



## บทที่ 2

### คาร์บอนเนชันของคอนกรีต

#### 2.1 ความนำ

การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต เป็นขบวนการทางเคมีฟิสิกส์ที่ซับซ้อนมาก ประกอบด้วยขบวนการหลาย ๆ อย่างควบคู่กัน ดังเช่น

1. การควบแน่นของไอน้ำบนผนังของรูพรุนคอนกรีตในสภาวะสมดุลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่แวดล้อมอยู่
2. การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์[CO<sub>2</sub>] ในบรรยากาศเข้าสู่รูพรุนในเนื้อคอนกรีตจากผิวภายนอก
3. ศักยภาพของการทำปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบในซีเมนต์ที่ส่งผลต่อการเกิดคาร์บอนเนตได้
4. การละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์[Ca(OH)<sub>2</sub>] จากน้ำในรูพรุนของคอนกรีต และการแพร่ของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Ca<sup>2+</sup> + 2OH<sup>-</sup>] ภายในรูพรุนเหล่านั้น
5. การละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากน้ำภายในรูพรุนคอนกรีต และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์ กับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์
6. ปฏิกิริยาทางเคมีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับส่วนประกอบของซีเมนต์เฟสท์ที่สามารถเกิดคาร์บอนเนตได้
7. การลดปริมาตรรูพรุนอันเนื่องมาจากผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและคาร์บอนเนชัน

ขบวนการดังกล่าว อาจจำลองเป็นพฤติกรรมทางคณิตศาสตร์ ตามอัตราการเกิดคาร์บอนเนชัน ซึ่งจะแสดงในรายละเอียดต่อไป

## 2.2 น้ำภายในรูพรุนคอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างภายในประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากภายในรูพรุนเหล่านี้ประกอบด้วยน้ำ อากาศ และสารละลาย เปลี่ยนแปลงตามสภาวะแวดล้อมและส่วนผสมของคอนกรีต ขนาดของรูพรุนในซีเมนต์เพสต์จะอยู่ในช่วงที่กว้างมาก อาจแบ่งตามที่มาและลักษณะเฉพาะ คือ รูพรุนเจล (Gel pore) รูพรุนคาปิลลารี (Capillary pore) รูพรุนฟองอากาศ (Air pore) และรูพรุนอัดแน่น (Compaction pore) โดยทั่วไปรูพรุนเหล่านี้จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามขนาดของรูพรุนเพื่อให้สอดคล้องกับคุณสมบัติด้านความทนทาน คือ รูพรุนขนาดเล็ก (Micro pore) รูพรุนคาปิลลารี (Capillary pore) และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macro pore) ดังได้แสดงในรูปที่ 2.1 [1] โครงสร้างของรูพรุนหมายถึงประเภท และการกระจายขนาดของรูพรุน ร่วมกับกลไกการยึดเกาะของผิวรูพรุน จะมีอิทธิพลต่อกลไกในการเคลื่อนตัวในเนื้อคอนกรีตของน้ำ และอากาศภายในรูพรุนนั้น ๆ อีกทั้งยังเป็นตัวควบคุมระดับความอึดตัวของความชื้นภายในรูพรุนอีกด้วย ขบวนการการเกิดคาร์บอนเนชั่นจะเกี่ยวข้องกับน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ภายในรูพรุนโดยน้ำมีบทบาท 2 อย่าง คือ

1. เป็นตัวกีดขวางการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนตัวผ่านรูพรุน
2. เป็นตัวกลางในการละลายเพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์

น้ำที่อยู่ในรูพรุนของเนื้อคอนกรีตจะขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศรอบข้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เนื่องจากซีเมนต์เพสต์มีรูพรุนเจลขนาดเล็ก และมีปริมาณมาก จึงทำให้คอนกรีต มีความจุของปริมาณน้ำสัมพัทธ์สูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกต่ำ แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกสูงขึ้น ความสามารถในการแพร่ผ่านของก๊าซในเนื้อคอนกรีตจะลดลง และเมื่อคอนกรีตอึดตัวด้วยน้ำ การแพร่กระจายของก๊าซอาจจะไม่ต้องคำนึงถึง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยทั่วไป [2] รูพรุนคาปิลลารี จะแห้งเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศน้อยกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ แต่รูพรุนเจลจะยังคงดูดซึมน้ำได้แม้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกจะต่ำมาก

Papadakis et. al. [3] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ และระดับความอิ่มตัวของรูพรุน เมื่อทราบการกระจายขนาดของรูพรุน และคุณสมบัติทางเคมีของผิวรูพรุน โดยสมมติว่า หากเกิดสภาวะสมดุลของความร้อนของน้ำ ระหว่างรูพรุนและสภาวะแวดล้อมแล้ว จะทำให้น้ำในรูพรุนนี้มีพฤติกรรมเชิงกลใน 2 ลักษณะคือ

1. ถ้ารูพรุนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง มากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเคลวิน (Kelvin diameter,  $d_k$ ) ( $d > d_k$ ) น้ำที่เกาะบนผนังของรูพรุนจะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มต่อเนื่อง ความหนาของแผ่นฟิล์มนี้จะเท่ากับ  $t_w$  ปริมาณน้ำส่วนนี้สามารถกำหนดให้เป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของน้ำต่อรูพรุน มีค่าเท่ากับ  $f_w$  เขียนเป็นสมการได้ คือ

$$f_w = \frac{2Bmd_w}{[1 + (B-1)m](1-m)} \int_{\log d_k}^{\infty} \frac{1}{d} (1 - m^{d/2d_w}) f_d d(\log d) \quad 2.1$$

เมื่อ

$$d_k = 2t_w + \frac{E}{T \ln(1/m)} \quad (\text{ไมโครเมตร}) \quad 2.3$$

$$t_w = \frac{Bmd_w}{[1 + (B-1)m](1-m)} (1 - m^{d/2d_w}) \quad (\text{ไมโครเมตร}) \quad 2.4$$

$$m = RH/100$$

$$RH = \text{ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)}$$

$$B = \text{ค่าคงที่ของ Brunauer, Emmett and Teller (BET) ขึ้นกับอุณหภูมิ และผิวที่ใช้ดูดซับไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 100 สำหรับซีเมนต์ที่ไม่เป็นคาร์บอนेट และเท่ากับ 1 สำหรับซีเมนต์ที่เป็นคาร์บอนेट}$$

$$E = \text{ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 0.6323 สำหรับวัสดุที่ไม่เป็นคาร์บอนेट และมีค่าเท่ากับ 0.2968 สำหรับวัสดุที่เป็นคาร์บอนेट}$$

$$T = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)}$$

$$d_w = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางโมเลกุลของน้ำมีค่าเท่ากับ } 3 \times 10^{-4} \text{ ไมโครเมตร}$$

$$d = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน (ไมโครเมตร)}$$

$$f_d = \text{ความหนาแน่นที่น้ำเชื่อถือ ของปริมาตรรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ } d$$

2. ถ้ารูปพุนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง น้อยกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเคลวิน  $d_k$  ( $d < d_k$ ) น้ำที่บรรจุอยู่ในรูปพุน มีปริมาณกำหนดตามสัดส่วนโดยปริมาตรของน้ำต่อรูปพุน มีค่าเท่ากับ  $f_k$  เขียนเป็นสมการได้ คือ

$$f_k = \int_{-\infty}^{\log d_k} f_d d(\log d) \quad 2.2$$

แต่เนื่องจากการกระจายขนาดของรูปพุนมีทั้ง 2 ส่วน ดังนั้น ระดับความอึดตัวของรูปพุน หรือ สัดส่วนของปริมาตรน้ำต่อปริมาตรรูปพุนรวม ( $f$ ) มีค่าเท่ากับ

$$f = f_w + f_k \quad 2.5$$

และอัตราส่วนของปริมาตรรูปพุนที่เหลือหรือก๊าซแพร่ผ่าน ( $f_g$ ) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน มีค่าเท่ากับ

$$f_g = 1 - f \quad 2.6$$

Papadakis et. al [3] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระดับความอึดตัวภายในรูปพุน กับสมการที่ 2.1 และ 2.2 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าระดับความอึดตัว และความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศโดยรอบตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สัดส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ การเติมมวลรวมในซีเมนต์พิเศษ และผลกระทบของการเป็น หรือไม่เป็นคาร์บอนเนตของซีเมนต์พิเศษ ค่าระดับความอึดตัวคำนวณได้จากน้ำหนักในสถานะคงที่ของตัวอย่างคอนกรีตที่เก็บรักษาในสภาวะแวดล้อมของความชื้นสัมพัทธ์ที่ควบคุมผลการทดลองด้วยการลดความชื้นสัมพัทธ์จาก 100 ถึง 0 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าที่สูงกว่าการทดลองการดูดซับความชื้น โดยการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ความสัมพันธ์จากการเปลี่ยนแปลงความชื้นทั้ง 2 ลักษณะ จะมีลักษณะสัมพันธ์เช่นเดียวกัน ค่าระดับความอึดตัวที่ได้จากวิธีการลดความชื้นสัมพัทธ์จะมากกว่าค่าที่ได้จากการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ปรากฏการณ์อันนี้ถือเป็นลักษณะธรรมชาติปกติตามขบวนการ การทำให้ของแข็งที่มีรูปพุนแห้ง รูปพุนจะมีลักษณะเหมือนขวดหมึกทำให้น้ำถูกกักไว้ในกระเปาะตามรูปพุนระหว่างการคายความชื้น และถูกกีดขวางขณะเคลื่อนตัวเข้าสู่

กระเปาะระหว่างการดูดซับความชื้น ดังนั้นในสถานะที่แท้จริงของการสมดุลจะอยู่ระหว่างสถานะที่ทดสอบด้วยวิธีทั้งสอง

ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4 เป็นการแสดงผลของความสัมพันธ์เชิงวิเคราะห์จากสมการที่ 2.1 - 2.4 แต่การกระจายขนาดของรูพรุนวัดได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่าขนาดส่วนใหญ่จะอยู่ที่  $6 \times 10^{-3}$  ไมโครเมตร โดยที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยจะทำให้ความหนาแน่นของรูพรุนขนาดเล็กมากกว่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มาก จากผลการทดลอง สรุปได้ว่า เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ค่าระดับความอึดตัวที่ได้ตามทฤษฎี จะใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้จากการดูดซับความชื้น แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงค่าระดับความอึดตัวที่ได้ตามทฤษฎีจะใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้จากการคายความชื้น และถ้าความชื้นสัมพัทธ์ปานกลาง ค่าระดับความอึดตัวที่ได้ตามทฤษฎี จะอยู่ระหว่างผลการทดลองที่ได้จากทั้งสองสถานะภาพ

ณ ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน ระดับความอึดตัวของรูพรุน จะขึ้นกับสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยสัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ระดับความอึดตัวของรูพรุนลดลง อันเป็นผลมาจากสัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็กในการกระจายขนาดของรูพรุนลดลง [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) อย่างไรก็ตาม Papadakis et. al. [3] พบว่าส่วนผลของคอนกรีตโดยสัดส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์และการคละของมวลรวม จะไม่มีผลกระทบต่อระดับความอึดตัวของรูพรุนด้วยเหตุผลที่มวลรวมที่ผสมเข้าไป และการคละของมวลรวมมีผลกระทบน้อยมากต่อสัดส่วนและขนาดของรูพรุนขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข) และ (ค) นอกจากนี้การเกิดคาร์บอนเนชั่นยังทำให้ค่าระดับความอึดตัวลดลง ทั้งๆที่การเกิดคาร์บอนเนชั่นช่วยเพิ่มสัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็ก เป็นเพราะคุณสมบัติทางเคมีของผิวรูพรุนถูกกำหนดโดยค่าที่น้อยของค่าคงที่ E และ B ในสมการที่ 2.1 ,2.3 และ 2.4 ซึ่งจะเป็นการลดน้ำในรูพรุนคอนกรีตภายหลังการเกิดคาร์บอนเนชั่น [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ง)

### 2.3 การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในคอนกรีต

ขบวนการการเคลื่อนที่ของน้ำ ก๊าซ และสารละลายในน้ำ เป็นขบวนการการเคลื่อนตัวภายใต้สภาวะแวดล้อมภายในรูพรุน มักจะมีสาเหตุมาจากความเข้มข้นที่แตกต่างกัน Crank [4] ได้อธิบายว่า กลไกการเคลื่อนย้ายที่แท้จริงเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแบบสุ่ม โดยแต่ละโมเลกุลจะเป็นอิสระต่อกัน และจะวิ่งชนกันอย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการเคลื่อนที่ แม้ว่า

การเคลื่อนที่จะเป็นแบบสุ่ม แต่อัตราส่วนโดยเฉลี่ยแล้วโมเลกุลเหล่านี้จะเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดใดๆ เพียงครั้งเดียว และโมเลกุลส่วนมากจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำเท่านั้น

เนื่องจากการเคลื่อนย้ายมวลมีความคล้ายคลึงกับพฤติกรรมการนำความร้อน ดังนั้น สมการ การเคลื่อนย้ายมวลตามกฎข้อที่ 1. ของฟิคค์ (Fick's first law) อาจเขียนเป็นสมการของฟูเรียร์ (Fourier) ได้ดังนี้ [5]

$$(J/A)_x = -D (\partial C/\partial x) \quad 2.7$$

เมื่อ

- $J/A$  = อัตราการเคลื่อนที่ของก๊าซ (โมล/วินาที.ตารางเมตร)
- $A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวกลางที่ก๊าซเคลื่อนที่ตั้งฉาก (ตารางเมตร)
- $D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซ (ตารางเมตร/วินาที)
- $\partial C/\partial x$  = เกรเดียนต์ ความเข้มข้นของก๊าซ (โมล/เมตร.ลบ.เมตรของตัวกลาง)
- $C$  = ความเข้มข้นของก๊าซที่กำลังแพร่ (โมล/ลบ.เมตรของตัวกลาง)
- $X$  = ระยะทางระหว่างระนาบที่อ้างอิง วัดตั้งฉากกับหน้าตัด และแสดงถึงการเคลื่อนย้ายในทิศทาง  $X$  เท่านั้น (เมตร)

จากสมการหากเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าการเคลื่อนที่ของก๊าซไปในทิศทางกลับกันกับความเข้มข้นที่มากขึ้น สัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการข้างต้น จะถูกต้องเมื่อตัวกลางเป็นไอโซโทรปิก(Isotropic) ดังนั้น จึงยากที่จะหาค่าที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตได้อย่างถูกต้อง เพราะในเนื้อคอนกรีตการไหลจะถูกขัดขวางด้วยโครงสร้างที่เป็นรูพรุน และระยะทางที่โมเลกุลเคลื่อนที่ไปจะมากกว่าความหนาของตัวกลาง(คอนกรีต) เนื่องจากการรบกวนของรูพรุน นอกจากนี้ เส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนอาจจะเล็กเพียงพอที่จะจำกัดการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลได้อีกด้วย

Daimon et. al [4] กล่าวว่า การแพร่ในระบบใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อ เส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนคาบิลลารี มีค่ามากกว่าสิบเท่าของระยะเคลื่อนอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ของโมเลกุลที่กำลังแพร่ แต่ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าระยะเคลื่อนที่อิสระเฉลี่ย โมเลกุลที่กำลังแพร่จะชนกับผนังของช่องทาง จากการทดลองพบว่ารูพรุนที่ทะลุถึงกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เส้นผ่าศูนย์กลาง

กลางใหญ่กว่าระยะเคลื่อนที่อิสระ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการค้นพบของ Darr และ Ludwig [4] ซึ่งกล่าวว่าที่อุณหภูมิ และความดันปกติ ระยะเคลื่อนที่อิสระเฉลี่ยของก๊าซจะอยู่ในช่วง 50 - 100 นาโนเมตร ( $50 \times 10^{-6}$  -  $100 \times 10^{-6}$  มิลลิเมตร) ซึ่งช่วงนี้จะตรงกันกับช่วงของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนคาปิลลารี นอกจากนี้พื้นที่หน้าตัดยังมีคุณสมบัติเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนสามารถซึมผ่านได้ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ( $D_0$ ) จึงใช้แทนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับการทดลองที่ใช้ตัวกลางเป็นคอนกรีต

การแพร่ของก๊าซผ่านคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับความจุความชื้นของรูพรุน Tuutti [6] ยืนยันโดยการทดลองว่า ความจุความชื้นเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด ที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล Lawrence [4] อธิบายว่าการแพร่ของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศจะมีค่ามากกว่าในของเหลว ประมาณ  $10^4$  ถึง  $10^5$  เท่า

สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของคอนกรีตขึ้นกับตัวแปรจำนวนมาก เช่น สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สภาพการบ่ม วิธีการทำให้คอนกรีตแน่น ชนิต และสัดส่วนของส่วนประกอบของซีเมนต์ และสภาวะแวดล้อม แต่ตัวแปรทั้งหมดสามารถลดลงเหลือเพียง 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ความพรุน ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ [7] Papadakis et. al. [8] ได้เสนอค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล โดยวิเคราะห์จากข้อมูลในการทดลอง ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 หรือเขียนเป็นสมการคือ

$$\sqrt{De,co2} = B_0 \epsilon_p [1 - (RH/100)] \quad 2.8$$

เมื่อ

$De,co2$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตารางเมตร/วินาที)

$\epsilon_p$  = ความพรุนของซีเมนต์เพสต์

$B_0$  = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ  $1.2 \times 10^{-3}$  เมตร/ $\sqrt{\text{วินาที}}$

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

ค่า  $[1-(RH/100)]$  ในสมการที่ 2.8 อาจพิจารณาให้อยู่ในรูปของระดับความอึดตัวของรูปพรุน ( $f$ ) ซึ่งค่าระดับความอึดตัวของรูปพรุนนี้ ได้รวมผลกระทบของการกระจายขนาดของรูปพรุน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่ขึ้นกับ สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ความพรุนนี้จะลดลงเมื่อเกิดขบวนการคาร์บอนเนชัน ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนของซีเมนต์เพสต์ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สามารถประมาณได้โดยการสร้างสมการขึ้นจากผลการทดลองของ Papadakis et. al [3] ดังต่อไปนี้

$$E_p(\text{carbonated}) = 0.63 w - 0.05 \quad 2.9$$

เมื่อ

$$E_p(\text{carbonated}) = \text{ความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่เกิดคาร์บอนเนต}$$

$$w = \text{สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์}$$

ผลดังในรูปที่ 2.7 แสดงถึงความพรุนในซีเมนต์เพสต์ที่ลดลงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันตามระยะเวลาที่ผ่านมา และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่ยังไม่เกิดคาร์บอนเนต [ $E_p(\text{uncarbonated})$ ] และความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่เกิดคาร์บอนเนต [ $E_p(\text{carbonated})$ ] ที่เวลา 100 และ 1000 วัน มีค่าโดยประมาณ คือ

$$E_p(\text{carbonated}) \approx 0.88 E_p(\text{uncarbonated}) \quad 2.10$$

CEB 1990 MODEL CODE [9] ได้สรุปไว้ว่าที่ความจุความชื้นปานกลางสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจน จะอยู่ในช่วง  $0.5 \times 10^{-8}$  ถึง  $5 \times 10^{-8}$  ตารางเมตร/วินาที และยังได้เสนอสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $D_{CO_2}$ ) สำหรับคอนกรีตที่เป็นคาร์บอนเนตได้ที่กำลังฝน มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ คือ

$$\log D_{CO_2} = -(7 + 0.25 f_{ck}/f_{cks}) \quad 2.11$$





เมื่อ

$$f_{cks} = 10 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} = \text{กำลังอัดคอนกรีต (Mpa)}$$

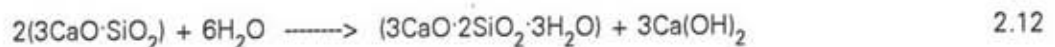
สำหรับคอนกรีตที่มีผิวสัมผัสกับฝนโดยตรงหรือมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ตามสมการที่ 2.11 จะลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์

ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซภายในรูพรุนคอนกรีตนั้น น้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ Papadakis et. al. [3] ได้สังเกตพบว่า การเติมมวลรวมลงในซีเมนต์เพสต์ไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล นั่นคือไม่มีผลแตกต่างระหว่างคอนกรีต และซีเมนต์เพสต์ที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และชนิดของซีเมนต์เหมือนกัน เพราะว่า การแพร่ผ่านรอยต่อระหว่างอนุภาคมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์จะเกิดขึ้นเมื่อ การแพร่ไม่สามารถที่จะกระทำผ่านอนุภาคของมวลรวมได้ และยังพบอีกว่าการเกิดคาร์บอนเนชั่น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลลดลงเล็กน้อย เนื่องจากความพรุน และรัศมีเฉลี่ยของรูพรุนลดลง อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 2.5 จะสังเกตพบว่า ความหนาแน่นของรูพรุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กกว่ามีเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของมวลรวม ดังนั้น การเติมมวลรวมน่าจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

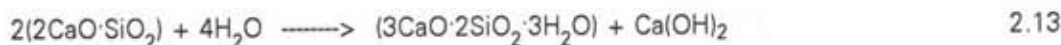
#### 2.4 ปฏิกริยาไฮเดรชั่น

การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตจะขึ้นกับปริมาณของสารประกอบซีเมนต์ที่สามารถเกิดคาร์บอนเนตได้ ปฏิกริยาเคมีระหว่างน้ำ กับ ซีเมนต์ หรือที่เรียกว่าปฏิกริยาไฮเดรชั่นจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งปฏิกริยาดังกล่าวสามารถเกิดได้ 2 ลักษณะ คือ

จาก ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ;  $\text{C}_3\text{S}$ ):

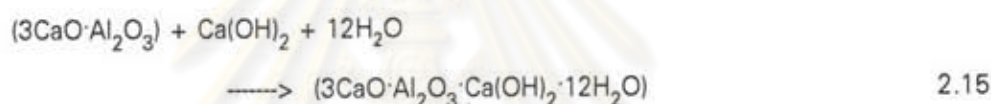
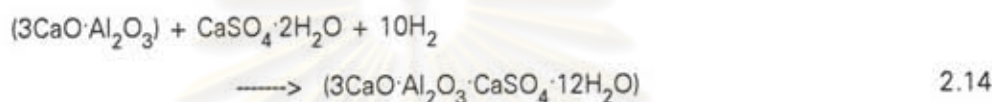


จาก ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ;  $\text{C}_2\text{S}$ ):

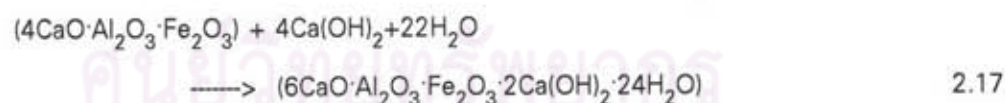
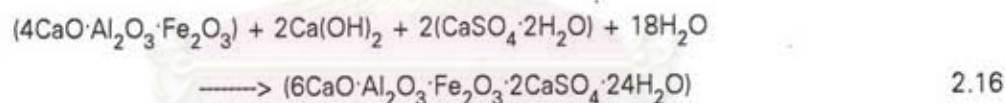


และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก่อนคือ

จาก ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{C}_3\text{A}$ ):



จาก เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรท์ ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{C}_4\text{AF}$ ):

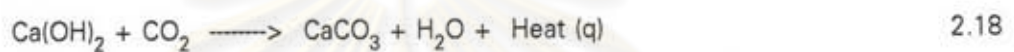


ปฏิกิริยาเคมีตามที่แสดงในสมการที่ 2.14 และ 2.16 เกิดขึ้นในขณะที่ปฏิกิริยากับ ยิบซั่มในส่วนประกอบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คิบหน้าอยู่ ส่วนปฏิกิริยาทางเคมีตามสมการที่ 2.15 และ 2.17 เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยากับยิบซั่มจนหมดสิ้นแล้ว อนึ่งปฏิกิริยาทางเคมีตามสมการที่ 2.12 - 2.17 จะสามารถคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ หากรู้ปริมาณส่วนประกอบของซีเมนต์ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ตามที่แสดงในตารางที่ 2.1 เป็นส่วนประกอบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่อาจเกิดคาร์บอนेटได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแสดงถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิด

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ ตามที่กำหนดใน ASTM C 150 หรือ มอก. 15

## 2.5 การเกิดคาร์บอนเนชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า น้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO<sub>2</sub>) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ คือ



q เป็นปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน มีค่าประมาณ 580 แคลอรีต่อกรัมของ CaO ที่ทำปฏิกิริยา หรือประมาณ 7.7 กิโลจูล / โมล ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันข้างต้นสามารถที่จะแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อย ๆ ได้ ดังนี้ [10]

1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะละลายบนแผ่นฟิล์มน้ำที่เกาะอยู่บนผนังภายในของรูพรุน ดังสมการเคมี



2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะแพร่ผ่านรูพรุนในส่วนที่เป็นอากาศ โดยจะเคลื่อนตัวจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ (จากภายนอกเข้าสู่ภายในมวลคอนกรีต) และจะละลายน้ำที่มีอยู่ภายในรูพรุนคอนกรีต จากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการเคมีต่อไปนี้



โดยมีขั้นตอนการทำปฏิกิริยา ดังนี้



Papadakis et. al [8] ให้ข้อเสนอแนะว่า ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามสมการที่ 2.20 น่าจะเป็นฟังก์ชันของ  $f$  ระดับความอิ่มตัวของน้ำในรูปพรุน (อัตราส่วนของปริมาตรน้ำทั้งหมดภายในรูปพรุนต่อปริมาตรของรูปพรุน) เนื่องจากค่าคงที่ของปฏิกิริยาดังกล่าว แท้จริงแล้วเกิดจากการวัดในสารละลายที่มีน้ำจำนวนมาก ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ามิติของโมเลกุล แต่ภายในรูปพรุนคอนกรีต จะมีขนาดของรูปพรุนขนาดเล็กอยู่ในระดับอังสตรอม ( $\text{\AA}$ ) และความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำบนผนังของรูปพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีมิติเพียง 1-3 โมเลกุล เท่านั้น และสามารถที่จะลดลงอีกเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ และระดับความอิ่มตัว ( $f$ ) ลดลง ในสภาวะของน้ำดังกล่าว การเคลื่อนตัวของประจุ (ได้แก่  $\text{OH}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) ให้มีขอบเขตที่กว้าง ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 2.18 จะขึ้นอยู่กับกลไกของโมเลกุลที่แตกต่างกันและเชื่อแน่ว่าจะต้องแตกต่างจากสภาพที่ตัวกลางมีน้ำเป็นจำนวนมากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อประจุถูกเกี่ยวไว้กับผนังของรูปพรุน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้ประจุอีกด้วย

ผลการศึกษาของ Bakker [11] ได้สรุปแบบจำลองของขบวนการการเกิดคาร์บอนเนชั่น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในช่วงแรก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยาบริเวณผิวภายนอกของคอนกรีต ตามสมการที่ 2.18 ต่อมาเมื่อส่วนบริเวณผิวภายนอกของคอนกรีตกลายเป็นคาร์บอนเนต แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยังสามารถแพร่ต่อไปเพื่อทำปฏิกิริยากับเนื้อคอนกรีตที่อยู่ถัดเข้าไปเรื่อย ๆ ยืนยันด้วยการทดลองของ Tuutti [6] ดังแสดงตามรูปที่ 2.9 จะพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในเนื้อคอนกรีตจะเข้าทำปฏิกิริยาเกือบหมด เหลือเพียงประมาณ 1 ใน 4 หลังจากปฏิกิริยาเกิดขึ้น อนึ่งการทดลองของ Ohgishi และ Ono [12] ใช้วิธี X-ray Diffraction

หาความเข้มข้นของรังสีส่วนที่เกิดคาร์บอนเนต และส่วนที่ยังมีสภาพเป็นต่างดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะพบว่าปฏิกิริยาคาร์บอนเนตจะอยู่ในจุดตัดระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมคาร์บอนเนต ตัดกับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อย ค่า pH ของคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนตจะเปลี่ยนแปลงไป และจะเป็นผลลัพธ์สำคัญในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากปฏิกิริยา และแสดงถึงปรากฏการณ์ของการเกิดคาร์บอนเนตขึ้น โดยปกติแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายในน้ำภายในรูพรุนของคอนกรีต และสารละลายที่เป็นต่างในมวลรวม จะมีค่า pH อยู่ระหว่าง 12.5 ถึง 13.5 แต่การแพร่ผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกต จะทำให้ค่า pH ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อคอนกรีตเกิดเป็นคาร์บอนเนตโดยสมบูรณ์แล้วจะมีค่า pH ประมาณ 8.3 ดังแสดงในรูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ระหว่างคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนตที่ผิวหน้าจะมีค่า pH ประมาณ 8.3 เข้าไปจนถึงจุดที่มีปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ค่า pH จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และในบริเวณที่คอนกรีตยังไม่เกิดคาร์บอนเนต จะมี pH สูงถึง 12 ขึ้นไป ดังการศึกษาของ CEB [13] ดังนั้นตำแหน่งความลึกของคาร์บอนเนตชั้นที่ได้จากการทดสอบโดยใช้สาร ฟีนอล์ฟทาลีน จะมีความไม่แน่นอนอยู่บ้าง ต่อมา Forrester [12] ได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่า pH กับความลึกคาร์บอนเนตชั้น ปรากฏว่าได้ผลคล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

## 2.6 การเกิดคาร์บอนเนตชั้นของ CSH และ สารประกอบส่วนที่ไม่ต้องการน้ำ

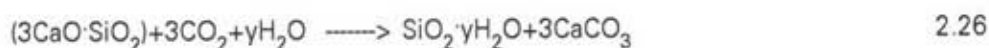
การเกิดคาร์บอนเนตชั้นของสารประกอบจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีสารประกอบอีกหลายตัวที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีให้เกิดคาร์บอนเนตชั้นได้ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) ของซีเมนต์เฟสท์ จะสามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีได้ดังต่อไปนี้

จากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

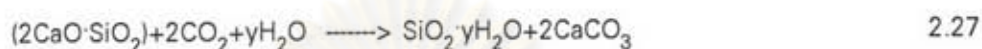


2.25

จากไตรแคลเซียมซิลิเกต



จากไดแคลเซียมซิลิเกต



อย่างไรก็ตาม ถ้าปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ ปฏิกิริยาทางเคมีตามสมการที่ 2.26 และ 2.27 จะไม่เกิดขึ้น แต่จากปฏิกิริยาเคมีที่ 2.25 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาดังกล่าว อาจเกิดขึ้นได้ในสถานะที่ไม่มีน้ำในรูปอนุคอนกรีตก็ได้ Steinour [4] กล่าวว่า คาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอันดับแรก และจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่น ๆ เมื่อ pH ต่ำกว่า 12.4 ซึ่งเป็นค่า pH ที่สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิ่มตัว ผลการทดลองของ Papadakis et.al. [8] พบว่าอัตราส่วนค่าคงที่ของปฏิกิริยา ระหว่างสมการที่ 2.25 และ 2.18 มีค่าโดยประมาณ  $7.8 \times 10^{-3}$  ซึ่งเป็นการยืนยันว่า ปฏิกิริยาเคมีที่ 2.18 เป็นปฏิกิริยาหลักของการเกิดคาร์บอนเนชัน

## 2.7 อัตราการเกิดคาร์บอนเนชัน

จากหัวข้อที่ 2.2 - 2.6 อาจกล่าวได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชันกับระยะเวลาจะเกี่ยวข้องกับหลายองค์ประกอบ คือ

1. ปริมาณน้ำในคอนกรีตซึ่งมีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ โดยน้ำในคอนกรีตจะเกิดขบวนการเคลื่อนตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต้นตอของการทำปฏิกิริยาให้เกิดคาร์บอนเนต

2. ความพรุนของคอนกรีต ซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ สภาพการบ่ม การทำให้แน่น และความพรุนของมวลรวม โดยจะมีผลต่อปริมาณน้ำในคอนกรีต พื้นผิวที่ทำปฏิกิริยาเคมีและความสามารถในการแพร่ของก๊าซ

3. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

4. ประเภท และปริมาณของสารประกอบหลักในซีเมนต์ ได้แก่  $C_2S$  และ  $C_3S$  ซึ่งจะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ผลิตภัณฑ์ คือ  $Ca(OH)_2$  และ  $CSH$

ในการพิจารณาปรากฏการณ์คาร์บอนเนชันในอดีต [4,6] ได้อ้างความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอนเนชัน และเวลา ดังสมการ

$$x = k\sqrt{t} \quad 2.28$$

โดย

- $x$  = ความลึกคาร์บอนเนชัน
- $t$  = เวลาที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อม
- $k$  = สัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ และสิ่งแวดล้อม

ค่าสัมประสิทธิ์  $k$  ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบมากมายดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น จะมีความแตกต่างกันไปตามสมมติฐาน และการทดลองที่กำหนดขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทางฟิสิกส์ ได้กำหนดขึ้นโดยอ้างอิงผลการทดสอบตามแต่ละสภาพ [4,9,11] รวบรวมไว้ดังนี้

1.) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เสนอโดย Hamada และ Uchida [4]

Uchida และ Hamada ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ ระหว่างความลึกที่มีคุณสมบัติเป็นกลางของคอนกรีตกับเวลา ตั้งแต่ปี 1928 พบว่าการกลายเป็นกลางของคอนกรีตจะช้าลงเมื่อสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง เป็นเพราะซีเมนต์เพสต์ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น และได้เสนอสมการอัตราการเกิดคาร์บอนเนชัน ดังต่อไปนี้

$$t = \frac{0.3(1+3w)x^2}{100(w-0.3)^2} \quad 2.29$$

โดย

- $t$  = เวลาที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อม (ปี)
- $w$  = สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์
- $x$  = ความลึกคาร์บอนเนชัน (มม.)

นักวิจัยชาวญี่ปุ่นเชื่อว่า สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่สอดคล้องกับการเกิดคาร์บอนเนชั่นมากที่สุด ซึ่งต่อมา Kishitani [4] ได้ปรับปรุงสมการดังกล่าว โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่างกัน คือ

เมื่อสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เกินกว่า 0.60

$$t = \frac{0.3(1.15 + 3w)x^2}{100(w - 0.25)^2} ; w > 0.6 \quad 2.30$$

และ เมื่อสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยกว่า 0.60

$$t = \frac{7.2x^2}{100(4.6w - 1.76)^2} ; w < 0.6 \quad 2.31$$

สมการที่ 2.29 - 2.31 เป็นสมการที่สร้างขึ้นจากตัวอย่างการทดลองที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และทรายและมวลรวมจากแม่น้ำ ดังนั้น จึงต้องมีการปรับแก้ให้เป็นกลางด้วยตัวคูณ R (Neutralization factor) เพื่อปรับแก้สมการข้างต้น ดังนี้

ในกรณีที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.60

$$t = \frac{0.3(1.15 + 3w)x^2}{100R^2(w - 0.25)^2} ; w > 0.6 \quad 2.32$$

และ ในกรณีที่สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยกว่า 0.60

$$t = \frac{7.2x^2}{100R^2(4.6w - 1.76)^2} ; w < 0.6 \quad 2.33$$





โดย

$$\begin{aligned}
 R &= \text{ตัวคูณปรับค่าความเป็นกลาง} \\
 &= r_c r_a r_s \\
 r_c &= \text{ตัวแปรจากชนิดของซีเมนต์} \\
 r_a &= \text{ตัวแปรจากชนิดของมวลรวม} \\
 r_s &= \text{ตัวแปรจากผิวสัมผัส}
 \end{aligned}$$

ตัวคูณที่เสนอโดย Hamada ดังได้แสดงในตารางที่ 2.2 พิจารณาแยกตามชนิดของซีเมนต์ หิน-ทราย และสารเคมีผสมเพิ่ม ในทำนองเดียวกัน Kishitani [4] ได้กำหนดค่าตัวคูณปรับแก้ให้เป็นกลาง ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยเน้นชนิดของหิน-ทราย และชนิดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ รวมไปถึงชนิดสารเคมีผสมเพิ่ม ซึ่งแยกเป็น 2 กลุ่ม คือสารเพิ่มฟองอากาศ และสารกระจายน้ำ อย่างไรก็ตาม สมการที่ 2.29 - 2.33 ได้คำนึงถึงเฉพาะลักษณะคุณสมบัติของวัสดุเท่านั้น โดยไม่พิจารณาถึงสภาวะแวดล้อมซึ่งเป็นองค์ประกอบอันสำคัญในการเกิดคาร์บอนเนชั่น

