บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต [1]

ลักษณะของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจะแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเสื่อมสภาพในรูปแบบต่างๆกันนั้น จะมีลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้นการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพนั้น จึงทำได้จากการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางโครงสร้าง อาจจะเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุหลักมากกว่าหนึ่งสาเหตุ หรืออาจจะได้รับความเสียหายจากการรับแรงที่มากเกินไป หรืองานก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งจะทำให้ความต้านทานการเสื่อมสภาพของโครงสร้างลดลงอย่างมาก

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

1) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical deterioration) ได้แก่การหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) การทรุดตัว (Settlement) การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic shrinkage) การแข็งตัวและเหลวของน้ำในคอนกรีต (Freezing and thawing)

2) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical deterioration) ได้แก่คาร์บอเนชั่น (Carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate attack) ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-aggregate reaction)

3) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical deterioration) ได้แก่ การขัดสี (Abrasion) การชะล้างด้วยกระแสน้ำและกระแสกรวดทราย (Erosion) และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitation)

4) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (Biological deterioration) ได้แก่ การเสื่อมสภาพโดยตะไคร่ รา รากพืช หรือแบคทีเรียบางประเภท

5) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (Mixed process) ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

2.1.2 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอเนชั่น

1) การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในคอนกรีต

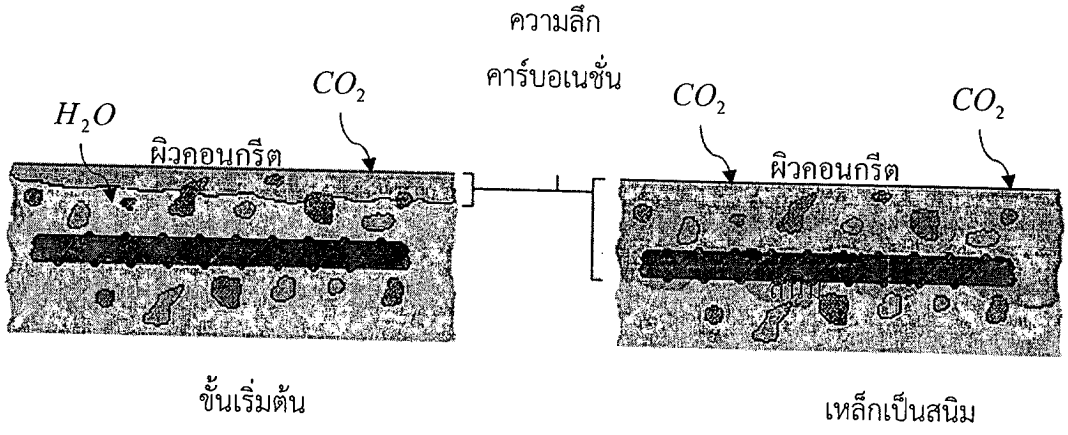
คาร์บอเนชั่น เกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศซึ่งมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.03-0.1 โดยปริมาตร (Neville et al, 1987) โดยจะมีความเข้มข้นสูงกว่านี้หากอยู่ในบริเวณของแหล่งชุมชน หรือโรงงานอุตสาหกรรม

คาร์บอเนชั่น เป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรด(CO_2) เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว (Alkaline cement paste) โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก ทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) นอกจากนี้ยังอาจเกิดสารประกอบอื่นๆ เช่น ไฮเดรตของซิลิกา ไฮเดรตของอลูมินา ดังสมการ 2.1 หรือ 2.2

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (2.1)$$

หรือ $$3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3CO_2 \longrightarrow 3CaCO_3.2SiO_2H_2O \qquad (2.2)$$

โดยปกติซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างสูงโดยมีค่า pH ระหว่าง 12.6 ถึง 13.5 และอาจลดลงเหลือเพียง 8 ถึง 9 ถ้าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นจนหมด ซึ่งหากมีอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นมาก จะทำให้การเป็นด่างของคอนกรีตลดลง และทำให้ฟิล์มที่เคลือบอยู่ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตถูกทำลายลงจึงอาจส่งผลให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมในที่สุด ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยา (2.1) มากกว่า (2.2) และในความเป็นจริงแล้วทั้งสองปฏิกิริยาต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของสารละลาย คอนกรีตที่ถูกคาร์บอเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น จะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดอออกไซด์ (CO_2))ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี โดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังนั้นคาร์บอเนชั่นจะค่อยๆคืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore structure) ของคอนกรีต และผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอเนตไปแล้ว ซึ่งมีความพรุนน้อยลงทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (H_2O) ดังนั้นในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิทจะไม่เกิดคาร์บอเนชั่น เนื่องจากในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทก็จะไม่มีน้ำในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นคาร์บอเนชั่นที่รุนแรง ในกรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-dry) นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึง 60 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาก รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดคาร์บอเนชั่น



รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในคอนกรีต

คาร์บอเนชั่นทำให้เกิดผลสำคัญ 3 ประการ คือ

1. ทำให้เกิดความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอเนชั่นต่ำลง

2. ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอเนชั่นต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอเนชั่นเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริม จนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤต

3. ทำให้เกิดการหดตัว(Carbonation shrinkage) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ภายใต้หน่วยแรงอัดที่เกิดจากหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ผลของคาร์บอเนชั่นทั้ง 3 กรณีนี้ ในกรณีที่ 2 คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ดีในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอเนชั่นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

2) ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชั่น

- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ชื้นและแห้งเกินไป จะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นรุนแรง
- ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศยิ่งมาก ก็จะทำให้การเกิดคาร์บอเนชั่นรุนแรง
- อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นดำเนินไปเร็ว
- ความพรุนของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำต่ำจะเกิดคาร์บอเนชั่นได้เร็วและมาก
- การใช้สารปอซโซลานบางชนิด จะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นมากขึ้นถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไป

3) การป้องกันการเกิดคาร์บอเนชั่น

- ออกแบบให้คอนกรีตมีความพรุนต่ำ เช่น ใช้ปริมาณน้ำน้อย อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ หรือใช้วัสดุเติมช่องว่าง (Filler) เช่น ซิลิกาฟูม จะช่วยให้คอนกรีตมีอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นลดลง

- บ่มคอนกรีตให้ดี การบ่มคอนกรีตให้ยาวนานขึ้นจะทำให้คอนกรีตบริเวณผิวและใกล้ผิวคอนกรีตมีความทึบน้ำดีขึ้น

- สำหรับการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก ควรออกแบบคอนกรีตหุ้มคอนกรีตให้หนาขึ้นถ้าทราบว่าโครงสร้างดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่คาร์บอเนชั่นรุนแรง

2.1.3 ข้อกำหนดทั่วไปในการออกแบบเมื่อพิจารณาด้านความคงทน [2]

1) วัสดุผสมคอนกรีตและคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย หิน หรือกรวด และสารผสมเพิ่มชนิดต่างๆ และได้รับการบ่มด้วยความชื้นจนมีกำลังและคุณสมบัติอื่นๆตามที่ต้องการ วัสดุที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องมีคุณภาพดังต่อไปนี้

- ปูนซีเมนต์ที่จะใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องเป็นปูนซีเมนต์ประเภท Portland Cement Type 1 เป็นหลัก หรืออาจจะใช้ปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆในกรณีที่ต้องการแก้ปัญหาเฉพาะ โดยปูนซีเมนต์ต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 [3] หากมีการใช้สารปอซโซลาน ให้อ้างอิงมาตรฐานอุตสาหกรรมสำหรับสารประเภทนั้นๆ หรืออ้างอิงมาตรฐานอื่นๆที่เทียบเท่า เช่น อ้างอิงมาตรฐาน มอก.2135 [4] สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์

- ทราย ให้ใช้ทรายน้ำจืดที่มีคุณภาพดี สะอาด มีคุณสมบัติตามมาตรฐานมอก. 566 [5] หรือมาตรฐานASTM C33 [6]

- หิน ที่สามารถใช้ในการผสมคอนกรีตต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานมอก. 566 หรือตามมาตรฐาน ASTM C33

