคมอุตสาหกรรมตั้งอยู่ในพื้นที่ด้วยสภาพทางภูมิศาสตร์และเศรษฐกิจของจังหวัด ทำให้อาคารส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีการทำสายสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะพานลอยคนเดินข้ามที่อยู่ในบริเวณการจราจรหนาแน่นนั้น มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของตัวโครงสร้างเนื่องจากสภาวะแวดล้อมดังกล่าว ดังนั้นเพื่อเป็นการรับมือและป้องกันการเสื่อมสภาพของสะพานลอยคนเดินข้ามในพื้นที่จังหวัดชลบุรี

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการสำรวจและตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี เพื่อที่จะได้ทราบถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้างดังกล่าว จะได้ดำเนินการศึกษาไปใช้ในการประเมินความเสี่ยงสำหรับพื้นที่อื่น ๆ ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน

นอกจากนี้จะได้สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับความคงทนของอาคารในสภาพแวดล้อมที่มีการทำสายต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การคัดเลือกตัวอย่างสะพานลอยคนเดินข้าม

ในการสำรวจการเกิดคาร์บอนซัน พร้อมทั้งประเมินความเสี่ยงและการเสื่อมสภาพของสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี ในครั้งนี้ประกอบด้วย การตรวจสอบด้วยตาเปล่า การวัดความเข้มข้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่สะพานลอยคนเดินข้ามดังกล่าวตั้งอยู่ การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม การประเมินกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาทดสอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาระยะความสึกกร่อนคาร์บอนซัน โดยได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมืองชลบุรีที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง จำนวน 4 สะพาน ได้แก่ สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส และสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี โดยตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตรวจสอบในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี

ตารางที่ 1 รายละเอียดของสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตรวจสอบในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี

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

*อายุโครงสร้างนับจากวันที่ก่อสร้างเสร็จไปจนถึงวันที่ตรวจสอบ (พ.ศ.2562)

2.2 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

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

คาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ครั้งนี้เป็นการวัด ณ ช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่ใช่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ตลอดทั้งปี อย่างไรก็ตามเพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดคาร์บอนชั้นของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่วัดได้ ณ ช่วงเวลาดังกล่าว

2.3 การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

การทดสอบวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมในตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งที่เจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนชั้นแสดงดังรูปที่ 1 โดยใช้เครื่อง Electromagnetic induction ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการวัดระยะห่างจากผิวโลหะ [4] ตรวจสอบบริเวณผิวของโครงสร้างคอนกรีตโดยเลือกหน้าตัดที่ผิวเรียบเท่านั้น ในแต่ละโครงสร้างอาคารจะวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 6 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 6 ค่า

2.4 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก

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

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

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



รูปที่ 1 การทดสอบวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม



รูปที่ 2 วิธีการทดสอบกำลังอัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีต โดยใช้ค้อนกระแทกแบบชมิทท์

2.5 การเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น

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

การทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ นำมาผ่าซีกดังแสดงในรูปที่ 4 โดยการฉีดฟีนอล์ฟธาไลนไปยังคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้ว ถ้าผิวของคอนกรีตที่ถูกฉีดเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้ม แสดงว่ายังไม่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น หากคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น จากนั้นวัดค่าระยะความลึกคาร์บอนชั้นจากรยะความหนาของคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่ไปจนถึงจุดตัดของสีชมพูเข้ม



รูปที่ 3 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนชั้น



รูปที่ 4 การทดสอบและวัดความลึกคาร์บอนชั้น

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การพัฒนาความสึกกร่อนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการเกิดคาร์บอนขึ้นนั้น ต้องอาศัยปัจจัยที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โดยค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนขึ้นในระดับรุนแรงมีค่าเท่ากับ 400 ppm เป็นต้นไป ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 60 (ความชื้นสัมพัทธ์ถึงขั้นกึ่งแห้ง) จัดว่าเป็นสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนขึ้นรุนแรงเช่นกัน [5] เมื่อปัจจัยทั้งสองด้านมีความเสี่ยงในระดับที่สูงย่อมทำให้การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนขึ้นสูงขึ้นตามลำดับ สำหรับภาพรวมของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสะพานลอยคนเดินข้ามทั้ง 4 สะพาน (ตารางที่ 2) พบว่า มีความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูง คือ 1,112 ถึง 1,167 ppm และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่างร้อยละ 53.4 ถึง 58.1 เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน มยผ. [5] ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนขึ้นที่ระดับความรุนแรง

3.2 ระยะเวลาการรื้อเหล็กเสริม

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

3.3 กำลังอัดประลัยคอนกรีต

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

3.4 ความสึกกร่อนชั้น

ในส่วนของระยะความสึกกร่อนชั้น (ตารางที่ 3) นั้น พบว่า สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) มีค่ามากที่สุด ตามไปด้วย สะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี สะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส และสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอายุของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่มากขึ้น การทำลายคอนกรีตเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ย่อมมากกว่า ส่งผลให้การเกิดคาร์บอนขึ้นที่มากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากผลของกำลังอัดประลัยของโครงสร้าง ปริมาณความเข้มข้น

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในบริเวณแต่ละพื้นที่ที่โครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามแต่ละสะพานตั้งอยู่นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 2) จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการเกิดคาร์บอนขึ้นที่แตกต่าง

3.5 สัมประสิทธิ์ความสึกกร่อนชั้น

โดยสมการ Fick's first law of diffusion เมื่อทราบอายุของโครงสร้างและความสึกกร่อนชั้น สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสึกกร่อนชั้นได้จากสมการ $d = k\sqrt{t}$ โดยที่ d คือค่าความสึกกร่อนชั้น (มิลลิเมตร) t คือ อายุของโครงสร้าง (ปี) และ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสึกกร่อนชั้น (มิลลิเมตร/ปี^{1/2})

จากผลการทดสอบโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความสึกกร่อนชั้นได้ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า โครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชนของจังหวัดชลบุรี มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้นที่ไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือ สัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้นของสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี มีค่ามากที่สุด ตามด้วยของสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) และสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์

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

ตารางที่ 3 ระยะเวลาการรื้อเหล็กเสริม กำลังอัดประลัย ความสึกกร่อนชั้น และสัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้น

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

3.6 การทำนายอายุโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามจากการเกิดคาร์บอนขึ้นตามสมการ Fick's first law of diffusion

3.6.1 ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

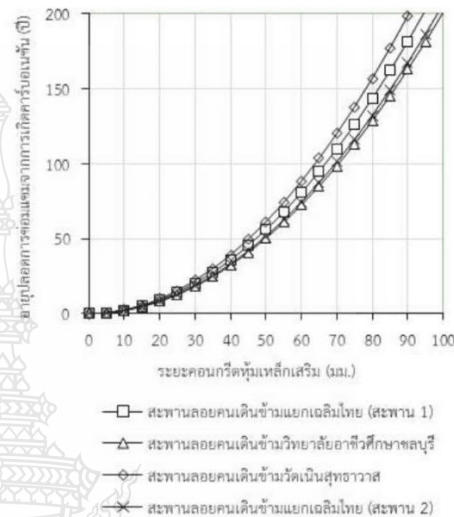
เมื่อพิจารณาโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง โครงสร้างเหล่านี้มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนขึ้นในอัตราที่สูง ซึ่งปฏิกิริยาการบวมขึ้นทำให้ความเค้นดัดของคอนกรีตลดลง และส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ไฉนที่สุด จนทำให้โครงสร้างเกิดความวิบัติขึ้นตามมา ดังนั้นการวางแผนเพื่อจะให้โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ โดยรูปที่ 5 ได้แสดงกราฟทำนายอายุปลดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนขึ้นของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion คือ $d = k\sqrt{t}$ พบว่า ที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่เท่ากันนั้น อายุปลดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนขึ้นของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 1) มีค่ามากที่สุด ตามด้วยสะพานลอยคนเดินข้ามวัดเนินสุทธาวาส สะพานลอยคนเดินข้ามแยกเฉลิมไทย (สะพาน 2) และสะพานลอยคนเดินข้ามวิทยาลัยอาชีวศึกษาชลบุรี ตามลำดับ

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

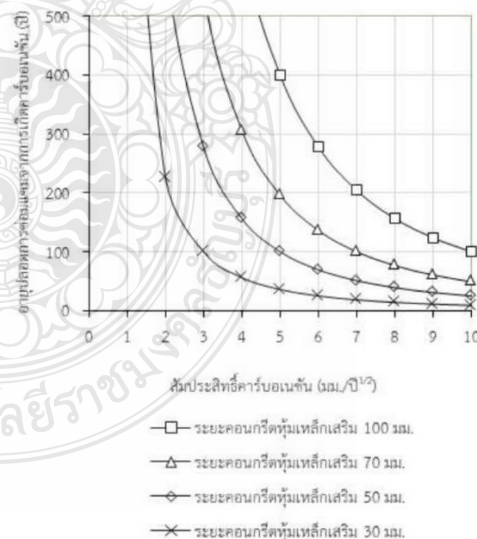
3.6.2 ผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนขึ้น

จากค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนขึ้น (ตารางที่ 3) สามารถทำนายอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอนขึ้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนขึ้น โดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion คือ $d = k\sqrt{t}$ ได้ดังรูปที่ 8 โดยในภาพดังกล่าวได้เสนอแนวคิดให้โครงสร้างที่มีการออกแบบให้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างเท่ากับ 30 50 70 และ 100 มิลลิเมตร พบว่า โครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนขึ้นน้อยทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีมากกว่าของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนขึ้นมาก ในขณะที่เดียวกันที่สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนขึ้น

เท่ากัน พบว่า โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมมากกว่าจะมีอายุการใช้งานที่มากกว่า



รูปที่ 5 อายุปลดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนขึ้นของสะพานลอยคนเดินข้ามอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม อ้างอิงสมการ Fick's first law of diffusion



รูปที่ 6 อายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอนขึ้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนขึ้น อ้างอิงสมการ Fick's first law of diffusion

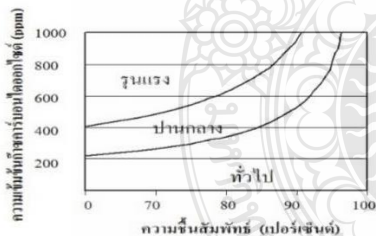
3.7 การทำนายอายุโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

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

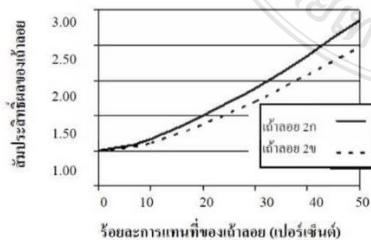
ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเอ็น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 7 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต และ k คือสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเอ็น ดังสมการ $k = 17.5 \cdot k_r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

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเอ็น [5]

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	α_2
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อการร่อนชั้นปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อการร่อนชั้นรุนแรง	1.00



รูปที่ 7 การแปรระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเอ็น [5]

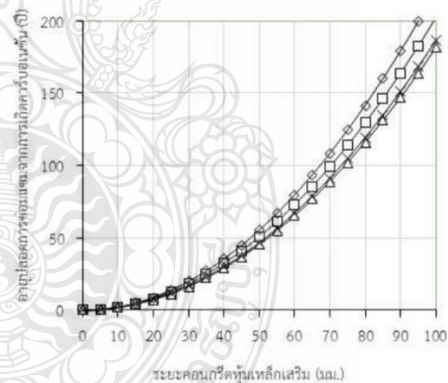


รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน [5]

3.7.1 ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

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

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

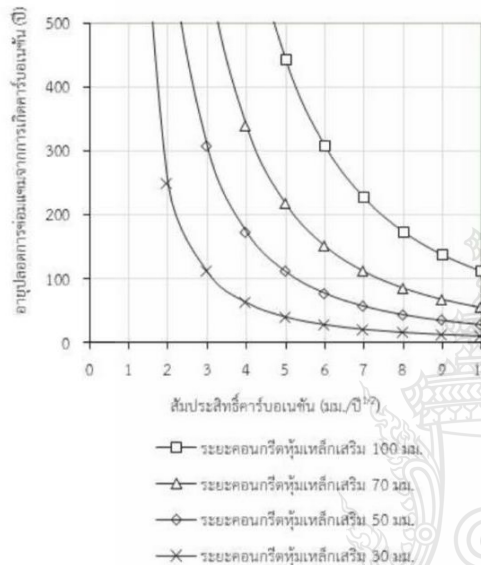


รูปที่ 9 อายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอนเอ็นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กอ้างอิงมาตรฐาน มยผ.

3.7.2 ผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเอ็น

จากผลสัมประสิทธิ์คาร์บอนเอ็น (ตารางที่ 3) สามารถทำนายอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอนเอ็นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตาม

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



รูปที่ 10 อายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอนเนชันของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันอ้างอิงมาตรฐาน มยผ. (โครงสร้างสำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น: $\alpha_1 = 0.95$ และอยู่สภาพเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันรุนแรง: $\alpha_2 = 1$)

จากการทำนายอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี ตามสมการ Fick's first law of diffusion และตามมาตรฐาน มยผ. โดยการใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ เพื่อทำนายอายุการใช้งานจากการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้าม สามารถนำไปใช้ในการวางแผนออกแบบ บำรุงรักษาโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรีที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชัน ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

4. สรุป

จากผลของการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1) สิ่งแวดล้อมของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรีมีความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 1,112 ถึง 1,167 ppm และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 53 ถึง 58 เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน มยผ. จัดอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชันในระดับรุนแรง

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

3) ความลึกคาร์บอนเนชันเฉลี่ยของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี มีค่าอยู่ระหว่าง 32 ถึง 41 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าอยู่ระหว่าง 6.4 ถึง 7.1 มิลลิเมตร/ปี^{1/2}

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

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

6) ตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง สามารถทำนายและคำนวณอายุปลอดภัยซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชัน ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.K.Roy, K.B.Poh and D.O.Northwood, (1998). Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies, Building and Environment, Vol.34, pp. 597-606.
- [2] P. Castro, E.I. Morenob and J. Genesca, (2000). Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings, Cement and Concrete Research, Vol 30, pp. 1565- 1571.
- [3] J.Khunthongkeaw, S.Tangtermsirikul and T.Leelawat, (2006). A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete, Construction and Building Materials, Vol.20, pp. 744-753.
- [4] มาตรฐาน มยผ. 1501-51 ถึง มยผ. 1507-51, มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย, กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- [5] มาตรฐาน มยผ. 1332 - 55, มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน, กรมโยธาธิการและผังเมือง.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุพจน์ ธรรมนิทา
วัน เดือน ปีเกิด	15 มกราคม 2525
ที่อยู่	32/15 หมู่ 2 ตำบลหนองเสือช้าง อำเภอหนองใหญ่ จังหวัดชลบุรี
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	081-175-3322
อีเมลล์	suphot_t@mail.rmutt.ac.th
ประวัติการทำงาน	พ.ศ.2547-ปัจจุบัน ตำแหน่ง ผู้ช่วยนายช่างโยธา กองช่าง องค์การบริหารส่วนตำบลหนองเสือช้าง อำเภอหนองใหญ่ จังหวัดชลบุรี
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	สุพจน์ ธรรมนิทา และปิตินันต์ กร้ามาต, 2563. การสำรวจอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นของโครงสร้างสะพานลอยคนเดิน ข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรม โยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 จังหวัดชลบุรี, บทความเลขที่ STR 43.