## 2.) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เสนอโดย Smolczyk [4]

Smolczyk ได้ทดลองวัดกำลังอัดคอนกรีตที่มีผลกระทบต่อ การเกิดคาร์บอนเนชั่น ทั้งนี้เนื่องจาก คาร์บอนเนชั่นจะเพิ่มขึ้นหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อ แคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งกำลังอัดคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความลึกคาร์บอนเนชั่นน่าจะแปรผกผันกับกำลังอัดคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป จากการทดลองของ Smolczyk ได้เสนอสมการ ดังนี้

$$x = 7.00 \left( 10 \frac{w}{\sqrt{N_T}} - 0.175 \right) \sqrt{12t} - 0.50 \quad 2.34$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 x &= \text{ความลึกคาร์บอนเนชั่น (มม.)} \\
 w &= \text{อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์} \\
 N_T &= \text{กำลังอัดคอนกรีต ณ เวลา T วัน (kg/cm}^2\text{)} \\
 t &= \text{เวลาที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อม (ปี)}
 \end{aligned}$$

### 3.) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาโดยใช้กฎของฟิกค์ (9,11)

เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดคาร์บอนเนชั่น และการเคลื่อนตัวของก๊าซในรูพรุนของคอนกรีตภายใต้สภาวะของความดันที่ไม่ต่างกัน แต่จะเกิดขึ้นจากหลักการของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของก๊าซภายนอก และในคอนกรีต ซึ่งจะสอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมของโครงสร้างในงานวิจัยนี้ ดังนั้นการเกิดคาร์บอนเนชั่นพิจารณาจากการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านเนื้อคอนกรีต ตามกฎของฟิกค์อธิบายได้ จากสมการ

$$dq = \frac{DA(c_1 - c_2)}{x} dt \quad 2.35$$

โดยที่

- $dq$  = ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แพร่ผ่านคอนกรีต (กรัม)  
 $D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อคอนกรีต(ตร.เมตร/วินาที)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดที่ก๊าซแพร่ผ่าน (ตร.เมตร)  
 $c_1$  = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวคอนกรีต (กรัม / ลบ.เมตร)  
 $c_2$  = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แนวการเกิดคาร์บอนเนชั่น (กรัม / ลบ.เมตร)  
 $t$  = เวลา (วินาที)  
 $x$  = ระยะจากผิวคอนกรีตถึงแนวการเกิดคาร์บอนเนชั่น (เมตร)

ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบซีเมนต์ คือ

$$dq = adV \quad 2.36$$

หรือ  $dq = aAdx \quad 2.37$

โดยที่

$a$  = ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำให้คอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตร  
เกิดคาร์บอนเนชั่นโดยสมบูรณ์ (กรัม / ลบ.เมตร)

$dV$  = ปริมาตรของคอนกรีต (ลบ.เมตร)

$dx$  = ระยะทางที่ก๊าซเคลื่อนที่ไป (เมตร)

จากสมการที่ 2.35 และ 2.37 กำหนดให้มีค่าเท่ากัน ดังนี้ :-

$$aAdx = \frac{DA(c_1 - c_2)}{x} dt \quad 2.38$$

$$\text{หรือ} \quad xdx = \frac{D(c_1 - c_2)}{a} dt \quad 2.39$$

ถ้า  $D$ ,  $c_1$  และ  $c_2$  เป็นค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับเวลา และระยะทาง ดังนั้นหากกำหนดให้ ความเข้มข้นของ  
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แนวการเกิดคาร์บอนเนชั่นเป็นศูนย์ จากสมการที่ 2.39 จะได้ค่าความ  
ลึกคาร์บอนเนชั่น

$$x = \sqrt{\frac{2Dc_1}{a} t} \quad 2.40$$

และจากคุณสมบัติการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านตัวกลางคอนกรีตทำให้ต้องใช้  
สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ( $D_e$ ) แทนสัมประสิทธิ์การแพร่ในสภาวะปกติธรรมดา ดังนั้น  
สมการที่ 2.40 อาจเขียนใหม่ได้ คือ

$$x = \sqrt{\frac{2D_e c_1}{a} t} \quad 2.41$$

ซึ่งสมการที่ 2.41 สามารถคำนวณหาค่าความลึกของคาร์บอนเนชั่นตามเวลาได้ หาก  
ทราบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ สารประกอบในซีเมนต์ที่สามารถเกิด  
คาร์บอนเนตได้ และสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของคอนกรีต

CEB-FIP MODEL CODE 1990 [9] กำหนดให้ใช้สมการที่ 2.41 คำนวณหาความลึกคาร์บอนเนชั่นตามระยะเวลาใดๆ สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมมาตรฐานค่า  $c_1/a$  จะมีค่าโดยประมาณ  $7 \times 10^{-6}$  และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล จะเป็นไปตาม สมการที่ 2.11 อย่างไรก็ตาม พึงจะต้องตระหนักไว้เสมอว่า ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และคุณสมบัติของคอนกรีตจะมีผลกระทบ และอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย ดังนั้น สมการที่ 2.41 จึงไม่อาจให้การคาดคะเนการเกิดคาร์บอนเนชั่น (Progression of carbonation) ได้ตามสภาพจริง ที่ให้ความเชื่อถือได้อย่างสมบูรณ์ จึงจำเป็นต้องพิจารณาเทียบเคียงกับสภาพจริงในภาคปฏิบัติประกอบด้วยเสมอ [9]



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย