

การประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชันและการทำนาย
อายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี

THE RISK ASSESSMENT OF CARBONATION INDUCED CORROSION
AND SERVICE LIFE PREDICTION OF REINFORCED CONCRETE
BUILDINGS IN UDON THANI COMMUNITY AREA

อภิสิทธิ์ ปาทวาท

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น
และการทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
ในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี

อภิสิทธิ์ ปาทวาท


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562

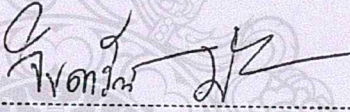
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้นและการทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี The Risk Assessment of Carbonation Induced Corrosion and Service Life Prediction of Reinforced Concrete Buildings in Udon Thani Community Area
ชื่อ - นามสกุล	นายอภิสิทธิ์ ปาทวาท
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.
ปีการศึกษา	2562

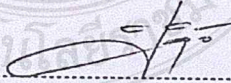
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

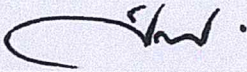
.....  กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ทวีชัย สำราญวานิช, ปร.ด.)

.....  กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จินดารัตน์ มณีเจริญ, D.Eng.)

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

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....  คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 18 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นและการทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี
ชื่อ-นามสกุล	นายอภิสิทธิ์ ปาทาวท
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.
ปีการศึกษา	2562



บทคัดย่อ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะพบปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ส่งผลเสียต่อความสามารถด้านกำลังรับแรง และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลงด้วย ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยทำการวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม วัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมและประเมินกำลังอัดประลัยของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก พร้อมเจาะเก็บชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในพื้นที่วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี ในพื้นที่วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี และในพื้นที่โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3 โดยข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์การเกิดคาร์บอนเนชั่นและทำนายอายุของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้สมการของ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนเนชั่นของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

ผลการศึกษาพบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าระหว่าง 31 ถึง 57 มิลลิเมตร และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าระหว่าง 308 ถึง 339 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนความลึกคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ยของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่มีค่าอยู่ระหว่าง 14 ถึง 29 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชั่นมีค่าอยู่ระหว่าง 2.76 ถึง 4.97 มิลลิเมตร/ปี^{1/2} สอดคล้องด้วยวิธีการตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานมยผ. สามารถทำนายและคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้างที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

คำสำคัญ: โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนเนชั่น การทำนายอายุการใช้งาน จังหวัดอุดรธานี

Thesis Title	The Risk Assessment of Carbonation Induced Corrosion and Service Life Prediction of Reinforced Concrete Buildings in Udon Thani Community Area
Name-Surname	Mr. Apisit Patavat
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Associate Professor Nirachon Nokkaew, M.Eng.
Academic Year	2019

ABSTRACT

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

This research aimed to investigate carbonation depth of RC building structures in the community area of Udon Thani province. Carbon dioxide (CO₂) concentration and relative humidity (RH) of the environment, cover thickness and compressive strength of RC building structures, and carbonation depth of RC building structures were measured. In this study, the RC building structures were selected in three areas of Udon Thani province, namely Udon Thani Technical College, Udon Thani Polytechnic College, and Nikomsrangtonengchagpin School 3. The occurrence and the effect of the carbonation depth of RC building structures were analyzed by Fick's First Law of Diffusion Equation and durability design of carbonation structure of Department of Public Works and Town & Country Planning.

The study results indicated that the RC building structures had the average cover thickness and the compressive strength of 31-57 mm and 308-339 kg/cm², respectively. Besides, the average carbonation depth and coefficient of RC building structures were 14-29 mm and 2.76-4.97 mm/year^{0.5}, respectively. Finally, the proposed method of 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 RC structures exposed to CO₂. This can be used for designing, planning, and maintaining RC structures faced by the carbonation environment as well as preventing damage that will occur in the future.

Keywords: reinforced concrete structure, carbon dioxide, carbonation, service life prediction, Udon Thani province

กิตติกรรมประกาศ

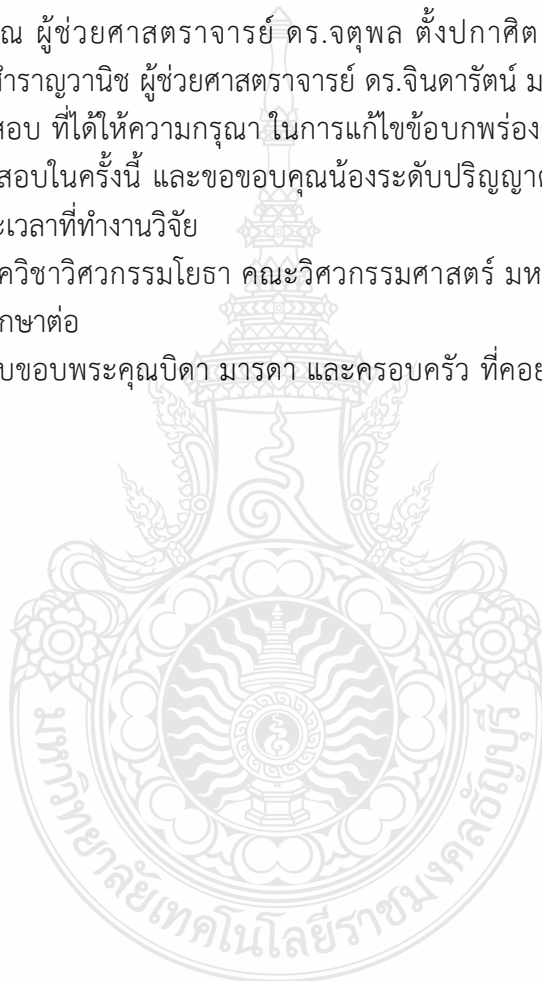
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตารัตน์ มณีเจริญ และ รองศาสตราจารย์ นิรชร นกแก้ว กรรมการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย รวมทั้งสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบคุณน้องระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยส่งเสริมและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

อภิสิทธิ์ ปาทawat



สารบัญ

	หน้า
หัวข้อวิทยานิพนธ์.....	(1)
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	15
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	47
3.1 ตำแหน่งของสถานที่ที่ทำการศึกษา.....	47
3.2 การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	49
3.3 การหาสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น.....	54
3.4 การวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น.....	54
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	58
4.1 การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี.....	58
4.2 การวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น.....	67
บทที่ 5 สรุป.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	87
ภาคผนวก ข ข้อมูลการปฏิบัติงานและรูปภาพการปฏิบัติงาน.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	178



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α).....	37
ตารางที่ 2.2	ค่าแนะนำสำหรับระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_o) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปลักษณะงานก่อสร้าง ระยะหุ้มต่ำสุด.....	37
ตารางที่ 2.3	ค่าแนะนำสำหรับระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป.....	40
ตารางที่ 2.4	สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น.....	41
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา.....	49
ตารางที่ 3.2	สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนชั้น.....	55
ตารางที่ 4.1	ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....	61
ตารางที่ 4.2	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตที่ศึกษา.....	63
ตารางที่ 4.3	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตที่ศึกษา.....	64
ตารางที่ 4.4	ระยะการเกิดคาร์บอนชั้นและสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ศึกษา.....	66
ตารางที่ 4.5	ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ.....	68

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	ราวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น.....	22
รูปที่ 2.2	แบรีเออร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนชั้น.....	22
รูปที่ 2.3	สภาพผิวของถ้งน้ำคอนกรีตที่เสียหายถ้งน้ำที่เทไม่เต็มแบบทำให้มีโอกาสที่จะเกิดสนิมในเหล็กได้มาก เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 ประการรวมกันคือ สาเหตุแรกคือน้ำสามารถชะเอาความเป็นด่างออกไปจากคอนกรีต เมื่อความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต ถ้ามีเวลาที่ถ้งน้ำแห้ง เหล็กได้สัมผัสกับก๊าซออกซิเจน ส่งผลให้เหล็กเกิดสนิมได้ และสาเหตุที่สองคือ เกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น.....	23
รูปที่ 2.4	กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	25
รูปที่ 2.5	ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนออกทั้งหมด ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันที่เกิดขึ้นจากผลิตผลของการเกิดสนิม และการเกิดสนิมยังทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมมีขนาดเล็กลง.....	26
รูปที่ 2.6	รอยร้าวที่เกิดขึ้นตามแนวของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมของเหล็กจะยิ่งทำให้สารจากสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อโครงสร้าง สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ง่าย มีผลทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้เร็วกว่าโครงสร้างที่ไม่เกิดรอยร้าว.....	26
รูปที่ 2.7	ความเสียหายของพื้นและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	27
รูปที่ 2.8	คอนกรีตบริเวณด้านล่างของราวสะพานหลุดออกเป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม.....	27
รูปที่ 2.9	ถ้งน้ำที่เทไม่เต็มแบบทำให้มีโอกาสที่จะเกิดสนิมในเหล็กได้มาก เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 ประการรวมกันคือ สาเหตุแรกคือน้ำสามารถชะเอาความเป็นด่างออกไปจากคอนกรีต เมื่อความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต ถ้ามีเวลาที่ถ้งน้ำแห้ง เหล็กได้สัมผัสกับก๊าซออกซิเจน ส่งผลให้เหล็กเกิดสนิมได้ และสาเหตุที่สองคือ เกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น.....	28
รูปที่ 2.10	สภาพผิวคอนกรีตที่เกิดรอยแตกขึ้น ทำให้น้ำในถ้งสามารถซึมผ่านออกมาทางรอยแตกและพาเอาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกสู่ภายนอกได้ เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศจะทำให้เกิดเป็นคราบหินปูนบนผิวคอนกรีต ปรากฏการณ์นี้ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตบริเวณรอยแตกต่ำลงได้ ทั้งนี้รอยแตกที่เกิดขึ้นยังเป็นช่องทางที่เปิดโอกาสให้สารที่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมเข้ามาทำปฏิกิริยาเกิดสนิมได้ง่ายขึ้นด้วย.....	28

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.11 โค้งปกติ.....	29
รูปที่ 2.12 ค้อนกระแทกแบบชมิตท์ (Schmidt Hammer).....	32
รูปที่ 2.13 เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก.....	33
รูปที่ 2.14 เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ (ยี่ห้อ AZ รุ่น 77535).....	34
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างความเสียหายของคอนกรีตที่เกิดจากการออกแบบ (ใส่รายละเอียดเหล็กเสริมไม่ดีทำให้คอนกรีตไม่สามารถไหลเข้าไปเต็มแบบ) ประกอบกับการก่อสร้างที่ไม่ดี (กระทุ้ง หรือจี้เขย่าไม่เพียงพอ) ดังนั้นเพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีความคงทน ควรคำนึงถึงทั้งการออกแบบ การเลือกใช้วัสดุ และการก่อสร้างให้ได้มาตรฐานตามแบบ.....	35
รูปที่ 2.16 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น.....	41
รูปที่ 2.17 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่แก้วลอยในวัสดุประสาน.....	42
รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งของโครงสร้างอาคารในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา.....	48
รูปที่ 3.2 เครื่องวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โดยเครื่องมือวัดยี่ห้อ AZ รุ่น 77535.....	50
รูปที่ 3.3 การวัดตำแหน่งเหล็กและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม โดยเครื่องมือวัดยี่ห้อ R-C-410 Rebarscope.....	51
รูปที่ 3.4 วิธีการทดสอบกำลังอัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีต โดยใช้ค้อนกระแทกแบบชมิตท์ (Schmidt Hammer).....	52
รูปที่ 3.5 สว่าน BOSCH หัวเจาะ HOLESAW.....	52
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM).....	53
รูปที่ 3.7 การทดสอบวัดระยะคาร์บอนเนชั่น.....	53
รูปที่ 3.8 การวัดระยะคาร์บอนเนชั่นและปูนฉาบ.....	54
รูปที่ 3.9 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น.....	56
รูปที่ 3.10 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่แก้วลอยในวัสดุประสาน.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.1	การแตกראวและหลุคอรอนของปุนฉาบบริเวณใต้ทอังกั้นสาด(วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี (อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ).....	58
รูปที่ 4.2	การหลุคอรอนและแตกראวของปุนฉาบใต้ทอกระเบียง (วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี อาคารพานิชยการ).....	59
รูปที่ 4.3	ปัญหาน้ำฝนรั่วซึมและการหลุคอรอนของสี (วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี อาคารโรงอาหาร).....	59
รูปที่ 4.4	ปัญหารอยร้าวชั้นปุนฉาบบริเวณเพดานของพื้นที่ชั้น 2 (วิทยาลัยสารพัดช่างอาคารปฏิบัติการวิชาชีพ).....	60
รูปที่ 4.5	ปัญหาทอพื้นที่ชั้น2 กะเทาะเห็นเหล็กเสริมเกิดสนิม (โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3).....	60
รูปที่ 4.6	ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	61
รูปที่ 4.7	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ.....	62
รูปที่ 4.8	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตที่ศึกษา.....	63
รูปที่ 4.9	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ศึกษา.....	65
รูปที่ 4.10	ระยะการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ศึกษา.....	66
รูปที่ 4.11	สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ศึกษา.....	67
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารอำนวยการ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1).....	69
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารเรียน 3 วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1).....	69
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารวิชาพื้นฐาน วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1).....	70
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารแผนกวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1).....	70
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารโรงอาหาร วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1).....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคาร กรณีอาคารนานาชาติ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (2).....	71
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคาร กรณีอาคารปฏิบัติการวิชาชีพ วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี.....	72
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคาร กรณีอาคารพาณิชย์การ วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี.....	72
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคาร กรณีอาคารโรงฝึกงาน วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี.....	73
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคาร กรณีอาคารอเนกประสงค์ วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี.....	73
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคาร กรณีอาคารเรียน โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3.....	74
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลอดการซ่อมแซม ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion.....	75
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นกับอายุปลอดการซ่อมแซมของ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion.....	76
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลอดการซ่อมแซม ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง.....	78
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลอดการซ่อมแซม ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสกับความ เปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกชื้นและสถานะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง.....	80
รูปที่ 4.28 อายุปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นอ้างอิงสมการ กรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกชื้นและสถานะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นทั่วไป.....	81



บทที่ 1

บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างอาคารในปัจจุบันนิยมทำการก่อสร้างอาคารต่าง ๆ ด้วยโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เช่น บ้านพักอาศัย สำนักงาน อาคาร และสถานที่ต่าง ๆ สามารถพบเห็นได้ง่ายทั่วไป หากแต่การตรวจสอบอาคารและอายุการใช้งานของโครงสร้างอาคารคอนกรีตนั้นยังค่อนข้างยากและไม่เป็นที่สนใจกันมากนัก เนื่องจากมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและยากต่อการตรวจสอบ ฉะนั้นการควบคุมดูแลอาคารให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมักจะนิยมควบคุมในระหว่างที่มีการก่อสร้างอาคาร เช่น การควบคุมให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ การออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังสูง มีความคงทนมากยิ่งขึ้น เป็นต้น แต่เนื่องด้วยคอนกรีตต้องอยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา อย่างเช่นกรณีโครงสร้างคอนกรีตเจอกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งอยู่ในอากาศอย่างไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ส่งผลให้คอนกรีตประสบปัญหาคาร์บอนเนชัน (Carbonation) มีผลต่อความคงทนและอายุการใช้งานของคอนกรีตเป็นอย่างยิ่ง สาเหตุการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในซีเมนต์เพสต์ ให้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยแคลเซียมคาร์บอเนต จะทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง และส่งผลให้เหล็กเกิดสนิมได้ และจะมีผลอย่างมากเมื่อคอนกรีตอยู่ใกล้กับสภาพแวดล้อมที่มีการจราจรหนาแน่น

จังหวัดอุดรธานี นั้นเป็นศูนย์กลางการคมนาคมและการท่องเที่ยวทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะภาพของการเป็นดินแดนแห่งวัดป่า ประตู่สู่ประเทศลาว ดินแดนอินโดจีนและดินแดนที่มีอารยธรรมเก่าแก่แห่งหนึ่งของโลกนอกจากนี้ยังมีแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติและมรดกธรรมชาติที่มีชื่อเสียง และลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินในอดีตขาดความชัดเจน การขยายตัวของเมืองเป็นอย่างดีทิศทางทำให้ขาดสมดุลในการใช้ประโยชน์ที่ดิน โครงสร้างถนนที่อยู่ในดินแบบเดิม ไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจและสังคม จำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นและรูปแบบ การเดินทางในชีวิตประจำวันที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ก่อให้เกิดปัญหาจราจรคับคั่งในบางพื้นที่ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในซีเมนต์เพลสต์ ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนต

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นศึกษาการประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ซึ่งเป็นการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสถานะเสี่ยงต่อปัญหาความคงทนเกี่ยวกับคาร์บอนเนชั่นเป็นหลัก เพื่อสำรวจเก็บข้อมูลของความเสียหายและการเสื่อมสภาพ ระยะหุ้มเหล็กเสริม กำลังอัดประลัย และการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าว และการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมจากคาร์บอนเนชั่นและการทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนเมืองจังหวัดอุดรธานี เพื่อได้เป็นข้อมูลสำหรับการควบคุมออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายในตัวเมืองอุดรธานีในอนาคตอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อสำรวจเก็บข้อมูลของความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

1.2.2 เพื่อศึกษาระยะหุ้มเหล็กเสริม และกำลังอัดประลัยของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

1.2.3 เพื่อศึกษาการเกิดและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

1.2.4 เพื่อประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมจากคาร์บอนเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนเมืองจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

1.2.5 เพื่อทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนเมืองจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 อาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย โครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในเขตจังหวัดอุดรธานี ทั้งหมด 4 สถานที่ จำนวน 11 อาคาร ได้แก่

1) สถานที่ที่ 1 ในวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1) จำนวน 5 อาคาร ได้แก่ อาคารอำนวยการ อาคารเรียน 3 อาคารวิชาพื้นฐาน อาคารไฟฟ้ากำลัง และอาคารโรงอาหาร

2) สถานที่ที่ 2 ในวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (2) จำนวน 1 อาคาร คือ อาคารนานาชาติ

3) สถานที่ที่ 3 ในวิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี จำนวน 4 อาคาร ได้แก่ อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ อาคารพานิชยกรรม อาคารโรงฝึกงาน และอาคารเอนกประสงค์

4) สถานที่ที่ 4 อาคารเรียนของโรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3

1.3.2 สํารวจเก็บข้อมูลของความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา

1.3.3 ทําการวัดระยะหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา

1.3.4 ทําการวัดความเข้มข้นและความชื้นสัมพัทธ์ของบริเวณที่ตั้งของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา

1.3.5 ทําการประเมินกำลังอัดประลัยของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา

1.3.4 ทําการวัดความลึกคาร์บอนชั้นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา

1.3.5 วิเคราะห์ประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมจากคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนเมืองจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา

1.3.6 วิเคราะห์อายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนเมืองจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบข้อมูลของความเสียหายและการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

1.2.2 ทราบระยะหุ้มเหล็กเสริม และกำลังอัดประลัยของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

1.2.3 ทราบการเกิดและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

1.2.4 สามารถประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมจากคาร์บอนชั้นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนเมืองจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

1.2.5 สามารถทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนเมืองจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ความคงทนของคอนกรีต [1]

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตทั้งเสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็กในอดีต จนถึงปัจจุบัน วิศวกรผู้ออกแบบจะคำนึงถึงแต่คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น ค่าอัตราส่วนปัวซอง เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะประเมินมาจากผลการทดสอบคอนกรีตที่อายุใดอายุหนึ่ง แต่ในความเป็นจริงแล้วหลายๆ โครงสร้างคอนกรีตเหล่านี้จะอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีการทำลายคุณสมบัติของคอนกรีตอยู่ตลอดเวลา ทำให้คุณสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังในการรับแรงต่ำลงในระยะยาว เป็นผลให้ต้องมีการบำรุงรักษา ตลอดจนการบูรณะและซ่อมแซม เพื่อให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถใช้งานต่อไปได้อีก ดังนั้นถ้าได้มีการคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคอนกรีตตามกาลเวลาในการออกแบบแล้ว ทั้งโดยสิ่งแวดล้อมหรือโดยตัวของคอนกรีตเอง ก็จะสามารถช่วยให้การวางแผนการบำรุงรักษา ซ่อมแซมกระทำได้ดีมากขึ้น ตลอดจนลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมลงไปได้ โดยการยืดอายุของโครงสร้างคอนกรีตจากการเสื่อมสภาพออกไปได้อีก เป็นที่ทราบกันดีว่าการบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างให้มีความแข็งแรงคงเดิมนั้น ต้องเสียค่าใช้จ่ายมหาศาล ในประเทศแถบทวีปยุโรป งบประมาณค่าก่อสร้างในแต่ละปีจะประกอบไปด้วยงบประมาณการบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างไม่ต่ำกว่างบประมาณที่ใช้ก่อสร้างโครงสร้างใหม่ ซึ่งสภาวะการณ์นี้อาจยังไม่ประสบกับประเทศไทยที่เพิ่งเริ่มก่อสร้างโครงสร้างเป็นจำนวนมากเมื่อไม่นานมานี้ แต่ในอนาคตประเทศไทยก็ต้องประสบกับสภาวะการณ์นี้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ก็ยังดูเหมือนว่าวิศวกรในประเทศไทยยังขาดความรู้ความเข้าใจในด้านความคงทนของคอนกรีตเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งส่วนหนึ่งก็มิสาเหตุมาจากความไม่สมดุลของหลักสูตรวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยในประเทศไทยที่มุ่งเน้นในเฉพาะบางด้าน อีกทั้งขาดเอกสารตำราวิชาการ และผลงานวิจัยเกี่ยวกับความคงทนที่วิศวกรสามารถอ่านและค้นคว้าเพื่อให้มีพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับความคงทนอย่างเพียงพอสำหรับการปฏิบัติงานจริง หลักการของการออกแบบโครงสร้างที่ดี คือการออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โดยปกติอายุการใช้งานที่ต้องการของโครงสร้างแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้าง เช่น ขนาด ความสำคัญ สถานที่ที่โครงสร้างนั้นอยู่ และราคาของโครงสร้างนั้นๆ เช่น เชื้อเพลิง มักจะถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานยาวนานกว่าสะพาน อาคารสูง และ

อาคารพาณิชย์ตามลำดับ การที่จะสามารถออกแบบให้โครงสร้างปราศจากการซ่อมแซมที่ก่อให้เกิดค่าใช้จ่าย และปัญหาต่อเนื่องอื่น ๆ ที่ตามมาจากการปิดการใช้งานของโครงสร้างที่จะซ่อมแซมนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงความคงทนของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างควบคู่ไปกับการออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างนั้นด้วย เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าการออกแบบการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตมักจะใช้ค่ากำลังของคอนกรีตที่อายุใดอายุหนึ่ง เช่น ที่อายุ 28 วัน เป็นเกณฑ์ โครงสร้างที่ออกแบบมานั้น จะรับน้ำหนักที่ออกแบบได้ตลอดไปก็ต่อเมื่อกำลังและสมบัติทางกลอื่นๆ ของคอนกรีตไม่เลวลงไปกว่าที่อายุ 28 วัน แต่ในหลายสภาวะแวดล้อม คอนกรีตจะมีสมบัติทางกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อม ทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และอื่น ๆ บางสาเหตุก็ยังเป็นผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมอีกด้วย

การออกแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การให้รายละเอียดของเหล็กเสริมและการควบคุมการก่อสร้างก็มีผลต่ออายุของโครงสร้างเช่นเดียวกัน การให้รายละเอียดของเหล็กเสริมที่ไม่ดี โดยไม่คำนึงถึงความเป็นไปได้ในการเทคอนกรีตที่ดี การก่อสร้างที่ไม่มีการควบคุมที่ดี ปล่อยให้มีการเทคอนกรีตไม่เต็มหรือคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมไม่เพียงพอก็ดี ล้วนแต่นำไปสู่ปัญหาโครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานสั้นลงกว่าที่ควรจะเป็นทั้งสิ้น

2.1.2 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต [1]

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า การออกแบบคอนกรีตที่มีพื้นฐานความคิดมาจากกำลังคอนกรีตที่อายุใดอายุหนึ่งมีจุดด้อยตรงที่ไม่ได้คำนึงถึงการเสื่อมสภาพของคอนกรีตไปตามอายุการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง จึงนำมาสู่แนวคิดการออกแบบใหม่โดยคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตด้วย อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะสามารถออกแบบโดยแนวคิดใหม่นี้ได้ จำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงการเสื่อมสภาพของคอนกรีตในสภาวะการใช้งานภายใต้สิ่งแวดล้อมต่างๆ กัน การเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

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

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

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

4) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) ได้แก่ การเสื่อมสภาพโดย ตะไคร่ รา รากพืช หรือแบคทีเรียบางประเภท

5) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (Mixed Process) ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

คอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายสภาวะ ตามอายุของคอนกรีตดังต่อไปนี้

1) คอนกรีตสด (Concrete in Fresh State) หมายถึง คอนกรีตหลังจากการผสมแล้วจนถึงช่วงเสร็จสิ้นการเทคอนกรีตแล้ว

2) คอนกรีตในสภาวะพลาสติก (Concrete in Plastic State) หมายถึง คอนกรีตหลังจากเสร็จสิ้นการเท จนถึงเวลาที่คอนกรีตก่อตัวขั้นสุดท้าย

3) คอนกรีตในสภาวะอายุเริ่มต้น (Concrete in Early Age State) หมายถึง คอนกรีตช่วงหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายจนถึงช่วงเวลาก่อนที่คอนกรีตจะพัฒนากำลังรับแรงได้ถึงค่ากำลังที่ออกแบบไว้

4) คอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้ว (Concrete in Hardened State) หมายถึง คอนกรีตหลังจากพัฒนากำลังได้ถึง หรือเกินค่ากำลังที่ออกแบบไปแล้ว

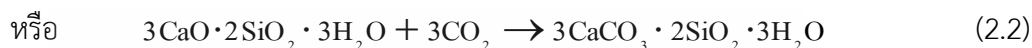
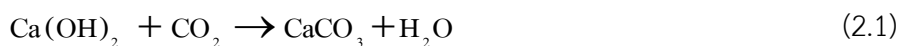
5) คอนกรีตในสภาวะยาวนาน (Concrete in Long-Term State) หมายถึง คอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้วโดยมีอายุเกินกว่าอายุที่ใช้ออกแบบกำลัง และต้องคงทนเป็นเวลายาวนานในสภาวะแวดล้อม

ปัญหาของความคงทนในคอนกรีตส่วนใหญ่มักจะเกิดกับคอนกรีตหลังจากสภาวะแข็งตัวแล้ว นั่นคือในสภาวะยาวนาน แต่อย่างไรก็ดี ปัญหาบางอย่างที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตในสภาวะก่อนหน้านี้ก็สามารถนำไปสู่ปัญหาในระยะยาวได้

2.1.3 การเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation) [1]

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

คาร์บอนเนชันเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) บริเวณผิวหน้าหรือใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ตามสมการของปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)



ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยา (2.1) มากกว่า (2.2) และในความเป็นจริงแล้วทั้งสองปฏิกิริยาก็ต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาพของสารละลายคอนกรีตที่ถูกคาร์บอนเตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลงเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังนั้นคาร์บอนเนชันจะค่อยๆคืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนเตไปแล้วซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น

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

ผลของคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชันทำให้เกิดผลที่สำคัญ 3 ประการ คือ

- 1) ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง
- 2) ทำให้ความเปราะบางของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนเนชันเกิดเข้า

ไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้เคียงหรือต่ำกว่าระดับวิกฤต

3) ทำให้เกิดการหดตัว (Carbonation shrinkage) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ภายใต้อิทธิพลของแรงอัด ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ผลของคาร์บอนเนชันทั้ง 3 กรณีนี้ ในกรณีที่ 2 คือ กรณีที่ทำให้ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนเนชันจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชัน

1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ขึ้นและแห้งเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอนเนชันรุนแรง

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 ควรออกแบบคอนกรีตหุ้มเหล็กให้หนาขึ้นถ้าทราบว่าโครงสร้างดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่คาร์บอนเนชันรุนแรง

รูปที่ 2.1 ถึง 2.3 แสดงตัวอย่างความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตที่เกิดจากคาร์บอนเนชัน โดยราวสะพานและแบรีเออร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ริมถนน ซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีความชื้นสัมพัทธ์พอประมาณ ทำให้เกิดคาร์บอนเนชันได้ง่าย เมื่อความเป็นต่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤตแล้ว จะทำให้เกิดการเป็นสนิมในเหล็กเสริมขึ้น ทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกะเทาะออกตามแนวเหล็กเสริม ส่วนรูปที่ 2.3 สภาพผิวของถังกักน้ำคอนกรีตที่เสียหาย

เนื่องจากคาร์บอนเนชั่น ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนออกเห็นเหล็กเสริม ซึ่งทำให้มีโอกาสเกิดสนิมได้เร็วขึ้น เพราะน้ำและออกซิเจนสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ง่าย



รูปที่ 2.1 ราวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น [1]



รูปที่ 2.2 แบรีเออร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น [1]



รูปที่ 2.3 สภาพผิวของผนังคอนกรีตที่เสียหายถึงน้ำที่เทไม่เต็มแบบทำให้มีโอกาสที่จะเกิดสนิมในเหล็กได้มาก เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 ประการรวมกันคือ สาเหตุแรกคือน้ำสามารถชะเอาความเป็นต่างออกไปจากคอนกรีต เมื่อความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต ถ้ามีเวลาที่ถึงน้ำแห้ง เหล็กได้สัมผัสกับก๊าซออกซิเจน ส่งผลให้เหล็กเกิดสนิมได้ และสาเหตุที่สองคือ เกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอนेशन [1]

2.1.4 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต [1]

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นต่างที่สูงของคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะของความเป็นต่างที่สูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Process) ได้ นั่นคือเหล็กจะไม่เกิดการแตกตัวออกเป็นไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ($2e^-$) ได้เลย ความเป็นต่างในคอนกรีตโดยปกติมักจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12.5 จนถึง 13.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสม และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมก็เป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมการเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย

กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อเงื่อนไขทั้ง 3 ประการดังต่อไปนี้ต้องเกิดขึ้น

1) ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic Process) สามารถเกิดได้ซึ่งความเป็นต่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤต (Critical Level) ของความเป็นต่าง ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยหลายสาเหตุต่างๆดังต่อไปนี้ คือ คาร์บอนेशन (Carbonation) การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปใน

คอนกรีต หรือแม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุนมาก ซึ่งกลไกของการทำให้ความเป็นต่างลดลงโดยแต่ละสาเหตุจะได้แยกอธิบายเป็นหัวข้อต่างหากต่อไป

2) มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้ อีออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และพอเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะมีเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว

3) มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated Pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่าง แต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนจะละลายในน้ำได้น้อยมาก ดังนั้น คอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลา มักจะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม

กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (รูปที่ 2.4) ในคอนกรีตจะเริ่มต้นด้วยการที่ความเป็นต่างของคอนกรีตในบริเวณที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่ มีค่าความเป็นต่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต และบริเวณรอบๆ เหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้นดังสมการที่ (2.3)



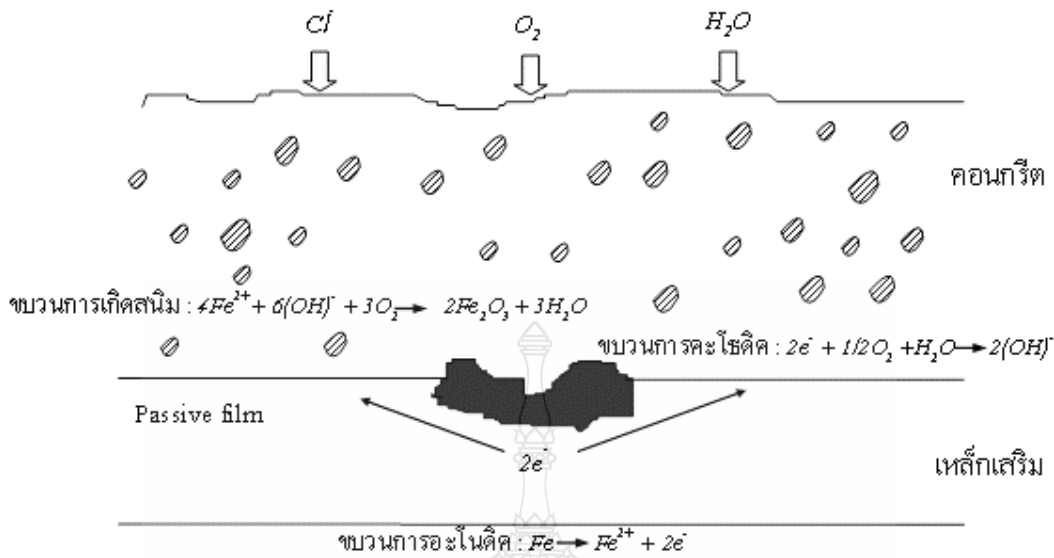
โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นอีออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic Process) ต่อจากนั้น $2e^{-}$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนที่บริเวณเดียวกัน หรือบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลอีออน ($(OH)^{-}$) ดังสมการที่ (2.4)



ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแคโทดิก (Cathodic Process) หลังจากนั้น ปฏิกิริยาการเกิดสนิมก็จะเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.6)



โดยที่ Fe_2O_3 ก็คือเฟอริกออกไซด์ หรือสนิมนั่นเอง ซึ่งปฏิกิริยาสมการ (2.6) นั้นอาจจะเกิดต่างบริเวณกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิกก็ได้ซึ่งก็หมายความว่าสนิมอาจจะเกิดคนละบริเวณกับบริเวณที่สูญเสียเนื้อเหล็กก็ได้ (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 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)

ดังนั้นผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความต้านทานความล้า (Fatigue Strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ ความยืดหยุ่น (Stiffness) ก็ลดลง การเกิดรอยแตกร้าวยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็ว และมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม แสดงดังรูปที่ 2.5 ถึง 2.10



รูปที่ 2.5 ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนออกทั้งหมด ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ของการเกิดสนิม และการเกิดสนิมยังทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมมีขนาดเล็กลง [1]



รูปที่ 2.6 รอยร้าวที่เกิดขึ้นตามแนวของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมของเหล็กจะยิ่งทำให้สารจากสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อโครงสร้าง สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ง่าย มีผลทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้เร็วกว่าโครงสร้างที่ไม่เกิดรอยร้าว [1]



รูปที่ 2.7 ความเสียหายของพื้นและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม [1]



รูปที่ 2.8 คอนกรีตบริเวณด้านล่างของราวสะพานหลุดออกเป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม [1]



รูปที่ 2.9 ถังน้ำที่เติมน้ำแบบทำให้มีโอกาสที่จะเกิดสนิมในเหล็กได้มาก เนื่องจากสาเหตุหลัก 2 ประการรวมกันคือ สาเหตุแรกคือน้ำสามารถชะเอาความเป็นต่างออกไปจากคอนกรีต เมื่อความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต ถ้ามีเวลาที่ถังน้ำแห้ง เหล็กได้สัมผัสกับก๊าซออกซิเจน ส่งผลให้เหล็กเกิดสนิมได้ และสาเหตุที่สองคือ เกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้น [1]

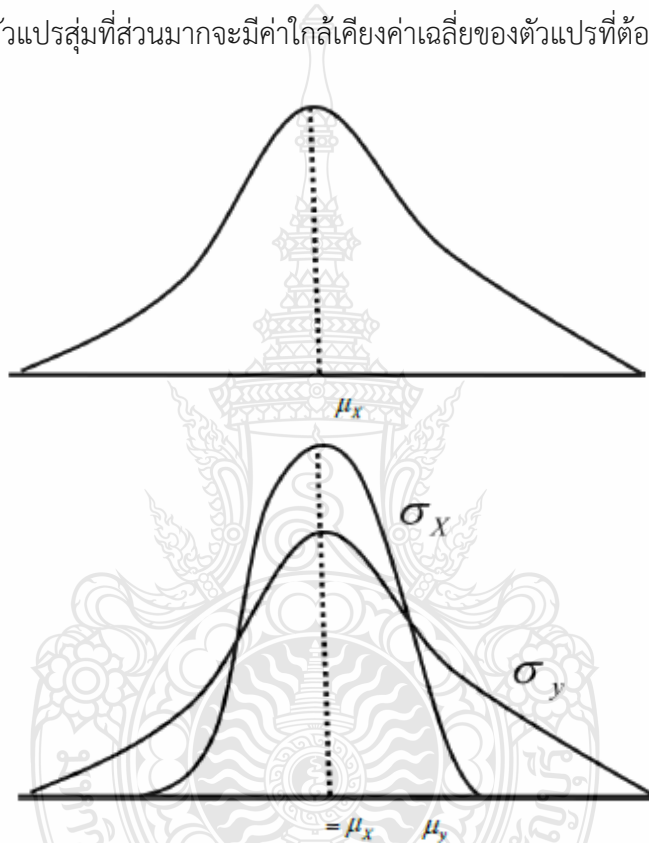


รูปที่ 2.10 สภาพผิวคอนกรีตที่เกิดรอยแตกขึ้น ทำให้น้ำในถังสามารถซึมผ่านออกมาทางรอยแตกและพาเอาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกสู่ภายนอกได้ เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศจะทำให้เกิดเป็นคราบหินปูนบนผิวคอนกรีต ปรากฏการณ์นี้ทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตบริเวณรอยแตกต่ำลงได้ ทั้งนี้รอยแตกที่เกิดขึ้นยังเป็นช่องทางที่เปิดโอกาสให้สารที่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริมเข้ามาทำปฏิกิริยาเกิดสนิมได้ง่ายขึ้นด้วย [1]

2.1.5 ความน่าจะเป็นทางสถิติ [2]

1) การแจกแจงความน่าจะเป็นต่อเนื่อง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีการเก็บข้อมูลในหลายๆรูปแบบ เช่น วัดระยะย่ำหุ้มเหล็ก วัดกำลังอัดจากค้อนกระแทก วัดระยะคาร์บอนเนชัน เป็นต้น ซึ่งแต่ละรูปแบบก็มีการเก็บค่าหลายๆค่า จึงทำให้ต้องมีการวิเคราะห์ค่าดังกล่าว เพื่อให้ได้ตัวแปรของค่าที่ต้องการใกล้เคียงความจริงมากที่สุด จึงต้องอาศัยหลักทางสถิติเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบของการแจกแจงปกติ ซึ่งเป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มที่ส่วนมากจะมีค่าใกล้เคียงค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ต้องการศึกษา



รูปที่ 2.11 โค้งปกติ

โค้งปกติที่มี $\mu_x = \mu_y$ และ $\mu_x < \mu_y$ ดังแสดงในรูปที่ 2.11

จากรูปโค้งปกติที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากันแต่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากกว่าจะต่ำและกระจายออกมากกว่าโค้งปกติที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า

2) คุณสมบัติของโค้งปกติ มีดังนี้

- ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $x = \mu$ (โค้งสูงที่สุด)
- โค้งมีสมมาตรกับแกนตั้งที่ลากผ่าน μ
- โค้งมีจุดเปลี่ยนเว้าที่ $x = \mu \pm \sigma$
- ปลายโค้งเข้าใกล้แกน x เมื่อ x มีค่าห่างจาก μ ออกไปทุกที
- พื้นที่ทั้งหมดที่อยู่ใต้เส้นโค้งและอยู่เหนือแกน x มีค่าเป็น 1

นอกจากนี้ยังมีการนำหลักสถิติเข้ามาประยุกต์ในการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมของ เหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนชั้น โดยต้องอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ชนิด คือ ระยะหุ้มเหล็กและระยะคาร์บอนชั้น จึงทำให้ต้องมีการนำหลัก การแจกแจงของผลต่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง เข้ามาประยุกต์ใช้งาน แต่จากหลักทางสถิติแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถพิจารณารูปแบบของข้อมูลได้ 2 รูปแบบ คือ ประชากรและตัวอย่าง ซึ่งในการวิเคราะห์ก็จะต้องคำนึงถึงรูปแบบของข้อมูลดังกล่าวด้วย เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาจริง

3) การสุ่มตัวอย่างและการแจกแจงของค่าเฉลี่ย

ประชากร (Population) หมายถึง กลุ่มที่ประกอบด้วยหน่วยทั้งหมดของบุคคล สัตว์ หรือ สิ่งของ ที่อยู่ในขอบเขตที่สนใจศึกษา

ตัวอย่าง (Sample) หมายถึง ส่วนหนึ่งของประชากรที่ได้รับเลือกขึ้นมาเพื่อเป็นหน่วยศึกษา หรือทดลอง

สัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องประชากร

μ แทน ค่าเฉลี่ยประชากร

σ แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

N แทน ขนาดประชากร

ตัวอย่าง

\bar{x} แทน ค่าเฉลี่ยกลุ่มตัวอย่าง

S แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n แทน ขนาดของตัวอย่าง

4) การแจกแจงของผลต่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

กำหนดประชากร 2 ชุด มีค่าเฉลี่ย μ_1, μ_2 และความแปรปรวน σ_1^2, σ_2^2 ตามลำดับ ให้ \bar{X}_1 คือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างชนิดสุ่มขนาด n_1 จากประชากรชุดแรก และ \bar{X}_2 คือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างชนิด สุ่มขนาด n_2 จากประชากรชุดที่สอง ตัวอย่างทั้งสองชุดเป็นอิสระต่อกัน

ค่าเฉลี่ย $\mu_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \mu_1 - \mu_2$ (2.7)

ความแปรปรวน $\sigma^2_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}$ (2.8)

พื้นที่ตัวแปรสุ่ม $Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$ (2.9)

2.1.6 การทดสอบแบบไม่ทำลาย [3]

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive Tests) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของคอนกรีตหรือเพื่อตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยที่ไม่ทำให้คอนกรีตได้รับความเสียหายหรือเกิดความเสียหายน้อยที่สุด การทดสอบแบบไม่ทำลายที่ดีจะใช้เครื่องมือทางเทคนิคและการควบคุมรายละเอียดของการทดสอบให้เป็นไปตามกำหนด โดยแบ่งการทดสอบดังต่อไปนี้

- การทดสอบหาค่ากำลังของคอนกรีตในสนามด้วยค้อนกระแทก (Schmidt Hammer)
- การตรวจหาตำแหน่งของเหล็กเสริมและวัดระยะหุ้มเหล็กด้วยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก (Covermeter)

1) การทดสอบกำลังของคอนกรีตในสนามด้วยค้อนกระแทก (Schmidt Hammer) ค้อนกระแทก (Rebound Hammer) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นเครื่องมือรูปทรงกระบอกภายในประกอบด้วยสปริงแรงในแนวแกน ตั้มน้ำหนัก และแท่งเหล็ก ประกอบอยู่ในโครงรูปแบบ ดันค้อน เข้าหาพื้นผิวของคอนกรีตซึ่งแท่งเหล็กจะถูกดันร่นเข้ามาอัดสปริง เมื่อแท่งเหล็กถูกดันเข้ามาเต็มที่ สปริงจะคืนตัวโดยอัตโนมัติ และแท่งเหล็กจะถูกดันขับเข้ากับค้อนส่งแรงกระแทกเข้ากับคอนกรีต และสะท้อนกลับออกมา ระยะของการสะท้อนกลับแสดงโดยตัวชี้บนมาตราส่วนซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 ซึ่งเรียกว่าค่าการสะท้อน (R) ซึ่งมีค่าขึ้นกับความแข็งแรงของคอนกรีต ถ้าคอนกรีตแข็งแรงมาก ระยะสะท้อนกลับจะมีค่ามาก การตีความของค่า R จะแสดงไว้ในคู่มือการใช้งานที่ผู้ผลิตแต่ละรายจะเป็น ผู้ให้มา ซึ่งค่า R จะเพิ่มขึ้นตามกำลังของคอนกรีต ตัวเลขที่วัดได้อาจใช้เพื่อประมาณความเป็นเนื้อเดียวกันของคอนกรีต และคุณภาพของคอนกรีต



รูปที่ 2.12 ค้อนกระแทกแบบชมิทท์ (Schmidt Hammer)

ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบให้ใช้ค้อนกระแทกที่ผลิตโดยบริษัทที่มีความเป็นมาตรฐาน ทำการกำหนดตำแหน่งที่จะทำการวัดค่าการสะท้อน โดยควรเป็นบริเวณผิวคอนกรีตที่เรียบไม่มีรอยแตกร้าวหรือ การกะเทาะออกของผิวคอนกรีต หากผิวไม่เรียบให้ทำการขัดผิวคอนกรีตให้เรียบด้วยก้อนหินขัด การทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีตที่ตำแหน่งหนึ่งๆ ให้ทำการวัดค่าการทดสอบบริเวณตำแหน่งที่ ต้องการทราบค่ากำลังอัดอย่างน้อย 10 ครั้ง โดยจุดที่วัดค่าการสะท้อนแต่ละครั้งต้องห่างกันประมาณ 25 มิลลิเมตร ในการทดสอบ 1 ตำแหน่งสามารถทดสอบได้ทั้งทิศแนวนอน แนวตั้ง(ทิศทางลงหรือทิศทาง ขึ้น) หรือ แนวเฉียง ซึ่งทิศทางของการทดสอบก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตด้วย ในส่วน ของค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัด ของคอนกรีต โดยอ้างอิงการประมาณค่าตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (2.10) (Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2005) หรือ สมการที่ (2.11) [4]

$$f'_c = -18 + (1.27 \times RN) \quad (2.10)$$

โดยที่ f'_c คือ ค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

RN คือ ค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer

$$f'_c = -176.4 + (1.4467 \times RN) \quad (2.11)$$

โดยที่ f'_c คือ ค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

RN คือ ค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer

2) การตรวจหาตำแหน่งของเหล็กเสริมและวัดระยะหุ้มเหล็กด้วยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เป็นอุปกรณ์สำรวจที่ใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งของเหล็กเสริมในคอนกรีต ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์สำรวจนั้น ๆ เมื่อเคลื่อนอุปกรณ์เข้าไปใกล้เหล็กเสริมในคอนกรีต เครื่องวัดจะบ่งบอกตำแหน่งของเหล็กเส้น เมื่ออุปกรณ์สำรวจอยู่เหนือเหล็กเส้นพอดี เมื่อมีการปรับเทียบที่เหมาะสม อุปกรณ์นี้ใช้คาดคะเนระยะหุ้มเหล็กได้หากรู้ขนาดของเหล็กเส้น หรืออาจใช้คาดคะเนขนาดเหล็กเส้นได้หากรู้ ระยะหุ้มเหล็ก



รูปที่ 2.13 เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก

ขั้นตอนการทดสอบ

ให้ใช้เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กที่ผลิตโดยบริษัทที่มีมาตรฐาน และก่อนนำเครื่องวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กไปใช้ ให้สอบเทียบเครื่องมือในห้องทดสอบเพื่อยืนยันความแม่นยำของเครื่องวัด ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโดยความถี่ของการตรวจสอบขึ้นอยู่กับคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือและควรวัดทุกปี การตรวจสอบไว้ด้วย โดยดำเนินการตรวจวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กได้ต่อเมื่อการแสดงผลของเครื่องนิ่งเท่านั้นเมื่ออุปกรณ์อยู่ในสภาพพร้อมทำงาน ให้นำหัววัดแนบกับผิวคอนกรีต และเคลื่อนที่บนผิวคอนกรีตในทิศทางที่ต้องการวัด ทิศทางการเคลื่อนหัววัดควรตั้งฉากกับแนวการวางตัวของเหล็กเสริม เนื่องจากเหล็กเสริมมีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุดเมื่อวางตัวผ่านแกน ของขดลวดในหัววัด โดยเครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กจะส่งสัญญาณให้ผู้ดำเนินการวัดทราบเมื่อผ่าน ตำแหน่งที่มีเหล็กเสริมอยู่

2.1.7 การวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ [3]

เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจสอบ (ยี่ห้อ AZ รุ่น 77535) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยการใช้สัญญาณตัวเซ็นเซอร์บริเวณส่วนหัวของเครื่องในการตรวจรับค่าที่เกิดขึ้น เมื่อต้องการทำการวัดค่าที่บริเวณใดให้ทำการเปิดเครื่องที่บริเวณนั้น เครื่องจะทำการบู๊ตเป็นเวลา 30 วินาทีหลังจากนั้นก็แสดงค่าที่หน้าปัดของตัวเครื่อง ซึ่งมีทั้งหมด 3 ค่า คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ โดยคุณสมบัติของตัวเครื่องเป็นดังต่อไปนี้

- วัดค่า CO₂ ในช่วง Range: 0 ถึง 5,000 ppm
- วัดค่าอุณหภูมิในช่วง -10 ถึง 60 องศาเซลเซียส
- วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 0.0 ถึง 99.9%RH
- สามารถคำนวณค่า Dew Point และ Wet Bulb ได้
- สามารถตั้งเตือนได้
- สามารถต่อกับ Computer โดยผ่านช่อง RS-232
- หน้าจอเป็น LCD สามารถแสดงค่าได้ 3 ค่า
- เซ็นเซอร์เป็นแบบ NDIR (non-dispersive infrared)



รูปที่ 2.14 เครื่องวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ (ยี่ห้อ AZ รุ่น 77535)

2.1.8 การออกแบบโดยคำนึงถึงความคงทน [1]

ดังที่กล่าวมา จะพอสรุปเป็นแนวคิดของการออกแบบโดยคำนึงถึงความคงทนอย่างง่าย ๆ ดังนี้ โครงสร้างที่ต้องการออกแบบให้มีอายุการใช้งานตามต้องการ จะต้องออกแบบให้เป็นดังสมการที่ (2.12)

$$R > E \quad (2.12)$$

โดยที่ R หมายถึง ความต้านทานของโครงสร้างต่อการกระทำจากสิ่งแวดล้อม

E หมายถึง ระดับความรุนแรงของการกระทำจากสิ่งแวดล้อม

โดยที่แนวคิดนี้ จะต้องเพิ่มเติมเข้าไปในการออกแบบโดยใช้ค่ากำลังของคอนกรีตที่อายุใดอายุหนึ่ง เช่น 28 วันเป็นเกณฑ์ด้วย

ความต้านทานของโครงสร้างต่อการกระทำจากสิ่งแวดล้อม หรือ R ย่อมได้มาจาก

1) การวิเคราะห์ห่อแบบรูปร่างและโครงสร้างและให้รายละเอียดเหล็กเสริมที่ดี ทำให้ก่อสร้างง่าย (รูปที่ 2.15)

2) การเลือกใช้วัสดุ (คอนกรีต) ที่ดี ทำให้เทง่าย และได้คอนกรีตที่สามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นตั้งอยู่

3) การก่อสร้างที่ดี มีการควบคุมให้การก่อสร้างเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

4) การบำรุงรักษาและซ่อมแซม



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างความเสียหายของคอนกรีตที่เกิดจากการออกแบบ (ใส่รายละเอียดเหล็กเสริมไม่ดีทำให้คอนกรีตไม่สามารถไหลเข้าไปเต็มแบบ) ประกอบกับการก่อสร้างที่ไม่ดี (กระทุ้ง หรือจี้เขย่าไม่เพียงพอ) ดังนั้นเพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีความคงทน ควรคำนึงถึงทั้งการออกแบบ การเลือกใช้วัสดุ และการก่อสร้างให้ได้มาตรฐานตามแบบ [1]

ส่วนระดับความรุนแรงของสิ่งแวดล้อมขึ้นอยู่กับปัญหาของการทำลายคอนกรีต ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายคอนกรีตในแต่ละสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น สิ่งแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนของซัลเฟต ระดับความรุนแรงก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ความชื้น และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ส่วนปัญหาของการทำลายคอนกรีตที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง ระดับความรุนแรงก็ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และความเร็วม เป็นต้น

สรุปอย่างสั้นๆ ก็คือ การที่จะให้ได้มาซึ่งโครงสร้างคอนกรีตที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน จำเป็นต้องออกแบบโดยคำนึงถึงความคงทนควบคู่กันไปกับการออกแบบบนพื้นฐานของกำลังรับแรงที่อายุใดอายุหนึ่ง ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตจะดี ก็ต่อเมื่อ มีการออกแบบที่ดี เลือกใช้วัสดุที่ดี เพื่อให้ได้คอนกรีตที่เหมาะสมกับสภาพสิ่งแวดล้อมและสภาพการใช้งาน และก่อสร้างให้ได้ตามการออกแบบ

2.1.8 ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบเมื่อพิจารณาถึงความคงทน

1) วัสดุผสมคอนกรีตและคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย หิน หรือกรวด และสารผสมเพิ่มชนิดต่างๆ และได้รับการบ่มด้วยความชื้นจนมีกำลังและคุณสมบัติอื่นๆ ตามที่ต้องการ

- วัสดุที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องมีคุณภาพดังต่อไปนี้

ปูนซีเมนต์ที่จะใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องเป็นปูนซีเมนต์ประเภท Portland Cement Type 1 เป็นหลัก หรืออาจจะใช้ปูนซีเมนต์ประเภทอื่น ๆ ในกรณีที่ต้องการแก้ปัญหาเฉพาะ โดยปูนซีเมนต์ต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 [5] หากมีการใช้สารปอซโซลานให้อ้างอิงมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับสารประเภทนั้นๆ หรืออ้างอิงมาตรฐานอื่น ๆ ที่เทียบเท่า เช่น อ้างอิงมาตรฐาน มอก. 2135 [6] สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์

ทราย ให้ใช้ทรายน้ำจืดที่มีคุณภาพดี สะอาด มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 566 [7] หรือมาตรฐาน ASTM C33 [8]

หิน ที่สามารถใช้ในการผสมคอนกรีตต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 566 หรือตามมาตรฐาน ASTM C33

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องเป็นน้ำจืดใสสะอาดที่มีปริมาณสารปนเปื้อน เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ความเป็นกรดต่าง หรือสารแขวนลอย อยู่ในปริมาณที่ไม่มาก และจะไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตเช่น การพัฒนากำลังของคอนกรีต หรือ ความคงทน (มาตรฐาน วสท. 1014) น้ำยาผสมคอนกรีตให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C494 [9]

- กำลังของคอนกรีต (Strength of Concrete) ให้ใช้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์ ยกเว้นในกรณีที่ระบุเป็นอย่างอื่น ทั้งนี้การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตให้ใช้วิธีการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐานของ ASTM C39 [10] สำหรับแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก หรือ BS 1881-116 สำหรับแท่งตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881-116 จะต้องมีย่านไม่น้อยกว่า 250 ksc และกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 จะต้องมีย่านไม่น้อยกว่า 200 ksc ยกเว้นในกรณีที่ระบุเป็นอย่างอื่น

2) ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด ในการออกแบบคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิด สนิมของเหล็กเสริมได้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อย ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14)

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

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

โดยที่ C คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (มิลลิเมตร)

C_{\min} คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด (มิลลิเมตร)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ดูตารางที่ 2.1)

C_o คือ ค่าแนะนำสำหรับระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (มม.) (ดูตารางที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α) [11]

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

ตารางที่ 2.2 ค่าแนะนำสำหรับระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_o) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปลักษณะงานก่อสร้าง ระยะหุ้มต่ำสุด [11]

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด
(ก) คอนกรีตหล่อในที่	
1) คอนกรีตที่หล่อติดกับดินโดยใช้ดินเป็นแบบ และผิวคอนกรีตสัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน	75 มม.
2) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 16 มม.	50 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	40 มม.
3) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน	
ในแผ่นพื้น ผนัง และ ตง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	40 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	20 มม.
ในคาน	

ตารางที่ 2.2 ค่าแนะนำสำหรับระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_o) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปลักษณะงานก่อสร้าง ระยะหุ้มต่ำสุด [11] (ต่อ)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้ง ในเสา	40 มม.
- เหล็กปลอกเดี่ยวหรือปลอกเกลียว (ข) คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน)	40 มม.
1) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน ในแผ่นผนัง	40 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	20 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	40 มม.
ในองค์อาคารอื่น	40 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	30 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม. ถึง 36 มม.	30 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	30 มม.
2) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน ในแผ่นพื้นผนัง และตง	30 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	15 มม.
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	25 มม.
ในคาน	
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้งในเสา	
- เหล็กลูกตั้ง เหล็กปลอกเดี่ยวหรือปลอกเกลียว	
(ค) คอนกรีตที่หล่อในน้ำ	100 มม.

ข้อแนะนำ

วิศวกรผู้ออกแบบไม่สามารถกำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริมให้น้อยกว่า C_{min} แต่สามารถกำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริมให้มากกว่าค่า C_{min} นี้ได้ ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานที่ต้องการ

3) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด

โดยปกติจะกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามต้องการ แต่สำหรับลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อความคงทนของคอนกรีต เพื่อให้

คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพ และสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ จำเป็นต้องกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำ ถึงแม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้อาจจะสูงกว่ากำลังอัดที่ต้องการในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบก็ตาม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด ให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด
1) คอนกรีตที่ต้องการความทึบน้ำ	0.50
2) คอนกรีตในสถานะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีตระดับปานกลาง	0.50
3) คอนกรีตในสถานะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีตระดับรุนแรง	0.45

ข้อเสนอแนะ

วิศวกรผู้ออกแบบสามารถกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำกว่าค่าที่กำหนดในหัวข้อนี้ได้ ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ 2.5 สำหรับสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน

4) ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด

ในบางโอกาส องค์อาคารบางประเภท เช่น คาน อาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงรอยร้าว ดังเช่น รอยร้าวที่เกิดจากโมเมนต์ตัดได้ ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้หากได้รับการออกแบบโดยคำนึงถึงการควบคุมรอยร้าว ไว้แล้วก็มักไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงขององค์อาคารถ้าองค์อาคารนั้นไม่ได้มีการเสื่อมสภาพอย่างไรก็ดี รอยร้าวที่มีความกว้างมากก็จะเป็นผลให้สารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริมซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย ทำให้องค์อาคารนั้นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมขนาดความกว้างของรอยร้าวไม่ให้มากเกินไป ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุดสำหรับโครงสร้างในสภาพแวดล้อมทั่วไป หรือในสภาพแวดล้อมที่เผชิญต่อการเป็นสนิมของเหล็กเสริมสามารถกำหนดได้จากข้อมูลด้านล่าง

ตารางที่ 2.3 ค่าแนะนำสำหรับระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป [11]

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

หมายเหตุ หากระยะหุ้มเหล็กเสริม (C) เกิน 100 มม. ให้ใช้ค่า 100 มม. ในการคำนวณหาความกว้าง รอยร้าวที่มากที่สุด

ข้อแนะนำ วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดขนาดความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุดให้ต่ำกว่าค่าในตารางก็ได้ ถ้าต้องการให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

2.1.9 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน [11]

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการปกป้องเหล็กเสริมจากการเป็นสนิมลดลงจนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ตัวอย่างของสภาพแวดล้อมที่มีคาร์บอนเนชัน เช่น โครงสร้างในที่จอดรถ โครงสร้างริมถนนหรือใต้สะพาน บริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น โครงสร้างใต้สะพานที่เผชิญกับเขม่าควันต่าง ๆ ตลอดจนในอาคารที่มีผู้คนอยู่มาก เป็นต้น เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจาก ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและมีอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-free service life) ตามที่กำหนด อย่างไรก็ตามจากอายุของคอนกรีตที่ทดสอบและความลึกคาร์บอนเนชันที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันได้จากสมการที่ (2.15)

$$d = k \sqrt{t} \tag{2.15}$$

อย่างไรก็ตามต้องควบคุมให้ความลึกคาร์บอนเนชันในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมมีค่าไม่มากกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการที่ (2.16) ในการออกแบบ

$$X_c \leq C \tag{2.16}$$

โดยที่ C คือ ระยะหุ้มคอนกรีต (มิลลิเมตร)

X_c คือ ความลึกคาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร) วัดจากผิว

คอนกรีตที่เผชิญสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.17)

$$X_c = \alpha_1 \alpha_2 k \sqrt{t} \quad (2.17)$$

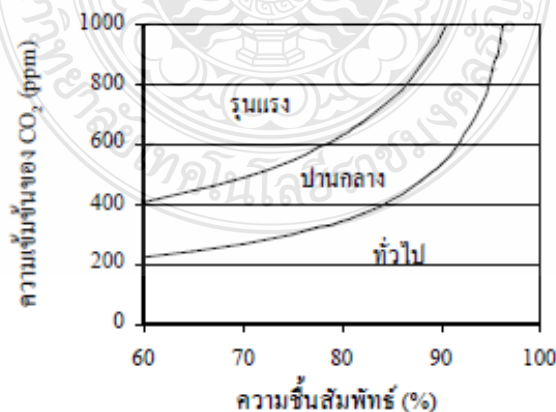
โดยที่ α_1 คือ สัมประสิทธิ์การสัมผัสน้ำความเปียกชื้น ในที่นี้ กำหนดให้ มีค่าเท่ากับ 1.00 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสน้ำความเปียกชื้นในขณะใช้งาน เช่น ผิวคอนกรีตที่อยู่ในร่มภายในอาคาร เป็นต้น และมีค่าเท่ากับ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสน้ำความเปียกชื้นในขณะใช้งาน เช่น ผิว คอนกรีตที่อยู่กลางแจ้งสามารถสัมผัสกับฝนได้ เป็นต้น

α_2 คือ สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น [11]

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	α_2
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชั่นปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชั่นรุนแรง	1.00

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 2.16 โดยขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต

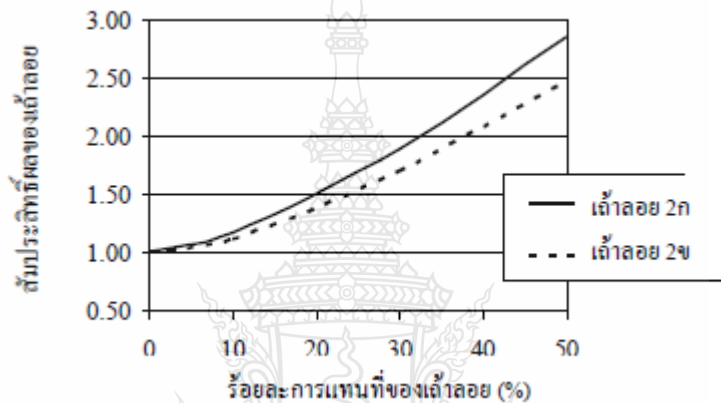


รูปที่ 2.16 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น [11]

สัมประสิทธิ์ความลึกรับแรงดัน (k) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.18)

$$k = 17.5 k_r (w/b)^3 \quad (2.18)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน (k_r) สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 2.17 (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)