- น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ต้องเป็นน้ำจืดใสสะอาดที่มีปริมาณสารปนเปื้อน เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ความเป็นกรดด่าง หรือสารแขวนลอย อยู่ในปริมาณที่ไม่มาก และจะไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีต เช่น การพัฒนากำลังของคอนกรีต หรือความคงทน มาตรฐาน ASTM C94 [7]

- สารผสมเพิ่ม ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C494

- กำลังของคอนกรีต (Strength of concrete) ให้ใช้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์ ยกเว้นในกรณีที่ระบุเป็นอย่างอื่น ทั้งนี้การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตให้ใช้วิธีการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐานของ ASTM C39 [8] สำหรับแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก หรือ BS 1881-116 สำหรับแท่งตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทั้งนี้กำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881-116 จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 250 ksc และกำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 200 ksc ยกเว้นในกรณีที่ระบุเป็นอย่างอื่น

2) ระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด

ในการออกแบบคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความคงทนต่อการเสื่อมสภาพ และสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุด ซึ่งระยะหุ้มเหล็กเสริมน้อยสุดสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.3 ต่อไปนี้

$$C_{min} = \alpha C_o \qquad (2.3)$$

โดยที่

C = ระยะหุ้มเหล็กเสริม (มม.)

α = ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ตารางที่ 2.1)

C_o = ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป หน่วยเป็นมิลลิเมตร (ตารางที่ 2.2 และ 2.3)

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริม (α)

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

หมายเหตุ

(*) ยกเว้นกรณีที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไปไม่เกิน 20 มม. และกรณีที่ต้องเผชิญกับกรดหรือเผชิญกับสภาวะซัลเฟตตั้งแต่ระดับปานกลางขึ้นไป ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 1.0

ตารางที่ 2.2 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_o) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
(ก) คอนกรีตหล่อในที่	
1) คอนกรีตที่หล่อติดกับดินโดยใช้ดินเป็นแบบ และผิวคอนกรีตสัมผัสกับดินตลอดเวลาที่ใช้งาน	75
2) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 16 มม.	50
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	40
3) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน	
ในแผ่นพื้น ผนัง และตง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	40
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	20
ในคาน	
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้ง	40
ในเสา	
- เหล็กปลอกเดี่ยวหรือปลอกเกลียว	40
(ข) คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน)	
1) คอนกรีตที่สัมผัสดิน หรือถูกแดดฝน	
ในแผ่นผนัง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	40
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	20
ในองค์อาคารอื่น	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	50
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มม. ถึง 36 มม.	40
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. และเล็กกว่า	30
2) คอนกรีตที่ไม่สัมผัสดิน หรือไม่ถูกแดดฝน	
ในแผ่นพื้นผนัง และตง	
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 40 มม. ขึ้นไป	30
- สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มม. และเล็กกว่า	15
ในคาน	
- เหล็กเสริมหลัก เหล็กลูกตั้ง	25
ในเสา	
-เหล็กลูกตั้ง เหล็กปลอกเดี่ยวหรือปลอกเกลียว	30
(ค) คอนกรีตที่หล่อในน้ำ	100

ตารางที่ 2.3 ระยะหุ้มเหล็กเสริมทั่วไป (C_o) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีความเสี่ยง ต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ลักษณะงานก่อสร้าง	ระยะหุ้มต่ำสุด (มม.)
(ก) คอนกรีตหล่อในที่ ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง	
- แผ่นพื้น และผนัง	50
- องค์อาคารอื่น	65
(ข) **คอนกรีตหล่อสำเร็จ (ควบคุมคุณภาพจากโรงงาน) ทั้งอัดแรงและไม่อัดแรง**	
- แผ่นพื้น และผนัง	40
- องค์อาคารอื่น	50

ข้อแนะนำ

วิศวกรผู้ออกแบบไม่สามารถกำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริมให้น้อยกว่า แต่สามารถกำหนดระยะหุ้มเหล็กเสริมให้มากกว่าค่า นี้ได้ ขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานที่ต้องการ

3) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

โดยปกติจะกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตตามต้องการ แต่ สำหรับลักษณะงานก่อสร้างและสภาพแวดล้อม ที่มีผลต่อความคงทนของคอนกรีต เพื่อให้คอนกรีตมีความ คงทนต่อการเสื่อมสภาพและสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ จำเป็นต้องกำหนดอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานให้ต่ำ ถึงแม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้อาจจะสูงกว่ากำลังอัดที่ต้องการในการรับน้ำหนัก บรรทุกที่ออกแบบก็ตาม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุดให้เป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงสุด
1) คอนกรีตที่ต้องการความทึบน้ำ	0.50
2) คอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีตระดับปานกลาง	0.50
3) คอนกรีตในสภาวะที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมหรือการเสื่อมสภาพของคอนกรีตระดับรุนแรง	0.45

ข้อแนะนำ

วิศวกรผู้ออกแบบสามารถกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ต่ำกว่าค่าที่กำหนดในหัวข้อนี้ได้ขึ้นอยู่ กับอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ 2)

4) ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด

ในบางโอกาส องค์อาคารบางประเภท เช่น คานอาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงรอยร้าวดัง เช่น รอยร้าวที่เกิดจากโมเมนต์ดัดได้ ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้มักไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงขององค์อาคาร ถ้าองค์อาคารนั้นไม่ได้มีการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ดี รอยร้าวที่มีความกว้างมากก็จะเป็นผลให้สารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต และเหล็กเสริมซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย ทำให้องค์อาคารนั้นเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมขนาดความกว้างของ รอยร้าวไม่ให้มากเกินไป ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด สำหรับโครงสร้างในสภาพแวดล้อมทั่วไป หรือในสภาพแวดล้อมที่เผชิญต่อการเป็นสนิมของเหล็กเสริม สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุด

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

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

ข้อแนะนำ

วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกกำหนดขนาดความกว้างรอยร้าวที่มากที่สุดให้ต่ำกว่าค่าในตารางก็ได้ ถ้าต้องการให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

2.1.4 การออกแบบเมื่อพิจารณาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลง จนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ตัวอย่างของสภาพแวดล้อมที่มีคาร์บอเนชั่น เช่นโครงสร้างในที่จอดรถ โครงสร้างริมถนนหรือใต้สะพานบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น โครงสร้างใต้สะพานที่เผชิญกับเขม่าควันต่างๆ ตลอดจนในอาคารที่มีผู้คนอยู่มาก เป็นต้น เพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น และมีอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ความลึกคาร์บอเนชั่นในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาให้มีค่าน้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการ 2.4 ในการออกแบบ

$$C \geq \gamma_i . X_c \qquad (2.4)$$

เมื่อ C = ระยะหุ้มเหล็กเสริม (มม.)

γ_i = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย

X_c = ความลึกคาร์บอเนชั่นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

โดยที่ γ_i มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาน้อยกว่า 15 ปี และมีค่าเท่ากับ 1.1 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาตั้งแต่ 15 ปี ขึ้นไป

ความลึกคาร์บอเนชั่นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ (X_c) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.5

$$X_c = \alpha_1.\alpha_2.k.\sqrt{t_r} \qquad (2.5)$$

โดยที่ X_c = ความลึกคาร์บอเนชั่นวัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

α_1 = สัมประสิทธิ์การสัมผัสความเปียกชื้น เช่น ฝน

α_2 = สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น

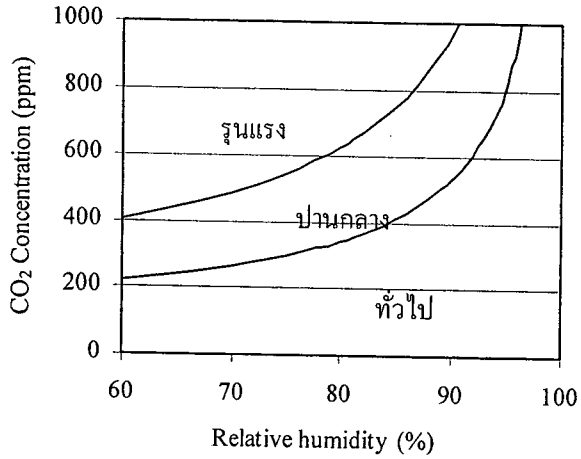
t_r = อายุการใช้งานของคอนกรีตที่ต้องการ หน่วยเป็นปี

โดยที่ α_1 มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น และมีค่าเท่ากับ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้นสัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น (α_2) สามารถกำหนดได้จาก ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น

ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	α_2
สภาวะทั่วไป	0.65
เสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นปานกลาง	0.85
เสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นรุนแรง	1.00

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 2.2 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ก่อสร้าง



รูปที่ 2.2 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่นทั่วไป

สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (k) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.6

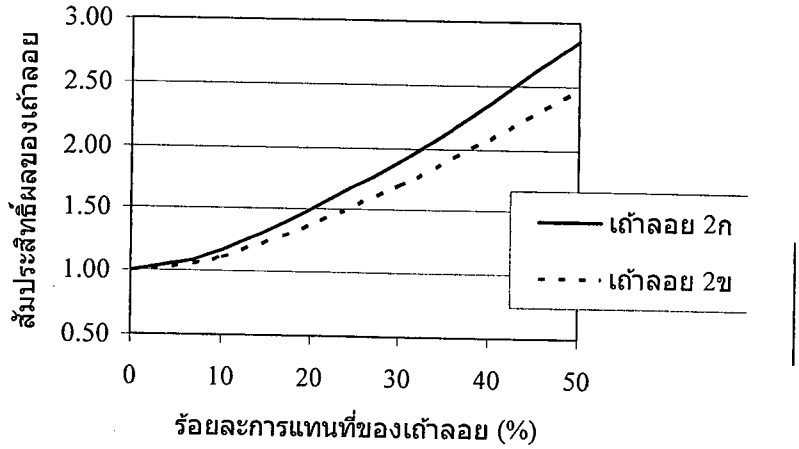
$$k = 17.5.k_r.(w/b)^3 \qquad (2.6)$$

เมื่อ k = สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น หน่วยเป็นมิลลิเมตร/ เดือน

k_r = ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน (เถ้าลอยชนิด 2ก และ 2 ข ตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)

w/b = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน (k_r) สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 2.3 (ชนิดของเถ้าลอย 2ก และ 2ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)



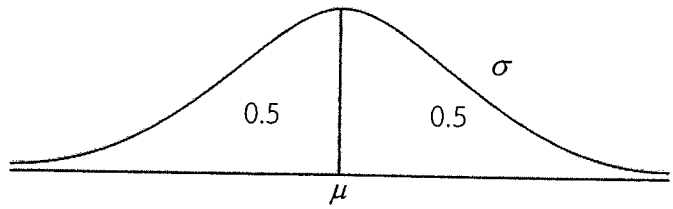
รูปที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน

ข้อแนะนำ

สมการการออกแบบความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นชุดนี้ สามารถใช้ในกรณีของคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ไม่เกิน 0.65 และมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานไม่เกินร้อยละ 50 ในกรณีของคอนกรีตที่มีรอยร้าว ผลของการมีรอยร้าวจะทำให้อายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาสั้นลง ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (k) ในสมการที่ (2.6) ไม่ได้คำนึงถึงผลของรอยแตกร้าว หากต้องการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตที่มีรอยร้าวหรือใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเกิน 0.65 หรือมีการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสานเกินกว่าร้อยละ 50 ควรปรึกษาผู้เชี่ยวชาญพิเศษ

2.1.5 สถิติและความน่าจะเป็น [11]

ในการเก็บข้อมูล เช่น วัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก วัดกำลังอัดคอนกรีตจากโครงสร้างอาคารด้วยค้อนกระแทก วัดความลึกคาร์บอเนชั่น เป็นต้น ซึ่งแต่ละรูปแบบได้ก็มีการเก็บค่าดังกล่าวไว้หลายค่า จึงจำเป็นต้อง มีการวิเคราะห์ค่าดังกล่าว เพื่อให้ได้ตัวแปรของค่าที่ต้องการใกล้เคียงความจริงมากที่สุด จึงต้องอาศัย หลักทางสถิติเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบของการแจกแจงปกติ ซึ่งเป็นการแจกแจง ความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม ส่วนมากจะมีค่าใกล้เคียงค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ต้องการศึกษา (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 โค้งปกติ (Normal curve)

คุณสมบัติของโค้งปกติ

1) เป็นโค้งปกติสมมาตร

2) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ μ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ σ

3) พื้นที่ใต้เส้นโค้งปกติเท่ากับ 1 หรือ 100%

4) ค่าเฉลี่ยเลขคณิต มัธยฐานและฐานนิยมมีค่าเท่ากันและอยู่ตรงกลางของกราฟ ดังนั้นจะแบ่งพื้นที่ใต้โค้งปกติออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน คือ 0.5 หรือ 50%

พื้นที่ใต้เส้นโค้งทั้งหมด เท่ากับ 1 หรือ 100% เนื่องจากพื้นที่ใต้เส้นโค้งก็คือความน่าจะเป็น ดังนั้นเมื่อต้องการหาค่าความน่าจะเป็นหรือพื้นที่ใต้เส้นโค้งในช่วงใดช่วงหนึ่ง ต้องใช้วิธีการอินทิเกรต เนื่องจากเป็นตัวแปรแบบต่อเนื่อง ซึ่งทำได้ยาก จึงสร้างตารางเพื่อหาพื้นที่หรือความน่าจะเป็นสำหรับ $\mu = 0$ และ $\sigma = 1$ เรียกว่า การแจกแจงปกติมาตรฐานใช้สัญลักษณ์ Z โดย

การแจกแจงปกติ

ค่ามาตรฐาน เมื่อต้องการเปรียบเทียบข้อมูลตั้งแต่สองค่าขึ้นไปที่มาจากข้อมูลคนละชุด บางครั้งไม่สามารถเปรียบเทียบได้โดยตรง เพราะค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูลแต่ละชุดและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมักจะไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความถูกต้องในการเปรียบเทียบมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการแปลงค่าที่ต้องการเปรียบเทียบเป็นค่ามาตรฐาน

ถ้าให้ X_i เป็นค่าที่ i ของตัวแปร X แล้ว ค่ามาตรฐานของ X_i คือ

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

โดย μ แทนค่าเฉลี่ยเลขคณิตของประชากร

σ แทนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร

N แทนจำนวนประชากร

หรือ

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \qquad \text{เมื่อ i = 1, 2, ... , N}$$

โดย X แทนค่าเฉลี่ยเลขคณิตของตัวอย่าง

S แทนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง

N แทนจำนวนตัวอย่าง

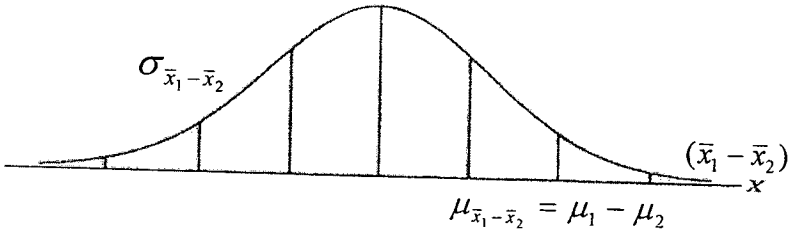
จากสูตรการแปลงเป็นค่ามาตรฐานข้างต้น จะเห็นว่าค่ามาตรฐานเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าความแตกต่างระหว่างค่าของข้อมูลนั้น ๆ กับค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็นกี่เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

นอกจากนั้นยังมีการนำหลักสถิติเข้ามาประยุกต์ในการประเมินความเสี่ยงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอเนชั่น โดยต้องอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ชนิดคือ ระยะหุ้มเหล็ก และความลึกคาร์บอเนชั่น จึงทำให้ต้องมีการนำหลักการแจกแจงของผลต่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างเข้ามาประยุกต์ใช้งาน

จากหลักทางสถิติแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถพิจารณารูปแบบของข้อมูลได้ 2 รูปแบบ คือ ประชากรและตัวอย่างซึ่งในการวิเคราะห์ก็จะต้องคำนึงถึงรูปแบบของข้อมูลดังกล่าวด้วยเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาจริง

กรณีทราบค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของสองตัวอย่าง

ถ้าเลือกตัวอย่างสุ่มจากตัวอย่างสองกลุ่มที่มีการแจกปกติและเป็นอิสระต่อกันที่มีค่าเฉลี่ย μ_1, μ_2 และค่าความแปรปรวน σ_1^2, σ_2^2 ตามลำดับ โดยมีขนาดของตัวอย่าง n_1, n_2 แล้วการแจกแจงตัวอย่างของผลต่างของค่าเฉลี่ยของสองตัวอย่างจะเป็นแบบปกติ



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

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

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

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

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Castro et al. (2000) [12] มีการศึกษาตำแหน่งที่ตั้งของอาคารอยู่ใกล้สภาวะแวดล้อมทะเลต่อการเกิดคาร์บอเนชั่น พบว่าตำแหน่งที่ตั้งอาคารห่างจากทะเลประมาณ 100-200 เมตร มีแนวโน้มอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และระดับความสูงเพิ่มขึ้นของอาคารตัวอย่าง ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นสูงขึ้นด้วย โดยทำการศึกษาปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก มีการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตของอาคารที่ระดับความสูง 50, 125 และ 190 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่น Fattuhi (1986) พบว่าอัตราการเกิดความลึกคาร์บอเนชั่นจะมีมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น โดยการหล่อคอนกรีตตัวอย่างทดสอบแบบเร่งในห้องปฏิบัติการ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในการทดสอบมีดังนี้ 0.7 0.6 และ 0.4 ทำการทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่นที่ 1,3,7,21 และ 28 วัน

Khunthongkeaw et al.(2006) [13] มีการศึกษาโดยใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่างกันสำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปวางไว้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆกันคือในเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO สูงจะมีการเกิดคาร์บอเนชั่นต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้การเกิดคาร์บอเนชั่นได้เร็วขึ้น

Alexander et al. (2007) [14] พบว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นแห้งจะมีการเกิดคาร์บอเนชั่นมากกว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง โดยทำการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นของโครงสร้างสะพาน 3 แห่งในแอฟริกาใต้ที่มีอายุระหว่าง 11-76 ปี คือสะพานที่อยู่ในพื้นที่ Cape Peninsula, Durban และ Johannesburg ซึ่งการเกิดคาร์บอเนชั่น ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง สภาพแวดล้อมที่ตั้งของโครงสร้างสะพาน

Haque and Khaiat (1997) [15] พบว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางที่น้อย (ระหว่าง 0.5-2 กม.) มีอัตรา การเกิดคาร์บอเนชั่นสูงกว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางที่มาก (ระหว่าง 3-20 กม.) ในส่วนของกำลังอัดพบว่าความลึกคาร์บอเนชั่นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด โดยการทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นของอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งใกล้กับทะเล มีการเก็บตัวอย่างคอนกรีตของโครงสร้างผนังและเสาทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่น รวมถึงการวัดค่ากำลังอัดของโครงสร้าง

Keun Kim et al. (2009) [16] พบว่าคอนกรีตที่อายุมากขึ้นการเกิดคาร์บอเนชั่นก็ยิ่งมากขึ้นด้วย และคอนกรีตที่มีกำลังต่ำจะมีอัตราการพัฒนาความลึกคาร์บอเนชั่นได้สูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูง โดยการหล่อคอนกรีตที่ความแข็งแรงสูง กลาง และต่ำ ทดสอบในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการ มีการทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นที่อายุ 1 2 3 และ 4 เดือน และวัดค่ากำลังอัด

Cengiz Duran Atis (2003) [17] มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยทดสอบในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการที่ความชื้นสัมพัทธ์ ที่ 65% และ 100 % ทำการทดสอบหาความลึกคาร์บอเนชั่นและค่ากาลังอัดที่ 3,7,28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณมากทำให้การเกิดคาร์บอเนชั่นสูงกว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่ปริมาณน้อย และในส่วนของกาลังอัดพบว่าความลึกคาร์บอเนชั่นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

Haque et al. (2007) [18] ได้ทำการศึกษาถึงความคงทนของโครงสร้างที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในโซนทะเลอะระเบียน มีการศึกษาถึงการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ซัลเฟต และคาร์บอเนชั่น สำหรับในส่วนคาร์บอเนชั่นพบว่าตำแหน่งที่ของอาคารที่ใกล้กับทะเลมีแนวโน้มการเกิดคาร์บอเนชั่นสูงกว่าตำแหน่งที่ของอาคารที่ไกลจากทะเล

Khayat (2002) [19] มีการหล่อคอนกรีต ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ 0.45-0.80 พบว่าอัตราการเกิดความลึกคาร์บอเนชั่นจะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น และในส่วนของกำลังอัดพบว่าความลึกคาร์บอเนชั่นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และทวิสัณห์ คงทรัพย์ [20] ทำการศึกษาเรื่องความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว มีการศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำร้อยละ 20 และ 40 โดยอัตราส่วนปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัด

แน่นเท่ากับ 1.2 1.4 และ 1.6 ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ พบว่าความลึกคาร์บอเนชั่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบดำ

วัจน์วงค์ และคณะ (2550) [21] ทำการศึกษาเรื่อง การสำรวจทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสา โครงสร้างทางรถไฟยกระดับ มีการเก็บตัวอย่างคอนกรีตโดยวิธีการ Coring เพื่อทดสอบหาค่าความลึกคาร์บอเนชั่นของโครงสร้างทางด่วนสายเหนือจากสถานีรถไฟหัวลำโพงถึงท่าอากาศยานนานาชาติดอนเมือง สายตะวันออก และสายตะวันตก มีระยะระหว่าง 2.00-19.40 มม. และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 10.90 มม. มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 65 ปี

Roy et al. (1996) [22] มีการศึกษาถึงผลกระทบของความหนาปูนฉาบที่มีต่อการเกิดคาร์บอเนชั่น ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุ 19 ปี โดยการเจาะเก็บตัวอย่างโครงสร้างเสาและคาน ทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่นด้วยการใช้สารละลายฟีนอล์ฟธาลีน มีการนำข้อมูลแสดงผลด้วยกราฟแท่งดูการกระจายตัวของข้อมูล

Jiranuwat Banjongratc และคณะ [23] ทำการศึกษาเรื่อง ***Effect of Plastering Mortar and Paint On Carbonation Resistance of Concrete*** มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4,0.5 และ 0.6 โดยตัวอย่างคอนกรีตมีทั้งการทาสี ไม่ทาสี ฉาบปูนและไม่ฉาบปูนภายนอกของตัวอย่างคอนกรีต ทำการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นโดยการผ่าซีกตัวอย่างคอนกรีตแล้วฉีดด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาลีน พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นสูงขึ้น สำหรับผลของสีและปูนฉาบสามารถป้องกันการเกิดคาร์บอเนชั่นได้ในระดับหนึ่ง

บัญญัติ วารินทร์ไหลและคณะ [29] ทำการศึกษาเรื่อง การประเมินความเสียหายและการเสื่อมสภาพของอาคารที่พักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตชุมชน โดยทำการตรวจสอบพินิจ ทดสอบและประเมินค่ากำลังอัด วัดระยะหุ้มเหล็ก วัดระยะความหนาปูนฉาบในกรณีที่มีชั้นปูนฉาบ เจาะเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบระยะคาร์บอเนชั่นของโครงสร้างอาคารที่พักอาศัยทั้งหมด 9โครงการ พบว่า อัตราการเกิดระยะคาร์บอเนชั่น (สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น, k) ของโครงสร้างอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งติดกับทางด่วนสูงกว่าที่ไม่ติดกับทางด่วน ในขณะที่ตำแหน่งที่ตั้งของโครงสร้างอาคารในเขตกรุงเทพมหานครมีอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นสูงกว่าในเขตปริมณฑล ส่วนในกรณีโครงสร้างอาคารชิ้นส่วนสำเร็จนั้นมีแนวโน้มว่าอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่น (สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น, k) ช้ากว่าโครงสร้างอาคารหล่อในที่เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน