บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะกล่าวถึงการเกิดคาร์บอเนชั่นในคอนกรีต รวมถึงวิธีการและผลของการเกิดคาร์บอเนชั่น รวมทั้งการใช้วัสดุประสานต่างชนิดต่อการเกิดคาร์บอเนชั่น

P.Castro, E.I.Morenob and J.Genesca [1] ได้ทำการศึกษาเรื่อง ***Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings*** มีการศึกษาถึงปัจจัยด้านสภาวะสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชั่นของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยการเก็บเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ระดับความสูง 50, 125 และ 190 เซนติเมตร ของตัวอาคาร จากนั้นนำไปทดสอบระยะคาร์บอเนชั่น นอกจากนั้นยังมีการศึกษาตำแหน่งที่ตั้งของอาคารที่อยู่ใกล้สภาวะแวดล้อมทะเลต่อการเกิดคาร์บอเนชั่นด้วย พบว่าตำแหน่งที่ตั้งอาคารห่างจากทะเลประมาณ 100-200 ม.มีแนวโน้มอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และระดับความสูงเพิ่มขึ้นของอาคารตัวอย่าง ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นสูงขึ้นด้วย

M.G.Alexander, J.R.Mackechnie and W.Yam [2] ได้ทำการศึกษาเรื่อง ***Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities*** มีการทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นของโครงสร้างสะพาน 3 แห่งในแอฟริกาใต้ที่มีอายุระหว่าง 11-76 ปี คือสะพานที่อยู่ในพื้นที่ Cape Peninsula, Durban และJohannesburg ซึ่งการเกิดคาร์บอเนชั่นขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง สภาพแวดล้อมที่ตั้งของโครงสร้างสะพาน โดยสภาพแวดล้อมที่ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 51-68 เปอร์เซ็นต์ จะมีโอกาสที่การเกิดคาร์บอเนชั่นมากกว่าสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ประมาณมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์

M.N.Haque and H.Al-Khaiat [3] ได้ทำการศึกษาเรื่อง ***Carbonation of Concrete Structures in Hot Dry Coastal Regions*** ซึ่งมีการทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นของอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งใกล้กับทะเล มีการเก็บตัวอย่างคอนกรีตของโครงสร้างผนังและเสาทดสอบอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่น รวมถึงการวัดค่ากำลังอัดของโครงสร้าง พบว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางที่ไม่มาก (ระหว่าง 0.5-2 กม.) มีอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นสูงกว่าอาคารที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ห่างจากทะเลเป็นระยะทางที่มากกว่า (ระหว่าง 3-20 กม.) ในส่วนของกำลังอัดพบว่าระยะคาร์บอเนชั่นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

S.K.Roy, D.O.Northwood and K.B.Poh [4] ทำการศึกษาเรื่อง ***Effect of plastering on the carbonation of a 19-year-old reinforced concrete building*** มีการศึกษาถึงผลกระทบของความหนาปูนฉาบที่มีต่อการเกิดคาร์บอเนชั่น ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอายุ 19 ปี โดยการเจาะเก็บตัวอย่างโครงสร้างเสาและคาน ทดสอบระยะคาร์บอเนชั่นด้วยการใช้สารละลายฟี

นอล์ฟธาลีน มีการนำข้อมูลแสดงผลด้วยกราฟแท่ง ดูการกระจายตัวของข้อมูล เป็นต้น ซึ่งพบว่าโครงสร้างที่มีปูนฉาบมีแนวโน้มระยะคาร์บอเนชั่นน้อยกว่าโครงสร้างที่ไม่มีปูนฉาบ

วัจน์วงค์ กรีพละ, รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา, สรรค์ สยามิภักดิ์, ธนากร พีระพันธ์ [5] ทำการศึกษาเรื่อง ***การสำรวจ ทดสอบและประเมินสภาพโครงสร้างเสา โครงการทางรถไฟยกระดับ*** มีการเจาะเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนเสาและคานของโครงสร้างทางด่วนสายเหนือจากสถานีรถไฟหัวลำโพงถึงท่าอากาศยานนานาชาติดอนเมือง สายตะวันออก และสายตะวันตกด้วยวิธีการ coring ที่ระดับความสูงประมาณ 1 ม. จากระดับพื้นดิน เพื่อทดสอบหาค่าระยะคาร์บอเนชั่น พบว่ามีระยะคาร์บอเนชั่น อยู่ระหว่าง 2.00-19.40 มม. มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 10.90 มม. มีอายุการใช้งานเฉลี่ยที่เหลืออยู่ 65 ปี

J.Khunthongkeaw, S.Tangtermsirikul and T.Leelawat [6] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete* มีการใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของปริมาณ CaO ที่ต่างกันสำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปทดสอบในสภาวะเร่งและสภาวะแวดล้อมจริงต่างๆกันคือในเขตเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO สูงจะมีการเกิดคาร์บอเนชั่นต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่ำ ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้การเกิดคาร์บอเนชั่นได้เร็วกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอย

S.K. Roy, K.B. Poh and D.O. Northwood [7] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Durability of concrete -accelerated carbonation and weathering studies* มีการนำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่น โดยศึกษาปัจจัยด้านระดับความชื้นสัมพัทธ์ คุณภาพคอนกรีตที่มีตั้งแต่เกรด 20, 25, 30, 35 และ 40 ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอเนชั่น ซึ่งพบว่าคุณภาพคอนกรีตทุกเกรดจะมีแนวโน้มการเกิดคาร์บอเนชั่นที่สูงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 52-75 %

Jin-Keun Kim, Chin-Yong Kim, Seong-Tae Yi and Yun Lee [8] ได้ทำการศึกษาเรื่อง *Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete* มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ความแข็งแรงสูง,กลาง และต่ำ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.68, 0.46 และ0.28 ตามลำดับ ทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการ ที่อายุ 1, 2, 3 และ 4 เดือน และวัดค่ากำลังอัด พบว่าที่อายุมากขึ้นการเกิดคาร์บอเนชั่นก็ยิ่งมากขึ้นด้วย และคอนกรีตที่มีกำลังต่ำจะมีอัตราการพัฒนาระยะคาร์บอเนชันได้สูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูง

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และทวิสัณห์ คงทรัพย์ [9] ทำการศึกษาเรื่องความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว มีการศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบดำร้อยละ 20 และ 40 โดยอัตราส่วนปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2, 1.4 และ 1.6 ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ พบว่าระยะคาร์บอเนชั่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบดำในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ในส่วนของการ

ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าต่างกันพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานยิ่งมากขึ้นจะทำให้ระยะคาร์บอเนชั่นมากขึ้นตามไปด้วย

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผงที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต และคุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟต โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

2.2.1 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, $3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide : $Ca(OH_2)$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1

$$2(3CaO.SiO_2)+6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_23H_2O+3Ca(OH)_2 \qquad (2.1)$$

ข. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2

$$2(2CaO.SiO_2)+4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_23H_2O+Ca(OH)_2 \qquad (2.2)$$

ค. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \qquad (2.3)$$

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum : $CaSO4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆของแอทริงไจท์ (Ettringite : $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4

$$3CaO.Al_2O_3+Ca.SO_4.\ 2H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O \qquad (2.4)$$

ง. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.5

$$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3+Ca.SO_4.\ 2H_2O \longrightarrow CaO.(Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4 \qquad (2.5)$$

เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียม และไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.2.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.2.2.1 *ชนิดของวัสดุปอซโซลาน*

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

ก. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไป (Volcanic ash) หินภูมิไซท์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

ข. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟูม (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

2.2.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะ

เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลานเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.7

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \qquad (2.6)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \qquad (2.7)$$

2.2.3 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (Electrostatic precipiation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมทำคอนกรีตได้ ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้แบ่งเถ้าลอยเป็นชนิด N, F และ C รายละเอียดดังตารางที่ 1 โดยในกรณีของชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มี ปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica, SlO_2) อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric Oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับSiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2สูง

2.2.3.1 ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

ก. เถ้าลอย ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica : SiO_2) และอลูมินา (Alumina : Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric oxide : Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide : CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอรตซ์ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

ข. เถ้าลอย ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติ

อื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [10]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O, ร้อยละ	1.5	1.5

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่า ควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์ มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 [11]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) , ร้อยละ	-	น้อยกว่า	น้อยกว่า	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	10.0	10.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3.0	5.0	5.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6.0	3.0 6.0	2.0 6.0	6.0

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ดีต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีโดย ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [12]

ตัวอย่างเถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

2.2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O, K_2O) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition : LOI) SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.2.3.3 ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (hydration) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.10 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.6 และ/หรือสมการที่ 2.7 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.2.4 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast-Furnace Slag)

การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเริ่มตั้งแต่ ค.ศ. 1774 โดยใช้ทำมอร์ต้าซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนขาวและทราย หลังจากนั้นได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและทดสอบคุณสมบัติต่างๆเรื่อยมา จนในปัจจุบันนี้สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้เป็นอย่างดี ตะกรันเตาถลุงเหล็กนอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิ่มตัว ยิปซัม หรือ แอนไฮไดรต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีข้อดี 2 ประการคือ

1. สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ
2. สามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้

ตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหินโดโลไมด์ องค์ประกอบนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆที่ติดมาเช่น SO_3, Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย

2.2.5 ซิลิกาฟูม (Silica Fume)

ซิลิกาฟูมเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันควอร์ตที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอของ SiO ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึกและมีรูปร่างกลม ซิลิกาฟูมจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ เนื่องจากซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูงและอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาซิลิกาฟูมในงานคอนกรีตคือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ได้ความข้นเหลวเท่าเดิมเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟูม ทำให้พื้นที่ผิวสูงมากจึงต้องการปริมาณน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วย

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูมคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟูมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี SiO_2 มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O,K_2O และออกไซด์อื่นๆอีกร้อยละ 1 หรือ 2

คุณสมบัติทางกายภาพที่เห็นชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากสีเทาดำหรือเทาอมขาว ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

2.2.6 ผงหินปูน (Limestone Powder)

ผงหินปูนในประเทศไทยมีเหมืองที่ทำการผลิตอยู่ 2 แหล่งใหญ่ด้วยกันคือ เหมืองหินปูนชนิดโดโลมิติกจังหวัดสระบุรี และฝุ่นหินปูนจากเหมืองหินปูนชนิด โดโลไมท์ จังหวัดกาญจนบุรี หินปูนชนิดโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) จัดอยู่ในจำพวกหินคาร์บอเนต (Carbonate Rock) โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบของแร่โดโลไมท์อยู่ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลมิติก ในขณะที่มีปริมาณของแร่โดโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลไมท์

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (reactive material) มีรายละเอียดดังนี้

2.2.6.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบ

ของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9

$$CaCO_3 + H_2O + heat \longrightarrow Ca(OH)_2 + CO_2 \quad (2.8)$$

$$MgCO_3 + H_2O + heat \longrightarrow Mg(OH)_2 + CO_2 \quad (2.9)$$

2.2.6.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.10

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \quad (2.10)$$

โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสานซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.2.7 ปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต [13]

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตนั้นสามารถเกิดได้ในทุกช่วงอายุของคอนกรีต ตั้งแต่ในสภาวะพลาสติกไปจนถึงคอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้ว ซึ่งลักษณะความเสี่ยงของการเสื่อมสภาพนั้นจะแตกต่างกันไปตามช่วงอายุ อย่างไรก็ตามการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ประเภท ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

1. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration)

2. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) เช่น คาร์บอเนชัน (Carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction)

3. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) เช่น การขัดสี (Abrasion) การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitations)

4. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) เช่น การเสื่อมสภาพโดยตะไคร่ รา รากพืช หรือ แบคทีเรียบางชนิด

5. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (Mixed Process) เช่น การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

ลักษณะของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจะแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเสื่อมสภาพในรูปแบบต่างๆกันนั้นจะมีลักษณะเฉพาะตัว

ดังนั้นการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพนั้นจึงทำได้จากการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางโครงสร้างอาจจะเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุหลักมากกว่าหนึ่งสาเหตุ หรืออาจจะได้รับความเสียหายจากการรับแรงที่มากเกินไป หรืองานก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งจะทำให้ความต้านทานการเสื่อมสภาพของโครงสร้างลดลงอย่างมาก

เนื่องจากลักษณะการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ค่อนข้างหลากหลายดังที่แสดงไว้ข้างต้น การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมและปัญหาทางด้านความคงทนที่มีความเสี่ยงสูงในแต่ละสภาวะจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น

2.2.8 ปัญหาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอเนชัน

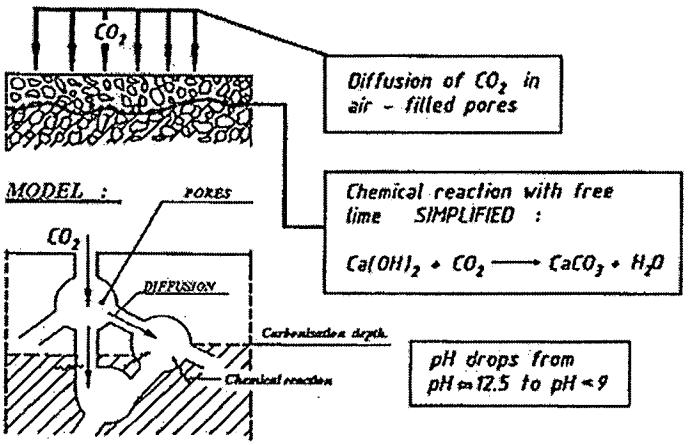
คาร์บอเนชันเป็นขบวนการที่เปลี่ยนผลิตผลบางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งโดยปกติมักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอเนต โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.8.1 กลไกของการเกิดคาร์บอเนชัน

คาร์บอเนชันเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) บริเวณผิวหน้าหรือใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ตามสมการ 2.11 ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

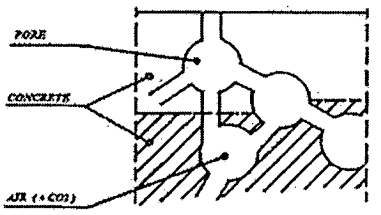
$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (2.11)$$

ปฏิกิริยาคาร์บอเนชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของสารละลายและคอนกรีตที่ถูกคาร์บอเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ดังนั้น คาร์บอเนชันจะค่อยๆคืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอเนตไปแล้วซึ่งจะมีความพรุนน้อยลงทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น

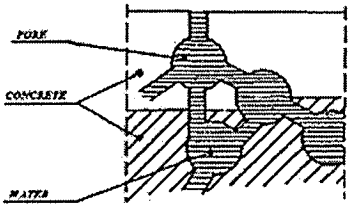


ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชันในคอนกรีต (Schiessl, 1988)

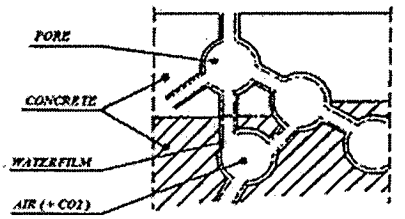
ปฏิกิริยาคาร์บอเนชันต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิทจะไม่เกิดคาร์บอเนชัน เนื่องจากในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทก็จะไม่มีน้ำในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ดังนั้น คาร์บอเนชันจะรุนแรงในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-Dry) นั่นคือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาก



(ก) คอนกรีตซึ่งแห้งสนิทไม่มีน้ำในโพรง



(ข) คอนกรีตซึ่งมีปริมาณน้ำในโพรงอิ่มตัว



(ค) คอนกรีตซึ่งมีปริมาณน้ำในโพรงพอเหมาะ

ภาพที่ 2.2 ภาพจำลองแสดงสภาวะของความชื้นของโพรงในคอนกรีต (Schiessl, 1988)

2.2.8.2 ผลของคาร์บอเนชั่น

คาร์บอเนชั่นทำให้เกิดผลที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอเนชั่นต่ำลง

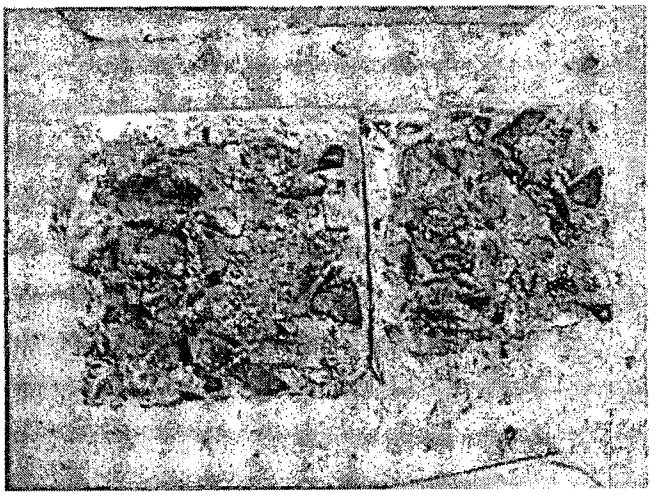
2. ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอเนชั่นต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น

3. ทำให้เกิดการหดตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ภายใต้หน่วยแรงอัด ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ในผลของคาร์บอเนชั่นทั้ง 3 ประการนี้ ประการที่ 2 คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ดี ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอเนชั่นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

2.2.8.3 การทดสอบคาร์บอเนชั่น

การทดสอบคาร์บอเนชั่นสามารถทำได้หลายวิธี แต่สำหรับการทดสอบครั้งนี้ใช้วิธีที่แนะนำโดย RILEM คือการใช้น้ำยาฟินอฟทาลีนในอัลกอฮอล์ฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่แตกออกใหม่ๆที่ต้องการวัดระยะคาร์บอเนชั่น คอนกรีตที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่จะปรากฏเป็นสีชมพู ส่วนคอนกรีตที่เกิดคาร์บอเนชั่นจะไม่มีสี (ภาพที่ 2.3)



ภาพที่ 2.3 ลักษณะก้อนตัวอย่างเมื่อพ่นน้ำยาฟินอฟทาลีนในอัลกอฮอล์