รูปที่ 2.17 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน [11]

ข้อแนะนำ

1) สมการการออกแบบความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันชุด นี้ สามารถใช้ในกรณีของคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตควมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานไม่เกิน 0.65 และมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานไม่เกินร้อยละ 50

2) ในกรณีของคอนกรีตที่มีรอยร้าว ผลของการมีรอยร้าวจะทำให้อายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีตลดลง ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกรับแรงดัน (k) ในสมการที่ (2.18) ไม่ได้คำนึงถึงผลของรอยแตกร้าว หากต้องการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีรอยร้าว หรือใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเกิน 0.65 หรือมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานเกินกว่าร้อยละ 50 ควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hyung-Min Lee , Han-Seung Lee , Sang-ho Min , Seungmin Lim and Jitendra Kumar Singh ได้ทำการศึกษาเรื่อง Carbonation-Induced Corrosion Initiation Probability of Rebars in Concrete With/Without Finishing Materials [12] ในปัจจุบันเราได้ใช้วัสดุตกแต่งที่แตกต่างกันบนคอนกรีตเพื่อลดผลกระทบของคาร์บอนชั้นด้วยการสำรวจภาคสนามและเงื่อนไขเร่ง ในการทดลองหนึ่งการวัดความหนาของฝากรอบคอนกรีตและการประยุกต์ใช้วัสดุตกแต่งสำเร็จในสถานที่ ในขณะที่ในการทดลองอื่น ๆ สิ่งเหล่านี้กระทำภายใต้เงื่อนไขเร่งความเร็ว ความลึกของคาร์บอนและสัมประสิทธิ์ของ wallpaper (SWP) ลดลงครึ่งหนึ่งในการทดลอง CO₂ 5% แบบเร่งเทียบกับแบบธรรมดาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) เนื่องจากสิ่งกีดขวางทางกายภาพภายนอกที่ช่วยลดการแทรกซึมของ CO₂ ผ่านรูขุมขนของคอนกรีต เราพบว่าคาร์บอนชั้นไม่ถึงส่วนผิวกึ่งเส้นแม้หลังจาก 100 ปีเมื่อใช้วัสดุตกแต่ง SWP แบบจำลองความน่าจะเป็นที่คาดการณ์ไว้ OPC และสีน้ำ (WP) 51 ปีนั้น จะต้องมีการกัดกร่อน 30% การเริ่มต้นผ่านการเร่งคาร์บอนชั้นในขณะที่ SWP จะต้องใช้เวลา 200 ปี

M.G.Alexander, J.R.Mackechnie and W.Yam [13] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities มีการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนชั้นของ โครงสร้างสะพาน 3 แห่งในแอฟริกาใต้ที่มีอายุระหว่าง 11-76 ปี คือสะพานที่อยู่ในพื้นที่ Cape Peninsula, Durban และ Johannesburg ซึ่งการเกิดคาร์บอนชั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง สภาพแวดล้อมที่ตั้งของโครงสร้างสะพาน โดยสภาพแวดล้อมที่ความชื้นสัมพัทธ์ ประมาณ 51-68 เปอร์เซ็นต์ จะมีโอกาสที่การเกิดคาร์บอนชั้นมากกว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ ที่ ประมาณมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์

Andreas Leemann¹ , Fabrizio Moro [14] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Carbonation of concrete the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity ซึ่งมีการศึกษาในนี้ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้น CO₂ และความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบ (RH) ต่อการเร่งและคาร์บอนธรรมชาติของส่วนผสมคอนกรีต 18 ชนิดที่ผลิตด้วยซีเมนต์ 9 ชนิดที่แตกต่างกัน การเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จาก 0.045 เป็น 1 และ 4% ที่ 57% RH จะไม่เปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อการเกิดคาร์บอนชั้นระหว่างส่วนผสมคอนกรีต การเพิ่มขึ้นของ RH จาก 57 เป็น 70 และ 80% RH ที่ 4% CO₂ แสดงอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์และผลเฉพาะซีเมนต์ที่มีผลต่อความต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาแบบคาร์บอนชั้นระหว่างส่วนผสมคอนกรีต ความต้านทานคาร์บอนชั้นที่ 4% CO₂ และ 57% RH ช่วยให้การประเมินความต้านทานของคาร์บอนชั้นของคอนกรีตในที่กำลังและมีข้อ จำกัด ในการเปิดรับแสงกลางแจ้งที่ไม่มีกรดด่าง ความต้านทานคาร์บอนชั้นต่ำกว่า 70% RH

ส่วนใหญ่จะถูกควบคุมโดยความจุัฟเฟอร์ CO₂ อย่างไรก็ตามในการทดสอบเร่งที่ 80% RH และในการควบแน่นของไม่มีที่กำบังที่สัมผัสภายนอกมีความสำคัญเพิ่มขึ้น

S.K.Roy, D.O.Northwood and K.B.Poh [15] ทำการศึกษาเรื่อง Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building มีการศึกษาถึงผลกระทบของความหนาปูนฉาบที่มีต่อการเกิดคาร์บอนเนชัน ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุ 19 ปี โดยการเจาะเก็บตัวอย่างโครงสร้างเสาและคาน ทดสอบระยะคาร์บอนเนชันด้วยการใช้สารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ มีการนำข้อมูลแสดงผลด้วยกราฟแท่ง ดูการกระจายตัวของข้อมูล เป็นต้น ซึ่งพบว่าโครงสร้างที่มีปูนฉาบมีแนวโน้มระยะคาร์บอนเนชันน้อยกว่าโครงสร้างที่ไม่มีปูนฉาบ

H.A1-Khayat, M. N. Haque and N. I. Fattuhi [16] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Concrete carbonation in arid climate มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ดังนี้ 0.45-0.80 ทดสอบ การเกิดคาร์บอนเนชันในสภาพแวดล้อมจริง พบว่าอัตราการเกิดระยะคาร์บอนเนชันจะมีมากขึ้นเมื่อ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น และในส่วนของกำลังอัดพบว่าระยะคาร์บอนเนชันมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

วัจนวงศ์ กริพละ, รัฐภูมิ ปรีชาติปรีชา, สรรค์ สยามิภักดี, ธนากร พิระพันธ์ [17] ทำการศึกษาเรื่อง การสำรวจ ทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสา โครงการทำงานรถไฟยกกระดบ มีการเจาะเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนเสาและคานของโครงสร้างทางด่วน สายเหนือจากสถานีรถไฟหัวลำโพงถึงท่าอากาศยานนานาชาติดอนเมือง สายตะวันออก และสายตะวันตกด้วยวิธีการ coring ที่ระดับความ สูงประมาณ 1 ม.จากระดับพื้นดิน เพื่อทดสอบหาค่าระยะคาร์บอนเนชัน พบว่ามีระยะคาร์บอนเนชัน อยู่ระหว่าง 2.00-19.40 มม. มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 10.90 มม. มีอายุการใช้งานเฉลี่ยที่เหลืออยู่ 65 ปี

จากงานวิจัยในอดีตที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าเป็นการศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างจริงในสภาวะแวดล้อมต่างกัน ซึ่งอาจจะเห็นผลการทดลองที่ชัดเจนในระดับหนึ่ง โดยโครงสร้างดังกล่าวที่ตรวจสอบจะเน้นไปที่โครงสร้างมูลฐานขนาดใหญ่ เช่น สะพาน ทางด่วน เป็นต้น แต่สำหรับการทดลองครั้งนี้เล็งเห็นว่าการศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างพื้นฐาน คือที่อยู่อาศัย ซึ่งประเทศไทยยังให้ความสำคัญในเรื่องดังกล่าวค่อนข้างน้อย โดยปัญหาดังกล่าวมีความสำคัญต่อปัญหาความคงทนเกี่ยวกับคาร์บอนเนชันที่จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างได้

N.I. Fattuhi [18] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period มีการหล่อคอนกรีตตัวอย่างทดสอบแบบเร่งในห้องปฏิบัติการ โดยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ 0.7, 0.6 และ 0.4 ทำการทดสอบการเกิด คาร์บอนเนชันที่ 1, 3, 7, 21 และ 28 วัน พบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันจะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วน น้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น

J. Khunthongkeaw, S.Tangtermsirikul and T.Leelawat [19] ได้ทำการศึกษาเรื่อง A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete มีการใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของปริมาณ CaO ที่ต่างกันสำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปทดสอบ ในสภาวะเร่งและสภาวะแวดล้อมจริงต่างๆกันคือในเขตเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO สูงจะมีการเกิดคาร์บอนเนชันต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่ำ ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชันของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอย

S.K. Roy, K.B. Poh and D.O. Northwood [20] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Durability of concrete - accelerated carbonation and weathering studies มีการนำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน โดยศึกษาปัจจัยด้านระดับความชื้นสัมพัทธ์ คุณภาพคอนกรีตที่มีตั้งแต่เกรด 20, 25, 30, 35 และ 40 ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชัน ซึ่งพบว่าคุณภาพคอนกรีตทุกเกรดจะมีแนวโน้มการเกิด คาร์บอนเนชันที่สูงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 52-75 %

Jin-Keun Kim, Chin-Yong Kim, Seong-Tae Yi and Yun Lee [21] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete มีการหล่อตัวอย่าง คอนกรีตที่ความแข็งแรงสูง,กลาง และต่ำ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.68, 0.46 และ 0.28 ตามลำดับ ทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชันในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการ ที่อายุ 1, 2, 3 และ 4 เดือน และวัดค่ากำลังอัด พบว่าที่อายุมากขึ้นการเกิดคาร์บอนเนชันก็ยิ่งมากขึ้นด้วย และคอนกรีตที่มี กำลังต่ำจะมีอัตราการพัฒนาระยะคาร์บอนเนชันได้สูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูง

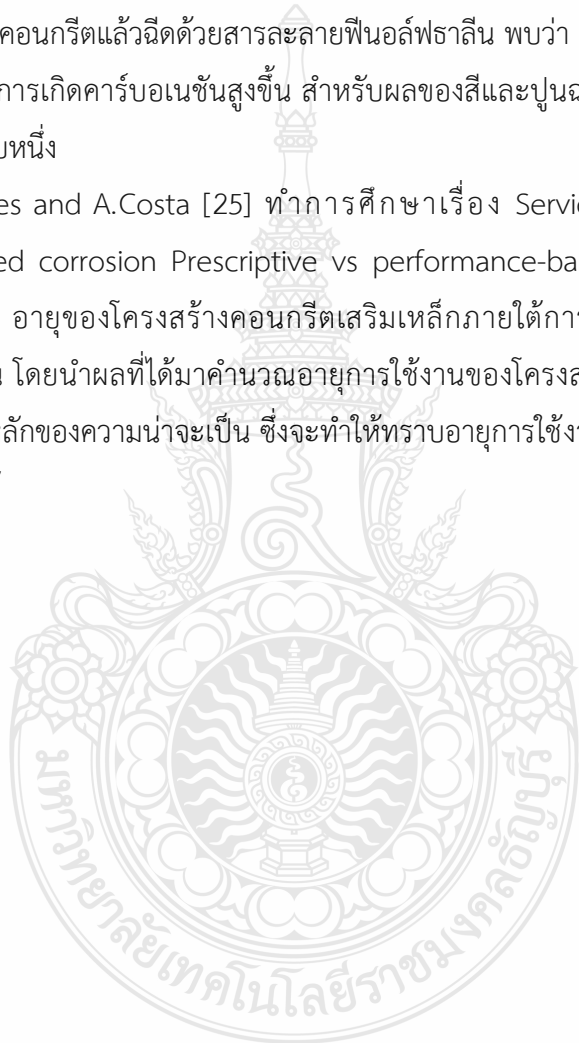
Cengiz Duran Atis [22] ได้ทำการศึกษาเรื่อง Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย ทดสอบในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 65 และ 100 % ทำการทดสอบหาระยะคาร์บอนเนชันและค่า กำลังอัดที่ 3,7,28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณมากทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันสูงกว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณน้อยและในส่วนของกำลังอัดพบว่าระยะ คาร์บอนเนชันมีค่าพ้องกับค่ากำลังอัด

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และทวิทัศน์ คงทรัพย์ [23] ทำการศึกษาเรื่องความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้า แกลบตาจากโรงสีข้าว มีการศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบตา ร้อยละ 20 และ 40 โดยอัตราส่วนปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ พบว่าระยะคาร์บอนเนชันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบตาในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ในส่วน

ของการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าต่างกันพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานยิ่งมากขึ้นจะทำให้ระยะคาร์บอนชั้นมากขึ้นตามไปด้วย

J. Banjongrat, K. Wongpiyachetchai, R. Sahamitmongkol and S.Tangtermsirikul [24] ทำการศึกษา เรื่อง Effect of Plastering Mortar and Paint On Carbonation Resistance of Concrete มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 โดยตัวอย่างคอนกรีตมีทั้ง การทำสี ไม่ทำสี ฉาบปูนและไม่ฉาบปูน ทำการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอนชั้น โดยการผ่าซีก ตัวอย่างคอนกรีตแล้วฉีด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาลิน พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนชั้นสูงขึ้น สำหรับผลของสีและปูนฉาบสามารถป้องกันการเกิดคาร์บอนชั้นได้ในระดับหนึ่ง

P.F.Marques and A.Costa [25] ทำการศึกษาเรื่อง Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion Prescriptive vs performance-based methodologies ได้ ทำการศึกษาประเมิน อายุของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การเสื่อมสภาพของคอนกรีต เนื่องจากคาร์บอนชั้น โดยนำผลที่ได้มาคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้าง ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ร่วมกับ หลักของความน่าจะเป็น ซึ่งจะทำให้ทราบอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของโครงสร้างคอนกรีตเสริม เหล็กได้



บทที่ 3

วิธีการศึกษา

สำหรับวิธีการศึกษาการประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีในครั้งนี้ ประกอบไปด้วย ตำแหน่งของสถานที่ที่ทำการศึกษา การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น และการวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ตำแหน่งของสถานที่ที่ทำการศึกษา

อาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย โครงสร้างอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในเขตจังหวัดอุดรธานีทั้งหมด 4 สถานที่ จำนวน 11 อาคาร ได้แก่

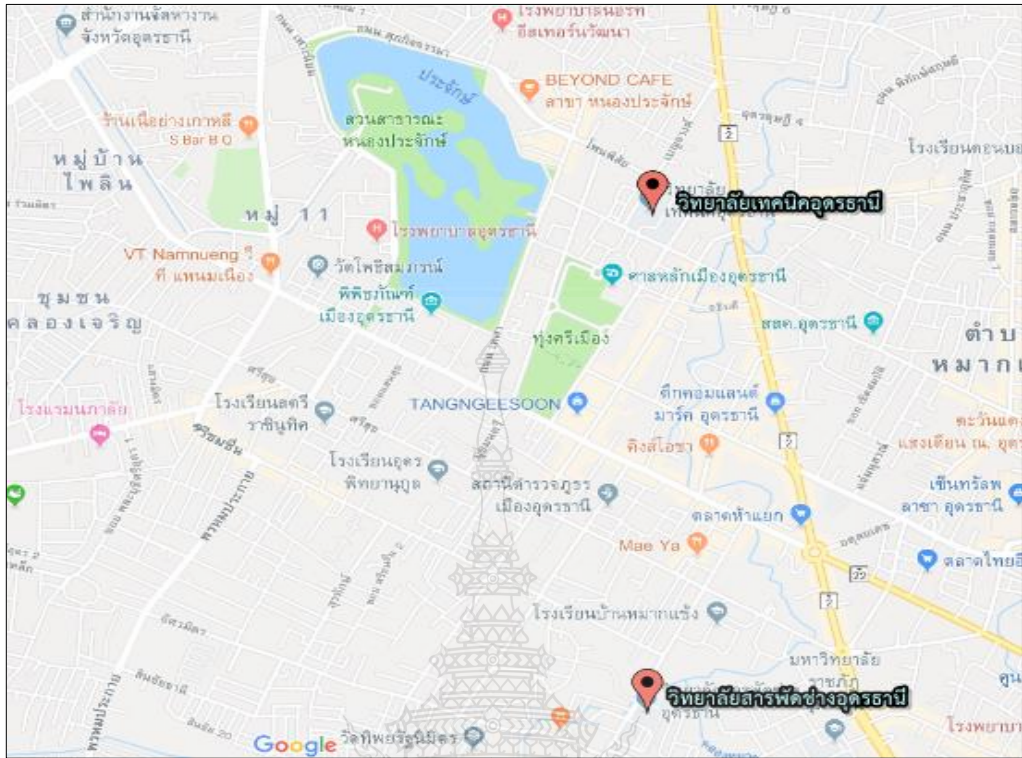
1) สถานที่ที่ 1 ในวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1) จำนวน 5 อาคาร ได้แก่ อาคารอำนวยการ อาคารเรียน 3 อาคารวิชาพื้นฐาน อาคารไฟฟ้ากำลัง และอาคารโรงอาหาร ดังรูปที่ 3.1 (ก)

2) สถานที่ที่ 2 ในวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (2) จำนวน 1 อาคาร คือ อาคารนานาชาติ ดังรูปที่ 3.1 (ก)

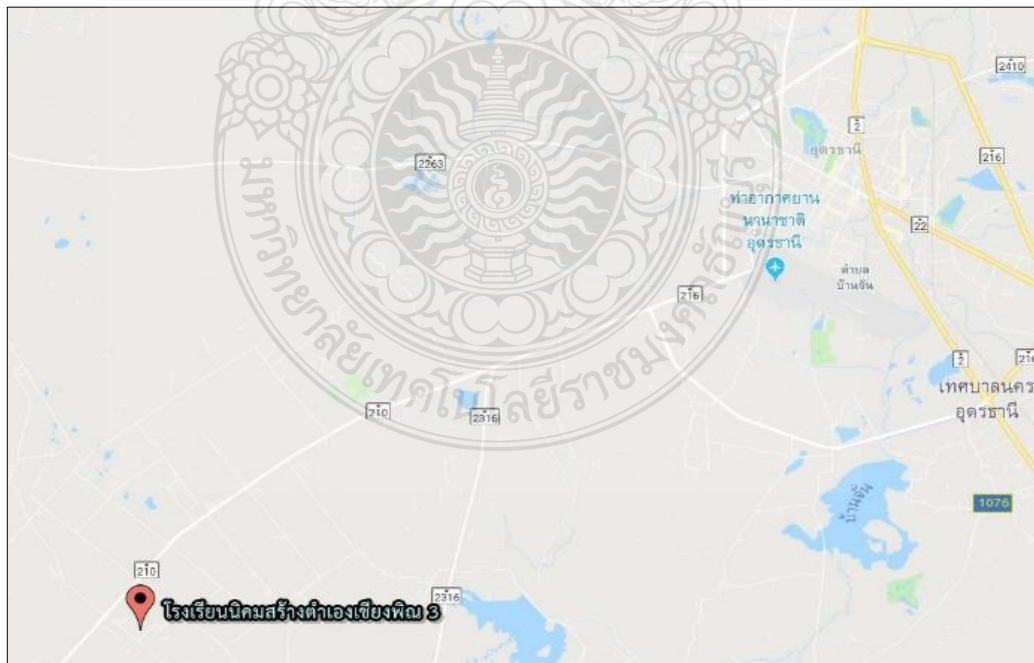
3) สถานที่ที่ 3 ในวิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี จำนวน 4 อาคาร ได้แก่ อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ อาคารพาณิชยกรรม อาคารโรงฝึกงาน และอาคารเอนกประสงค์ ดังรูปที่ 3.1 (ก)

4) สถานที่ที่ 4 อาคารเรียนของโรงเรียนนิคมสร้างตนเองเซียงพิณ 3 ดังรูปที่ 3.1 (ข)

โดยตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ที่ใช้ในการศึกษา



(ก) ตำแหน่งโครงสร้างของวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1) วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (2) และวิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี



(ข) ตำแหน่งโครงสร้างของโรงเรียนนคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3

รูปที่ 3.1 แผนที่แสดงตำแหน่งของโครงสร้างอาคารในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา

สถานที่ที่เข้าตรวจสอบ	ระบบก่อสร้าง	อายุ (ปี)
สถานที่ที่ 1 วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1)		
- อาคารอำนวยการ	หล่อในที่	50
- อาคารเรียน 3	หล่อในที่	50
- อาคารวิชาชีพพื้นฐาน	หล่อในที่	20
- อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	หล่อในที่	20
- อาคารโรงอาหาร	หล่อในที่	20
สถานที่ที่ 2 วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (2)		
- อาคารนานาชาติ	หล่อในที่	20
สถานที่ที่ 3 วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี		
- อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	หล่อในที่	21
- อาคารพาณิชย์การ	หล่อในที่	21
- อาคารโรงฝึกงาน	หล่อในที่	47
- อาคารเอนกประสงค์	หล่อในที่	20
สถานที่ที่ 4 โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3		
- อาคารเรียน	หล่อในที่	34

*อายุโครงสร้างนับจากวันที่ก่อสร้างเสร็จไปจนถึงวันที่ตรวจสอบ (พ.ศ.2562)

3.2 การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

การศึกษาการประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีในครั้งนี้ ประกอบไปด้วย การตรวจพินิจอาคาร การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ การหาตำแหน่งและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ การวัดระยะการเกิดคาร์บอนเนชั่น และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การตรวจพินิจอาคาร

การตรวจพินิจอาคาร เป็นการตรวจสอบด้วยตาเปล่าร่วมกับการใช้อุปกรณ์ตรวจสอบพื้นฐาน เช่น ไม้บรรทัดเพื่อตรวจสอบความยาวของรอยแตกของคอนกรีต และกล้องถ่ายรูปเพื่อบันทึกร่องรอยของความเสียหาย ในการตรวจสอบผู้ตรวจสอบจะต้องจำแนกความเสียหายประเภทต่าง ๆ อย่างชัดเจน

เพื่อความสะดวกสำหรับการอ้างอิงข้อมูลในภายหลัง เนื่องจากการตรวจพินิจนั้นมีค่าดำเนินการที่ต่ำและดำเนินการได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีตรวจสอบด้วยวิธีอื่นๆ ดังนั้นผู้ตรวจสอบต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิศวกรรมโครงสร้าง พฤติกรรมของวัสดุ และเทคนิคการก่อสร้าง เพื่อการรวบรวมข้อมูลที่สมบูรณ์มากที่สุด ด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพของการตรวจสอบด้วยตาเปล่าจึงขึ้นอยู่กับความรู้และประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบด้วย

3.2.2 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ในการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ใช้เครื่องทดสอบในการความปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ AZ รุ่น 77535 (รูปที่ 3.2) เก็บวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณอาคารที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบความลึกระยะคาร์บอนเนชั่น ทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โดยจะวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงเวลา คือช่วงเช้า (เวลา ประมาณ 9.00-10.00 น.) ช่วงเที่ยง (เวลาประมาณ 12.00-13.00 น.) และช่วงบ่าย (เวลาประมาณ 14.00-15.00 น.) ในแต่ละอาคารที่มีการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โดยเครื่องมือวัด ยี่ห้อ AZ รุ่น 77535

3.2.3 การหาตำแหน่งและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

โดยใช้เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็กเป็นอุปกรณ์สำรวจที่ใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งของเหล็กเสริมในคอนกรีต ใช้หลักของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์สำรวจนั้นๆ เมื่อเคลื่อนอุปกรณ์เข้าไปใกล้เหล็กเสริมในคอนกรีต เครื่องจะแสดงตำแหน่งและบอกระยะของเหล็กเสริม อุปกรณ์นี้จะใช้คาดคะเนระยะหุ้มเหล็กได้หากรู้ขนาดของเหล็กเสริมเส้นดังกล่าว โดยในการศึกษาในครั้งนี้ ในการ

ทดสอบหาตำแหน่งเหล็กและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม เพื่อใช้ประกอบการเจาะเพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยเครื่องมือวัดยี่ห้อ R-C-410 Rebarscope (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 การวัดตำแหน่งเหล็กและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม โดยเครื่องมือวัดยี่ห้อ R-C-410 Rebarscope

3.2.4 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ

ในการทดสอบกำลังอัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีตในครั้งนี้ ใช้ค้อนกระทบแบบชมิทท์ (Schmidt Hammer) ทำการทดสอบวัดค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต (รูปที่ 3.3) เก็บค่าการสะท้อนกลับของ คอนกรีต 20 ค่าต่อ 1 ตำแหน่งการทดสอบ โดยจุดที่มีการวัดค่าการสะท้อนแต่ละครั้งต้องห่างกัน ประมาณ 25 มิลลิเมตร ในส่วนของค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัด ของคอนกรีตโดยอ้างอิงการประมาณค่าตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (3.1) (Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2005) หรือ สมการที่ (3.2)

$$f'_c = -18 + (1.27 \times RN) \quad (3.1)$$

$$f'_c = -176.4 + (1.4467 \times RN) \quad (3.2)$$

โดยที่ f'_c คือ ค่าประมาณการกำลังอัดของคอนกรีต (กก./ซม.²)

RN คือ ค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer



รูปที่ 3.4 วิธีการทดสอบกำลังอัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีต โดยใช้ค้อนกระแทกแบบชมิคท์ (Schmidt Hammer)

3.2.5 การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างเพื่อทดสอบวัตรยะการเกิดคาร์บอนขึ้น

1) การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่าง

การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่าน BOSCH หัวเจาะ HOLESAW (รูปที่ 3.5) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร ตำแหน่งที่เจาะสูงจากระดับพื้นดินประมาณ 1-1.5 เมตร และการเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตลึกประมาณ 3-4 เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 สว่าน BOSCH หัวเจาะ HOLESAW

2) การวัตรยะการเกิดคาร์บอนขึ้น

นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะจากตำแหน่งที่กล่าวมา นำมาผ่าซีกดังแสดงในรูปที่ 3.7(ก) ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เพื่อ

ทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น ในการทดสอบนี้ได้ทำการฉีดยาสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์ไปยังคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้วดังแสดงใน รูปที่ 3.7(ข) ถ้าผิวของคอนกรีตที่ถูกฉีดยาเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มแสดงว่ายังไม่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น หากคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจากนั้นวัดค่าระยะคาร์บอนเนชั่นจากระยะความหนาของคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่ไปจตุรรอยต่อดังแสดงใน รูปที่ 3.8(ก) สำหรับอาคารที่เป็นโครงสร้างแบบหล่อในที่ สามารถวัดค่าระยะปูนฉาบได้จากตัวอย่างเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.8(ข)



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)



(ก) การผ่าซีกก่อนตัวอย่างคอนกรีต



(ข) นำก้อนตัวอย่างที่ผ่าซีกฉีดยา
สารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์

รูปที่ 3.7 การทดสอบวัดระยะคาร์บอนเนชั่น



(ก) กรณีขึ้นส่วนสำเร็จ



(ข) กรณีหล่อในที่มีระยะปูนฉาบ

รูปที่ 3.8 การวัดระยะคาร์บอนเนชั่นและปูนฉาบ

3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น

โดยสมการ Fick's first law of diffusion เมื่อทราบอายุของโครงสร้างและความลึกคาร์บอนเนชั่น สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชั่นได้จากสมการที่ (3.3)

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

โดยที่ d คือ ค่าความลึกคาร์บอนเนชั่น (มิลลิเมตร)

t คือ อายุของโครงสร้าง (ปี) และ

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

3.4 การวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น

3.4.1 การทำนายอายุโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามสมการ Fick's first law of diffusion

เมื่อพิจารณาโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง โครงสร้างเหล่านี้มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นในอัตราที่สูง ซึ่งปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง และส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ในที่สุด จนทำให้โครงสร้างเกิดความวิบัติขึ้นตามมา ดังนั้นการวางแผนเพื่อจะให้โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น โดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion ดังสมการที่ (3.4)

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

3.4.2 การทำนายอายุโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

มาตรฐานการออกแบบของกรมโยธาธิการและผังเมืองเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการออกแบบได้ [5] โดยใช้สมการที่ (3.5)

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t} \quad (3.5)$$

โดยที่ x_c คือ ความลึกคาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ

α_1 คือ สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น โดย

เท่ากับ 1.00 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น และ

เท่ากับ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น

α_2 คือ สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน พิจารณาได้จากตารางที่ 3.2 และ t คืออายุของโครงสร้าง (ปี) โดยระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 3.9 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต

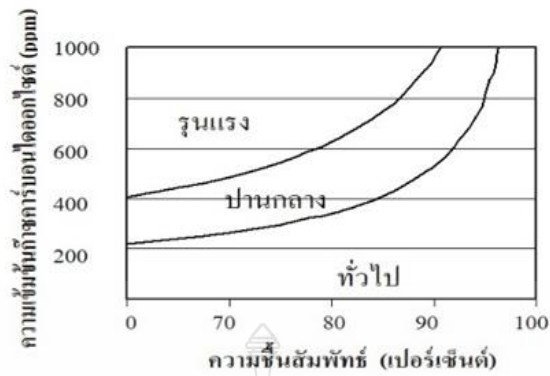
k คือ สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน ดังสมการที่ (3.6)

$$k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3 \quad (3.6)$$

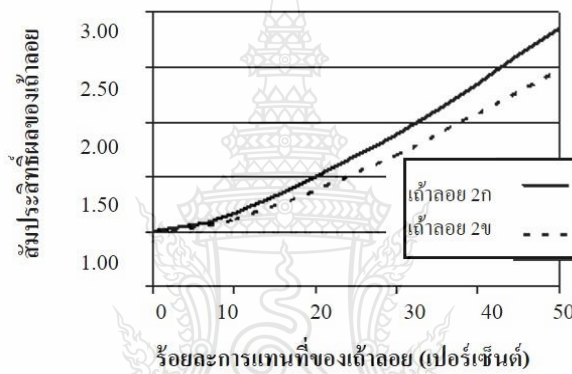
เมื่อ w/b คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดย k_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ วสท. 1014-46) ดังรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน [5]

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	α_2
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันรุนแรง	1.00



รูปที่ 3.9 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น [5]



รูปที่ 3.10 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่ถ้ำลอยในวัสดุประสาน [5]

3.4.3 การประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากคาร์บอนเนชั่นกับอายุของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กคำนวณโดยใช้สมการของกรมโยธาธิการและผังเมืองดังแสดงในสมการที่ (3.7)

$$1) d = k\sqrt{t} \quad (3.7)$$

$$2) Z = \frac{(\bar{X}_{car,real(pH)} - \bar{X}_{cover}) - (0)}{\sqrt{S_{car,real}^2 + S_{cover}^2}} \quad (3.8)$$

โดยที่

Z คือ ค่าตัวแปรสุ่มปกติมาตรฐานนำไปเปิดตารางพื้นที่ใต้โค้งของการเกิดสนิม
เนื่องจากคาร์บอนเนชั่น

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

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

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

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

S_{cover}^2 คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย

3) เปิดตารางพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐาน ซึ่งพื้นที่ใต้โค้งปกติมาตรฐานนี้คือความน่าจะเป็นที่
เหล็กเสริม เกิดสนิม

4) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น (ร้อยละ)
กับอายุโครงสร้าง (ปี)

3.4.4 การประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากคาร์บอนเนชั่นกับอายุของ
อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กคำนวณโดยใช้สมการของกรมโยธาธิการและผังเมืองดังแสดงในสมการที่ (3.8)

$$1) d = k\sqrt{t} \quad (3.9)$$

$$2) Z = \frac{(\bar{X}_{car,real(pH)} - \bar{X}_{cover}) - (0)}{\sqrt{S_{car,real}^2 + S_{cover}^2}} \quad (3.10)$$

โดยที่

d, x_c = ระยะคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ย

k = สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชั่น

t = อายุโครงสร้างในขณะทำการทดสอบ

α_1 = สัมประสิทธิ์สัมพัทธ์ความเปื่อยกขึ้น

สำหรับผิวคอนกรีตสัมพัทธ์ความเปื่อยกขึ้น $\alpha_1 = 1$

สำหรับผิวคอนกรีตสัมพัทธ์ความเปื่อยกขึ้น $\alpha_1 = 0.95$

α_2 = สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชั่น

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากผลการศึกษาการประเมินความเสี่ยงของการเกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอนเนชันและการทำนายอายุปลอดภัยของคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีในครั้งนี้ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี

4.1.1 การตรวจพินิจอาคาร

จากการตรวจพินิจหรือการตรวจสอบด้วยตาเปล่าได้บันทึกร่องรอยของความเสียหาย จากการสำรวจในวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานีนานาชาติ วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี และโรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3 พบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันและแตกต่างกันในบางส่วน โดยจะทำการแยกประเภทเป็นความเสียหายภายนอกอาคารและความเสียหายภายในอาคาร

1) ความเสียหายภายนอกอาคาร

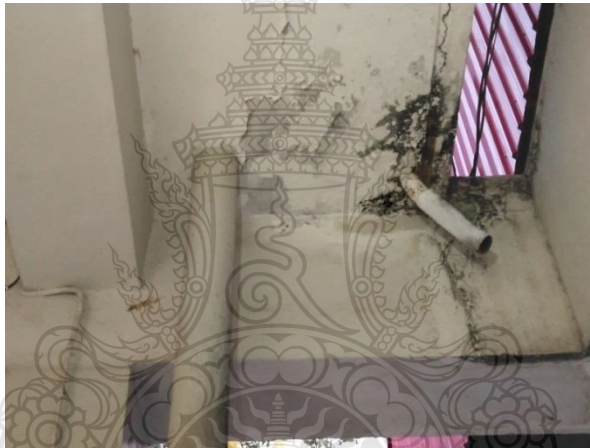
รูปที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงความเสียหายภายนอกอาคาร โดยทำการตรวจสอบรอบๆ โครงสร้างอาคารที่ศึกษา ได้ทำการจำแนกความเสียหายโดยรวมตามลักษณะดังแสดงในรูป จากการสำรวจพื้นที่พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นมักเกิดกับโครงสร้างอาคารภายนอกของตัวอาคาร



รูปที่ 4.1 การแตกร้าวและหลุดร่อนของปูนฉาบบริเวณใต้ท้องกันสาด(วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี (อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ)



รูปที่ 4.2 การหลุดร่อนและแตกร้าวของปูนฉาบใต้ท้องระเบียง (วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี อาคารพานิชยกรรม)



รูปที่ 4.3 ปัญหาน้ำฝนรั่วซึมและการหลุดร่อนของสี (วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี อาคารโรงอาหาร)

ความเสียหายภายในอาคาร

รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงความเสียหายภายในอาคาร โดยทำการตรวจสอบรอบๆ
โครงสร้างอาคารที่ศึกษา ได้ทำการจำแนกความเสียหายโดยรวมตามลักษณะดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.4 ปัญหารอยร้าวชั้นปูนฉาบบริเวณเพดานของพื้นที่ชั้น 2 (วิทยาลัยสารพัดช่าง อาคารปฏิบัติการ วิชาชีพ)



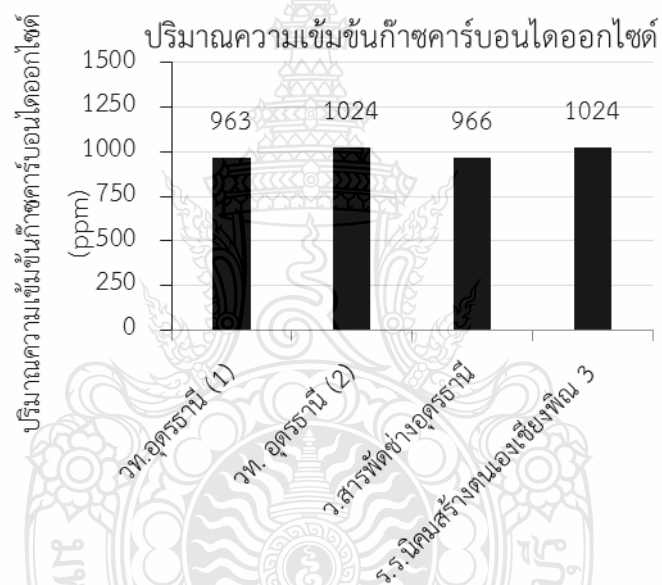
รูปที่ 4.5 ปัญหาห้องพื้นที่ชั้น 2 กะเทาะเห็นเหล็กเสริมเกิดสนิม (โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงใหม่ 3)

4.1.2 ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

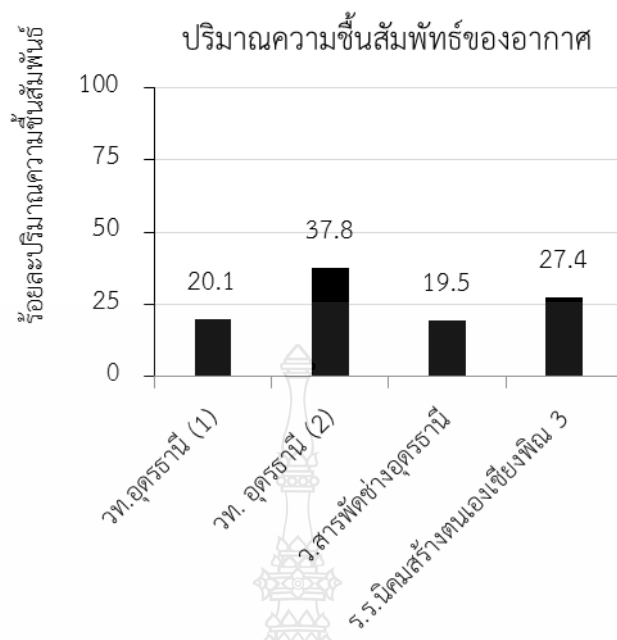
ในส่วนองปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแสดงดังตารางที่ 4.1 เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ส่งผลต่อระยะคาร์บอนชั้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่ในโดยภาพรวมแล้ว ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกๆ สถานที่ที่ศึกษาในครั้งนี้ มีความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูง นั้นแสดงว่าโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เลือกในการศึกษาครั้งนี้มีภาวะความเสี่ยงต่อการเกิดระยะคาร์บอนชั้นที่ชัดเจน แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 และ 4.7 ข้อสังเกตพบว่า ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวิทยาลัยเทคนิคคูตรธานี (2) และโรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงใหม่ 3 มีความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง อาจเนื่องมาจากความหนาแน่นของการจราจรที่มาก ส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบริเวณดังกล่าวมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

สถานที่	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		ความชื้นสัมพัทธ์	
	ความเข้มข้นเฉลี่ย (ppm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ppm)	ปริมาณ (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
วิทยาลัยอุดรธานี (1)	963	±17.97	20.1	±3.52
วิทยาลัยอุดรธานี (2)	1024	±17.25	37.8	±6.70
วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี	966	±16.24	19.5	±3.87
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3	1024	±16.96	27.4	±0.69



รูปที่ 4.6 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



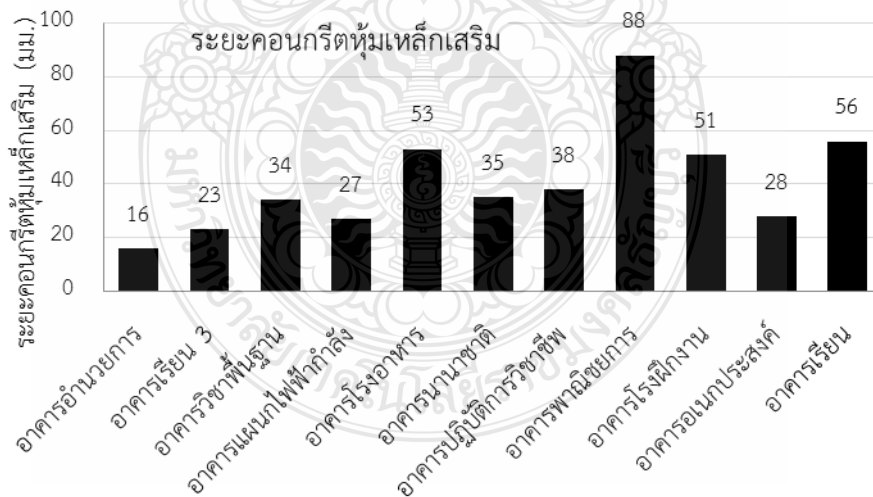
รูปที่ 4.7 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

4.1.3 ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

ในส่วนของผลการวัดระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8 พบว่าระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเฉลี่ยของแต่ละอาคารมีทั้งที่มากกว่าและน้อยกว่า 30 มิลลิเมตร ซึ่งระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กตามข้อกำหนดทั่วไป นั้นแสดงว่าการควบคุมการก่อสร้างยังไม่ได้เท่าที่ควร

ตารางที่ 4.2 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตที่ศึกษา

สถานที่	อาคาร	อายุ (เดือน)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (มิลลิเมตร)	
			เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี (1)	อาคารอำนวยการ	600	16	±8
	อาคารเรียน 3	600	23	±6
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	34	±2
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	27	±4
	อาคารโรงอาหาร	240	53	±4
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี (2)	อาคารนานาชาติ	240	35	±2
วิทยาลัยสารพัด ช่างอุดรธานี	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	38	±1
	อาคารพาณิชย์การ	252	88	±15
	อาคารโรงฝึกงาน	564	51	±3
	อาคารอเนกประสงค์	240	28	±4
โรงเรียนนิคม สร้างตนเองเชียง พิณ 3	อาคารเรียน	408	56	±5



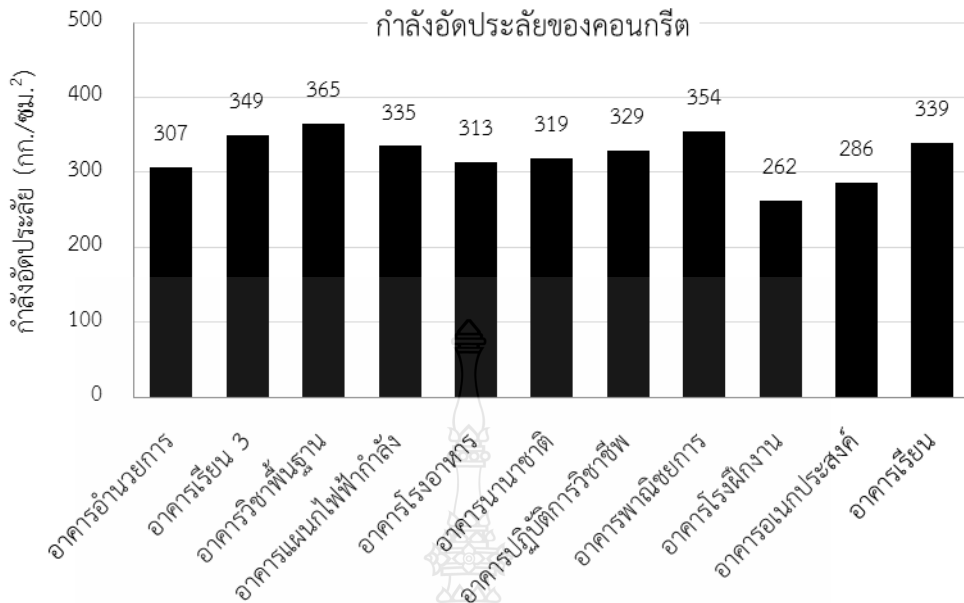
รูปที่ 4.8 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตที่ศึกษา

4.1.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก

จากผลการทดสอบการสะท้อนกลับของผิวของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Schmidt Hammer) ของโครงสร้างอาคารเรียนในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ทั้ง 11 โครงสร้างอาคาร สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัยข้อมูลความสัมพันธ์กับสมการที่ (3.2) คือ $f_c' = -176.4 + (1.4467 \times RN)$ ได้ค่าของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 พบว่า กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตของโครงสร้างอาคารทั้ง 11 แห่ง อยู่ระหว่าง 262-365 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่ามากกว่า 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีลิเมตร ซึ่งเป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีตตามข้อกำหนดทั่วไป นั้นแสดงว่าสัดส่วนผสมของคอนกรีตก็อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในอนาคตข้างหน้าระยะคาร์บอนชั่นจะเพิ่มขึ้นตามอายุปลดการซ่อมแซมจนถึงเหล็กเสริมภายในคอนกรีต อาจทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ส่งผลทำให้กำลังอัดลดน้อยลงแตกต่างกันไป

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตที่ศึกษา

สถานที่	อาคาร	อายุ (เดือน)	กำลังอัดประลัย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	
			เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี (1)	อาคารอำนวยการ	600	307	±5
	อาคารเรียน 3	600	349	±8
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	365	±13
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	335	±4
	อาคารโรงอาหาร	240	313	±3
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี (2)	อาคารนานาชาติ	240	319	±2
วิทยาลัยสารพัด ช่างอุดรธานี	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	329	±2
	อาคารพาณิชย์การ	252	354	±10
	อาคารโรงฝึกงาน	564	262	±20
	อาคารอเนกประสงค์	240	287	±12
โรงเรียนนิคม สร้างตนเองเชียง พิณ 3	อาคารเรียน	408		±5



รูปที่ 4.9 กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่ศึกษา

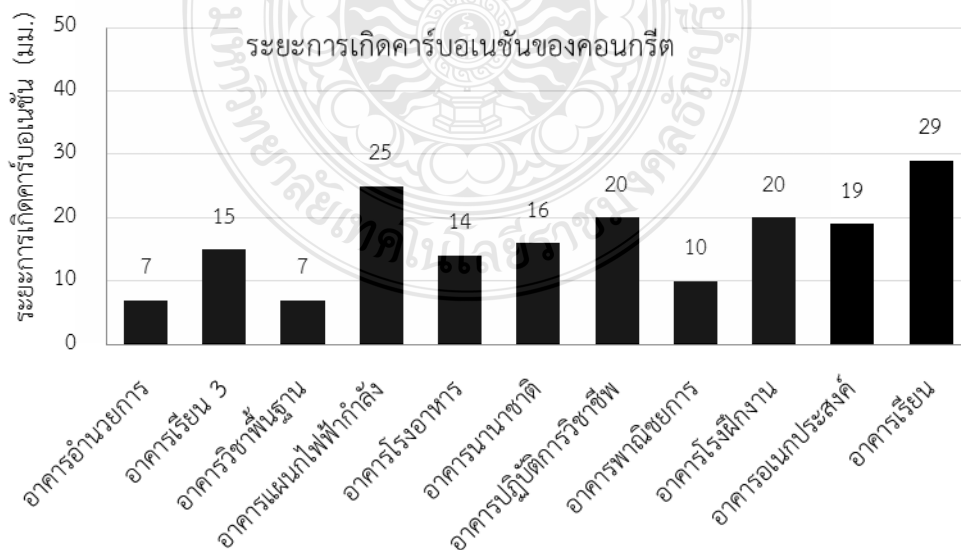
4.1.5 ระยะการเกิดคาร์บอนเนชันและค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันของคอนกรีต

จากการนำแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะในแต่ละอาคารที่ศึกษา มาทดสอบวัดระยะการเกิดคาร์บอนเนชัน แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.10 และจากผลของระยะการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างคอนกรีต นำมาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันซึ่งที่สัมพันธ์กับอายุของโครงสร้าง จากสมการที่ (3.3) คือ $d = k\sqrt{t}$ จะได้สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.11 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันของคอนกรีต ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งของแนวถนนช่วงนั้นๆ มีแนวโน้มสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันสูงกว่าเมื่อความเข้มข้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามอาจมีปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น กำลังอัดของคอนกรีต อายุของอาคาร เป็นต้น

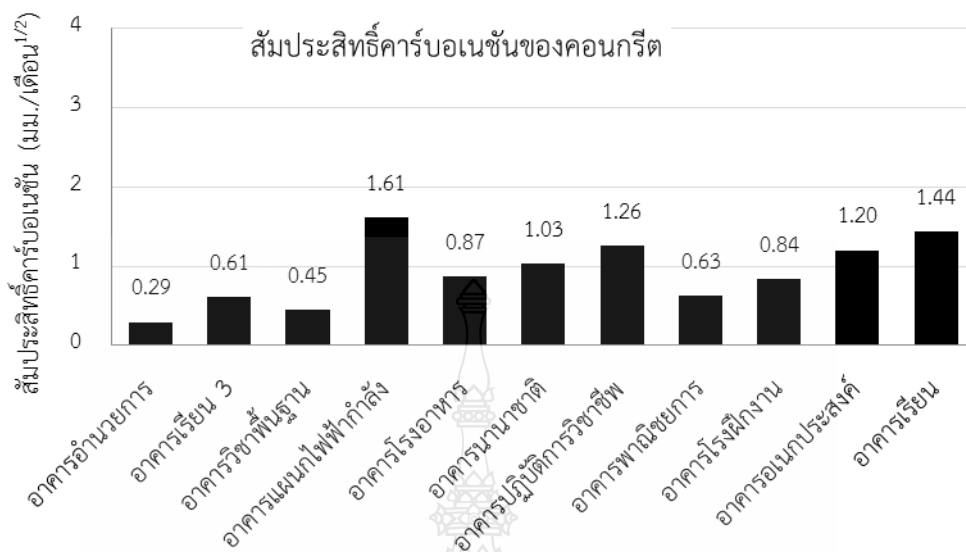
ตารางที่ 4.4 ระยะการเกิดคาร์บอนชั้นและสัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ศึกษา

สถานที่	อาคาร	อายุ (เดือน)	ระยะคาร์บอนชั้น (มม.)		ส.ป.ส. คาร์บอนชั้น (มม./เดือน ^{1/2})	
			ความลึก	S.D.	ส.ป.ส.	S.D.
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี (1)	อาคารอำนวยการ	600	7	±3	0.29	±0.20
	อาคารเรียน 3	600	15	±1	0.61	±0.10
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	7	±3	0.45	±0.15
	อาคารแผนกไฟฟ้า กำลัง	240	25	±3	1.61	±0.22
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี (2)	อาคารโรงอาหาร	240	14	±1	0.87	±0.02
	อาคารนานาชาติ	240	16	±1	1.03	±0.03
วิทยาลัยสารพัด ช่างอุดรธานี	อาคารปฏิบัติการ วิชาซีพี	252	20	±1	1.26	±0.10
	อาคารพาณิชย์การ	252	10	±2	0.63	±0.10
	อาคารโรงฝึกงาน	564	20	±1	0.84	±0.03
	อาคารอเนกประสงค์	240	19	±1	1.20	±0.09
โรงเรียน นิคม สร้างตนเองเชียง พิณ 3	อาคารเรียน	408	29	±4	1.44	±0.16

หมายเหตุ S.D. หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 4.10 ระยะการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ศึกษา



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันของคอนกรีตที่ศึกษา

4.2 การวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชัน

4.2.1 การทำนายอายุโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

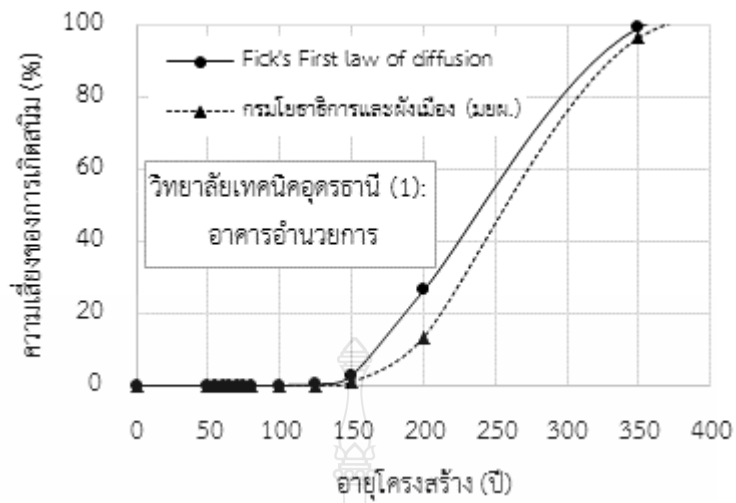
จากการศึกษาวิเคราะห์ค่าความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคาร์บอนเนชันในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ดังที่กล่าวแล้ว ประกอบด้วยอาคารในสถานที่ ในวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1) จำนวน 5 อาคาร ได้แก่ อาคารอำนวยการ อาคารเรียน 3 อาคารวิชาพื้นฐาน อาคารไฟฟ้ากำลัง และอาคารโรงอาหาร และในวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (2) จำนวน 1 อาคาร คือ อาคารนานาชาติ สถานที่ที่ 3 ในวิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี จำนวน 4 อาคาร ได้แก่ อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ อาคารพาณิชยการ อาคารโรงฝึกงาน และอาคารเอกประสงค์ และสถานที่ที่ 4 อาคารเรียนของโรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3 ได้ผลการศึกษาความเสี่ยงที่เหล็กจะเกิดสนิมในโครงสร้าง ตามสมการ fick's first law of diffusion และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) โดยให้ผิวคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้สัมผัสกับความเปียกชื้น และให้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันเฉลี่ย (k) มีค่าคงที่ตลอดอายุตลอดการซ่อมแซมของโครงสร้าง โดยใช้สมการที่ (3.4) และ (3.5) โดยผลของการคำนวณความเสี่ยงในการเกิดสนิมแสดงดังตารางที่ 4.5

รูปที่ 4.12 ถึง 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคาร เพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของแต่ละอาคารที่ใช้สมการต่างกัน คือ สมการ fick's first law of diffusion และ สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) พบว่า มีค่าความเสี่ยงที่ต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะสมการกรมโยธาธิการและผังเมือง ได้มีการพิจารณาเพิ่มเติมเงื่อนไขของปัจจัยที่มีผลต่อความเสี่ยงการเกิดสนิมของโครงสร้าง กล่าวคือ ได้แบ่งประเภทของ

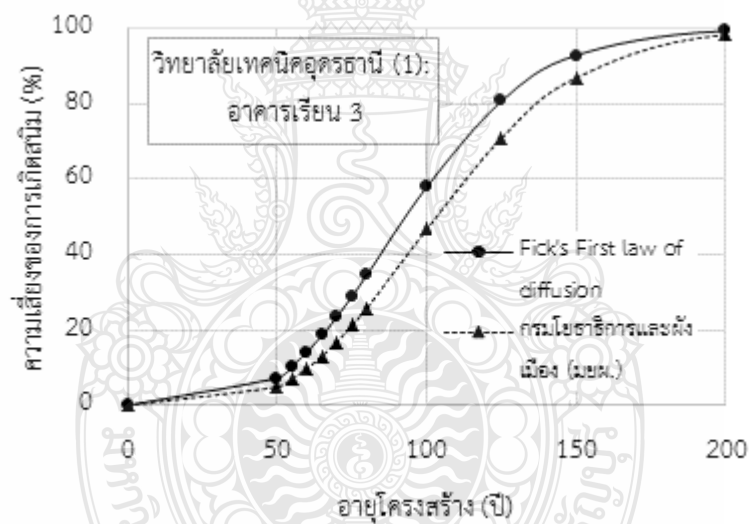
โครงสร้างคอนกรีตที่ไม่สัมผัสกับความเปียกชื้นและที่สัมผัสกับความเปียกชื้น รวมทั้งได้แบ่งความรุนแรงของระดับความเข้มข้นของคาร์บอนชั้นไว้ที่ 3 ระดับ (ตารางที่ 3.2) คือ สภาวะทั่วไป สภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง และสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง ซึ่งการคำนวณโดยสมการของ fick's first law of diffusion จะตรงกับการคำนวณโดยสมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) ในกรณีที่คอนกรีตไม่สัมผัสกับความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง สำหรับการคำนวณหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กโครงสร้างครั้งนี้ เลือกกรณีที่คอนกรีตมีการสัมผัสกับความเปียกชื้นและอยู่ในสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง

ตารางที่ 4.5 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

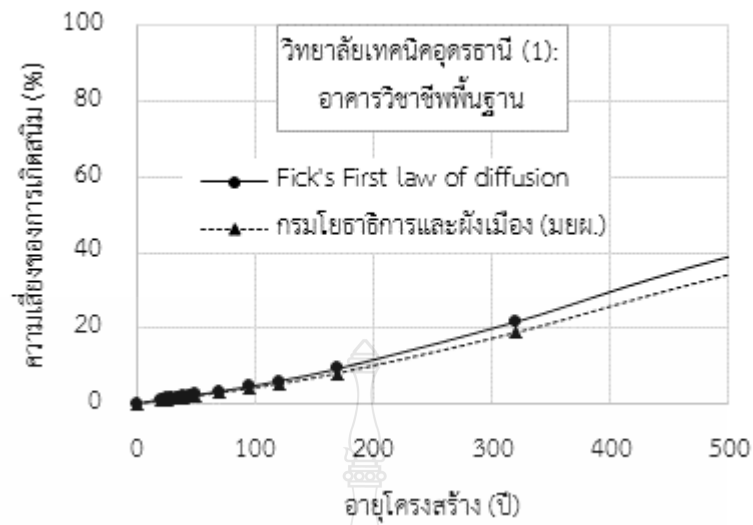
สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง (ปี)	ความเสี่ยงการเกิดสนิม (%)	
			fick's first law of diffusion	กรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1)	อาคารอำนวยการ	50	0.00	0.00
	อาคารเรียน 3	50	7.28	4.89
	อาคารวิชาพื้นฐาน	20	1.15	1.08
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	20	16.34	7.47
	อาคารโรงอาหาร	20	2.52	2.32
วิทยาลัยอุดรธานี (2)	อาคารนานาชาติ	20	12.07	11.11
วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	21	15.87	17.29
	อาคารพาณิชย์การ	21	12.56	12.74
	อาคารโรงฝึกงาน	47	0.00	0.00
	อาคารอเนกประสงค์	20	1.18	1.54
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3	อาคารเรียน	34	0.00	0.00



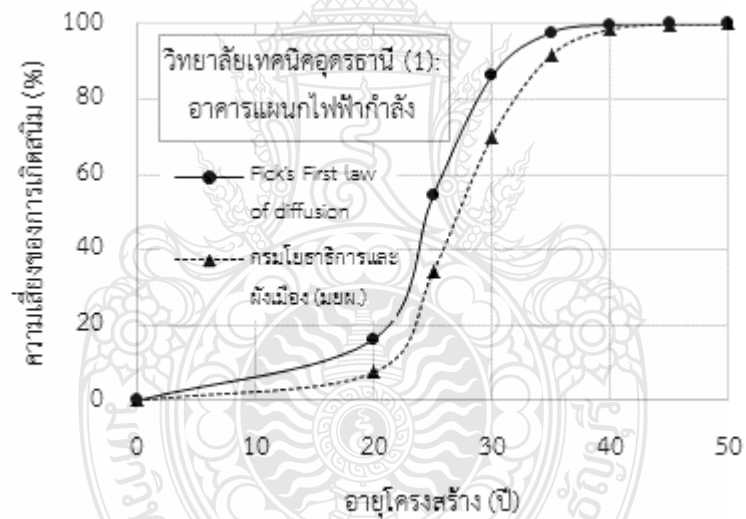
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสัณิมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารอำนวยการ วิทยาลัยเทคนิคคูคตธานี (1)



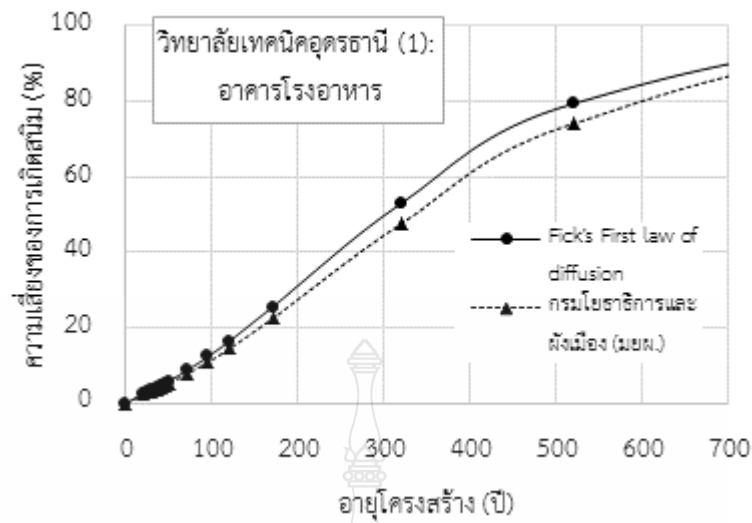
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสัณิมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารเรียน 3 วิทยาลัยเทคนิคคูคตธานี (1)



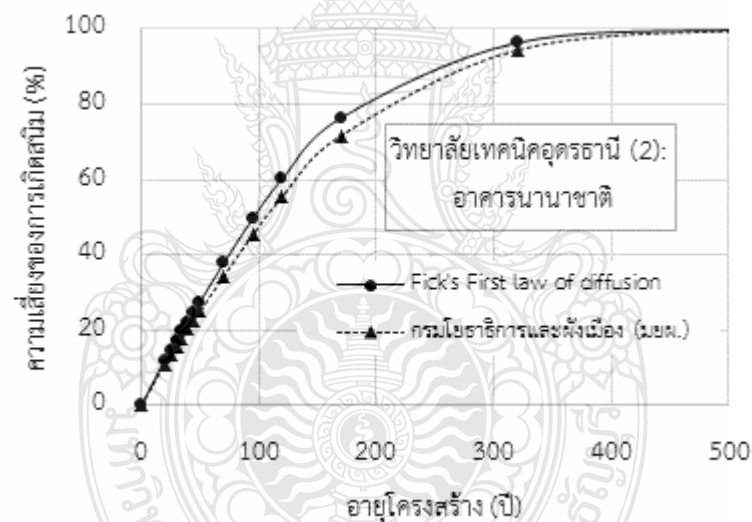
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสึนามิกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารวิชาพื้นฐาน วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1)



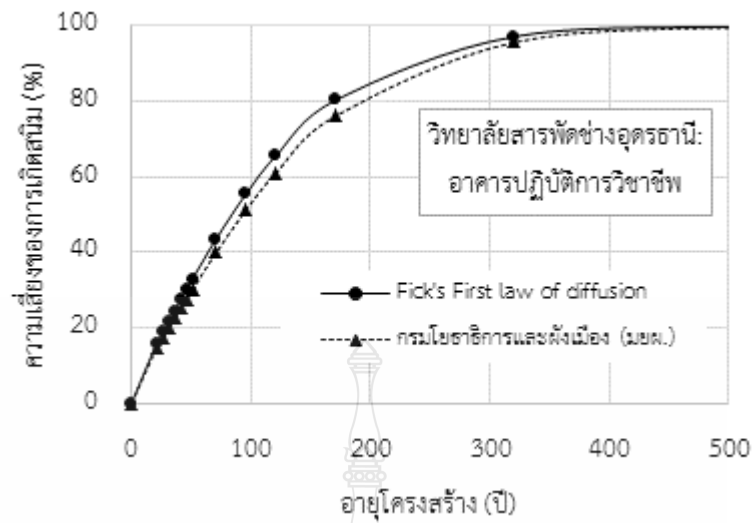
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสึนามิกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารแผนกวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1)



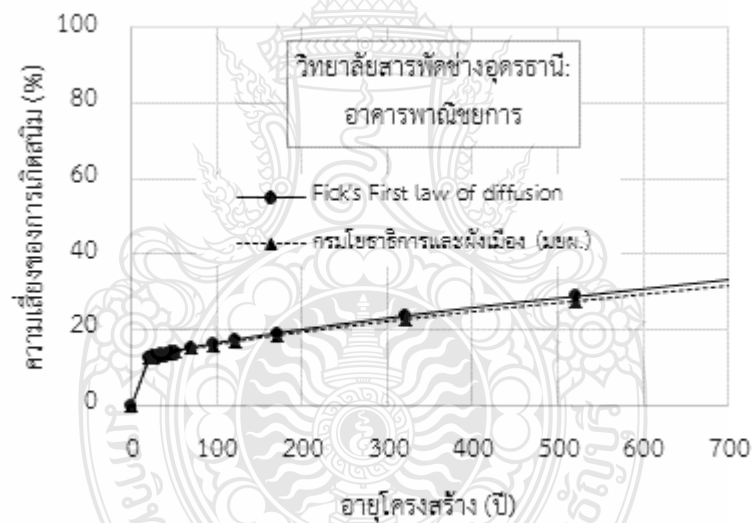
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสปีมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารโรงอาหาร วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (1)



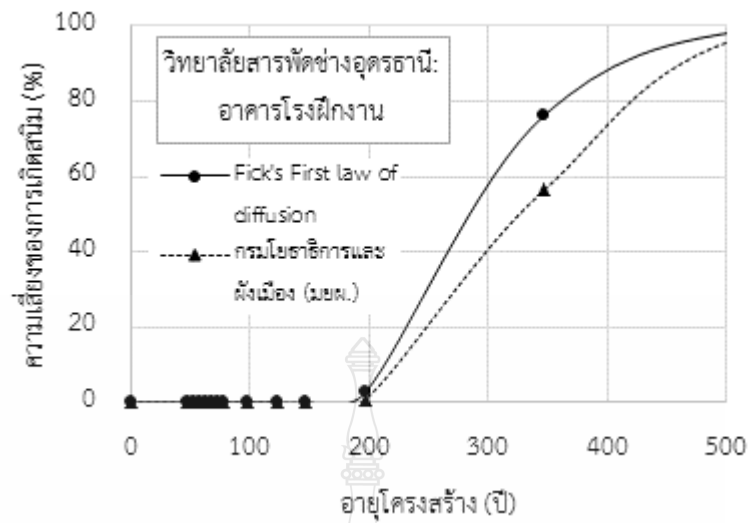
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสปีมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารนานาชาติ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (2)



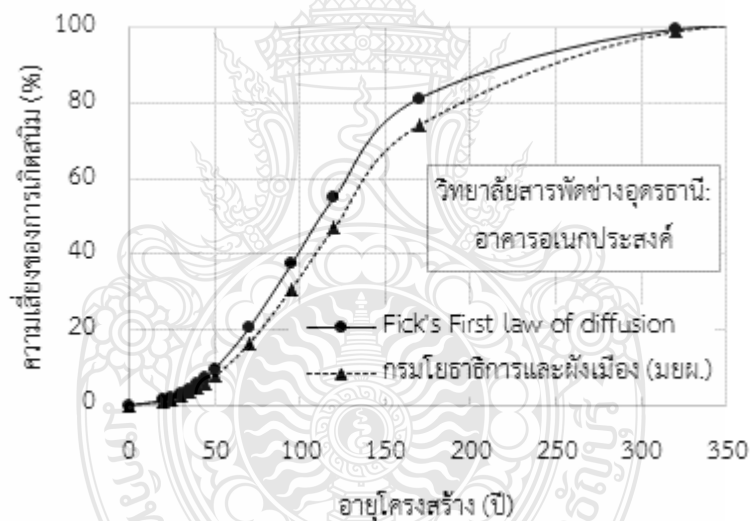
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสปีมกับอายุของโครงสร้างอาคาร กรณีอาคารปฏิบัติการวิชาชีพ วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี



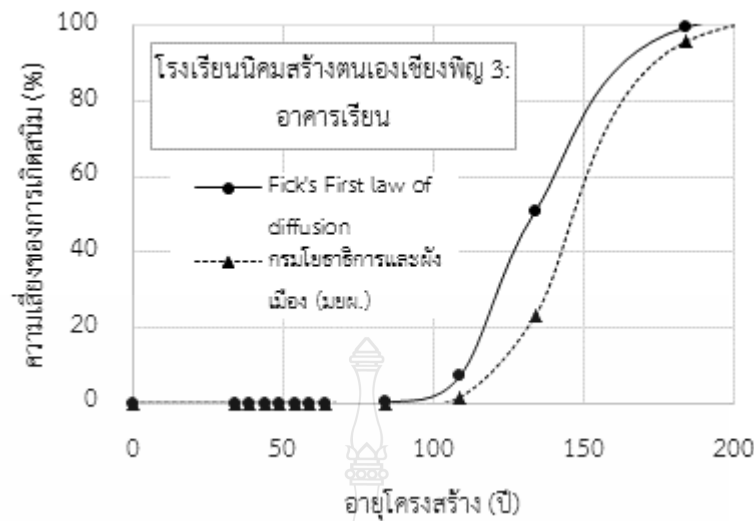
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสปีมกับอายุของโครงสร้างอาคาร กรณีอาคารพณิชยการ วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารโรงฝึกงาน วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคารกรณีอาคารอเนกประสงค์ วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงของการเกิดสนิมกับอายุของโครงสร้างอาคาร กรณีอาคารเรียน โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3

4.2.2 การทำนายอายุปลอดภัยการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชน จังหวัดอุดรธานี

จากการศึกษาการทำนายอายุปลอดภัยการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชน จังหวัดอุดรธานี ได้ผลการทดสอบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศรอบๆ พื้นที่ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานีที่ใช้ในการศึกษา ส่วนตารางที่ 4.4 แสดงระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยเฉลี่ย (x) ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นเฉลี่ย (d) และค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้นเฉลี่ย (k) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี

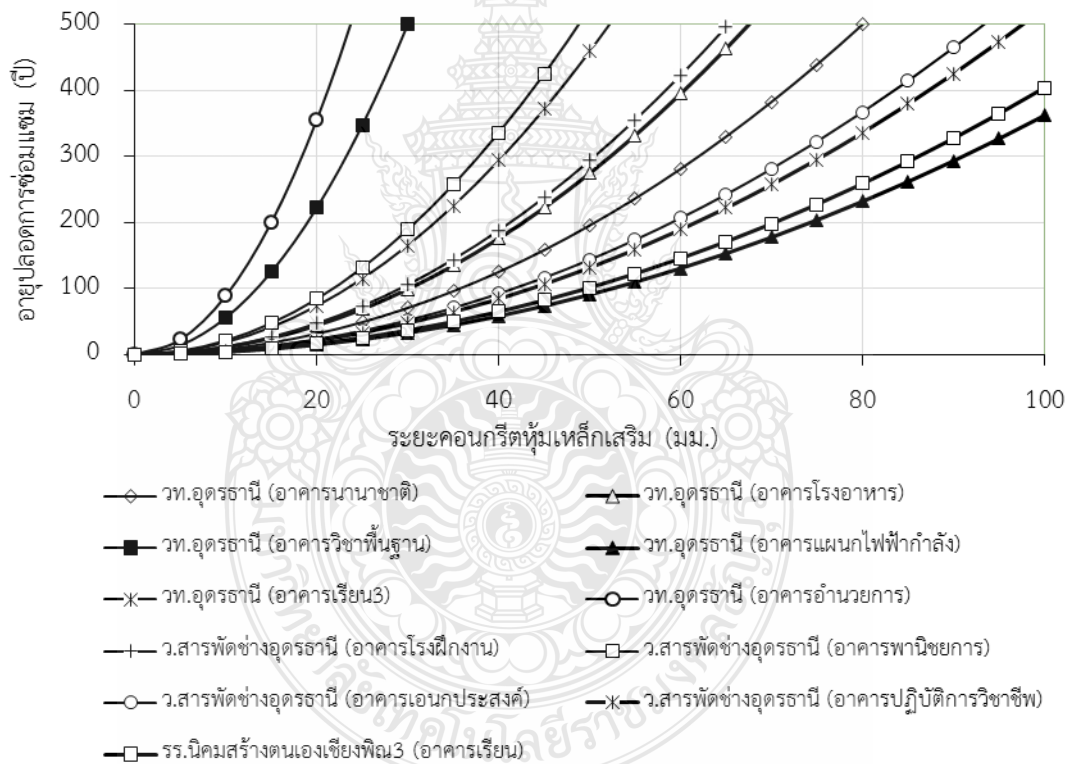
สำหรับในการศึกษาครั้งนี้นั้น ในส่วนการทำนายอายุปลอดภัยการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี จะพิจารณาการทำนายอายุโครงสร้างอาคารเรียนตามสมการ Fick's first law of diffusion และการทำนายอายุโครงสร้างอาคารเรียนตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

1) การทำนายอายุปลอดภัยการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ตามสมการ Fick's first law of diffusion

การทำนายอายุปลอดภัยการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ตามสมการ Fick's first law of diffusion โดยสมการคือ คือ $X_c = k\sqrt{t}$ ได้พิจารณาผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น ที่มีต่อการทำนายอายุปลอดภัยการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก) ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

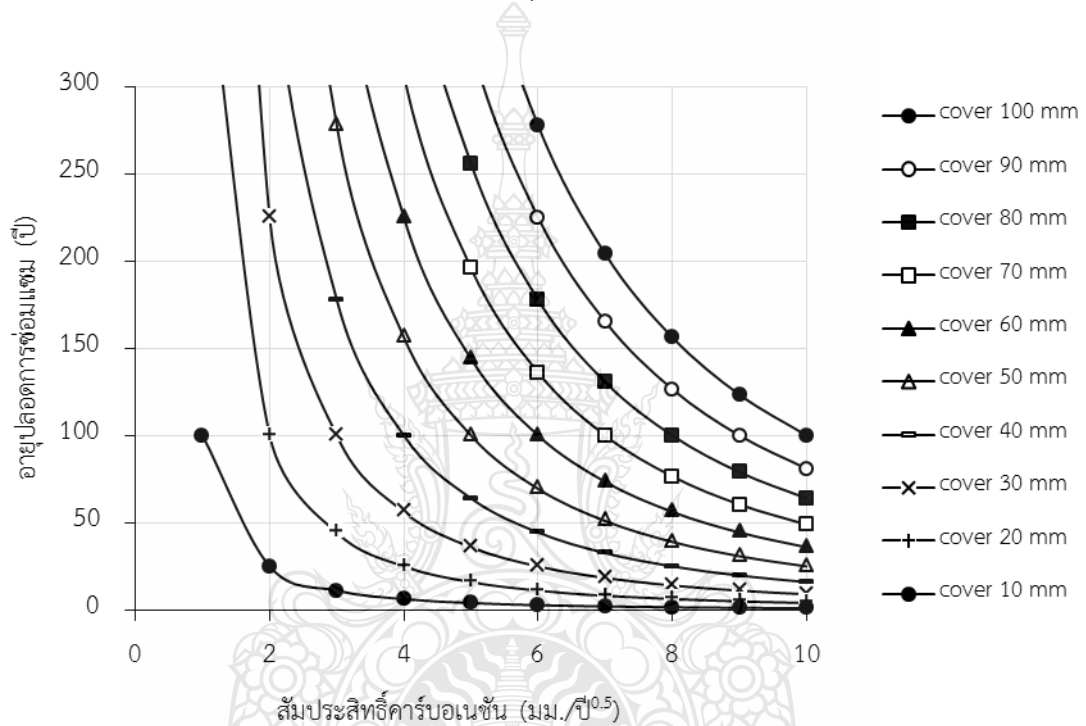
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลดการซ่อมแซมการทำนายอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion พบว่า อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ทั้ง 11 อาคารที่ศึกษาในครั้งนี้ อาคารอำนวยการ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี มีแนวโน้มมีอายุใช้งานน้อยที่สุด ในขณะที่อาคารไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี มีแนวโน้มมีอายุปลดการซ่อมแซมมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกำลังอัดประลัยของคอนกรีตของอาคารไฟฟ้ากำลังมีค่าที่มากกว่าของอาคารอำนวยการ (f_c ของอาคารอำนวยการเท่ากับ 307 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ f_c ของอาคารไฟฟ้ากำลังเท่ากับ 335 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระหว่างอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มากกว่า จะให้ค่าอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารที่นานกว่า



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion

ข) ผลจากสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน

รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion พบว่า อาคารโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันที่น้อย ทำให้อายุปลดการซ่อมแซมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนานกว่าของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันมาก และเห็นได้ชัดเจนว่าอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มากกว่า ส่งผลให้อาคารมีอายุปลดการซ่อมแซมนานกว่าของอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันกับอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ fick's first law of diffusion

2) การทำนายอายุของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

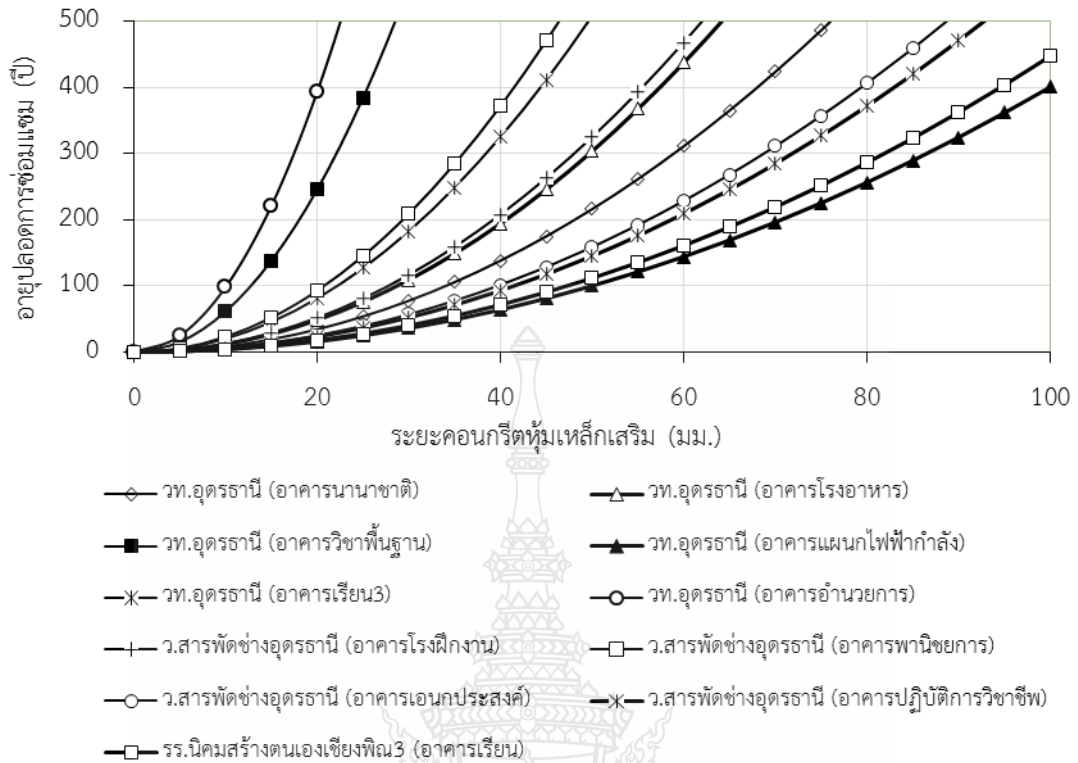
การทำนายอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ตามสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยสมการคือ $X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t}$ ได้พิจารณาผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม และผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน ที่มีต่อการทำนายอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยสัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมแสดงดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นการแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน

ก) ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

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

- กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง ซึ่งจะได้ $\alpha_1 = 0.95$ และ $\alpha_2 = 1$ ตามลำดับนั้น โดยรูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลอดการซ่อมแซมการทำนายอายุปลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง พบว่า อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี ทั้ง 11 อาคารที่ศึกษาในครั้งนี้ อาคารอำนวยการ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี มีแนวโน้มมีอายุใช้งานน้อยที่สุด ในขณะที่อาคารไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี มีแนวโน้มมีอายุปลอดการซ่อมแซมมากที่สุด ให้ผลในทิศทางเดียวกับของสมการ fick's first law of diffusion เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว





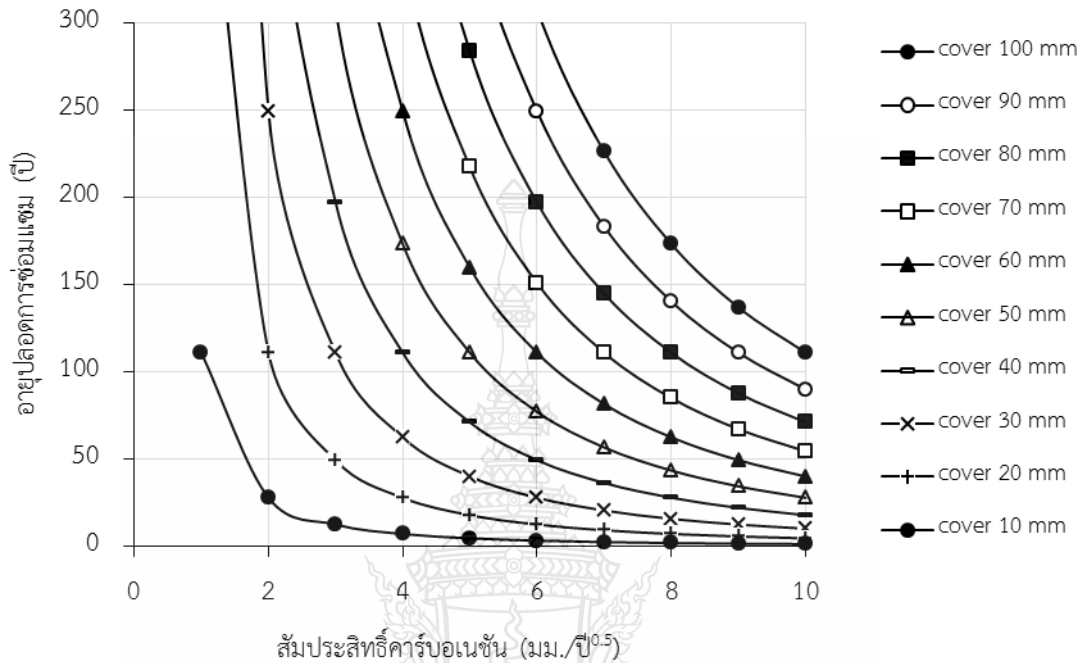
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการ และผังเมือง

ข) ผลจากสัมประสิทธิ์การบอเนชัน

ในทำนองเดียวกันเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเรชั่นรุนแรง ซึ่งจะได้ $\alpha_1 = 1$ และ $\alpha_2 = 1$ นั้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเรชั่นกับอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี จะได้ค่าเหมือนกับของสมการ fick's first law of diffusion

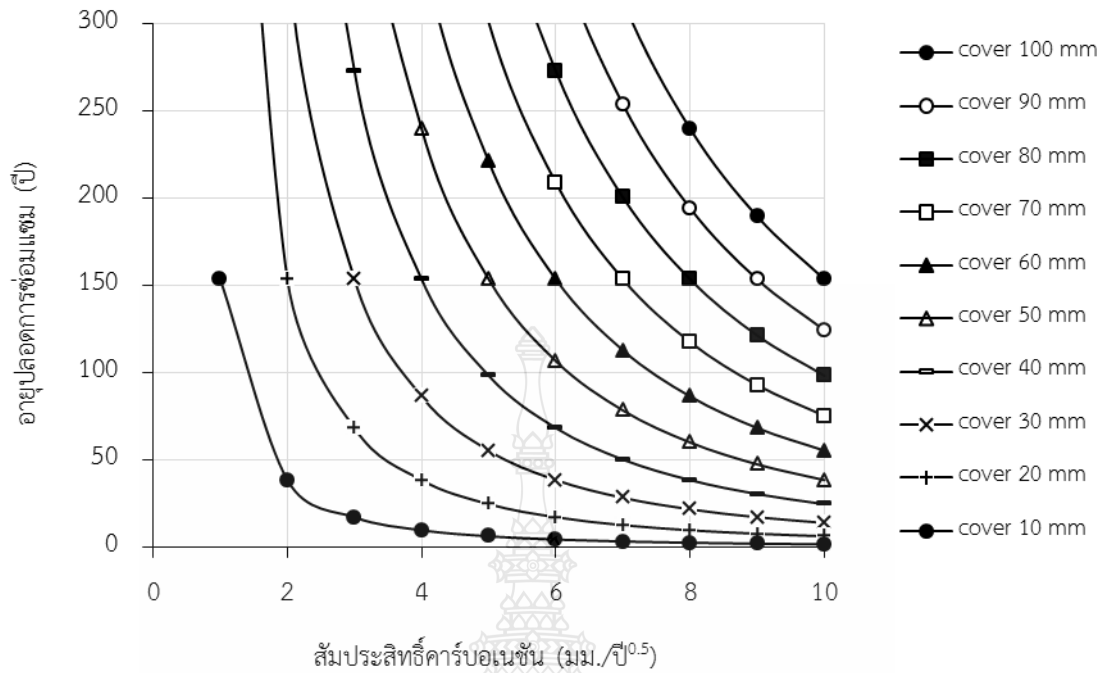
ส่วนรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การบอเนชันกับอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเรชั่นรุนแรง ซึ่งจะได้ $\alpha_1 = 0.95$ และ $\alpha_2 = 1$ ตามลำดับ พบว่าอาคารโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การบอเนชันที่น้อย ทำให้อายุปลดการซ่อมแซมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนานกว่าของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การบอเนชันมาก และเห็นได้ชัดเจนว่าอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มากกว่า ส่งผลให้อาคารมีอายุปลดการซ่อมแซมนานกว่าของอาคารที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก

เสริมที่น้อยกว่า ให้ผลเช่นเดียวกับวิธีของสมการ fick's first law of diffusion ซึ่งสามารถทำนายอายุปลดการซ่อมแซมของโครงสร้างได้เช่นกัน



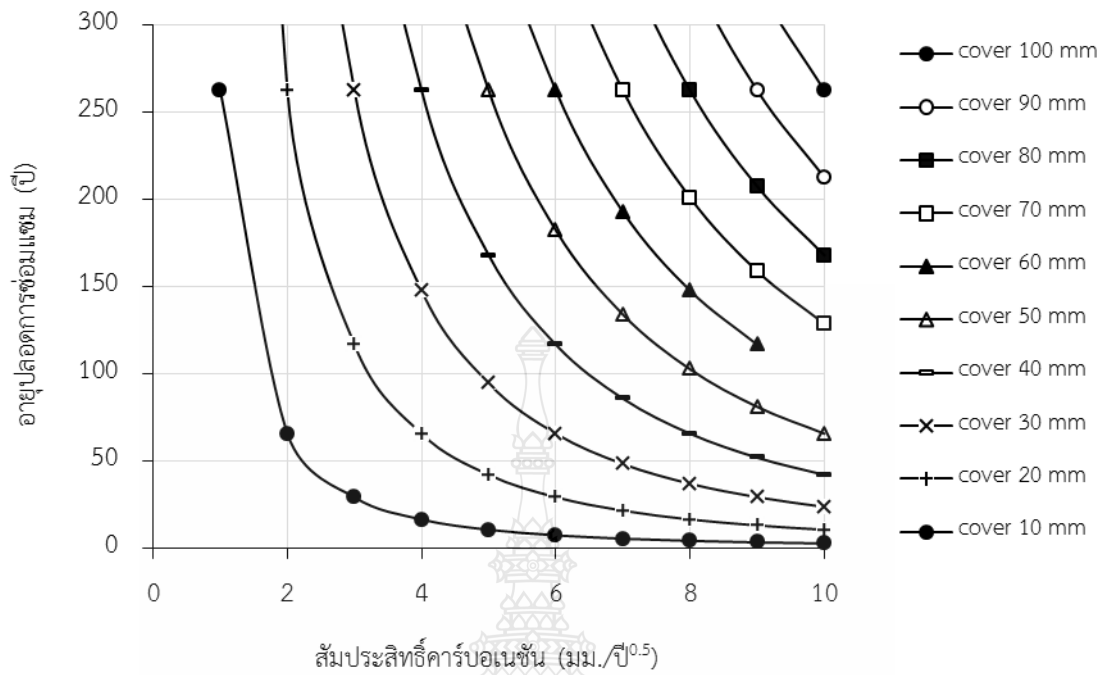
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสถานะเสี่ยงต่อคาร์บอนชันรุนแรง

รูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนชันกับอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง เมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกและสถานะเสี่ยงต่อคาร์บอนชันปานกลาง ซึ่งจะได้ $\alpha_1 = 1$ และ $\alpha_2 = 0.85$ และเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกและสถานะเสี่ยงต่อคาร์บอนชันทั่วไป ซึ่งจะได้ $\alpha_1 = 1$ และ $\alpha_2 = 0.65$ ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์คาร์บอนชันกับอายุปลดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง เมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสถานะเสี่ยงต่อคาร์บอนชันปานกลาง ซึ่งจะได้ $\alpha_1 = 0.95$ และ $\alpha_2 = 0.85$ และเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสความเปียกและสถานะเสี่ยงต่อคาร์บอนชันทั่วไป ซึ่งจะได้ $\alpha_1 = 0.95$ และ $\alpha_2 = 0.65$ ตามลำดับ ซึ่งจะให้ผลในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลอดการซ่อมแซมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยอ้างอิงสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง





รูปที่ 4.28 อายุปลดการซ่อมแซมของโครงสร้างที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันอ้างอิงสมการกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสผิวความเปียกชื้นและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันทั่วไป



บทที่ 5

สรุป

จากผลของการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความเสียหายของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน และแตกต่างกันในมากนัก โดยความเสียหายส่วนมากที่เกิดขึ้นจากภายนอกมีมากกว่าของที่เกิดขึ้นจากภายใน

2) สิ่งแวดล้อมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 993 ถึง 1,024 ppm และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 20 ถึง 29 ซึ่งจัดอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชันในระดับรุนแรง

3) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าระหว่าง 31 ถึง 57 มิลลิเมตร ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าระหว่าง 308 ถึง 339 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4) ความลึกคาร์บอนเนชันเฉลี่ยของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าอยู่ระหว่าง 14 ถึง 29 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าอยู่ระหว่าง 2.76 ถึง 4.97 มิลลิเมตร/ปี^{1/2}

5) ตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง สามารถทำนายและคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้างที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชัน ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

6) ผลจากประเมินความเสี่ยงและการทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยวิธีตามสมการ Fick's first law of diffusion ได้ความเสี่ยงที่มากกว่าและอายุการใช้งานน้อยกว่าวิธีตามสมการ มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง

บรรณานุกรม

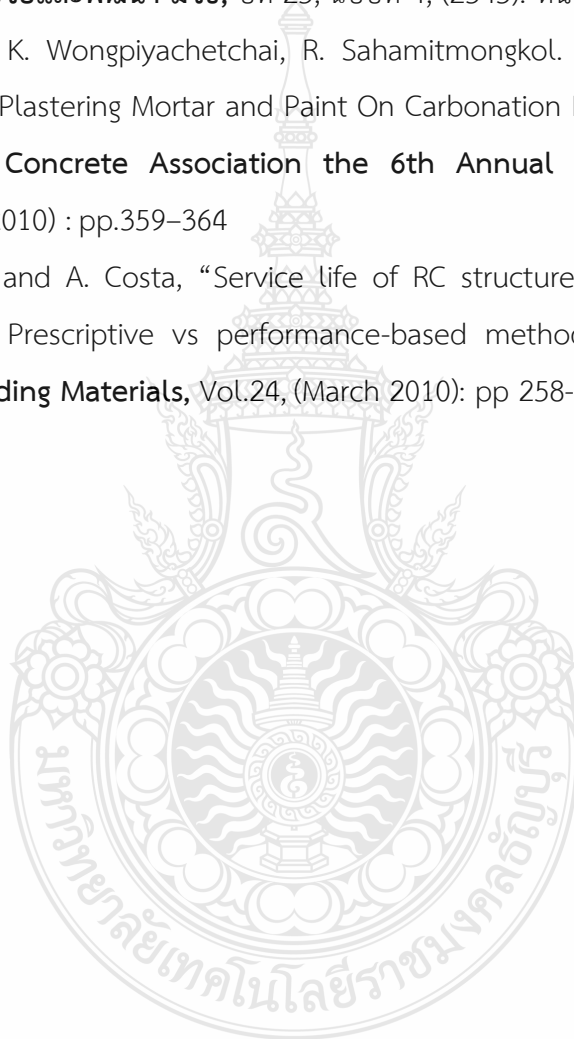
- [1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.
- [2] P. Castro, E.I. Morenob and J. Genesca, (2000). Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings, 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] Standard drawings, Kingdom of Thailand ministry of transport and communications department of highways. 1994.
- [5] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม. 2547.
- [6] มาตรฐาน มยผ. 1332 – 55, มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน, กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมวลผสมคอนกรีต. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม. 2550.
- [8] American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Concrete Aggregates. 2018.
- [9] American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. 2005.
- [10] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2018.
- [11] Standard drawings, Kingdom of Thailand ministry of transport and communications department of highways. 1994.
- [12] 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

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] H. Al-Khayat 1 , M. N. Haque I. and N. I. Fattuhi, “Concrete carbonation in arid climate,” **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, Vol. 3 5 , (August 2002) : pp 421-426.
- [17] วจน์วงศ์ กรีพละ, รัฐภูมิ ปรีชาตีปรีชา และสรรค์ สยามิภักดี, ธนากร “การสำรวจ ทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสาโครงการทางรถไฟยกระดับ,” **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 3**, (ตุลาคม 2550) : หน้า 26-34.
- [18] N.I. Fattuhi, “Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period ,” **Materials et Constructions**, Vol 1 9 , (March 1 9 8 6): pp 1-2.
- [19] 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.
- [20] S.K. Roy, K.B. Poh. and D.O. Northwood, “Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies,” **Building and Environment**, Vol 3 4 , (September 1999). pp 597-606.
- [21] 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.

บรรณานุกรม (ต่อ)

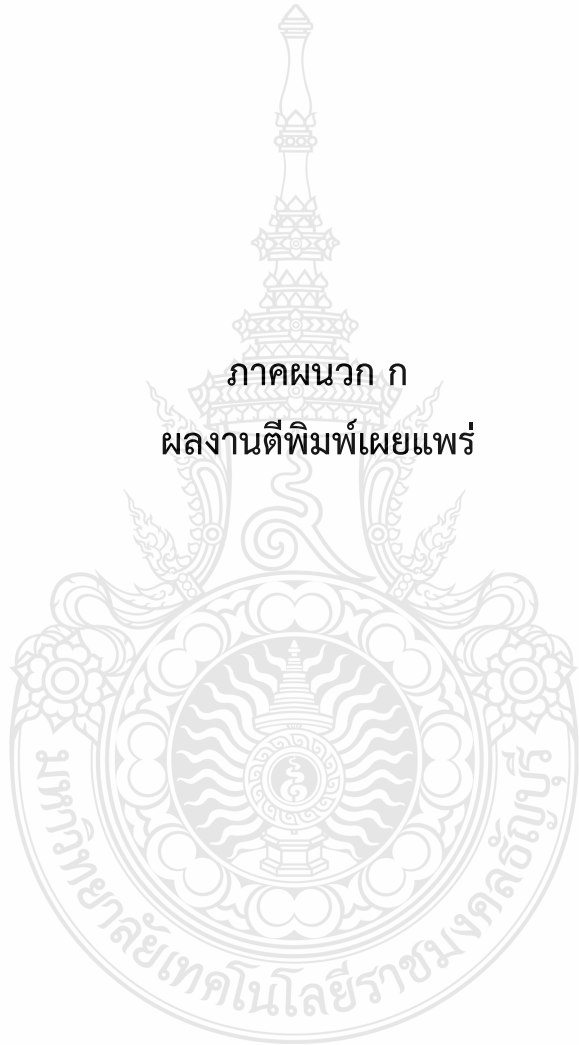
- [22] Cengiz Duran Atis, “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash,” **Construction and Building Materials**, Vol 17, (April 2003): pp.147–152.
- [23] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และทวิสันท์ คงทรัพย์ “ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว ,” **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**, ปีที่ 25, ฉบับที่ 4, (2545): หน้า 373-389.
- [24] 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
- [25] 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



ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15
การพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีต
สำหรับโครงการ EEC

25-26-27 มีนาคม 2563



ANNUAL CONCRETE CONFERENCE 15

จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
 ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น



เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ
การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15
Annual Concrete Conference 15 (ACC15)

บทความ

- ❖ บทความโดยองค์ปาฐก (Keynote)
- ❖ บทความวิจัยรับเชิญ (IVT)
- ❖ บทความวิจัย สาขาคอนกรีตและวัสดุ (MAT)
- ❖ บทความวิจัย สาขาโครงสร้างคอนกรีต (STR)
- ❖ บทความวิจัย สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต (REP)
- ❖ บทความวิจัยสาขาคอนกรีตเพื่อสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์พลังงาน (ENV)
- ❖ บทความวิจัย สาขาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยวัสดุซีเมนต์ (GTE)
- ❖ บทความวิจัย สาขาผลงานและนวัตกรรมงานคอนกรีตของผู้ประกอบการ (ICM)

25-27 มีนาคม 2563

โรงแรมระยองรีสอร์ท

อำเภอบ้านเพ จังหวัดระยอง

จัดทำโดย

- ❖ สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ร่วมกับ

- ❖ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
- ❖ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สงวนลิขสิทธิ์ © ตาม พรบ.ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2521 โดยสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ.
2563 จำนวน 150 เล่ม

คำนำ

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15 เป็นความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.) วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น จัดขึ้นระหว่างวันที่ 25-27 มีนาคม 2563 ณ โรงแรมระยองรีสอร์ท อำเภอบ้านเพ จังหวัดระยอง ภายใต้หัวข้อ “การพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีตสำหรับโครงการ EEC” โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เป็นเวทีในการเผยแพร่ความรู้ นำเสนองานวิจัย และแสดงความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีคอนกรีตของประเทศ เพื่อมุ่งพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศและ EEC และให้นักวิชาการ อาจารย์ นักวิจัย นิสิต วิศวกร ผู้ประกอบการ รวมถึงผู้ปฏิบัติงานด้านคอนกรีตได้ทราบถึงเทคโนโลยีใหม่ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ในการประชุมครั้งนี้สมาคมฯ ได้รับเกียรติวิทยากรจากหน่วยงานภาครัฐ บริษัทเอกชน และบริษัทก่อสร้างที่สำคัญในประเทศที่มีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับงานด้านคอนกรีตและมอร์ตาร์ซึ่งเชื่อว่าผู้เข้าร่วมประชุมจะได้รับประโยชน์จากการประชุมครั้งนี้อย่างมาก นอกเหนือจากการนำเสนอเนื้อหาของงานวิจัยทางด้านคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ สุดท้ายแล้วยังมีการนำเสนองานที่น่าสนใจที่ได้รับรางวัล TCA Concrete Practice award รวมนำเสนอผลงานก่อสร้างภายในงานดังกล่าว

ในฐานะของคณะผู้จัดการประชุมครั้งนี้ ขอขอบคุณ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น วิทยากรรับเชิญ ผู้เขียนบทความ ผู้นำเสนอบทความ ผู้เข้าร่วมประชุม บริษัทและห้างร้านต่างๆ ที่ได้สนับสนุนการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 15 เป็นอย่างดีซึ่งทำให้การประชุมครั้งนี้ ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

- สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

สารบัญ

	หน้า
คณะกรรมการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย	2
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาโครงสร้างคอนกรีต	3
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง	4
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต	6
คณะกรรมการกลุ่มมอर्टาร์	7
สำนักเลขาธิการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย	8
คณะทำงานฝ่ายประชาสัมพันธ์ และสื่อสารองค์กร	8
คณะกรรมการอำนวยการจัดประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยพะเยา	9
คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15	9
กำหนดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15	11
สารบัญบทความ	18
ผู้สนับสนุน	401

กำหนดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15
The 15th Annual Concrete Conference (ACC15)
(Interactive Online Conference)
วันที่ 25-27 มีนาคม พ.ศ. 2563

วันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 25, 2020]

พิธีเปิดการประชุมวิชาการ
ห้องที่ 1(ชื่อเดิม Rayong Grand Ballroom)

ผู้ดำเนินรายการ: รศ.ดร. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร

13.00-13.30 น. กล่าวต้อนรับผู้เข้าร่วมการประชุมและกล่าวขอบคุณผู้สนับสนุนการจัดการประชุม
มอบรางวัล TCA Concrete Practice Awards (Opening ACC15)
โดยนายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (President of TCA)
พิธีเปิดการประชุมและกล่าวขอบคุณผู้สนับสนุน
โดยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาหรือผู้แทน

13.45น. เป็นต้นไป การบรรยายพิเศษ(Keynote Speaker)ห้องที่ 1(Rayong Grand Ballroom)
“Development of Concrete Technology for Eastern Economic Corridor”

ประธานภาค : รศ.ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร

13.45 – 14.45น. “การทำนายพฤติกรรมคอนกรีตเพื่อการประยุกต์ใช้งานและจัดทำมาตรฐาน (Modeling of Concrete Behavior for Applications and Standard Establishment)”
โดย ศ.ดร. สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล

14.45 – 15.45น. นำเสนอผลงาน TCA Concrete Practice Awards(Gold Medal)
โครงการ Rose Wood Hotel Project
โดย ดร.อัศวิน วาณิชย์กกุล,Aurecon Consulting (Thailand) Co.,Ltd.

15.45 – 16.00น. พักรับประทานอาหารว่าง

16.00 – 16.30 น. บทความวิจัย เรื่อง “บริบทคอนกรีตกับงานก่อสร้าง ภายใต้สมาคมซีเมนต์
และคอนกรีตโลก (Global Concrete and Cement Association, GCCA)”
โดยคุณณัฐวุฒิ อินทรส Co-chairman Future of Construction, GCCA

16.30 – 17.00น. 16th International Congress on the Chemistry of Cement, ICC2023 in
Bangkok Thailand

17:00-17:30 น. แนะนำเจ้าภาพ ACC16มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 26, 2020]

- 08.30 – 10.15 น. **หัวข้อบรรยายพิเศษ** ห้องที่ 1 (ชื่อเต็ม Rayong Grand Ballroom)
“Development of Construction Technology for EEC’s Infrastructure”
 ประธานภาค : ผศ.ดร.ชูชัย สุจิวิกรกุล
- 08.30– 08.55 น. “Non Sludge and High Strength Technology for Spun Pile Production”
 โดย Mr. Thanakit Kittimongkol (R&D, Infrastructure Business, KAO)
- 08.55–09.20 น. “Admixture to Improve RC Segment Production with Thickening Control Technology”
 โดย Mr. Anuwat Poontavorn (R&D Manager, Infrastructure Business, KAO)
- 09.20 – 09.45 น. “Investigation of Heat Transfer Behavior and Sound Insulation Relating to Biomimicry Design of 3D Printing Panel”
 โดย Mr.Kittisak Pongpaisanseree, SCG
- 09.45 – 10.10 น. “การประเมินความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟความเร็วสูงบนสะพานด้วยวิธีการทดสอบ และการวิเคราะห์แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพาน: กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิงค์(Running Safety Assesment of High Speed Train Over a Viaduct via Experiment and Bridge-Train Dynamic Interaction Simulation: A Case Study of Thailand Airport Rail Link Project)”
 โดย ผศ.ดร.รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา, มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 26, 2020]

- 08.30 – 10.15 น.การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 2 (ชื่อเต็ม Banphe Grand Ballroom)
 ประธานภาค : ผศ.ดร.เกียรติสุดา สมณา
 รองประธานภาค : รศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุกาฬ

MAT-001	การตรวจสอบรอยร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในรูปแบบมัลติสเกลโดยการประมวลผลภาพ Piyawat Tonsrisakul
MAT-003	สมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาละเอียด Sathit Larpthaikarn
MAT-004	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย Chanawit koedsri
MAT-005	การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียก Naragon Sudthamnong
MAT-006	ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก Ditthawat Dangchum

MAT-007	การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้ในงานอุตสาหกรรมด้วยอัลคาไลน์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง <i>ธนภุต เทพอุโมงค์</i>
MAT-008	ผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและการขยายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ <i>Surasit Pohboon</i>

8.30 – 10.15 น. การนำเสนอบทความวิจัยห้องที่ 3 (ชื่อเต็ม Samet Room)

ประธานภาค : ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกรธัช

ICM-002	นวัตกรรมคอนกรีตเบาเซลล์กรีต <i>อภัย ชาภิรมย์, อีรวรรณสินศิริ</i>
ICM-004	Rheological property of cement containing supplementary cementitious material <i>THANAKRIT CHANTRA</i>
ICM-005	A direct test method to assess pozzolanic activity of fly ash for concrete <i>Pornwit Anansup</i>
ICM-006	ปูนซีเมนต์สำหรับงานคอนกรีตไม่อัดแรง <i>Teepakorn Napharatsamee</i>
ICM-007	การใช้หลักการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับทำนายความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต <i>Oraya Assawanawachart</i>
ICM-008	Natural Rubber Powder for Construction Applications <i>Nanticha Kalapat</i>
ICM-009	Non-shrink grout <i>Phattarakamon Chaipayoom</i>
GTE-002	COMPRESSIVE STRENGTH OF RECYCLED BASED MATERIALS IMPROVED BY POLYVINYLALCOHOL AND CEMENT <i>Chaiwat waree</i>

10.15 – 10.30 น. พักการบรรยาย

10.30 – 12.15 น. การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 1 (ชื่อเต็ม Rayong Grand Ballroom)

ประธานภาค : รศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ

MAT-009	INFLUENCES OF FINE AGGREGATE TYPES AND CONTENTS ON COMPRESSIVE STRENGTH AND RADIATION SEIELDING OF CONCRETE <i>Saranyoo Srirach</i>
MAT-010	การศึกษาเบื้องต้นการประยุกต์ใช้แผ่น viscoelastic polymer ในการปรับปรุงคุณสมบัติการสันสะเทือนและเสียงในแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ <i>Jirawin Sanguansin</i>
MAT-011	EFFECT OF GRAPHENE OXIDE ON BOND STRENGTH OF STEEL FIBER <i>Suriyawan Kongtun</i>
MAT-012	THE EFFECT OF GRAPHENE OXIDE IN BOND STRENGTH OF SYNTHETIC FIBERS <i>Apisit Techaphatthanakon</i>

MAT-015	ผลกระทบของโซเดียมพอลิอะคริเลตต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูง <i>Chalisa Intamat</i>
---------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------

10.30 – 12.15 น. การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 2 (ชื่อเดิม Banphe Grand Ballroom)

ประธานภาค : ผศ.ดร.รัฐพล สมณา

รองประธานภาค : รศ.ดร.ณัฐพงศ์ คำรงวิริยะนภาพ

STR-002	พฤติกรรมการเสริมกำลังโครงสร้างเจตียในจังหวัดพะเยา <i>Akarachai Jaima</i>
STR-003	TESTING OF EFFICIENCY OF CONCRETE-FILLED STEEL SQUARE TUBE COLUMNS AFTER EXPOSURE TO ELEVATED TEMPERATURES <i>Apichat Tipcharoen</i>
STR-004	SURVEY ON CARBONATION RATE OF RC BUILDING STRUCTURES IN COMMUNITY AREA OF UDON THANI PROVINCE <i>Apisit Pamvad, ปิติศานต์ กร้ามาตร, Pinyo Poyen</i>
MAT-016	อิทธิพลของโพลีเมอร์ต่อกำลังอัดของดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ <i>กฤษณะพัฒน์ เจนปิยพงศ์</i>
MAT-017	USE OF GEOPOLYMER MORTAR AS REPAIR MATERAIL CONCRETE EXPOSE MAGNESIUM SUNFATE <i>BOONLERT SRIOPAS</i>
MAT-035	อิทธิพลของวัสดุโพลีเมอร์ที่มีต่อคุณสมบัติการตัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว <i>Chuchai Sujivorakul, Jiraporn Jaratguy, Namfon Kanin</i>

10.30 – 12.15 น. การนำเสนอบทความวิจัยห้องที่ 3(ชื่อเดิม Samet Room)

ประธานภาค : ผศ.ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล

MAT-018	EFFECTS OF FLY ASH AND EXPANSIVE ADDITIVE ON SHRINKAGE CRACKING AND CHLORIDE PENETRATION RESISTANCES OF CONCRETE <i>Warangkana Saengsoy</i>
MAT-019	Comparison of water permeability between laboratory test and in place test for pervious concrete <i>Mano Promde</i>
MAT-022	การเปรียบเทียบระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังต่ำ <i>กวาดล ไยยินดี, ชัชฎาสู่ บุญมี, Kittipoom Rodsin</i>
MAT-024	เส้าปาล์มน้ำมันและเส้าถ่านหินจีโอโพลีเมอร์ที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง <i>ประชุม คำพณ, เกียรติสุตา สมณา, rattapon somna</i>
MAT-025	Effects of Expansive Additive on Setting Time and Compressive Strength of Alkali-Activated High-Calcium Fly Ash <i>Sakonwan Hanjitsuwan, Borwonrak Injorhor, Nattawat Sohsungnoen, Tanisom sohsungnoen, Phattarapol Chanwanna, Akaraphol Wachum, Chattarika Phiangphimai, Tanakorn Phoo-ngernkham</i>

MAT-037	INFLUENCE OF BURNISHING PROCESS ON SURFACE HARDNESS AND ABRASION RESISTANCE OF CONCRETE WITH DIFFERENT TYPES OF BINDER <i>Udom Kong, Narongchai Phuangkong, Raktipong Sahamitmongkol</i>
---------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

12.15 – 13.15 น. พักการบรรยาย

วันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 26, 2020]

13.30 - 15.30 น. **ชมการบรรยายพิเศษและการสาธิตผลิตภัณฑ์ของงานคอนกรีตและมอร์ตาร์**
ห้องที่ 1 (ชื่อเดิม Rayong Grand Ballroom)

ประธานภาค : น.อ.รศ.ดร.ธนากร วีระพันธุ์

13.30 – 14.00 น. การสาธิตผลิตภัณฑ์ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

14.00 – 14.30 น. การสาธิตผลิตภัณฑ์ของบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด

14.30 – 15.00 น. การสาธิตผลิตภัณฑ์ของบริษัท ซีพีโก้ จำกัด (มหาชน)

15.00– 15.30 น. แนะนำConcrete Asia 2020 ของ บริษัท IMPACT Exhibition Management จำกัด

วันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2563 [March 27, 2020]

08.30 – 11.30 น. **การบรรยายพิเศษผลงานประกวด TCA Concrete Practice Award**
ห้องที่ 1 (ชื่อเดิม Rayong Grand Ballroom)

ประธานภาค : ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช

08.30 – 09.00 “การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการไฟฟ้าพลังน้ำ
ไชยะบุรี”

โดย บริษัท ช.การช่าง(ลาว) จำกัด(มหาชน), TCA Silver Medal

09.00 - 09.30 น. “CPAC High Strength Concrete First Concrete Grade 80 MPa Supplied for
Commercial Building in Thailand”

โดย บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, TCA Silver Medal

09.30 – 10.00น. “การก่อสร้างระบบพื้นแบบกลวงรับแรงสองทาง (BIAXIAL SLAB) ของอาคารสำนักงาน T-
ONE BUILDING”

โดย บริษัท เจนเนอรัล เอนจิเนียริง จำกัด (มหาชน), TCA Concrete PracticeAward

- 10.00 – 10.30 น. "การก่อสร้างฐานรากด้วยเสาเข็มสับ (Spun pile) และระบบติดตั้งเสาเข็มเจาะลำเรือรูป (Double rod auger) โครงการ The Uppergrounds"
โดย บริษัท เจนเนอรัล เอนจิเนียริง จำกัด (มหาชน), TCA Concrete Practice Award
- 10.30 – 11.00 น. "คอนกรีตสำหรับงานฐานรากและกำแพงกันดินระดับลึกมาก (Tremie concrete for very deep foundation and retaining wall)"
โดย ดร. ชยานันท์ บุญยรักษ์,
ผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรม, บริษัท ซีพีโก้ จำกัด (มหาชน)

วันที่ 27 มีนาคม 2563 [March 27, 2020]

- 08.30 – 11.30 น. การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 2 (ชื่อเดิม Banphe Grand Ballroom)
ประธานภาค : ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด

MAT-026	Compressive Strength of Concrete with Recycled Asphalt Pavement Aggregates under Tropical Temperatures <i>Jirayut Suebsuk</i>
MAT-027	Effect of Temperatures on Compressive Strength and Microstructure of Cement Mortar with Recycled Asphalt Pavement Aggregates <i>Jirayut Suebsuk</i>
MAT-028	Factors of Na ₂ SiO ₃ /NaOH Ratio and Portland Cement Content on Setting time, Compressive and Slant Shear Strengths of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar <i>Chirdsakul Lathulee, Thawatchai Sarachot, Sirichaj Chobrak, Natthasin Wichit, Khattiya Chompoovong, Chudapak Detphan, ศศคุณ เดชพันธุ์, Tanakorn Phoo-ngernkham</i>
MAT-029	Workability, Strength and Chloride Diffusion Coefficient of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Incorporated with Silica Fume <i>Akaraphol Wachum, Sirivat Woravong, Songwut Klaoram, Mongkhon Phonsen, Chattarika Phiangphimai, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ, Nattapong Damrongwiriyanupap, Tanakorn Phoo-ngernkham</i>
MAT-030	Development of Alkali-Activated Material Made From High-Calcium Fly Ash Containing Limestone Powder as Rendering Mortar <i>Tanakorn Phoo-ngernkham, Chattarika Phiangphimai, Sawat Guankrathok, Chudapak Detphan, Khattiya Chompoovong, ศศคุณ เดชพันธุ์, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ, Piti Sukontasukkul</i>
MAT-031	ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF REINFORCING STEEL CORRODED BY CARBONATION <i>Sothyarak Rath, Pakawat Sancharoen</i>
MAT-032	Effects of High Volume of Bottom Ash on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of High Strength Recycled Aggregate Concrete <i>Nakarin Nakararoj, Weerachart Tangchirapat, Chai Jaturapitakkul</i>

08.30 – 11.30 น. การนำเสนอบทความวิจัยห้องที่ 3(ชื่อเดิม Samet Room)

ประธานภาค : ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์

รองประธานภาค : ดร.ยุทธ ปณิธานวงศ์

ENV-001	ผลกระทบของเถ้าชีวมวลที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพต่อสมรรถนะการไหลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและกำลังอัดของคอนกรีตชนิดอัดตัวแน่นได้เอง <i>Chaipak Suwachart</i>
MAT-033	INFLUENCES OF SODIUM HYDROXIDE SOLUTION AND CALCIUM CARBIDE RESIDUE TO FLY ASH RATIOS ON COMPRESSIVE STRENGTH AND ABRASION RESISTANCE OF ALKALI-ACTIVATED MORTAR <i>Puntana Suttiprapa, Weerachart Tangchirapat , Chai Jaturapitakkul</i>
MAT-034	Mechanical Properties of High Performance Concrete Using Ground Bottom Ash and Limestone Powder as a Cement Replacement <i>Piyanat Charoenamnuaysuk, Pakawat Pommoon, Weerachart Tangchirapat , Anuwat Attachaiyawuth, Chai Jaturapitakkul</i>
MAT-036	ผลกระทบของซิลิกาฟุ่ม เถ้าแกลบบด และเถ้าลอยต่อการพฤติกรรมการก่อตัว กำลังอัด และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในซีเมนต์เพสต์ <i>Mongkhon Namluk, Phongphat Muleephan, Itinun Tesson, Thanakan Zatang</i>

11.30 –12.00น. ปิดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15



สารบัญบทความ

การบรรยายพิเศษ (Keynote Speaker)	หน้า
Keynote-001 การทำนายพฤติกรรมคอนกรีตเพื่อการประยุกต์ใช้งานและจัดทำมาตรฐาน (Modeling of Concrete Behavior for Applications and Standard Establishment) <i>ศ.ดร.สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล</i>	24
Keynote-002 บริบทคอนกรีตกับงานก่อสร้าง ภายใต้สมาคมซีเมนต์และคอนกรีตโลก (Global Concrete and Cement Association, GCCA) <i>คุณณัฐวุฒิ อินทรส</i>	70
บทความวิจัย สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง (MAT)	หน้า
MAT-001 การตรวจสอบรอยร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในรูปแบบมัลติสเกลโดยการประมวลผลภาพ <i>Piyawat Tonsrisakul</i>	79
MAT-003 สมบัติของคอนกรีตผสมเถ้ากันเทาละเอียด <i>Sathit Larphthai kam</i>	85
MAT-004 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันและเถ้ากันเทาแทนที่ทราย <i>Chanawit koedsri</i>	93
MAT-005 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเปียก <i>Naragon Sudthamnong</i>	102
MAT-006 ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก <i>Ditthawat Dangchum</i>	111
MAT-007 การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้ในงานอุตสาหกรรมด้วยอัลตราโซนิกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง <i>ธนกฤต เทพอุโมงค์</i>	118
MAT-008 ผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ <i>Surasit Pohboon</i>	124
MAT-009 INFLUENCES OF FINE AGGREGATE TYPES AND CONTENTS ON COMPRESSIVE STRENGTH AND RADIATION SEIELDING OF CONCRETE <i>Saranyoo Srirach</i>	132
MAT-010 การศึกษาเบื้องต้นการประยุกต์ใช้แผ่น viscoelastic polymer ในการปรับปรุงคุณสมบัติการสั่นสะเทือนและเสียงในแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ <i>Jirawin Sanguansin</i>	140

การสำรวจอัตราการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี

SURVEY ON CARBONATION RATE OF RC BUILDING STRUCTURES
IN COMMUNITY AREA OF UDON THANI PROVINCEอภิสิทธิ์ ปาทาวต¹ (Apisit Patavat)¹ปิติศานต์ กร้ามาต² (Pitisan Krammart)²ปิญโญ โพธิ์เย็น² (Pinyo Poyen)³¹นักศึกษานิเทศศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีEmail: apisit.m.eng@gmail.com²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีEmail: pitisan.k@en.rmutt.ac.th³วิศวกร บริษัท บาโอ คอนสตรัคชั่น จำกัดEmail: pinyopoyen248650@gmail.com

บทคัดย่อ : การศึกษานี้เป็นการตรวจสอบการเกิดคาร์บอนเนชันของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนจังหวัดอุดรธานี โดยทำการวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม วัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมและประเมินกำลังอัดประลัยของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก พร้อมเจาะเก็บชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนเนชันของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในพื้นที่วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี ในพื้นที่วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี และในพื้นที่โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3 โดยข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์การเกิดคาร์บอนเนชันและทำนายอายุของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้สมการของ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานการออกแบบความคงทนสำหรับโครงสร้างที่เผชิญคาร์บอนเนชันของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) ผลการศึกษาพบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าระหว่าง 31 ถึง 57 มิลลิเมตร และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าระหว่าง 308 ถึง 339 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนความลึกคาร์บอนเนชันเฉลี่ยของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าอยู่ระหว่าง 14 ถึง 29 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าอยู่ระหว่าง 2.76 ถึง 4.97 มิลลิเมตร/ปี^{1/2} สุดท้ายด้วยวิธีการตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐาน มยผ. สามารถทำนายและคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้างที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชัน ตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

คำสำคัญ: โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนเนชัน การทำนายอายุการใช้งาน จังหวัดอุดรธานี

ABSTRACT: This study was an investigation on the carbonation depth of RC building structures in community area of Udon Thani province. Carbon dioxide (CO₂) concentration and relative humidity (RH) of the environment, cover thickness and compressive strength of RC building structures, and carbonation depth of RC building structures were measured. In this study, the RC building structures were selected in 3 area of Udon Thani province, namely Udonthani Technical College, Udonthani Polytechnic College and Nikomsrangtonengchappin 3 School. The study results were analyzed the occurrence and the effect on the carbonation depth of RC building structures. The predict for free service life of RC building 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 RC building structures had the average of the cover thickness and the average of the compressive strength as 31-57 mm and 308-339 kg/cm², respectively. Besides, the average of the carbonation depth and the average of the carbonation coefficient of RC building structures were 14-29 mm and 2.76-4.97 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 PDS exposed to CO₂, the result can be used in the design, planning and maintenance of reinforced concrete structures faced by the carbonation environment as well as preventing damage that will occur in the future.

KEYWORDS: RC building structure, Carbon dioxide, Carbonation, Service life prediction, Udon Thani province

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การนำมาใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ อาทิ อาคารหรือโครงสร้างสาธารณะ หรือนำคอนกรีตมาหล่อขึ้นรูป และตกแต่งรูปทรงตามที่ต้องการ ถึงแม้ว่าคอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้สูง แต่ถ้าคอนกรีตมีการก่อสร้างในสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพ ก็จะทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตแตกต่างกัน ซึ่งสภาพแวดล้อมเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพเนื่องจากปัญหาความคองทนได้ เช่น การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่น คลอไรด์ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในเขตที่มีการจราจรหนาแน่น หรือในเขตเมืองจะมีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในปริมาณที่สูง ก๊าซ CO₂ ดังกล่าวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการ $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ซึ่งทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมเกิดสนิมได้ จากผลการวิจัยในอดีตพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น จากผลงานวิจัยในอดีตของ Roy et al [1] พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 ถึง 75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูง ส่วนในกรณีของ Castro et al [2] พบว่าตำแหน่งที่ตั้งอาคารห่างจากทะเลประมาณ 100 ถึง 200 เมตร มีแนวโน้มอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และระดับความสูงเพิ่มขึ้นของอาคารตัวอย่าง ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ Khunthongkeaw et al [3] พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงและปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งต่างก็มี

ส่วนทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) จึงทำให้ความลึกคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น อย่างไรก็ตามก็ยังไม่มีการตระหนักอย่างเพียงพอถึงการวางแผนและการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีผลกระทบต่อความเสี่ยงสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชั่นอย่างจริงจัง รวมถึงการนำมาตรฐานการออกแบบต่าง ๆ ที่ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพให้อยู่ในเกณฑ์ที่ป้องกันได้ในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ มาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตที่แพร่หลาย จึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายเนื่องจากการคาร์บอนเนชั่น เป็นผลให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลงตามลำดับ

จังหวัดอุดรธาณินั้นเป็นศูนย์กลางการคมนาคมและการท่องเที่ยวทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นประตูสู่ประเทศลาว ดินแดนอินโดจีน และดินแดนที่มีอารยธรรมเก่าแก่แห่งหนึ่งของโลก นอกจากนี้ยังมีแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติ มีการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งจังหวัดอุดรธาณินั้นมีสนามบินที่สามารถรองรับผู้โดยสาร และมีเที่ยวบินมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และการเตรียมตัวสู่กับการบินของภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนเชื่อมกับอนุภูมิภาคกลุ่มน้ำโขง ทำให้นักท่องเที่ยวเดินทางเข้าประเทศไทยมากขึ้น และการฟื้นตัวของเศรษฐกิจย่อมมีผลให้สภาพมลภาวะในตัวเมืองมีการเพิ่มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากยิ่งขึ้น ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในตัวเมืองอุดรธาณินั้นโดยตรง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการสำรวจการเกิดคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนของจังหวัดอุดรธาณินั้น ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างสูง ทำให้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าว มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมเนื่องจากการคาร์บอนเนชั่นสูง โดยข้อมูลที่ได้สามารถเป็นฐานข้อมูลที่นำไปใช้ในการพิจารณาออกแบบให้มีความสอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริง โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ชุมชนจังหวัดอุดรธาณินั้น ตลอดจนวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การคัดเลือกตัวอย่างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการสำรวจการเกิดคาร์บอนเนชั่น พร้อมทั้งประเมินความเสียหาย และการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชนของจังหวัดอุดรธานี ในครั้งนี้ประกอบด้วย การตรวจสอบด้วยตาเปล่า การวัดความชื้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าวตั้งอยู่ การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม การประเมินกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาทดสอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการเพื่อหาระยะความลึกคาร์บอนเนชั่น โดยได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างจากโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมืองอุดรธานีที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง ทั้งหมด 3 พื้นที่ จำนวน 11 อาคาร ได้แก่ พื้นที่ที่ 1) วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี จำนวน 6 อาคาร ได้แก่ อาคารอำนวยการ อาคารเรียน 3 อาคารวิชาพื้นฐาน อาคารไฟฟ้ากำลัง อาคารโรงอาหาร และอาคารนานาชาติ พื้นที่ที่ 2) วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี จำนวน 4 อาคาร ได้แก่ อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ อาคารพานิชยกรรม อาคารโรงฝึกงาน และอาคารเอนกประสงค์ และ พื้นที่ที่ 3) โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3 จำนวน 1 อาคารเรียน โดยอายุโครงสร้างที่เลือกมาศึกษาในครั้งนี้ มีอายุตั้งแต่ 20 ถึง 50 ปี (โดยประมาณ)

2.2 การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในการตรวจวัดครั้งนี้ใช้เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยี่ห้อ EXTECH รุ่น CO250 เก็บวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่น ทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด 1 เดือน (เดือนเมษายน) ใน 1 เดือนเก็บค่าทั้งหมด 4 วัน โดยในแต่ละวันทำการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงเวลา คือ

ช่วงเช้า (เวลาประมาณ 9 ถึง 10 นาฬิกา) ช่วงเที่ยง (เวลาประมาณ 12 ถึง 13 นาฬิกา) และช่วงเย็น (เวลาประมาณ 17 ถึง 18 นาฬิกา) ซึ่งการเก็บข้อมูลดังกล่าวจะเก็บในวันเดียวกันทั้ง 3 พื้นที่ ทั้งนี้การวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ครั้งนี้เป็นการวัด ณ ช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่ใช่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ตลอดทั้งปี อย่างไรก็ตามเพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดคาร์บอนเนชั่นของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่วัดได้ ณ ช่วงเวลาดังกล่าว

2.3 การวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

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

2.4 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ

ในการทดสอบกำลังอัดประลัยของโครงสร้างคอนกรีตในครั้งนี้ ใช้ค้อนกระทบแบบชมิทท์ (Schmidt Hammer) ทำการทดสอบวัดค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต (ภาพที่ 2) เก็บค่าการสะท้อนกลับของคอนกรีต 20 ค่าต่อ 1 ตำแหน่งการทดสอบ โดยจุดที่มีการวัดค่าการสะท้อนแต่ละครั้งต้องห่างกันประมาณ 25 มิลลิเมตร ในส่วนของค่าการสะท้อนของ Schmidt Hammer สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัด ของคอนกรีตโดยอ้างอิงการประมาณค่าตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (1) (Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2005)

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

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



ภาพที่ 1 การวัดระยะ
คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม



ภาพที่ 2 วิธีการทดสอบ
กำลังอัด ประลัยของ
โครงสร้างคอนกรีต โดยใช้
ค้อนกระแทกแบบชนิดดี



ภาพที่ 3 การเจาะตัวอย่าง
คอนกรีตเพื่อทดสอบความ
ลึกคาร์บอนเนชัน



ภาพที่ 4 การทดสอบและวัด
ความลึกคาร์บอนเนชัน

2.5 การเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบความลึกคาร์บอนเนชัน

การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตด้วยสว่าน BOSCH หัวเจาะ HOLESAW (ภาพที่ 3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร ตำแหน่งที่เจาะสูงจากระดับพื้นดินประมาณ 1 ถึง 1.5 เมตร และการเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่างคอนกรีตลึกประมาณ 4 ถึง 5 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาจากแบบโครงสร้างและพื้นที่ก่อสร้างจริง ซึ่งพิจารณาจากโครงสร้างหลักและสัมพันธ์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ โดยแต่อาคารโครงสร้างเจาะเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่างต่อ 1 อาคาร จากนั้นทำการผ่าซีกชิ้นตัวอย่าง ผิดด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์เพื่อวัดระยะคาร์บอนเนชัน

การทดสอบความลึกคาร์บอนเนชัน โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะ นำมาผ่าซีกดังแสดงในภาพที่ 4 โดยการฉีดฟีนอล์ฟธาไลน์ไปยังคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้ว ถ้าผิวของคอนกรีตที่ถูกฉีดเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้ม แสดงว่ายังไม่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน หากคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน จากนั้นวัดค่าระยะความลึกคาร์บอนเนชันจากระยะความหนาของคอนกรีตที่ยังคงสีเดิมอยู่ไปจนถึงจุดตัดของสีชมพูเข้ม

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้การพัฒนาความลึกคาร์บอนเนชันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการเกิดคาร์บอนเนชันนั้น ต้องอาศัยปัจจัยที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ โดยค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชันในระดับรุนแรงมีค่าเท่ากับ 400 ppm เป็นต้นไป ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 60 (ความชื้นสัมพัทธ์ถึงขั้นกึ่งแห้ง) จัดว่าเป็นสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดคาร์บอนเนชันรุนแรงเช่นกัน [5] เมื่อปัจจัยทั้งสองด้านมีความเสี่ยงในระดับที่สูงย่อมทำให้การเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชันสูงขึ้นตามลำดับ สำหรับภาพรวมของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ (ตารางที่ 1) พบว่า มีความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูงคือ 966 ถึง 1,023 ppm ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการเกิดระยะคาร์บอนเนชันที่ค่อนข้างชัดเจน ส่วนความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่างร้อยละ 20 ถึง 29

3.2 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

จากการวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมดที่ศึกษาในครั้งนี้พบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ยทั้ง 3 สถานที่ คือ ของวิทยาลัยเทคนิคอุตรดิตถ์เท่ากับ 31 มิลลิเมตร ของวิทยาลัย

สารพัดช่างอุดรธานีเท่ากับ 53 มิลลิเมตร และของโรงเรียน
นิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3 เท่ากับ 57 มิลลิเมตร

3.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

จากผลการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต
โดยวัดการสะท้อนกลับของผิวของคอนกรีตด้วยค้อน
กระทบ (Schmidt Hammer) ของโครงสร้างอาคาร
คอนกรีตเสริมเหล็กที่ศึกษา พบว่า กำลังอัดประลัยของ
คอนกรีตของอาคารทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าเฉลี่ย (โดยประมาณ)
มากกว่า 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ตารางที่ 2)

3.4 ความลึกคาร์บอนเนชัน

สำหรับความลึกคาร์บอนเนชันเฉลี่ยของโครงสร้าง
อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในบริเวณของทั้ง 3 พื้นที่
แสดงดังตารางที่ 2 โดยโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3 มีแนวโน้ม
ของความลึกคาร์บอนเนชัน (29 มิลลิเมตร) ที่มากกว่าของที่ตั้ง
อยู่ในพื้นที่วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี (18 มิลลิเมตร)
และของที่ตั้งอยู่ในพื้นที่วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (14
มิลลิเมตร) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสภาพของสิ่งแวดล้อม
โดยเฉพาะความชื้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่าง
สภาพอายุการใช้งานที่ต่างกัน รวมทั้งคุณภาพของคอนกรีต
ที่ใช้ในการก่อสร้างของแต่ละพื้นที่อาจมีส่วนที่ต่างกัน

โดยสมการ Fick's first law of diffusion เมื่อ
ทราบอายุของโครงสร้างและความลึกคาร์บอนเนชัน สามารถ
คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันได้จากสมการ
 $d = k\sqrt{t}$ โดยที่ d คือค่าความลึกคาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร) t
คือ อายุของโครงสร้าง (ปี) และ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความ
ลึกคาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร / ปี^{1/2})

จากผลการทดสอบโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริม
เหล็ก สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน (k)
(ตารางที่ 2) พบว่า โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่
ตั้งอยู่ในพื้นที่โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3 มีค่า
สัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันสูงกว่าของที่ตั้งอยู่ในพื้นที่วิทยาลัย
สารพัดช่างอุดรธานี และที่ตั้งอยู่ในพื้นที่วิทยาลัยเทคนิคอุดร
ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม

พื้นที่ที่ตรวจสอบ	อายุ (โดยประ มาณ) (ปี)	ความเข้มข้น ก๊าซคาร์บอนได ออกไซด์ (ppm)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	20-50	993	29
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	20-50	966	20
โรงเรียนนิคมสร้าง ตนเองเชียงพิณ 3	34	1,023	27

ตารางที่ 2 กำลังอัดประลัย ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม
ความลึกคาร์บอนเนชัน และสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน

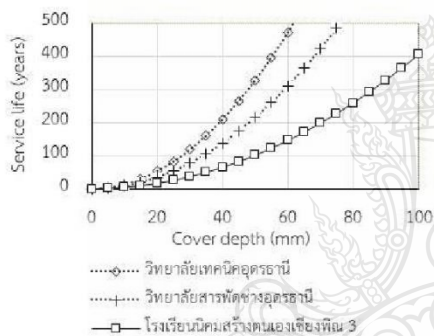
พื้นที่ที่ ตรวจสอบ	กำลังอัด ประลัย (กก./ซม. ²)	ระยะ คอนกรีต หุ้มเหล็ก เสริม (มม.)	ความลึก คาร์ บอนเนชัน (มม.)	สปส. ความลึกคาร์ บอนเนชัน (มม./ปี ^{1/2})
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	332	31	14	2.76
วิทยาลัยสารพัด ช่างอุดรธานี	308	53	18	3.41
โรงเรียนนิคม สร้างตนเอง เชียงพิณ 3	339	57	29	4.97

3.5 การทำนายอายุโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
ตามสมการ Fick's first law of diffusion

3.5.1 ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

เมื่อพิจารณาโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่
สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง โครงสร้าง
เหล่านี้มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชัน
ในอัตราที่สูง ซึ่งปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันทำให้ความเป็นต่าง
ของคอนกรีตลดลง และส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ใน
ที่สุด จนทำให้โครงสร้างเกิดความวิบัติขึ้นตามมา ดังนั้นการ
วางแผนเพื่อจะให้โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุ
การใช้งานที่ยาวนานขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยภาพที่ 5 ได้

แสดงกราฟทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion คือ $d = k\sqrt{t}$ พบว่าที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากัน จะทำให้อายุการใช้งานโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในพื้นที่โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเขียงพิณ 3 น้อยกว่าของวิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี และของวิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น อายุของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สภาพแวดล้อม ณ บริเวณที่ตั้งอาคาร และคุณภาพคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้าง เป็นต้น และจากภาพที่ 5 นี้สามารถทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งในเขตแต่ละสถานที่ได้

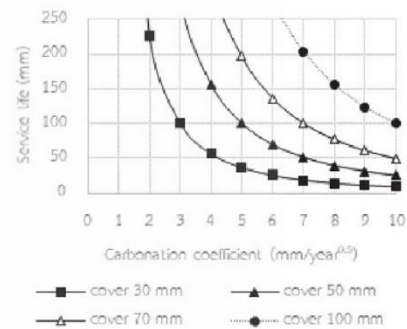


ภาพที่ 5 อายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม อ้างอิงสมการ Fick's first law of diffusion

3.5.2 ผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน

จากค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน (ตารางที่ 2) สามารถทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน โดยใช้สมการ Fick's first law of diffusion คือ $d = k\sqrt{t}$ ได้ตั้งภาพที่ 6 โดยในภาพดังกล่าวได้เสนอแนวคิดให้โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีการออกแบบให้ระยะหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างเท่ากับ 30 50 70 และ 100 มิลลิเมตร พบว่า โครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันน้อยจะทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริม

เหล็กมีมากกว่าของโครงสร้างที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันมาก ในขณะที่เดียวกันที่สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันเท่ากัน พบว่า โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมมากกว่าจะมีอายุการใช้งานที่มากกว่า



ภาพที่ 6 อายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน อ้างอิงสมการ Fick's first law of diffusion

3.6 การทำนายอายุโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

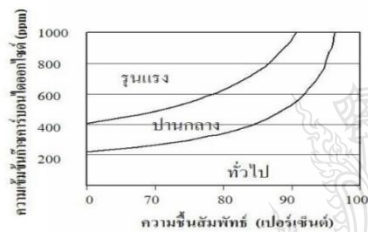
มาตรฐานการออกแบบของกรมโยธาธิการและผังเมืองเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการออกแบบได้ [5] โดยใช้สมการ $X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t}$ โดยที่ x_c คือ ความลึกคาร์บอนเนชัน (มิลลิเมตร) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ α_1 คือ สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น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

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชันสามารถกำหนดได้โดยใช้ภาพที่ 7 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้างในช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอาจต้องคาดการณ์ล่วงหน้าไปในอนาคต และ k คือ

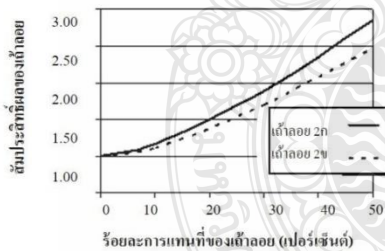
สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน ดังสมการ $k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3$ เมื่อ w/b คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดย k_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ วสท. 1014-46) ดังภาพที่ 8

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน [5]

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	α_2
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอนเนชันรุนแรง	1.00



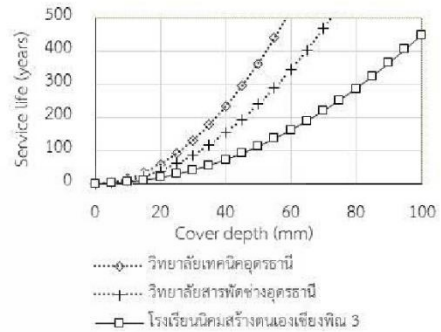
ภาพที่ 7 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอนเนชัน [5]



ภาพที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน [5]

3.6.1 ผลจากระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

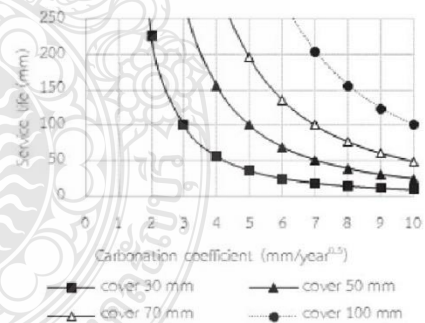
ผลจากการทำนายอายุที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามมาตรฐาน มยผ. ดังภาพที่ 9 ซึ่งมีอายุการใช้งานไปในทิศทางเดียวกันกับสมการ Fick's first law of diffusion



ภาพที่ 9 อายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามระยะหุ้มเหล็กอ้างอิงมาตรฐาน มยผ.

3.6.2 ผลจากสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชัน

จากผลสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน (ตารางที่ 2) สามารถทำนายอายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชัน โดยใช้มาตรฐาน มยผ. ได้เช่นกัน (ภาพที่ 10) โดยในภาพดังกล่าวได้เสนอแนวคิดให้ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 30 50 70 และ 100 มิลลิเมตร เหมือนกับวิธีของสมการ Fick's first law of diffusion ซึ่งสามารถทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างได้



ภาพที่ 10 อายุการใช้งานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่แปรผันตามสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชันอ้างอิงมาตรฐาน มยผ.

จากการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในเขตจังหวัดอุดรธานี ตามสมการ Fick's first law of diffusion และตามมาตรฐาน มยผ. โดยการใช้ระยะหุ้มเหล็กเสริม และค่าสัมประสิทธิ์คาร์

บอเนชันเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ เพื่อทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถนำไปใช้ในการวางแผนออกแบบ บำรุงรักษาโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งในเขตจังหวัดอุดรธานีที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชันตลอดจนป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

4. สรุป

จากผลของการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1) สิ่งแวดล้อมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 993 ถึง 1,023 ppm และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 20 ถึง 29 ซึ่งจัดอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนเนชันในระดับรุนแรง

2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าระหว่าง 31 ถึง 57 มิลลิเมตร ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าระหว่าง 308 ถึง 339 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

3) ความลึกคาร์บอนเนชันเฉลี่ยของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 3 พื้นที่ มีค่าอยู่ระหว่าง 14 ถึง 29 มิลลิเมตร ส่วนสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนเนชันมีค่าอยู่ระหว่าง 2.76 ถึง 4.97 มิลลิเมตร/ปี^{1/2}

4) ตามสมการ Fick's first law of diffusion และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง สามารถทำนายและคำนวณอายุการใช้งานของโครงสร้างที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวางแผนดูแลบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมคาร์บอนเนชัน 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.



ภาคผนวก ข
ข้อมูลการปฏิบัติงาน

ภาคผนวกที่ ข1 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารนานาชาติ
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี 2

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	44		3	
A2	42		1	
A3	44		3	
A4	45		4	
A5	39		-2	
B1	37		-4	
B2	38		-3	
B3	38		-3	
B4	44		3	
B5	42	40.95	1	333.264
C1	44		3	
C2	40		-1	
C3	40		-1	
C4	41		0	
C5	40		-1	
D1	38		-3	
D2	42		1	
D3	40		-1	
D4	41		0	
D5	40		-1	

ภาคผนวกที่ ข2 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารนาชาติ
วิทยาลัยเทคนิคอุตรธานี 2 (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	35		-2	
A2	38		1	
A3	38		1	
A4	39		2	
A5	39		2	
B1	32		-5	
B2	36		-1	
B3	38		1	
B4	37		0	
B5	42	37.25	5	287.2135
C1	36		-1	
C2	34		-3	
C3	36		-1	
C4	38		1	
C5	39		2	
D1	40		3	
D2	33		-4	
D3	40		3	
D4	36		-1	
D5	39		2	

ภาคผนวกที่ ข3 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารนานาชาติ
 วิทยาลัยเทคนิคอุตรธานี 2 (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	f_c' (ksc)
A1	42			1
A2	42			1
A3	40			-1
A4	42			1
A5	40			-1
B1	40			-1
B2	42			1
B3	42			1
B4	42			1
B5	42	41.2		1
C1	42			1
C2	44			3
C3	42			1
C4	40			-1
C5	42			1
D1	40			-1
D2	40			-1
D3	42			1
D4	38			-3
D5	40			-1

336.3752

ภาคผนวกที่ ข4 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารโรงอาหาร
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	f_c' (ksc)
A1	42		1	
A2	42		1	
A3	41		0	
A4	42		1	
A5	44		3	
B1	44		3	
B2	42		1	
B3	38		-3	
B4	44		3	
B5	43		2	
C1	40	40.90	-1	332.641
C2	40		-1	
C3	39		-2	
C4	42		1	
C5	40		-1	
D1	42		1	
D2	39		-2	
D3	36		-5	
D4	39		-2	
D5	39		-2	

ภาคผนวกที่ ข5 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารโรงอาหาร
วิทยาลัยเทคนิคอุตรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	34		-4	
A2	33		-5	
A3	35		-3	
A4	35		-3	
A5	36		-2	
B1	32		-6	
B2	36		-2	
B3	36		-2	
B4	36		-2	
B5	38	37.750	0	293.437
C1	38		0	
C2	40		2	
C3	40		2	
C4	42		4	
C5	38		0	
D1	40		2	
D2	40		2	
D3	44		6	
D4	40		2	
D5	42		4	

ภาคผนวกที่ ข6 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารวิชาพื้นฐาน
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	50		3	
A2	49		2	
A3	49		2	
A4	46		-1	
A5	48		1	
B1	46		-1	
B2	47		0	
B3	48		1	
B4	48		1	
B5	42	46.75	-5	405.451
C1	48		1	
C2	50		3	
C3	46		-1	
C4	51		4	
C5	44		-3	
D1	44		-3	
D2	43		-4	
D3	42		-5	
D4	50		3	
D5	44		-3	

ภาคผนวกที่ ข7 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารวิชาพื้นฐาน
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	f_c' (ksc)
A1	44		4	
A2	38		-2	
A3	40		0	
A4	34		-6	
A5	40		0	
B1	44		4	
B2	40		0	
B3	40		0	
B4	44		4	
B5	42	40.250	2	324.552
C1	40		0	
C2	40		0	
C3	40		0	
C4	38		-2	
C5	40		0	
D1	42		2	
D2	39		-1	
D3	42		2	
D4	38		-2	
D5	40		0	

ภาคผนวกที่ ข8 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารไฟฟ้ากำลัง
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	40		-1	
A2	37		-4	
A3	40		-1	
A4	40		-1	
A5	40		-1	
B1	42		1	
B2	41		0	
B3	40		-1	
B4	40		-1	
B5	42		1	
C1	43	40.65	2	329.530
C2	42		1	
C3	40		-1	
C4	41		0	
C5	40		-1	
D1	42		1	
D2	44		3	
D3	39		-2	
D4	38		-3	
D5	42		1	

ภาคผนวกที่ ข9 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารไฟฟ้ากำลัง
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	41		-1	
A2	48		6	
A3	39		-3	
A4	44		2	
A5	43		1	
B1	36		-6	
B2	41		-1	
B3	40		-2	
B4	44		2	
B5	46		4	
C1	40	41.550	-2	340.731
C2	42		0	
C3	44		2	
C4	41		-1	
C5	41		-1	
D1	36		-6	
D2	42		0	
D3	36		-6	
D4	45		3	
D5	42		0	

ภาคผนวกที่ ข10 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารเรียน 3
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	43		0	
A2	40		-3	
A3	43		0	
A4	41		-2	
A5	40		-3	
B1	43		0	
B2	38		-5	
B3	45		2	
B4	45		2	
B5	42	43.05	-1	359.400
C1	42		-1	
C2	44		1	
C3	42		-1	
C4	45		2	
C5	44		1	
D1	48		5	
D2	43		0	
D3	43		0	
D4	48		5	
D5	42		-1	

ภาคผนวกที่ ข11 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารเรียน 3
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	f_c' (ksc)
A1	46		5	
A2	40		-1	
A3	42		1	
A4	42		1	
A5	38		-3	
B1	40		-1	
B2	43		2	
B3	43		2	
B4	46		5	
B5	37	41.400	-4	338.864
C1	42		1	
C2	42		1	
C3	43		2	
C4	36		-5	
C5	35		-6	
D1	42		1	
D2	43		2	
D3	47		6	
D4	39		-2	
D5	42		1	

ภาคผนวกที่ ข12 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารอำนวยการ
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	42		-2	
A2	48		4	
A3	49		5	
A4	46		2	
A5	44		0	
B1	47		3	
B2	42		-2	
B3	47		3	
B4	44		0	
B5	48	44.10	4	372.469
C1	48		4	
C2	42		-2	
C3	42		-2	
C4	32		-12	
C5	37		-7	
D1	44		0	
D2	44		0	
D3	42		-2	
D4	46		2	
D5	48		4	

ภาคผนวกที่ ข13 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารอำนวยการ
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	30		-4	
A2	34		0	
A3	36		2	
A4	34		0	
A5	32		-2	
B1	34		0	
B2	32		-2	
B3	34		0	
B4	38		4	
B5	36	33.650	2	242.408
C1	34		0	
C2	34		0	
C3	34		0	
C4	36		2	
C5	32		-2	
D1	30		-4	
D2	32		-2	
D3	32		-2	
D4	33		-1	
D5	36		2	

ภาคผนวกที่ ข14 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารโรงฝึกงาน
วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	f_c' (ksc)
A1	38		2	
A2	39		3	
A3	39		3	
A4	38		2	
A5	38		2	
B1	36		0	
B2	39		3	
B3	39		3	
B4	34		-2	
B5	34	36.00	-2	271.656
C1	34		-2	
C2	34		-2	
C3	34		-2	
C4	34		-2	
C5	34		-2	
D1	34		-2	
D2	35		-1	
D3	35		-1	
D4	38		2	
D5	34		-2	

ภาคผนวกที่ ข15 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารโรงฝึกงาน
วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	f_c' (ksc)
A1	31		-3	
A2	32		-2	
A3	34		0	
A4	36		2	
A5	36		2	
B1	30		-4	
B2	32		-2	
B3	34		0	
B4	36		2	
B5	35	34.050	1	247.386
C1	34		0	
C2	32		-2	
C3	32		-2	
C4	36		2	
C5	36		2	
D1	31		-3	
D2	34		0	
D3	35		1	
D4	36		2	
D5	39		5	

ภาคผนวกที่ ข16 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(f_c') ของอาคารโรงฝึกงาน
วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	f_c' (ksc)
A1	40			4
A2	36			0
A3	36			0
A4	36			0
A5	36			0
B1	35			-1
B2	31			-5
B3	32			-4
B4	32			-4
B5	34	35.600		-2
C1	38			2
C2	36			0
C3	37			1
C4	36			0
C5	35			-1
D1	40			4
D2	34			-2
D3	36			0
D4	36			0
D5	36			0

266.678

ภาคผนวกที่ ข17 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารพานิชยกรรม
วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	44		1	
A2	42		-1	
A3	44		1	
A4	42		-1	
A5	42		-1	
B1	40		-3	
B2	47		4	
B3	42		-1	
B4	44		1	
B5	42	43.40	-1	363.756
C1	44		1	
C2	45		2	
C3	42		-1	
C4	46		3	
C5	44		1	
D1	42		-1	
D2	42		-1	
D3	44		1	
D4	44		1	
D5	46		3	

ภาคผนวกที่ ข18 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc') ของอาคารพานิชยกรรม
วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	39		-3	
A2	38		-4	
A3	38		-4	
A4	44		2	
A5	42		0	
B1	42		0	
B2	40		-2	
B3	38		-4	
B4	44		2	
B5	44		2	
C1	38	41.800	-4	343.843
C2	41		-1	
C3	44		2	
C4	42		0	
C5	40		-2	
D1	46		4	
D2	43		1	
D3	45		3	
D4	44		2	
D5	44		2	

ภาคผนวกที่ ข19 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc')

ของอาคารอเนกประสงค์ วิทยาลัยสารพัดช่างอุตรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	44		3	
A2	40		-1	
A3	42		1	
A4	42		1	
A5	42		1	
B1	42		1	
B2	40		-1	
B3	44		3	
B4	44		3	
B5	40	41.05	-1	334.508
C1	42		1	
C2	41		0	
C3	42		1	
C4	40		-1	
C5	42		1	
D1	40		-1	
D2	40		-1	
D3	36		-5	
D4	40		-1	
D5	38		-3	

ภาคผนวกที่ ข20 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc')

ของอาคารอเนกประสงค์ วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	38		1	
A2	37		0	
A3	36		-1	
A4	35		-2	
A5	34		-3	
B1	35		-2	
B2	40		3	
B3	38		1	
B4	40		3	
B5	37		0	
C1	34	36.600	-3	279.124
C2	38		1	
C3	38		1	
C4	36		-1	
C5	36		-1	
D1	36		-1	
D2	38		1	
D3	36		-1	
D4	34		-3	
D5	36		-1	

ภาคผนวกที่ ข21 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc')

ของอาคารอเนกประสงค์ วิทยาลัยสารพัดช่างอุตรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	30			-4
A2	32			-2
A3	36			2
A4	34			0
A5	36			2
B1	30			-4
B2	34			0
B3	32			-2
B4	32			-2
B5	36	34.050		2
C1	33			-1
C2	34			0
C3	32			-2
C4	38			4
C5	34			0
D1	38			4
D2	36			2
D3	34			0
D4	36			2
D5	34			0

247.386

ภาคผนวกที่ ข22 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc')

ของอาคารปฏิบัติการ วิชาซีพวิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	48		6	
A2	40		-2	
A3	42		0	
A4	42		0	
A5	42		0	
B1	45		3	
B2	42		0	
B3	42		0	
B4	38		-4	
B5	42	42.40	0	351.310
C1	42		0	
C2	42		0	
C3	44		2	
C4	46		4	
C5	38		-4	
D1	44		2	
D2	44		2	
D3	46		4	
D4	40		-2	
D5	39		-3	

ภาคผนวกที่ ข23 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc')

ของอาคารปฏิบัติการ วิชาซีพวิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	40		-3	
A2	44		1	
A3	40		-3	
A4	38		-5	
A5	38		-5	
B1	40		-3	
B2	40		-3	
B3	44		1	
B4	44		1	
B5	44	42.600	1	353.800
C1	44		1	
C2	42		-1	
C3	38		-5	
C4	46		3	
C5	42		-1	
D1	46		3	
D2	44		1	
D3	46		3	
D4	46		3	
D5	46		3	

ภาคผนวกที่ ข24 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc')

ของอาคารปฏิบัติการวิชาชีพ วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี (ต่อ)

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	38			1
A2	40			3
A3	34			-3
A4	40			3
A5	42			5
B1	36			-1
B2	36			-1
B3	38			1
B4	34			-3
B5	38			1
C1	36	36.900		-1
C2	38			1
C3	36			-1
C4	36			-1
C5	36			-1
D1	34			-3
D2	36			-1
D3	38			1
D4	36			-1
D5	36			-1

282.857

ภาคผนวกที่ ข25 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc')

ของอาคารเรียน โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	36		-3	
A2	38		-1	
A3	39		0	
A4	40		1	
A5	38		-1	
B1	37		-2	
B2	38		-1	
B3	39		0	
B4	39		0	
B5	41	39.05	2	309.616
C1	40		1	
C2	41		2	
C3	37		-2	
C4	37		-2	
C5	40		1	
D1	39		0	
D2	40		1	
D3	41		2	
D4	40		1	
D5	41		2	

ภาคผนวกที่ ข26 ค่าRebound Number(RN) และค่ากำลังอัดประลัย(fc')

ของอาคารเรียน โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงใหม่ 3

จุดทดสอบ	Rebound Number	AVG. RN.	ตรวจสอบ (+_6)	fc' (ksc)
A1	46		2	
A2	42		-2	
A3	40		-4	
A4	48		4	
A5	44		0	
B1	45		1	
B2	45		1	
B3	42		-2	
B4	41		-3	
B5	40	43.750	-4	368.113
C1	46		2	
C2	48		4	
C3	39		-5	
C4	44		0	
C5	40		-4	
D1	48		4	
D2	44		0	
D3	46		2	
D4	43		-1	
D5	44		0	

ภาคผนวกที่ ข27 อายุโครงสร้างที่ตรวจสอบ ระยะคาร์บอนชั้น สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น และค่ากำลังอัดประลัย(f_c')

โครงสร้างที่ตรวจสอบ	อายุ(เดือน)	ระยะคาร์บอนชั้น		สัมประสิทธิ์คาร์บอนชั้น (K)		
		ระยะเฉลี่ย(มม.)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	$K(\text{มม./เดือน}^{1/2})$	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	f_c'
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี						
1)อาคารนานาชาติ	240	16	15	1.033	3	318.951
2)อาคารโรงอาหาร	240	14	94	0.871	2	313.039
3)อาคารวิชาพื้นฐาน	240	7	299	0.452	15	365.001
4)อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	25	270	1.614	22	335.131
5)อาคารเรียน3	600	15	46	0.612	10	349.132
6)อาคารอำนวยการ	600	7	299	0.286	20	307.438
วิทยาลัยสารพัดช่าง						
1)อาคารโรงฝึกงาน	564	20	112	0.842	3	261.907
2)อาคารพานิชยกรรม	252	10	205	0.630	10	353.800
3)อาคารเอนกประสงค์	240	19	69	1.205	9	287.006
4)อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	20	112	1.260	10	329.322
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิน3	408	29	396	1.436	16	338.864

ภาคผนวกที่ ข28 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k \sqrt{t}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	16.000	-1.17	12.07
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	13.500	-1.96	2.52
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	6.000	-2.27	1.15
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	23.500	-0.98	16.34
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	16.500	-1.46	7.28
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	7.500	-5.38	0.00
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	20.000	-5.98	0.00
	อาคารพานิชยกรรม	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	10.000	-1.15	12.56
	อาคารอเนกประสงค์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	18.667	-2.26	1.18
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	20.000	-1.00	15.87
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	29.000	-7.48	0.00
							10.161			

ภาคผนวกที่ ข29 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 5 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	60		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t_{+5ปี}}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			$t_{รฐ}$ (เดือน)	60								
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	17.889	-1.06	14.57		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	15.093	-1.88	3.02		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	6.708	-2.21	1.34		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	26.274	0.11	54.28		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	17.305	-1.26	10.39		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	7.866	-5.14	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	21.037	-5.77	0.00		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	11.127	-1.13	12.91		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	20.870	-2.07	1.93		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	22.254	-0.89	18.75		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	31.059	-6.94	0.00		
								10.161				

ภาคผนวกที่ ข30 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 10 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{10} (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t}_{+10ปี}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			120									
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	19.596	-0.95	17.11		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	16.534	-1.81	3.55		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	7.348	-2.16	1.54		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	28.782	1.09	86.24		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	18.075	-1.07	14.16		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	8.216	-4.92	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	22.025	-5.58	0.00		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	12.150	-1.12	13.23		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	22.862	-1.89	2.92		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	24.300	-0.79	21.62		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	32.990	-6.44	0.00		
								10.161				

ภาคผนวกที่ ข31 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 15 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{rs} (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t_{+15ปี}}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			180									
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	21.166	-0.85	19.68		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	17.859	-1.74	4.11		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	7.937	-2.11	1.73		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	31.088	2.00	97.70		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	18.813	-0.89	18.56		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	8.551	-4.71	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	22.971	-5.40	0.00		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	13.093	-1.10	13.53		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	24.694	-1.73	4.17		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	26.186	-0.69	24.49		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	34.814	-5.96	0.00		
								10.161				

ภาคผนวกที่ ข32 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 20 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	$t_{20ปี}$ (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k \sqrt{t_{+20ปี}}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			240	600								
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	22.627	-0.76	22.28		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	19.092	-1.68	4.68		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	8.485	-2.07	1.94		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	33.234	2.84	99.77		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	19.523	-0.72	23.51		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	8.874	-4.51	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	23.879	-5.22	0.00		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	13.973	-1.09	13.82		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	26.399	-1.58	5.69		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	27.946	-0.60	27.33		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	36.547	-5.50	0.00		
								10.161				

ภาคผนวกที่ ข33 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 25 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	$t_{25ปี}$ (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k \sqrt{t_{+25ปี}}$)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			300									
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	24.000	-0.68	24.88		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	20.250	-1.62	5.28		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	9.000	-2.02	2.15		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	35.250	3.63	99.99		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	20.208	-0.56	28.92		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	9.186	-4.31	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	24.754	-5.05	0.00		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	14.800	-1.08	14.09		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	28.000	-1.44	7.49		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	29.601	-0.52	30.15		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	38.202	-5.07	0.00		
								10.161				

ภาคผนวกที่ ข34 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 30 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{30} (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k \sqrt{t_{+30}}$)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			360									
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	25.298	-0.60	27.48		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	21.345	-1.56	5.90		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	9.487	-1.98	2.36		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	37.157	4.38	100.00		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	20.871	-0.40	34.64		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	9.487	-4.12	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	25.599	-4.88	0.00		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	15.584	-1.06	14.35		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	29.515	-1.31	9.57		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	31.168	-0.44	32.94		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	39.788	-4.65	0.00		
								10.161				

ภาคผนวกที่ ข35 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 50 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	50ปี (เดือน)		600		k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real}(ph)$ ($k \sqrt{t_{+50}}$)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	s_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$s_{car,real}$ (มิลลิเมตร)				
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	29.933	-0.31	37.74
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	25.256	-1.37	8.58
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	11.225	-1.84	3.29
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	43.964	7.05	100.00
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	23.335	0.20	58.02
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	10.607	-3.41	0.03
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	28.732	-4.27	0.00
	อาคารพานิชยการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	18.387	-1.02	15.31
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	34.922	-0.83	20.34
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	36.775	-0.16	43.59
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	45.583	-3.13	0.09
							10.161			

ภาคผนวกที่ ข36 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 75 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{75} (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k \sqrt{t_{+75}}$)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			900									
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	34.871	-0.01	49.68		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	29.423	-1.16	12.34		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	13.077	-1.69	4.58		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	51.217	9.89	100.00		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	26.089	0.87	80.80		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	11.859	-2.62	0.44		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	32.223	-3.59	0.02		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	21.381	-0.98	16.38		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	40.683	-0.32	37.38		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	42.762	0.14	55.49		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	51.924	-1.46	7.16		
								10.161				

ภาคผนวกที่ ข37 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 100 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{100} ปี (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k \sqrt{t_{+100}}$)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			1200									
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	39.192	0.26	60.20		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	33.068	-0.98	16.47		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	14.697	-1.55	6.02		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	57.563	12.38	100.00		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	28.579	1.47	92.98		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	12.990	-1.90	2.85		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	35.370	-2.98	0.14		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	24.004	-0.94	17.36		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	45.724	0.12	54.88		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	48.008	0.40	65.56		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	57.572	0.02	50.75		
							10.161					

ภาคผนวกที่ ข38 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 150 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{100} ปี (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k\sqrt{t_{+150}}$)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			1800									
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	46.648	0.72	76.37		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	39.359	-0.66	25.48		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	17.493	-1.32	9.30		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	68.514	16.68	100.00		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	33.000	2.55	99.46		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	15.000	-0.63	26.35		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	40.946	-1.89	2.91		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	28.536	-0.87	19.13		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	54.422	0.89	81.31		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	57.071	0.85	80.33		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	67.463	2.62	99.56		
								10.161				

ภาคผนวกที่ ข39 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 300 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{300} ปี (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k \sqrt{t_{+300}}$)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			3600									
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	64.000	1.79	96.31		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	54.000	0.08	53.00		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	24.000	-0.78	21.63		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	94.000	26.67	100.00		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	43.655	5.13	100.00		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	19.843	2.43	99.25		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	54.343	0.72	76.31		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	39.097	-0.72	23.68		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	74.667	2.67	99.63		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	78.194	1.91	97.19		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	90.893	8.77	100.00		
								10.161				

ภาคผนวกที่ ข40 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 500 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{500} ปี (เดือน)		\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($k \sqrt{t_{+500}}$)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			6000									
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	81.584	2.87	99.80		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	68.837	0.82	79.39		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	30.594	-0.24	40.51		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	119.827	36.80	100.00		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	54.724	7.82	100.00		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	24.875	5.61	100.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	68.230	3.42	99.97		
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	49.809	-0.56	28.84		
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	95.182	4.48	100.00		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	99.618	2.98	99.86		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	114.929	15.08	100.00		
							10.161					

ภาคผนวกที่ ข41 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 1000 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t ₁₀₀₀ ปี (เดือน)		12000		k (มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	X _{car,real(ph)} (k √t ₊₁₀₀₀)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			X _{cover} (มิลลิเมตร)	S _{cover} (มิลลิเมตร)	X _{car,real} (มิลลิเมตร)	S _{car,real} (มิลลิเมตร)				
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	114.263	4.89	100.00
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	96.409	2.20	98.62
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	42.849	0.77	78.01
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	167.824	55.63	100.00
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	75.612	12.88	100.00
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	34.369	11.62	100.00
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	94.396	8.52	100.00
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	69.727	-0.26	39.62
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	133.307	7.84	100.00
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	139.455	4.97	100.00
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	159.926	26.90	100.00
							10.161			

ภาคผนวกที่ ข42 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง มาตรฐาน Fick's First law of diffusion เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 3000 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t ₃₀₀₀ ปี (เดือน)		36000		k	X _{car,real(ph)} (k √t ₊₃₀₀₀)	Z	ความน่าจะเป็น ที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			X _{cover} (มิลลิเมตร)	S _{cover} (มิลลิเมตร)	X _{car,real} (มิลลิเมตร)	S _{car,real} (มิลลิเมตร)				
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	16.00	4.00	1.033	196.611	9.97	100.00
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	13.50	9.19	0.871	165.891	5.69	100.00
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	6.00	1.41	0.387	73.729	3.32	99.96
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	23.50	2.12	1.517	288.773	103.07	100.00
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	16.50	2.12	0.674	128.869	25.80	100.00
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	7.50	0.71	0.306	58.577	26.93	100.00
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	564	50.67	1.15	20.00	5.00	0.842	161.034	21.51	100.00
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	10.00	7.07	0.630	119.940	0.48	68.45
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	18.67	9.61	1.205	229.380	16.31	100.00
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	20.00	8.66	1.260	239.881	9.99	100.00
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	29.00	1.41	1.436	273.947	56.84	100.00
							10.161			

ภาคผนวกที่ ข43 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) ณ ช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	$\alpha_1 =$	0.95	k	$\alpha_2 =$	1	$\bar{X}_{car,real}(ph)$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	s_{cover} (มิลลิเมตร)		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$s_{car,real}$ (มิลลิเมตร)			
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	15.200	-1.22	11.11
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	12.825	-1.99	2.32
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	5.700	-2.30	1.08
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	22.325	-1.44	7.47
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	15.675	-1.66	4.89
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	7.125	-5.61	0.00
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	18.694	-6.23	0.00
	อาคารพานิชยกรรม	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	9.500	-1.15	12.41
	อาคารอเนกประสงค์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	17.733	-2.35	0.95
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	19.000	-1.05	14.69
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	27.550	-7.87	0.00
					10.161					

ภาคผนวกที่ ข44 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 5 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_s (เดือน)		k	$\alpha_2 =$		$\bar{X}_{car,real}$	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			60	$\alpha_1 =$		1	s_{cover}			
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	0.95	1.033	16.00	4.00	16.994	-1.11	13.34
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	14.339	-1.92	2.77
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	6.373	-2.24	1.25
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	24.960	-0.41	34.17
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	16.440	-1.47	7.08
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	7.473	-5.39	0.00
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	19.695	-6.04	0.00
	อาคารพานิชยกรรม	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	10.571	-1.14	12.74
	อาคารอเนกประสงค์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	19.826	-2.16	1.54
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	21.141	-0.94	17.29
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเขียงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	29.506	-7.35	0.00
					10.161					

ภาคผนวกที่ ข45 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 10 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{10} (เดือน)		k	$\alpha_2 =$		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}(ph)$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t_{+10}}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			120	$\alpha_1 =$ 0.95		1						
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	18.616	-1.01	15.62		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	15.707	-1.85	3.24		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	6.981	-2.19	1.42		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	27.342	0.53	70.07		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	17.171	-1.29	9.81		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	7.805	-5.18	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	20.647	-5.85	0.00		
	อาคารพานิชยกรรม	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	11.542	-1.12	13.04		
	อาคารอนุประสงค์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	21.719	-1.99	2.31		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	23.085	-0.85	19.88		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	31.341	-6.87	0.00		
					10.161							

ภาคผนวกที่ ข46 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 15 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{15} (เดือน)		k	$\alpha_2 =$		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t_{+15}}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			180	$\alpha_1 =$ 0.95		$\alpha_2 =$	1					
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	20.108	-0.92	17.92		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	16.966	-1.78	3.73		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	7.540	-2.14	1.60		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	29.533	1.39	91.71		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	17.872	-1.12	13.08		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	8.124	-4.98	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	21.557	-5.67	0.00		
	อาคารพานิชยการ	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	12.438	-1.11	13.32		
	อาคารอนุเคราะห์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	23.459	-1.84	3.29		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	24.877	-0.76	22.48		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	33.074	-6.41	0.00		
					10.161							

ภาคผนวกที่ ข47 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 20 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{20} (เดือน)		k	$\alpha_2 =$		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t_{+20}}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			240	$\alpha_1 =$ 0.95		1						
			\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	(มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)					
วิทยาลัยเทคนิค อุตรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	21.496	-0.83	20.25		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	18.137	-1.72	4.23		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	8.061	-2.10	1.78		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	31.572	2.19	98.56		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	18.547	-0.96	16.88		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	8.430	-4.79	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุตรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	22.430	-5.50	0.00		
	อาคารพานิชยการ	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	13.274	-1.10	13.59		
	อาคารอนุประสงศ์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	25.079	-1.70	4.48		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	26.548	-0.67	25.06		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	34.720	-5.98	0.00		
					10.161							

ภาคผนวกที่ ข48 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 25 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ(t_0) (เดือน)	t_{25} (เดือน)		k	$\alpha_2 =$		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t+25}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			300	$\alpha_1 =$ 0.95		$\alpha_2 =$	1					
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	22.800	-0.75	22.59		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	19.238	-1.67	4.75		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	8.550	-2.06	1.96		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	33.488	2.94	99.83		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	19.198	-0.80	21.16		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	8.726	-4.60	0.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	23.270	-5.34	0.00		
	อาคารพานิชยกรรม	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	14.060	-1.09	13.85		
	อาคารอนุประสงค์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	26.600	-1.56	5.90		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	28.120	-0.59	27.63		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	36.292	-5.57	0.00		
					10.161							

ภาคผนวกที่ ข49 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 30 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{30} (เดือน)		k	$\alpha_2 =$		$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t+30}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			360	$\alpha_1 =$ 0.95		$\alpha_2 =$	1			
			\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)	(มิลลิเมตร./เดือน ^{1/2})	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)			
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	24.033	-0.68	24.94
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	20.278	-1.62	5.29
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	9.012	-2.02	2.15
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	35.299	3.65	99.99
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	19.827	-0.65	25.84
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	9.012	-4.42	0.00
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	24.081	-5.18	0.00
	อาคารพานิชยกรรม	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	14.805	-1.08	14.09
	อาคารอนุประสงค์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	28.039	-1.44	7.54
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	29.609	-0.52	30.17
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	37.798	-5.17	0.00
					10.161					

ภาคผนวกที่ ข50 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 50 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	$\alpha_1 = 0.95$		k	$\alpha_2 = 1$		$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t_{+50}}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)			
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	28.437	-0.40	34.28
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	23.993	-1.43	7.63
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	10.664	-1.89	2.96
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	41.766	6.18	100.00
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	22.168	-0.08	46.79
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	10.076	-3.75	0.01
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	27.084	-4.60	0.00
	อาคารพานิชยกรรม	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	17.468	-1.04	14.99
	อาคารอนุประสงค์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	33.176	-0.98	16.27
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	34.936	-0.25	40.01
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	43.303	-3.73	0.01
					10.161					

ภาคผนวกที่ ข51 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 75 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{75} (เดือน)		k	$\alpha_2 =$		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t+75}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			900	$\alpha_1 =$ 0.95		1						
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	33.128	-0.12	45.40		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	27.951	-1.23	10.90		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	12.423	-1.74	4.08		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	48.656	8.89	100.00		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	24.784	0.55	71.02		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	11.266	-2.99	0.14		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	30.423	-3.94	0.00		
	อาคารพานิชยการ	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	20.312	-0.99	15.99		
	อาคารอนุประสงศ์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	38.649	-0.50	30.81		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	40.624	0.03	51.24		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	49.328	-2.15	1.59		
					10.161							

ภาคผนวกที่ ข52 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 100 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	t_{100} (เดือน)	$\alpha_1 = 0.95$		k	$\alpha_2 = 1$		$\bar{X}_{car,real}(ph)$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_{+100}}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่เหล็กจะเกิดสนิม (%)
		อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	s_{cover} (มิลลิเมตร)		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$s_{car,real}$ (มิลลิเมตร)			
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	37.232	0.14	55.47
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	31.415	-1.06	14.50
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	13.962	-1.61	5.32
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	54.685	11.25	100.00
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	27.150	1.13	87.03
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	12.341	-2.31	1.03
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	33.430	-3.36	0.04
	อาคารพานิชยการ	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	22.804	-0.96	16.91
	อาคารอนุประสงศ์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	43.438	-0.08	46.85
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	45.608	0.28	61.04
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	54.693	-0.74	23.05
					10.161					

ภาคผนวกที่ ข53 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 150 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{150} (เดือน)		k	$\alpha_2 =$		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t+150}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			1800	$\alpha_1 =$ 0.95		$\alpha_2 =$	1					
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	44.315	0.57	71.72		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	37.391	-0.76	22.41		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	16.618	-1.39	8.15		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	65.088	15.33	100.00		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	31.350	2.15	98.41		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	14.250	-1.11	13.42		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	38.751	-2.32	1.01		
	อาคารพานิชยการ	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	27.109	-0.89	18.56		
	อาคารเนกประสงค์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	51.701	0.65	74.20		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	54.218	0.71	76.14		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	64.090	1.73	95.82		
					10.161							

ภาคผนวกที่ ข54 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 300 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	$\alpha_1 = 0.95$		k	$\alpha_2 = 1$		$\bar{X}_{car,real}(ph)$ $(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t+300})$	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)			
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	60.800	1.59	94.42
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	51.300	-0.06	47.60
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	22.800	-0.88	18.83
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	89.300	24.83	100.00
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	41.472	4.60	100.00
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	18.851	1.80	96.43
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	51.514	0.17	56.56
	อาคารพานิชยการ	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	37.142	-0.75	22.80
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	70.933	2.35	99.05
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	74.284	1.71	95.68
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	86.349	7.58	100.00
					10.161					

ภาคผนวกที่ ข55 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 500 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	t_{500} (เดือน)		$\alpha_1 =$ 0.95	$\alpha_2 =$ 1	k	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t+500}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			6000	$\alpha_1 =$ 0.95								
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	77.505	2.62	99.56		
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	65.395	0.65	74.12		
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	29.064	-0.37	35.70		
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	113.836	34.45	100.00		
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	51.988	7.15	100.00		
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	23.631	4.83	100.00		
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	64.729	2.74	99.69		
	อาคารพานิชยการ	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	47.319	-0.59	27.60		
	อาคารอเนกประสงค์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	90.423	4.06	100.00		
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	94.637	2.73	99.69		
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	109.182	13.57	100.00		
							10.161					

ภาคผนวกที่ ข56 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 1000 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	$\alpha_1 = 0.95$		k	$\alpha_2 = 1$		$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \sqrt{t+1000}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	S_{cover} (มิลลิเมตร)		$S_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)			
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	108.550	4.54	100.00
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	91.589	1.96	97.51
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	40.706	0.60	72.42
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	159.432	52.34	100.00
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	71.832	11.96	100.00
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	32.651	10.53	100.00
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	89.612	7.59	100.00
	อาคารพานิชการ	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	66.241	-0.31	37.65
	อาคารอนุเคราะห์สงฆ์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	126.641	7.26	100.00
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	132.482	4.62	100.00
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชียงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	151.930	24.80	100.00
					10.161					

ภาคผนวกที่ ข57 การหาค่าความเสี่ยงการเกิดสนิมเหล็กในโครงสร้าง สมการมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.)

เมื่อระยะเวลาผ่านไปเป็นเวลา 3000 ปี

สถานที่	ชื่ออาคาร	อายุโครงสร้าง ขณะทำการทดสอบ (เดือน)	$\alpha_1 = 0.95$		k	$\alpha_2 = 1$		$\bar{X}_{car,real(ph)}$ ($\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_{+3000}}$)	Z	ความน่าจะเป็นที่ เหล็กจะเกิดสนิม (%)
			\bar{X}_{cover} (มิลลิเมตร)	s_{cover} (มิลลิเมตร)		$\bar{X}_{car,real}$ (มิลลิเมตร)	$s_{car,real}$ (มิลลิเมตร)			
วิทยาลัยเทคนิค อุดรธานี	อาคารนานาชาติ	240	35.00	15.72	1.033	16.00	4.00	186.781	9.36	100.00
	อาคารโรงอาหาร	240	52.50	17.68	0.871	13.50	9.19	157.596	5.27	100.00
	อาคารวิชาพื้นฐาน	240	33.50	12.02	0.387	6.00	1.41	70.043	3.02	99.87
	อาคารแผนกไฟฟ้ากำลัง	240	26.00	1.41	1.517	23.50	2.12	274.334	97.40	100.00
	อาคารเรียน3	600	22.50	3.54	0.674	16.50	2.12	122.426	24.24	100.00
	อาคารอำนวยการ	600	16.00	1.41	0.306	7.50	0.71	55.648	25.08	100.00
วิทยาลัยสารพัดช่าง อุดรธานี	อาคารโรงฝึกงาน	546	50.67	1.15	0.842	20.00	5.00	152.945	19.93	100.00
	อาคารพานิชยกรรม	252	87.50	67.18	0.630	10.00	7.07	113.943	0.39	65.23
	อาคารอนุประสงศ์	240	44.33	6.03	1.205	18.67	9.61	217.911	15.30	100.00
	อาคารปฏิบัติการวิชาชีพ	252	40.00	18.03	1.260	20.00	8.66	227.887	9.39	100.00
โรงเรียนนิคมสร้างตนเองเชิงพิณ 3	อาคารเรียน	408	57.50	3.54	1.436	29.00	1.41	260.250	53.24	100.00
					10.161					

ภาคผนวกที่ ข58 ค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม(X) ค่าสัมประสิทธิ์ความถึการบอเนชัน(k) และอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม(t) ที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยอ้างอิงสมการสมการ fick's first law of diffusion

x (mm)	k	t ที่ x=10 mm	t ที่ x=20 mm	t ที่ x=30 mm	t ที่ x=40 mm	t ที่ x=50 mm	t ที่ x=60 mm	t ที่ x=70 mm	t ที่ x=80 mm	t ที่ x=90 mm	t ที่ x=100 mm
10	1	100	400	900	1600	2500	3600	4900	6400	8100	10000
20	2	25	100	225	400	625	900	1225	1600	2025	2500
30	3	11	44	100	178	278	400	544	711	900	1111
40	4	6	25	56	100	156	225	306	400	506	625
50	5	4	16	36	64	100	144	196	256	324	400
60	6	3	11	25	44	69	100	136	178	225	278
70	7	2	8	18	33	51	73	100	131	165	204
80	8	2	6	14	25	39	56	77	100	127	156
90	9	1	5	11	20	31	44	60	79	100	123
100	10	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100

ภาคผนวกที่ ข59 ค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม(X) ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น(k) และอายุการใช้งานที่ปลอดภัยซ่อมแซม(t) ที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสกับความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นทั่วไป

x (mm)	k	t ที่ x=10 mm	t ที่ x=20 mm	t ที่ x=30 mm	t ที่ x=40 mm	t ที่ x=50 mm	t ที่ x=60 mm	t ที่ x=70 mm	t ที่ x=80 mm	t ที่ x=90 mm	t ที่ x=100 mm
10	1	262	1049	2360	4196	6556	9441	12851	16784	21243	26226
20	2	66	262	590	1049	1639	2360	3213	4196	5311	6556
30	3	29	117	262	466	728	1049	1428	1865	2360	2914
40	4	16	66	148	262	410	590	803	1049	1328	1639
50	5	10	42	94	168	262	378	514	671	850	1049
60	6	7	29	66	117	182	262	357	466	590	728
70	7	5	21	48	86	134	193	262	343	434	535
80	8	4	16	37	66	102	148	201	262	332	410
90	9	3	13	29	52	81	117	159	207	262	324
100	10	3	10	24	42	66	94	129	168	212	262

ภาคผนวกที่ ข60 ค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม(X) ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น(k) และอายุการใช้งานที่ปลอดภัยซ่อมแซม(t) ที่แปรผันตาม
 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสกับความเปียกและสภาวะเสี่ยง
 ต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง

x (mm)	k	t ที่ x=10 mm	t ที่ x=20 mm	t ที่ x=30 mm	t ที่ x=40 mm	t ที่ x=50 mm	t ที่ x=60 mm	t ที่ x=70 mm	t ที่ x=80 mm	t ที่ x=90 mm	t ที่ x=100 mm
10	1	153	613	1380	2454	3834	5521	7515	9815	12422	15336
20	2	38	153	345	613	959	1380	1879	2454	3106	3834
30	3	17	68	153	273	426	613	835	1091	1380	1704
40	4	10	38	86	153	240	345	470	613	776	959
50	5	6	25	55	98	153	221	301	393	497	613
60	6	4	17	38	68	107	153	209	273	345	426
70	7	3	13	28	50	78	113	153	200	254	313
80	8	2	10	22	38	60	86	117	153	194	240
90	9	2	8	17	30	47	68	93	121	153	189
100	10	2	6	14	25	38	55	75	98	124	153

ภาคผนวกที่ ข61 ค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม(X) ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น(k) และอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีต (t) ที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตสัมผัสกับความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นรุนแรง

x (mm)	k	t ที่ x=10 mm	t ที่ x=20 mm	t ที่ x=30 mm	t ที่ x=40 mm	t ที่ x=50 mm	t ที่ x=60 mm	t ที่ x=70 mm	t ที่ x=80 mm	t ที่ x=90 mm	t ที่ x=100 mm
10	1	111	443	997	1773	2770	3989	5429	7091	8975	11080
20	2	28	111	249	443	693	997	1357	1773	2244	2770
30	3	12	49	111	197	308	443	603	788	997	1231
40	4	7	28	62	111	173	249	339	443	561	693
50	5	4	18	40	71	111	160	217	284	359	443
60	6	3	12	28	49	77	111	151	197	249	308
70	7	2	9	20	36	57	81	111	145	183	226
80	8	2	7	16	28	43	62	85	111	140	173
90	9	1	5	12	22	34	49	67	88	111	137
100	10	1	4	10	18	28	40	54	71	90	111

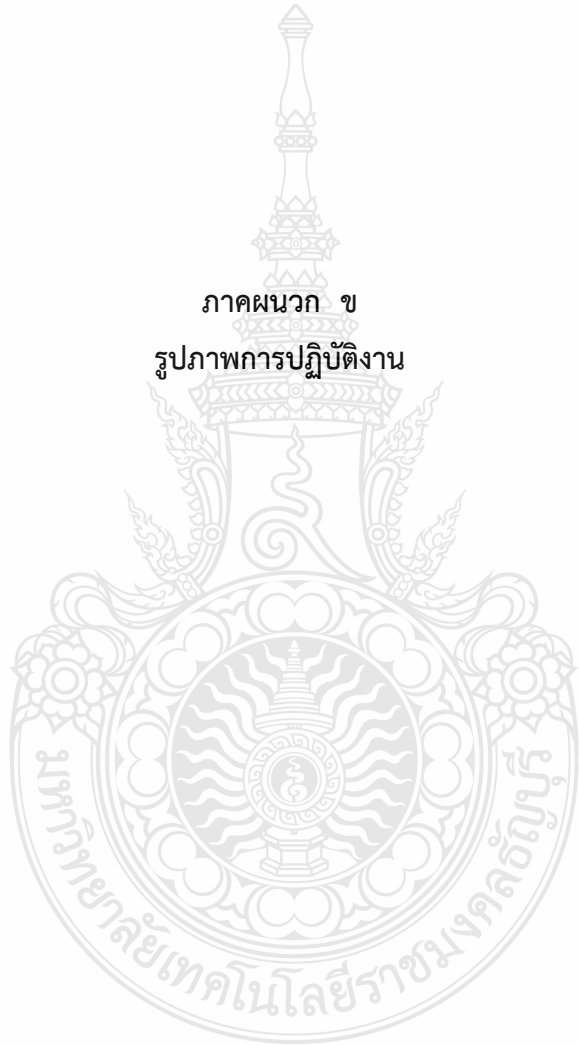
ภาคผนวกที่ ข62 ค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม(X) ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น(k) และอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีตที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสกับความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นปานกลาง

x (mm)	k	t ที่ x=10 mm	t ที่ x=20 mm	t ที่ x=30 mm	t ที่ x=40 mm	t ที่ x=50 mm	t ที่ x=60 mm	t ที่ x=70 mm	t ที่ x=80 mm	t ที่ x=90 mm	t ที่ x=100 mm
10	1	138	554	1246	2215	3460	4983	6782	8858	11211	13841
20	2	35	138	311	554	865	1246	1696	2215	2803	3460
30	3	15	62	138	246	384	554	754	984	1246	1538
40	4	9	35	78	138	216	311	424	554	701	865
50	5	6	22	50	89	138	199	271	354	448	554
60	6	4	15	35	62	96	138	188	246	311	384
70	7	3	11	25	45	71	102	138	181	229	282
80	8	2	9	19	35	54	78	106	138	175	216
90	9	2	7	15	27	43	62	84	109	138	171
100	10	1	6	12	22	35	50	68	89	112	138

ภาคผนวกที่ ข63 ค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม(X) ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอนชั้น(k) และอายุการใช้งานที่ปลอดภัยของคอนกรีต (t) ที่แปรผันตามระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยอ้างอิงสมการมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง กรณีเมื่อผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกและสภาวะเสี่ยงต่อคาร์บอนชั้นทั่วไป

x (mm)	k	t ที่ x=10 mm	t ที่ x=20 mm	t ที่ x=30 mm	t ที่ x=40 mm	t ที่ x=50 mm	t ที่ x=60 mm	t ที่ x=70 mm	t ที่ x=80 mm	t ที่ x=90 mm	t ที่ x=100 mm
10	1	237	947	2130	3787	5917	8521	11598	15148	19172	23669
20	2	59	237	533	947	1479	2130	2899	3787	4793	5917
30	3	26	105	237	421	657	947	1289	1683	2130	2630
40	4	15	59	133	237	370	533	725	947	1198	1479
50	5	9	38	85	151	237	341	464	606	767	947
60	6	7	26	59	105	164	237	322	421	533	657
70	7	5	19	43	77	121	174	237	309	391	483
80	8	4	15	33	59	92	133	181	237	300	370
90	9	3	12	26	47	73	105	143	187	237	292
100	10	2	9	21	38	59	85	116	151	192	237

ภาคผนวก ข
รูปภาพการปฏิบัติงาน





รูปผนวกที่ ข1 หาดำแหน่งของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา



รูปผนวกที่ ข2 สภาพของอาคารที่เลือกทำการศึกษา



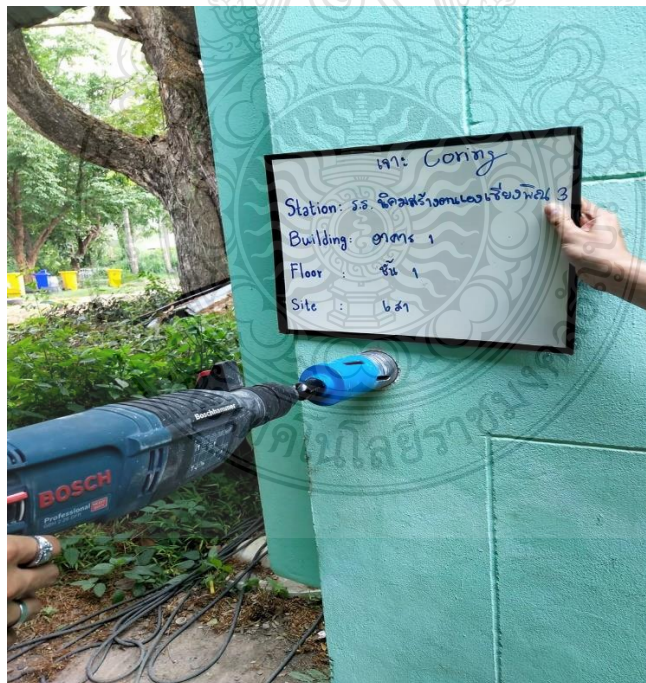
รูปผนวกที่ ข3 ทำการวัดปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ



รูปผนวกที่ ข4 การหาตำแหน่งเหล็กและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม



รูปผนวกที่ ข5 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก



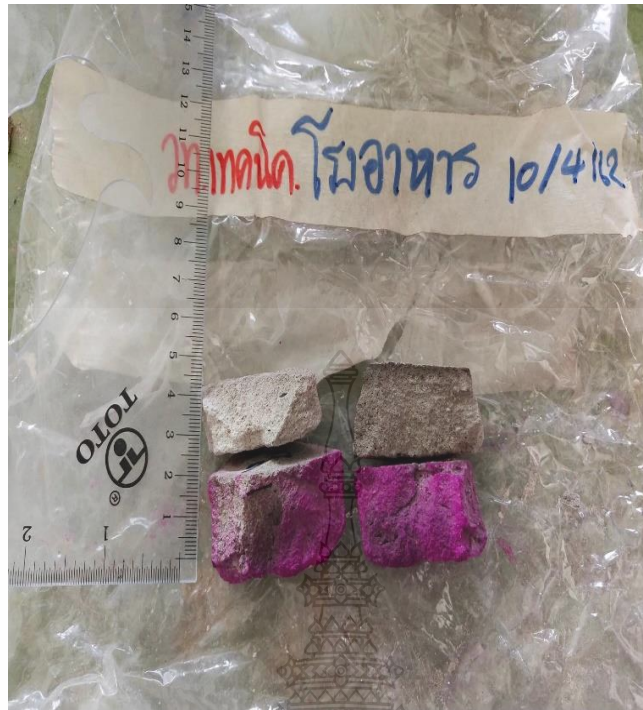
รูปผนวกที่ ข6 การเจาะเก็บชิ้นส่วนตัวอย่าง



รูปผนวกที่ ข7 นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะจากตำแหน่งที่กล่าวมา นำมาผ่าซีกด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)



รูปผนวกที่ ข8 ทำการฉีดพ่นสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์ไปยังคอนกรีตที่ผ่าซีกแล้ว



รูปผนวกที่ ข9 ทำการวัดระยะการเกิดคาร์บอนขึ้น



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอภิสิทธิ์ ปาทาท
วัน - เดือน - ปี เกิด	วันที่ 14 พฤศจิกายน 2514
ที่อยู่	561/5 หมู่ 1 ซ. บ้านหนองบัว 3 ต. หมาแข้ง อ.เมืองอุดรธานี จ.อุดรธานี 41000
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สถานที่ทำงาน	รับราชการครู ตำแหน่งครูชำนาญการ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี
เบอร์โทรศัพท์	09-45032595
อีเมล	apisit.m.eng@gmail.com

