สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีต ที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิด และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

CHLORIDE PENETRATION COEFFICIENT AND CARBONATION COEFFICIENT OF CONCRETE USING DIFFERENT TYPES OF BINDERS AND BOTTOM ASH FOR SAND REPLACEMENT

ชนาวิทย์ เกิดศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีต ที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิด และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

ชนาวิทย์ เกิดศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิด และเถ้ากันเตาแทนที่ทราย Chloride Penetration Coefficient and Carbonation Coefficient of Concrete Using Different Types of Binders and Bottom Ash for Sand Replacement
ชื่อ – นามสกุล	นายชนาวิทย์ เกิดศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.)

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิด และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย
ชื่อ – นามสกุล	นายชนาวิทย์ เกิดศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

สิ่งก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่มักจะพบปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ส่งผลเสียต่อความสามารถด้านกำลังรับแรง และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลงด้วย ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณค่อนข้างมากในการซ่อมบำรุงและแก้ไข ดังนั้นมีความจำเป็นในการศึกษาถึงสาเหตุ แนวทางการป้องกันและแก้ไขของการเสื่อมสภาพของคอนกรีต

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (D_a) และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น (k) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GGBS) ซิลิกาฟูม และผงหินปูนแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนในทราย เพื่อพัฒนาคอนกรีตที่เผชิญกับสภาวะแวดล้อมคลอไรด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการศึกษาพบว่า D_a ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย GGBS และซิลิกาฟูม มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน ส่วน D_a ของคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีต OPC ล้วนและ D_a ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายทั้งที่บ่มน้ำและบ่มอากาศ มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่น้อย อย่างไรก็ตาม D_a ของคอนกรีตที่ระยะเผชิญคลอไรด์มากกว่า มีค่าน้อยกว่าของที่ระยะเผชิญคลอไรด์น้อยกว่า และ D_a ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายที่บ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าของที่บ่มอากาศ นอกจากนี้พบว่า k ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย GGBS ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ k ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน สุดท้ายพบว่า คอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สั้นกว่า ให้ k ของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่ามากกว่าของกรณีที่บ่มอากาศ แต่เมื่อเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่นานกว่ากลับพบว่า k ของคอนกรีตกรณีบ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตกรณีบ่มอากาศ

คำสำคัญ: วัสดุประสาน เถ้าก้นเตา สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น

Thesis Title	Chloride Penetration Coefficient and Carbonation Coefficient of Concrete Using Different Types of Binders and Bottom Ash for Sand Replacement
Name - Surname	Mr. Chanawit Koedsri
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Pitisan Krammert, Ph.D.
Academic Year	2019

ABSTRACT

Most of the reinforced concrete structures tend to encounter the problem of rusting of the reinforcing steel which adversely affects the compressive strength and the service life of the concrete structures is also reduced. This wastes quite a lot of budget for maintenance and repair. Therefore, there is a need to investigate the causes, and guidelines for preventing and maintaining concrete deterioration.

The objective of this research was to investigate the diffusion coefficient (D_a) and carbonation coefficient (k) of concrete, which partially replaced Portland cement type 1 (OPC) with fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBS), silica fume and limestone powder, and also partially replaced the sand with bottom ash for developing the concrete facing chloride and carbon dioxide surrounding conditions.

The study results showed that D_a of the concrete using fly ash, GGBS, and silica fume was less than that of OPC concrete. Besides, D_a of the concrete using limestone powder was closer to or more likely than those of the OPC concrete. Also, it was found that the D_a of concrete, which partially replaced the sand with bottom ash and cured with water and air, was more than that of the concrete using plain sand, especially when replacing it with a small amount of bottom ash. However, the D_a of the concrete, which had the long exposure period of chloride, was less than that of the shorter one. Yet, the D_a of the concrete, which partially replaced the sand with bottom ash, with water curing and air curing, were less than the one cured with the air. Furthermore, it was found that the k of the concrete using fly ash, GGBS, silica fume, and limestone powder was more than that of the OPC concrete. Meanwhile, the k of the concrete, which partially replaced the sand with bottom ash, was less than that with plain sand. Finally, the concrete, which had the shorter exposure period of carbon dioxide, made the k of the concrete with the water curing case much more than that with the air curing one. Nevertheless, when being longer exposed to carbon dioxide, it was found that the k of the concrete for the water curing case was less than that of the air curing one.

Keywords: binders, bottom ash, chloride diffusion coefficient, carbonation coefficient

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาพร้อมแนะนำแนวทางในการดำเนินงาน และวิธีการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทำงานตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาการให้นักศึกษาเป็นผู้ที่มีความรู้ ซึ่งทำให้การจัดทำวิทยาพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์นี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้แด่ บิดาและมารดา และอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่นักศึกษาทุกคน

ชนาวิทย์ เกิดศรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย........ (3)

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........ (4)

กิตติกรรมประกาศ........ (5)

สารบัญ........ (6)

สารบัญตาราง........ (8)

สารบัญรูป........ (10)

บทที่ 1 บทนำ........ 13

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา........ 13

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา........ 15

1.3 ขอบเขตของการศึกษา........ 15

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ........ 16

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง........ 17

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 17

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง........ 21

บทที่ 3 วิธีการศึกษา........ 56

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา........ 56

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา........ 56

3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา........ 66

บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์........ 68

4.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้........ 68

4.2 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต........ 71

4.3 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีต........ 106

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุป.. 121

บรรณานุกรม.. 122

ภาคผนวก 126

ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.. 127

ประวัติผู้เขียน.. 149

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618......................	25
ตารางที่ 2.2	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545.............	26
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ.....................................	26
ตารางที่ 2.4	องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา..	28
ตารางที่ 2.5	ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้...........................	32
ตารางที่ 2.6	สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ........................	37
ตารางที่ 2.7	มาตรฐานของคุณภาพคอนกรีตในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ตาม ASTM C1202..	45
ตารางที่ 2.8	สัมประสิทธิ์ของระดับความรุนแรงสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน................	54
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการศึกษาค่าสัมประสิทธ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55..	66
ตารางที่ 3.2	สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาค่าสัมประสิทธ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55...................................	67
ตารางที่ 4.1	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน......................................	68
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้..	70
ตารางที่ 4.3	ความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา..........	71
ตารางที่ 4.4	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วันเผชิญคลอไรด์ 28 วัน..	72
ตารางที่ 4.5	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน....................................	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.6	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุ บ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน..............................	81
ตารางที่ 4.7	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน..	84
ตารางที่ 4.8	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน....................................	88
ตารางที่ 4.9	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน...............................	92
ตารางที่ 4.10	สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน................................	107
ตารางที่ 4.11	สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน.........	110
ตารางที่ 4.12	สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน...	112

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์............... 34
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างความเสียหายเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต
เนื่องจากเกลือคลอไรด์.. 35
รูปที่ 2.3 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต.............................. 36
รูปที่ 2.4 กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก..... 38
รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล 38
รูปที่ 2.6 ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริม
เหล็ก.. 39
รูปที่ 2.7 โครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล....................................... 40
รูปที่ 2.8 แผนภาพประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต.. 43
รูปที่ 2.9 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ.. 44
รูปที่ 2.10 ชุดเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง................................. 45
รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในคอนกรีต................... 49
รูปที่ 2.12 ภาพจำลองแสดงสภาวะของความชื้นของโพรงในคอนกรีต............................ 49
รูปที่ 2.13 ราวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอเนชัน.................... 51
รูปที่ 2.14 แบริเออร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอเนชัน...................... 52
รูปที่ 2.15 สภาพผิวของถังน้ำคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากคาร์บอเนชัน......................... 52
รูปที่ 2.16 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น........................... 55
รูปที่ 2.17 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน...................... 55
รูปที่ 3.1 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์.. 57
รูปที่ 3.2 เครื่องมือหาความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์.................... 57
รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่าการกักเก็บน้ำในวัสดุพรุน............................ 58
รูปที่ 3.4 ภาพแสดงแนวคิดการหาค่าความกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา............................. 59
รูปที่ 3.5 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.. 60

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.6	การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต...............	61
รูปที่ 3.7	การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องวัดคลอไรด์อัตโนมัติ..................................	63
รูปที่ 3.8	แบบหล่อตัวอย่างขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร.......................................	64
รูปที่ 3.9	อบตัวอย่างในตู้เร่งการเกิดคาร์บอเนชั่น..	64
รูปที่ 3.10	ตัวอย่างคอนกรีตฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน..	65
รูปที่ 4.1	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยใช้เครื่อง SEM..................................	69
รูปที่ 4.2	ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของเถ้าก้นเตา..	71
รูปที่ 4.3	ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน..	95
รูปที่ 4.4	ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน..	96
รูปที่ 4.5	ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน..	97
รูปที่ 4.6	ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่ม อากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน...................................	98
รูปที่ 4.7	ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน..	99
รูปที่ 4.8	ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน..................................	100
รูปที่ 4.9	ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 2 วัสดุประสาน เมื่อใช้ ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน	101
รูปที่ 4.10	ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 3 วัสดุประสาน เมื่อใช้ ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน..	101
รูปที่ 4.11	ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน..	102

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน 103
รูปที่ 4.13 ค่าเปรียบเทียบชนิดการบ่ม สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน........ 104
รูปที่ 4.14 ค่าเปรียบเทียบชนิดการบ่ม สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน........ 105
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างของคอนกรีตที่ทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นโดยใช้น้ำยาฟินอฟทาลีนในแอลกอฮอล์ฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์........ 107
รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน........ 109
รูปที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ........ 113
รูปที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มอากาศ........ 114
รูปที่ 4.19 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำบ่มอากาศ........ 116
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มคอนกรีตกับอายุการใช้งานตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนโดยอ้างอิงสมการ fick’s first law of diffusion........ 117
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มคอนกรีตกับอายุการใช้งานตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย (กรณีบ่มน้ำ)โดยอ้างอิงสมการ fick’s first law of diffusion........ 119
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มคอนกรีตกับอายุการใช้งานตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย (กรณีบ่มอากาศ)โดยอ้างอิงสมการ fick’s first law of diffusion........ 120

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้างของไทยและต่างประเทศในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตนั้น ผู้ออกแบบมักจะคำนึงถึงกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก แต่ในความเป็นจริงโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตอยู่ตลอดเวลา เช่น การกัดกร่อนโดยซัลเฟต การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ การเกิดคาร์บอเนชั่น ที่ส่งผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้าง โดยเฉพาะโครงสร้างของฐานราก และโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับพื้นดินหรือน้ำทะเลโดยตรง ส่งผลทำให้อายุการใช้งานของคอนกรีตลดลง

ปัจจุบันมีการใช้วัสดุทดแทนที่สามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต เช่น เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยเถ้าลอย (fly ash) เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวน การเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ที่ประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุต่างๆ นี้ สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ซึ่งเถ้าลอยมีขนาดค่อนข้างเล็ก เมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดในช่องว่างเล็กๆ ระหว่างซีเมนต์และหินหรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เพิ่มความต้านทานในการกัดกร่อนของคอนกรีต เพิ่มกำลังอัดและกำลังแรงดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น และลักษณะอนุภาคทรงกลมทำให้คอนกรีตลื่นไถลได้ดี เพิ่มความสามารถในการเทได้ [1] แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยมีข้อเสียคือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น [2] ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blastfurnace slag) เกิดจากกระบวนการถลุงเหล็กแล้วนำตะกรันเตาถลุงเหล็กมาบดให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว และยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีความสามารถในการเทและเขย่าหรือทำให้แน่นได้ง่ายกว่าคอนกรีตธรรมดา [3] ในขณะที่ซิลิกาฟูม (silica fume) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ ซึ่งมีขนาดเล็กมาก ไม่เป็นผลึก และมีรูปร่างกลม จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีต คือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น [4] แต่ส่วนใหญ่การใช้ซิลิกาฟูมมักใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูงและใช้เพิ่มความต้านทานของคอนกรีตเป็นหลัก เนื่องจากการใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต และการแทรกซึมของคลอไรด์ [3] การเกิดคาร์บอเนชั่น สำหรับผงหินปูน ($CaCO_3$) เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหิน มีความ

ละเอียดหลายขนาดที่จำหน่ายในท้องตลาดในปัจจุบัน โดยทั่วไปมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร เมื่อแทนที่ผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถปรับปรุงคุณภาพบางประการของคอนกรีตได้ ซึ่งมีจุดเด่นแตกต่างจากเถ้าลอย คือทำให้การก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้น กำลังในระยะต้นสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดการเยิ้มน้ำ ลดการหดตัว เพิ่มความต้านทานซัลเฟต และความต้าน ทานกรด เป็นต้น จากจุดเด่นดังกล่าวนี้ปัจจุบันได้มีการนำผงหินปูนมาใช้ในในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จกันมากขึ้น [5]

เถ้าก้นเตา (bottom ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่นเดียว กับเถ้าลอย แต่เถ้าก้นเตาเกิดจากการรวมตัวกันของเถ้าถ่านหินที่หลอมเหลว ดังนั้นเถ้าก้นเตาจึงมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนสูงกว่าเถ้าลอยมาก ลักษณะโดยรวมของอนุภาคของเถ้าก้นเตาจะมีรูพรุน มีความเปราะ ขนาดคละใกล้เคียงกับทราย แต่ละเอียดกว่าทราย มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าทราย และมีค่าการดูดซึมมากกว่าทราย เถ้าก้นเตาที่ไม่ผ่านการบดจึงมีสมบัติความเป็นสารปอซโซลานต่ำ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีการกระจายอนุภาคใกล้ เคียงกับมวลรวมละเอียด ดังนั้นจึงมีการนำเถ้าก้นเตามาใช้ในรูปแบบของวัสดุบ่มภายใน [6,7]

สิ่งก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่มักจะพบปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยเฉพาะคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล น้ำกร่อย หรือบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล เนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือคลอไรด์ คาร์บอเนชั่น และซัลเฟตละลายอยู่ ทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กประสบความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิม จึงส่งผลเสียต่อความสามารถด้านกำลังรับแรง และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลงด้วย ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณค่อนข้างมากในการซ่อมบำรุงและแก้ไข จึงเป็นปัญหาอย่างมากด้านความคงทนของคอนกรีต ในปัจจุบันพบว่าปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น มีการศึกษาสาเหตุการเสื่อมสภาพของคอนกรีต แนวทางในการป้องกันและแก้ไขการเสื่อมสภาพของคอนกรีต

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย เพื่อช่วยลดผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์และคาร์บอเนชั่น เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งเป็นการเพิ่มฐานข้อมูลในการพัฒนาการใช้วัสดุทดแทนนี้ในงานคอนกรีตต่อไปตลอดจนใช้เป็นข้อมูลทางเลือกในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ให้สามารถทนทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลและสภาพเผชิญคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้การนำวัสดุทดแทนที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม มาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ให้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาที่ใช้ในการศึกษา

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.2.4 เพื่อทำนายอายุของตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย จากผลสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยแทนที่เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.2 ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ในทราย โดยปริมาตร

1.3.3 ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.3.4 ทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (น้ำเกลือ) ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ร้อยละ 5 (50 กรัม/ลิตร) ซึ่งใช้ระยะเวลาในการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

1.3.5 ทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยเผชิญก๊าซคาร์บอไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน

1.3.6 คำนวณหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.3.7 วิเคราะห์ผลกระทบของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.3.8 คำนวณอายุของตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย จากผลสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.4.2 ทราบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.4.3 ทราบผลกระทบของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

1.4.6 ทราบผลทำนายอายุของตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานต่างชนิดกัน และก้นเตาแทนที่ทราย จากผลสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น

1.4.7 ทราบแนวทางสำหรับนำไปใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ให้มีความทนทานในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์และคาร์บอเนชั่นต่อไป

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้กล่าวถึงงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น และทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น มีการวิจัยกันอย่างแพร่หลาย โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการสืบค้นงานวิจัยและสรุปรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพียงบางส่วน ดังนี้

Mahdi et al. [8] ได้ศึกษาคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 เปรียบเทียบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์กับคอนกรีตทั่ว ไปในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณอ่าวเปอร์เซียเป็นระยะเวลา 9 เดือน โดยวางตัวอย่างในบริเวณใต้ชั้นทรายบนชายหาด บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง บริเวณที่โดนคลื่นสาด และบริเวณที่สัมผัสกับอากาศใกล้ทะเลจากการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไปอย่างมาก และคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงมีการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด

อุดมพร กุลมงคล [9] ได้ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไดร์วิกฤตของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย และคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย จะมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น และปริมาณการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10 คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ ร้อยละ 30 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอีกทั้งพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีประสิทธิภาพในการบ่มภายในดีกว่าคอนกรีตทั่วไปอีกด้วย

กิรติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี [10] ได้ศึกษาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลาต่าง ๆ กันโดยใช้คอนกรีตควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ15, 25, 35และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเหมือนกับคอนกรีตควบคุม หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200 มม.^{3} เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยบ่มคอนกรีตในน้ำจนมีอายุครบ 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งครบ 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี ได้ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีต สามารถหาความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเลต่างๆ ได้ ผลการวิจัยพบว่า ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์มีอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วง 5 ปีแรกที่คอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล การแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจนนอกจากนั้นอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินตลอดจนกำลังอัดที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนั้นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสามารถใช้ป้องกันการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสสิ่งแวด ล้อมทะเลได้ดี เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี (กำลังอัดสูง) ควบคู่กับคุณสมบัติด้านความคงทนที่ดี (ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ)

Chalee, et al. [11] ได้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะในการป้องกันการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย โดยทำการเก็บตัวอย่างถึงระยะเวลา 7 ปี ซึ่งผลการศึกษาพบว่าเถ้าถ่านหินมีศักยภาพในการใช้ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้นส่งผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลจะลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ มีค่าลดลง และชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนั้นยังพบว่า เมื่อพิจารณาข้อมูลถึง 7 ปี คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงถึง 0.65 สามารถใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลได้เมื่อผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25-50 เพราะให้ผลในการต้านทานการทำลายเหล็กเสริมเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลดีเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

Ann et al. [12] ในงานวิจัยนี้ได้แสดงถึงปริมาณคลอไรด์อิออนบนผิวหน้าของคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่สภาวะต่างๆ เช่น สภาวะน้ำขึ้นน้ำลง สภาวะละอองคลื่น และสภาวะบรรยากาศ โดยปริมาณคลอไรด์อิออนจะสะสมที่ผิวหน้ามากขึ้นตามอายุการใช้งาน และในการทำนายอัตราการเพิ่มขึ้นของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตนั้น จะต้องอยู่ในรูปแบบของสมการที่เหมาะสมซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน และจากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า การใช้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวเป็นค่าคงที่ จะส่งผลทำให้การแทรกซึมของเกลือคลอไรด์มีค่ามากเกินไป ซึ่งเมื่อมีรูปแบบของสมการปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวขึ้นอยู่กับเวลาในรูปแบบต่าง ๆ จะทำให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเกลือคลอไรด์นี้จะมีผลต่อความเสี่ยงของการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

Song et al. [13] ศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ (D_a) และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (C_s) ในคอนกรีตที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้า จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์มีค่าลดลงและปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออายุการใช้งานนานขึ้น เนื่องจากการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดชั่นของซีเมนต์ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนผสมของคอนกรีต ปริมาณโพรงช่องว่างในคอนกรีต วิธีการบ่ม ลักษณะการเผชิญกับน้ำทะเล และฤดูกาล เป็นต้น ส่วนในคอนกรีตที่ใช้วัสดุอื่นๆแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นวัสดุประสาน จะมีประโยชน์ในการทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ลดลง และจะส่งผลทำให้ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนนั้นจะไปเติมโพรงช่องว่างของคอนกรีต และช่วยในการยึดจับเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต

วิเชียร ชาลี [14] ศึกษาถึงผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณต่างๆ และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ และ ปริมาณเกลือ คลอไรด์ที่ผิวของคอนกรีตโดยใช้กฎข้อที่ 2 ของ ฟิค (Fick’s second law) พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตทุกส่วนอัตราส่วนผสมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาแช่น้ำทะเลนานขึ้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตลดลงเมื่อใช้ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น

Dhir et al. [15] ในงานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาความต้านทานการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ในคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยชนิดที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำในการศึกษา ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงลักษณะทาง

กายภาพ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์และเพิ่มความสามารถในการยึดจับคลอไรด์อิออน รวมถึงศึกษาถึงปริมาณการใช้เถ้าลอยในการใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีต โดยปริมาณการใช้เถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดจะใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณซีเมนต์ 30% โดยน้ำหนักของซีเมนต์

J. Khunthongkeaw,S. Tangtermsirikul และ T. Leelawat [16] ศึกษาเรื่อง A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete มีการใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่างกัน สำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ มีการนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปวางไว้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆกันคือ ในเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO สูง จะมีการเกิดคาร์บอเนชั่นต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ Cao ต่ำ ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่น นอกจากนี้พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้การเกิดคาร์บอเนชั่นเร็วขึ้น

Cengiz Duran Atis [17] ศึกษาเรื่อง Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย ทดสอบในสภาวะเร่งในห้องปฏิบัติการที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ 65 และ 100 % ทำการทดสอบหาระยะคาร์บอเนชั่นและค่ากำลังอัดที่ 3, 7, 28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตที่มีปริมาณมาก ทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นสูงกว่าการแทนที่เถ้าลอยในคอนกรีตปริมณที่น้อย และในส่วนของกำลังอัดพบว่าระยะคาร์บอเนชั่นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

N.I. Fattuhi [18] ศึกษาเรื่อง Carbonation of concrete as effected by mix constituents and initial water curing period มีการหล่อตัวอย่างทดสอบแบบเร่งในห้องปฏิบัติการ โดยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ 0.7, 0.6 และ 0.4 ทำการทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นที่ 1, 3, 7, 21 และ28 วัน พบว่าอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นจะมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น

H.Al-Khayat ,M.N. Haque and N.I. Fattuhi [19] ศึกษาเรื่อง Concrete Carbonation in arid climate มีการหล่อตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ดังนี้ 0.45, 0.80 ทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นในสภาวะแวดล้อมจริง พบว่าอัตราการเกิดระยะคาร์บอเนชั่นจะมีมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น และส่วนกำลังอัดพบว่าระยะคาร์บอเนชั่นมีค่าผกผันกับค่ากำลังอัด

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและสรุปรายละเอียดของทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์และสัมประสีทธิ์คาร์บอเนชั่น โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

2.2.1 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัว กำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, $3CaO.2SiO_2 3H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide : $Ca(OH_2)$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.1

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

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2

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

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

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

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

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

4) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าโดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้นโดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม 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 ด้วยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียม และไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิ เนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตและซัลโฟเฟอไรท์แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.2.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และหรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกต

ไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความ สามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

1) ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan)มีรายละเอียดดังนี้

- ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

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

- ปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่าขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบัน ปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าซิลิกาฟูม (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะ อัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

2) ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 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) ปฏิกิริยาปอซโซลาน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

2.2.3 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์ หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่งเป็นผลพลอยได้ (By product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (Electrostatic precipiation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า [3]

1) ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

- เถ้าลอย ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica : SiO_2) และอลูมินา (Alumina : Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric oxide : Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide : CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนี่ยวและควอรตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

- เถ้าลอย ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.1 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [20]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ (SiO_2 + $Al2O_3$ + 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

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ดังกล่าวมาแล้วยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออก ไซด์ (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 มากกว่าเพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก. 2135-2545) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 [21]

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 10.0	น้อยกว่า 10.0	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างมาก, ร้อยละ	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	3.0	3.0	2.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมาก, ร้อยละ	6.0	6.0	6.0	6.0

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและลักษณะ การเผาถ่านหิน อย่างไรก็ดีต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีโดย ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [22]

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) 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) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่อง จากการเผา (loss on ignition : LOI) SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80 ถึง 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

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) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2.2.4 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (blast-furnace slag) คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะ ซึ่งส่วนใหญ่ประ กอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก นอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (granulated blast-furnace slag) หมายถึงเม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากการทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุงเหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดเพื่อให้ตะกรันเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ตะกรันเตาถลุงเหล็กนอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิ่มตัว (hydrated lime) ยิปซั่ม หรือ แอนไฮไดรต์ (anhydrite) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีต มีข้อดี

2 ประการคือ สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และ สามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้

องค์ประกอบทางเคมีตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักซึ่งปนมากับ สินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหินโดโลไมต์องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่า ร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆ ที่ติดมาเช่น SO_3, Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดาใน ค.ศ. 1988 [19] แม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในตารางที่ 2.4 จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะแต่ละโรงงานจะพบว่า มีค่าแตกต่างกันไม่มากการที่ตะกรันเตาถลุงเหลกมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา [23]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
SiO_2	32-40
Al_2O_3	7-16
CaO	32-45
MgO	5-15
SO_3	0.7-2.2
Fe_2O_3	0.1-1.5
MnO	0.2-1.0

2.2.5 ซิลิกาฟูม

ซิลิกาฟูม (Silica Fume) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันควอร์ตที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอของ SiO ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึกและมีรูปร่างกลม ซิลิกาฟูมจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ เนื่องจากซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูงและอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาซิลิกาฟูมในงานคอนกรีตคือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ได้ความข้นเหลวเท่าเดิมเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟูม ทำให้พื้นที่ผิวสูงมากจึงต้องการปริมาณน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วย [4]

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 ไมโครเมตรมีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

2.2.6 ผงหินปูน

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

1) วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยในการ ลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้น ก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9

$$CaCO_3 + H_2O + heat \longrightarrow Ca(OH)_2 + CO_2 \tag{2.8}$$

$$MgCO_3 + H_2O + heat \longrightarrow Mg(OH)_2 + CO_2 \tag{2.9}$$

2) วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทด แทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.10

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

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

2.2.7 เถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเช่น เดียวกับเถ้าลอย แต่เถ้าก้นเตาเกิดจากการรวมตัวกันของเถ้าถ่านหินที่หลอมเหลว ดังนั้นเถ้าก้นเตาจึงมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนสูงกว่าเถ้าถ่านหินมาก [3] โดยทั่วไปของเถ้าก้นเตานั้นจะมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับเถ้าลอย แต่เถ้าก้นเตาไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เมื่อเทียบกับเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่ามาก จึงถือได้ว่าเถ้าก้นเตาสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิกได้เพียงบางส่วน เนื่องจากลักษณะโดยรวมของอนุภาคของเถ้าก้นเตาจะมีรูพรุน มีความเปราะ ขนาดคละใกล้เคียงกับทราย แต่ละเอียดกว่าทราย มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าทรายและมีค่าการดูดซึมมากกว่าทราย เถ้าก้นเตาที่ไม่ผ่านการบดจึงมีสมบัติความเป็นสารปอซโซลานต่ำ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีการกระจายอนุภาคใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ดังนั้นจึงมีการนำเถ้าก้นเตามาใช้ในรูปแบบของวัสดุบ่มภายใน

คุณสมบัติเชิงกลของเถ้าก้นเตา

1) การต้านทานการสึกหรอและความคงทนนั้นเถ้าก้นเตามีความต้านทานการสึกหรอและความทนน้อยเนื่องจากเป็นวัสดุเม็ดละเอียด

2) การดูดซึมน้ำของเถ้าก้นเตา เนื่องจากเถ้าก้นเตามีขนาดเม็ดวัสดุขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากจึงมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าวัสดุมวลรวมโดยทั่วไป

3) ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาเมื่อเทียบกับวัสดุมวลรวมจะมีค่าน้อยกว่าแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำมาใช้งานจะทำให้มีน้ำหนักคงที่ลดลง

4) ความเหนียวของวัสดุ เนื่องจากเถ้าก้นเตาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากการเผาไหม้ของถ่านหินดังนั้น เถ้าก้นเตาจึงเป็นวัสดุประเภท Non-Plastic

5) ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเถ้าก้นเตาจะน้อยกว่าวัสดุมวลรวมโดยทั่วไปทั้งรูปแบบการบดอัดแบบมาตรฐานและการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

6) ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) จะสูงกว่าวัสดุมวลรวมโดยทั่วไปทั้งรูปแบบการบดอัด แบบมาตรฐานและการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

2.2.8 ปัญหาความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต [24]

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตนั้นสามารถเกิดได้ในทุกช่วงอายุของคอนกรีต ตั้งแต่ในสภาวะพลาสติกไปจนถึงคอนกรีตในสภาวะแข็งตัวแล้ว ซึ่งลักษณะความเสี่ยงของการเสื่อมสภาพนั้นจะแตกต่างกันไปตามช่วงอายุ อย่างไรก็ตามการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ประเภทตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

1) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (physical deterioration) เช่น การรับน้ำหนักที่มากเกินไป

2) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (chemical deterioration) เช่น คาร์บอเนชั่น การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต และปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม

3) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (mechanical deterioration) เช่น การขัดสี การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ

4) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (biological deterioration) เช่น การเสื่อม สภาพโดยตะไคร่ รา รากพืช หรือ แบคทีเรียบางชนิด

5) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (mixed process) เช่น การเกิดสนิมในเหล็กเป็นต้น

ลักษณะของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจะแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเสื่อมสภาพในรูปแบบต่างๆกันนั้นจะมีลักษณะเฉพาะตัว ดังนั้นการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพนั้นจึงทำได้จากการวิเคราะห์ลักษณะการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางโครงสร้างอาจจะเสื่อมสภาพเนื่อง จากสาเหตุหลักมากกว่าหนึ่งสาเหตุ หรืออาจจะได้รับความเสียหายจากการรับแรงที่มากเกินไป หรืองานก่อสร้างที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งจะทำให้ความต้านทานการเสื่อมสภาพของโครงสร้างลดลงอย่างมาก

เนื่องจากลักษณะการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ค่อนข้างหลากหลาย ดังที่แสดงไว้ข้างต้น การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับ

สภาวะแวดล้อมและปัญหาทางด้านความคงทนที่มีความเสี่ยงสูงในแต่ละสภาวะจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น

2.2.9 การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวกลางที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลงและหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

1) แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อม) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้ [24]

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้สูงสุดในคอนกรีต (ร้อยละของน้ำหนักวัสดุประสาน)
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัสกับคลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น (sea-retaining walls)	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะใช้งานมีการป้องกันความชื้น	1.00
การก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	0.30

หมายเหตุ : โดยการทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1218/C 1218M

อย่างไรก็ตาม ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วน มากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (de-icing salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี ดังต่อไปนี้

- การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์เป็นส่วนประกอบ (Capillary Suction)
- การแพร่ของอิออนคลอไรด์ (Chloride diffution) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าไปสู่ความเข็มเข้นของคลอไรด์ภายในเนื้อคอนกรีต
- การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วๆ ไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวสัมผัส กับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้นข้นคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่าง ของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้น ของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อม ได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation เกิดใน 2 ลักษณะดังนี้

- ในกรณีของสภาวะเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเลในขณะทีบริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวคอนกรีต ทิ้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่ภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว
- ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อม สามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไปไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชั่น เช่น (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นบวกสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ดีในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้ไม่มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ในบริเวณที่ติดกับคอนกรีต จะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย [20]

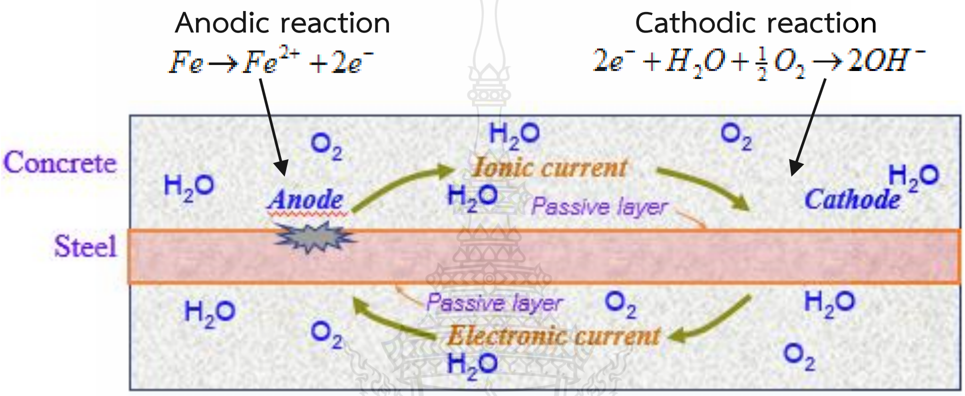
2) กลไกลการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์

ณัฐมนต์ กัมปนานนท์และจุลเศรษฐ์ กฤษษะภักดี [8] ปริมาณเกลือคลอไรด์เป็นสาเหตุที่สำคัญของการเกิดการผุกร่อนเป็นสนิมของเหล็กเสริม และถ้าหากว่าปริมาณคลอไรด์ในปริมาณที่มากพอในระหว่างการผสมคอนกรีต อาจส่งผลให้ Passivity Film ไม่เกิดขึ้นได้

ทวีชัย สำราญวานิช [9] โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปของ “ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี” โดยมีเกลือคลอไรด์ประพฤติตัวในลักษณะคล้ายๆ กับตัวเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อน

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ [10] และชัญชาญโชติถนอม [11] กล่าวว่าโดยปกติเหล็กเสริมในคอนกรีต จะมีชั่นของฟิล์มออกไซด์ (Protective passivity layer) บางๆเคลือบ

อยู่ที่ผิวของเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก (γ-Fe_2O_3) แต่เมื่อใดก็ตามหากคลอไรด์อิออน สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ชั้นของฟิล์มออกไซด์ ของดังกล่าวจะถูกทำลาย จนกระทั่งเมื่อใดที่ชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤติ (Critical Level) เหล็กเสริมในบริเวณนั้นก็จะเกิดสนิมได้ซึ่งเราเรียกว่า (Depassivation) และในขณะเดียวกันหากบริเวณ ดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะ กระบวนการทางไฟฟ้า-เคมีก็จะเกิดขึ้น



Fe^{2+} + 2OH ⟶ $Fe(OH)_2$ ⟶ (Ferrous hydroxide)

$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O$ ⟶ $Fe(OH)_3$ ⟶ (Ferric hydroxide)

$2Fe(OH)_3Fe_2O_3.\ H_2O + 2H_2O$ ⟶ (Hydrated ferric oxide (Rust))

↓

$$\frac{VOL_{Fe_2O_3 \cdot H_2O}}{VOL_{Steel}} = 2 \rightarrow 10$$

↓

คอนกรีตแตกร้าวและหลุดร่อน

รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ [9]

กล่าวคือ บริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ (Anode) ซึ่งเกิด “ปฏิกิริยาอาโนดิก” (Anodic reaction) ดังสมการต่อไปนี้

$$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e \qquad (2.11)$$

อิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดขึ้นนี้ จะวิ่งผ่านไปยังฟิล์มที่ไม่ได้ถูกทำลายซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathode) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนได้ก็จะเกิดเป็นไฮดรอกซิลอิออน $(OH)^-$ เป็น "ปฏิกิริยาคาโธดิก" (Cathodic reaction)

$$4e^- + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4(OH)^- \quad (2.12)$$

และในขณะเดียวกัน Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบ (Anode) ส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจน จนกระทั่ง เฟอริกไฮดรอกไซด์ (Ferric hydroxide) ดังสมการเคมีดังนี้

$$Fe^{2+} + 2(OH) \longrightarrow Fe(OH)_2 \quad (2.13)$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 \quad (2.14)$$

จากนั้น Fe^{2+} ที่เหลืออยู่อีกส่วนหนึ่งที่ขั่วลบนั้นจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride) และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดสนิมเพิ่มเติมขึ้นมา ดังสมการทางเคมีดังนี้

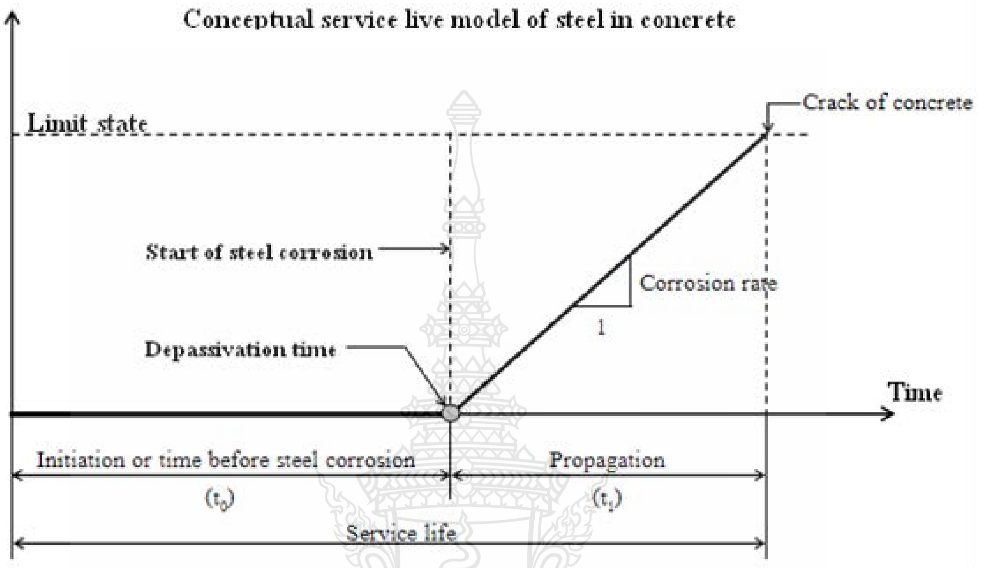
$$Fe^{2+} + 2Cl^- \longrightarrow FeCl_2 \quad (2.1\,5)$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl \quad (2.16)$$

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างความเสียหายเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์

3) กระบวนการในการเกิดสนิมจากสาเหตุของการซึมผ่านของคลอไรด์อิออน

โดยกระบวนการในการเกิดสนิมจากสาเหตุของการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนผ่านเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอนคือ Initial period และ Propagation period ดังแสดงใน รูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองช่วงชีวิตการใช้งานของเหล็กเสริมในคอนกรีต [24]

- Initial period หรือ ระยะเวลาช่วงแรก (t_0) หมายถึง ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่หล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์อิออนจะแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต นอกจากนั้นออกซิเจนและน้ำจะซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ซึ่งระยะเวลาช่วงแรก (t_0) นี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม

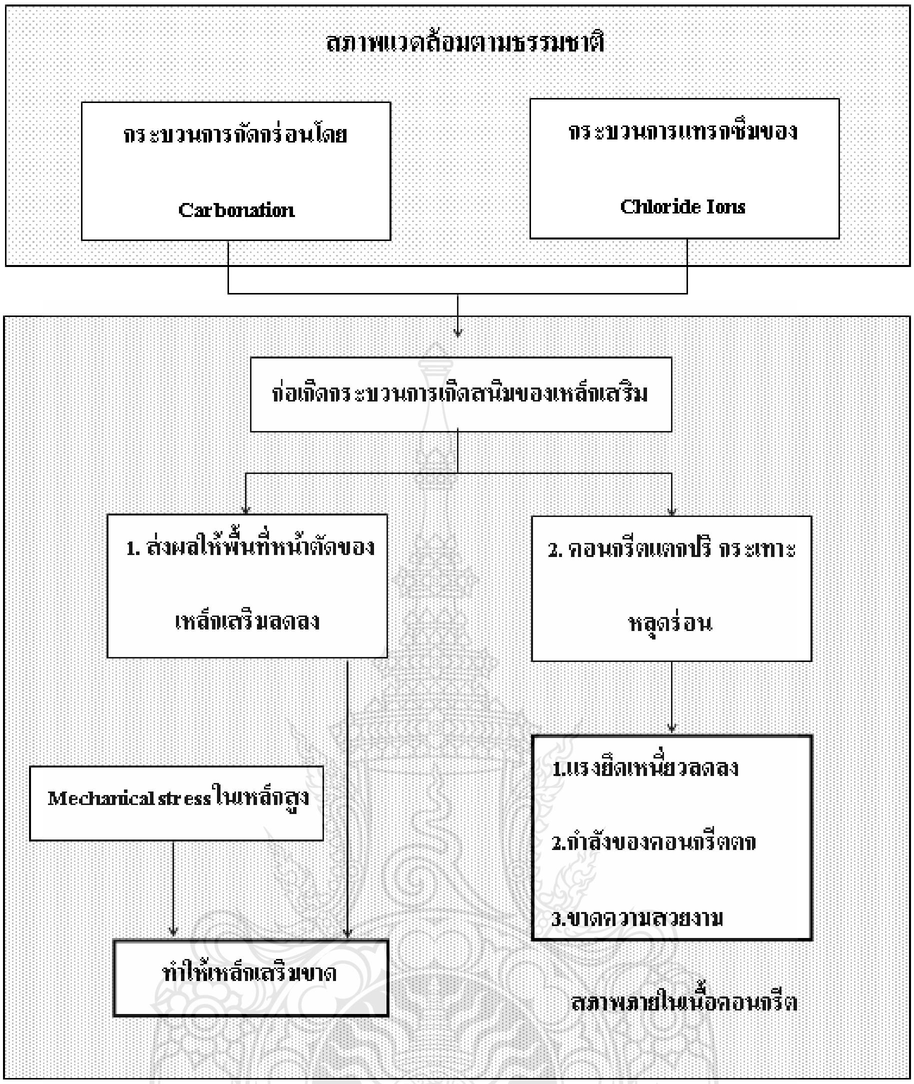
- Propagation period หรือ ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง (t_1) หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนาการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต คือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งานจะเห็นได้ว่าคลอไรด์อิออนที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยนั้นจะมีผลกระทบต่อการกระตุ้นให้เกิดสนิมบนเหล็กเสริมได้ แต่สนิมเหล็กเองกลับไม่มีคลอไรด์อิออนเป็นส่วนประกอบเลย

โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้น จะทำให้เหล็กเสริมบริเวณขั้วลบถูกกัดกร่อน ทำให้เหล็กเสริมมีขนาดหน้าตัดเล็กลง และเหล็กเสริมบริเวณขั้วบวกก็จะเกิดเป็นสนิม ซึ่งสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดขึ้นนี้ จะมีการพัฒนาเพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ ประมาณ 4-6 เท่า ดันให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่กะเทาะออก เมื่อการกัดกร่อนเกิดเพิ่มมากยิ่งขึ้น คอนกรีตก็จะหลุดร่อนออกเป็นชั้น ๆ (Delamination) ทำให้เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้สูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่งคงแข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบโครงสร้างนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คือแผนภาพแสดงกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และรูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

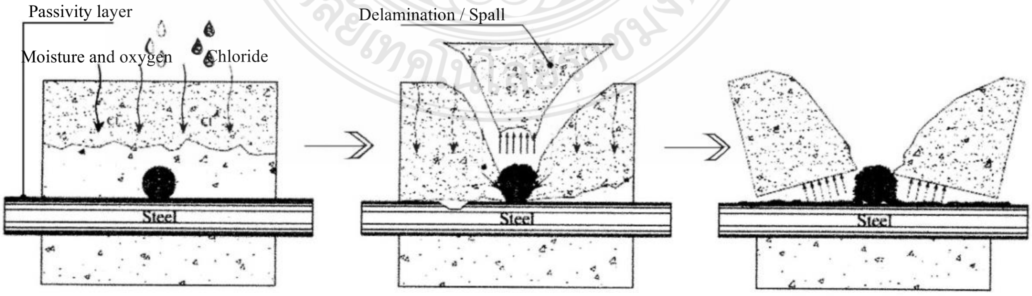
นอกจากการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์อิออนผ่านเนื้อคอนกรีต จะเป็นสาเหตุของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นนี้จะลดความเป็นด่างของคอนกรีตลง ซึ่งความเป็นด่างของคอนกรีตนี้จะเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดสนิม โดยปกติ ค่า pH ของคอนกรีตจะอยู่ระหว่าง 12-13 หากค่า pH ของคอนกรีตลดลงจนถึงจุดวิกฤต รวมทั้งมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ซึ่งค่า pH ก็จะเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่ามีโอกาสเกิดสนิมได้มากน้อยเพียงใด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สภาพของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ค่า pH ในระดับต่าง ๆ [25]

ค่า pH ของคอนกรีต	สภาพของสนิมภายในเหล็กเสริมคอนกรีต
ต่ำกว่า 9.5	เริ่มเกิดสนิมเล็กน้อยที่ผิว (ฟิล์มที่ผิวยังไม่หาย)
8.0	ฟิล์มที่เคลือบผิวเหล็กหายไป
ต่ำกว่า 7.0	เกิดสนิมอย่างรุนแรงที่ตัวของเหล็กเสริม



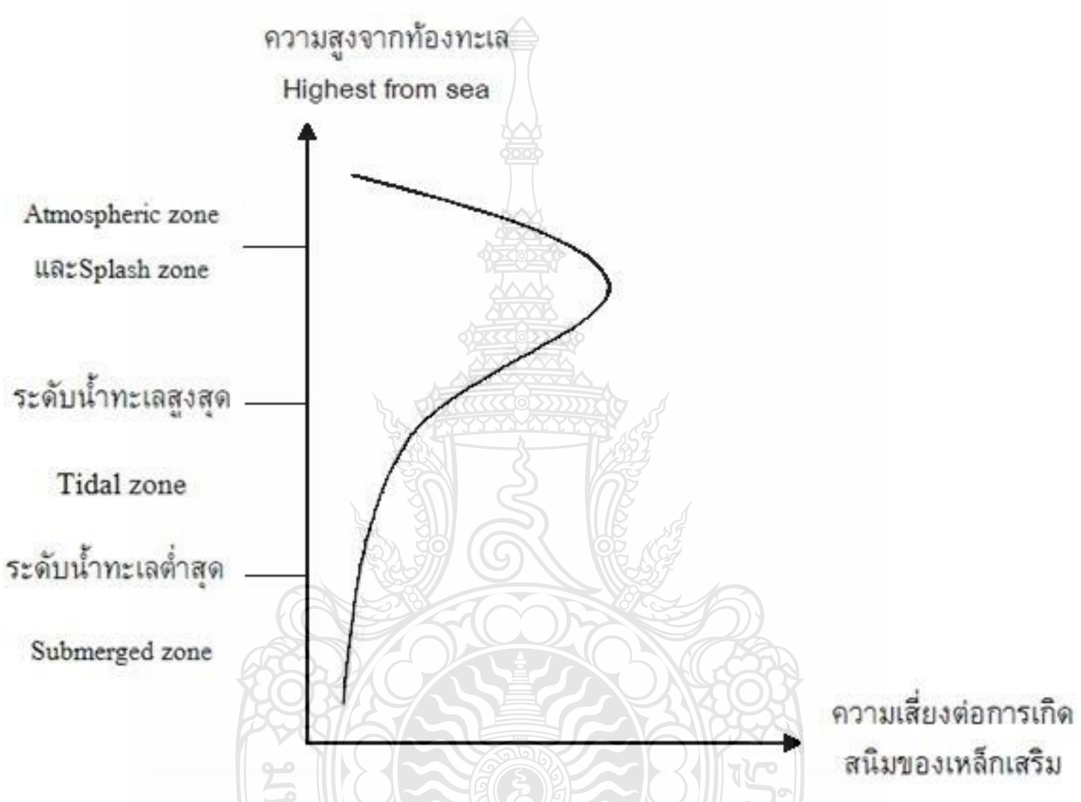
รูปที่ 2.4 กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [24]



รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล [24]

4) ความเสี่ยงของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีมากที่สุด ในบริเวณโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณคลื่นละอองน้ำ รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริมในโครงสร้างได้น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.6

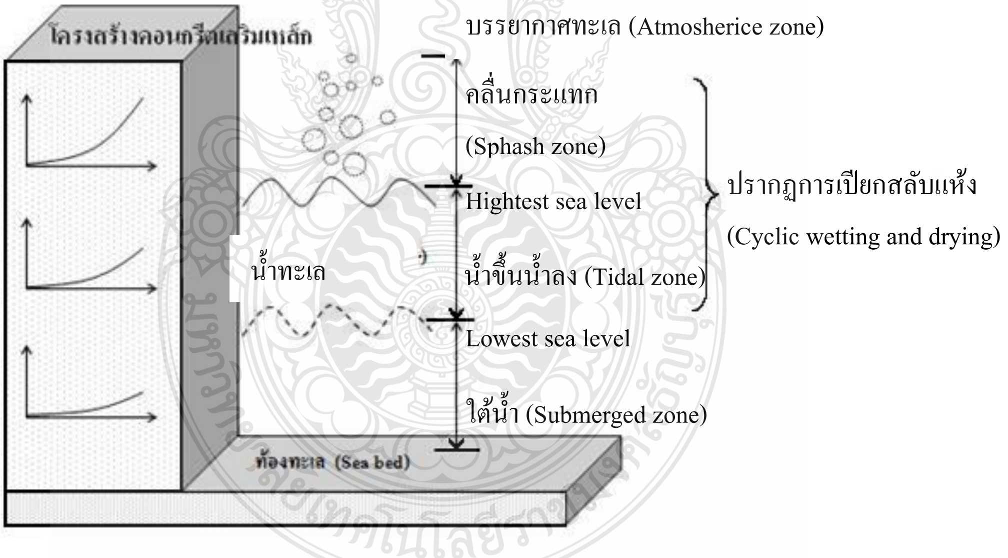


รูปที่ 2.6 ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [24]

การที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนเหล็กเสริมในโครงสร้างน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำ เนื่องมาจากช่องว่างภายในคอนกรีตอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนจะละลายในน้ำได้น้อยมาก เป็นผลทำให้อัตราการแพร่ในคอนกรีตเกิดขึ้นน้อย

ถึงแม้ว่า จะมีปริมาณออกซิเจนมากในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นก็จะถูกจำกัดไปด้วย อัตราการแพร่ของออกซิเจนที่ต่ำ ผ่านช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่สภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการแพร่ หรือการซึมผ่าน จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง น้ำที่ผิวที่ผิวของคอนกรีตจะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อคลอไรด์อิออนที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต มีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และกระจายเข้าสู่ภายในคอนกรีต ทำให้คลอไรด์เข้าสู่บริเวณผิวของเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้า และภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้น การแพร่ของคลอไรด์อิออนเข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปในคอนกรีตของคลอไรด์อิออนในสภาพเปียกสลับแห้งดังแสดงในรูปที่ 2.7 แบบจำลองของโครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล



รูปที่ 2.7 โครงสร้างที่ถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเล [24]

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์อิออนเข้าไปในคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางของลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และสภาพการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ใน

โครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกันโดยทั่วไปคอนกรีตจะมีสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกจะเร่งให้คลอไรด์อิออนเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง โดยมีช่วงแห้งที่นานกว่านั้น จะมีโอกาสเกิดปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้มากกว่า และสนิมจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณคลอไรด์อิออนที่ผิวของเหล็กเสริมมีมากพอที่จะทำให้เหล็กเสริมนั้นเริ่มเกิดสนิมได้

5) การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

เนื่องจากคลอไรด์เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำทะเล จึงทำให้การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่างๆของคอนกรีตได้ ซึ่งจะมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นยังขึ้น อยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไก และธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

- การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อิ่มตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์อิออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของอิออน โดยคลอไรด์อิออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนสูง ไปยังบริเวณที่มีความเข้มขั้นของคลอไรด์อิออนต่ำ

- การดึงดูดแบบคาพิวลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบคาพิวลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิวลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น

- การดึดดูดอิออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มขั้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดอิออนจะเกิดสูงขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีตจะดึงดูดคลอไรด์อิออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น

- แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์อิออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำและเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแพร่เป็นหลัก โดยที่ในคลอไรด์ของสิ่ง แวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่จะแพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์สูงไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตแล้วคลอไรด์ก็จะแพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์ เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

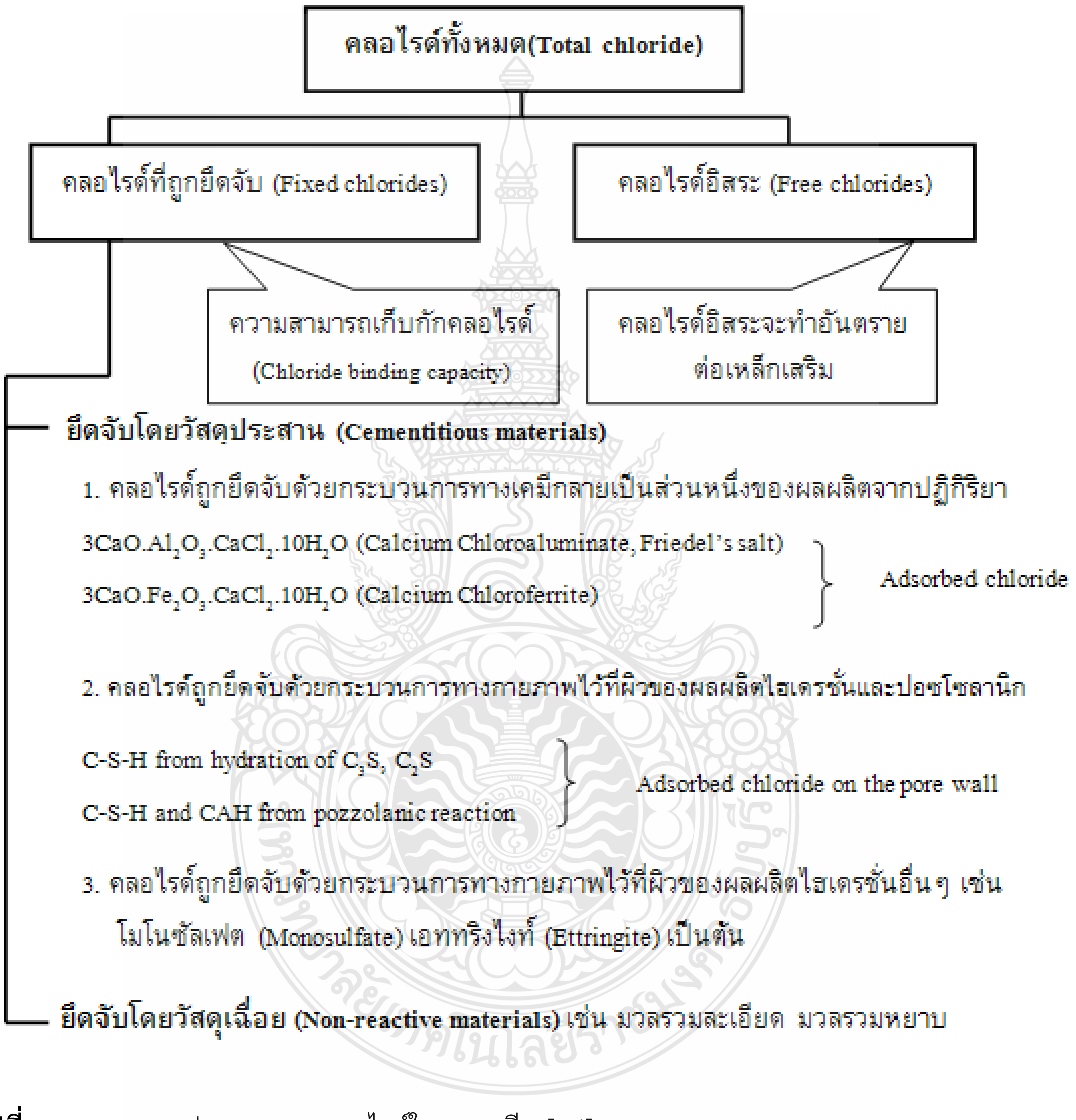
6) ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต [20]

การที่คลอไรด์อิออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ชนิดของแคตอิออน ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้นๆ เผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีตนั้น จะเป็นผลรวมของคลอไรด์2 ประเภท (Total chloride) ได้แก่

- คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับให้อยู่ในผลิตภัณฑ์ไฮเดชั่น (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Friedal’s salt) หรือ $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Calcium chloroferrite) และเกิดปฏิกิริยา โดยเปลี่ยนไปในรูปของ Calcium chloro-aluminate hydrate ที่เรียกว่า Friedel’s salt หรือคลอไรด์ถูกยึดจับไว้ที่ผิวของ Gel pores และบางส่วนอาจถูกยึดจับไว้ที่ผิวของผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic production) ของเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งคลอไรด์ประเภทนี้ไม่มีผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดชั่น เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

- คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่มีสภาพเป็นสารละลายละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ซึ่งถ้ามีคลอไรด์ประเภทนี้ในปริมาณที่มากพอก็จะสามารถทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในสภาพ

แวด ล้อมที่เปียกสลับแห้ง เช่น บริเวณคลื่นละอองน้ำ (Splash zone) หรือ บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) จะได้รับผลกระทบจากการซึมผ่านของคลอไรด์อิออนที่ค่อยข้างรุนแรงกว่า โครงสร้างที่อยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา เช่น บริเวณใต้ทะเล (Submerged zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่เป็นแผนภาพแสดงชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต



รูปที่ 2.8 แผนภาพประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต [24]

7) วิธีการวัดคลอไรด์และความต้านทานคลอไรด์

วิธีการทดสอบที่นิยมใช้มีดังนี้

- การไทเทรต

การไทเทรต (Titration test) เป็นการทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตในระยะความลึกต่างๆ โดยต้องเจาะหรือเอาคอนกรีตบริเวณที่ต้องการหาปริมาณคลอไรด์ไปบดให้ละเอียด และวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ที่มีอยู่ในการแทรกซึมของคลอไรด์มี 2 ลักษณะคือ วิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตาม ASTM C 1152 เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ ทั้งหมด (Total chloride content) และทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218 หลังจากเตรียมสารละลายเสร็จ สามารถไทเทรตปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตด้วยมือหรือด้วยเครื่อง Potentiometer titration ซึ่งเป็นเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (รูปที่ 2.9)

รูปที่ 2.9 เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ [26]

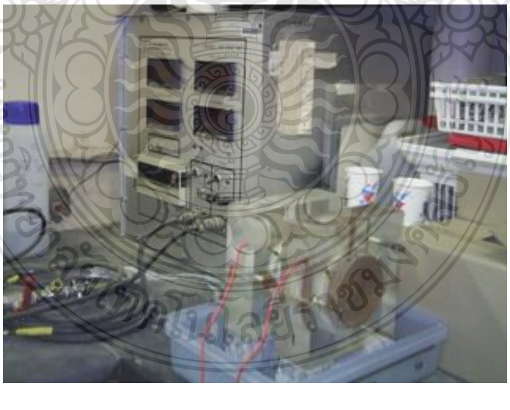
- ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง

การทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยวิธีเร่ง (Rapid chloride penetration test) ทำได้โดยใช้วิธีทดสอบตาม ASTM C1202 ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ประจุไฟฟ้าที่วิ่งผ่านชิ้นคอนกรีต ระหว่างสารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ปริมาณ ประจุไฟฟ้าวัดเป็นคูลอมบ์ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการแทรกซึมของคลอไรด์ วิธีนี้สามารถบอกผลได้อย่างรวดเร็ว ว่าคอนกรีตสามารถต้านทานต่อการแทรกซึมได้มากน้อยเพียงใด โดยอ้างอิงตามเกณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 และ รูปที่ 2.10 แสดงชุดเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง โดยการทดลองใช้ตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์ กลาง 100 มม.

หนา 50 มม. และ เคลือบอีพอกซี่ ที่ขอบของตัวอย่าง จากนั้นทำการดูดอากาศออกจากโพรงในเนื้อตัวอย่างเป็นเวลา 3 ชม. และทำ ให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำอีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงได้นำตัวอย่างเข้าทดสอบในเครื่องทดสอบ Rapid Chloride โดยจะวัดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในรูปของประจุไฟฟ้าทั้งหมด (Total Charge) ที่ผ่านตัวอย่างในการทดสอบจะใช้เวลา 6 ชั่วโมงต่อหนึ่งชิ้นตัวอย่าง นอกจากการทดลองวัดค่า การซึมผ่านของคลอไรด์ดังกล่าวแล้วยังสามารถคำนวณหาค่าความพรุน (Porosity) ของตัวอย่างได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.7 มาตรฐานของคุณภาพคอนกรีตในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ตาม ASTM C 1202

จำนวนประจุที่เคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์)	ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์	คุณภาพคอนกรีต
>4000	สูง (High)	แย่ (Poor)
2000-4000	ปานกลาง (Moderate)	ปานกลาง (Moderate)
1000-2000	ต่ำ (Low)	ดี (Good)
100-1000	ต่ำมาก (Very low)	ดีมาก (Very good)
<100	ไม่ซึมผ่าน (Negligible)	ดีเยี่ยม (Excellence)



รูปที่ 2.10 ชุดเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธีเร่ง [26]

- ทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธีฉีดสี

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธีฉีดสี (Colorimetric technique) สามารถใช้วัดระดับความลึกของการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration depth) ในคอนกรีต และเป็นวิธีการทดสอบที่สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว โดยการฉีด พ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO3) บนตัวอย่างทดสอบ ผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นเป็นสีขาว และสีน้ำตาล โดยส่วนที่เป็นสีขาวเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง ซิลเวอร์อิออน (Ag+) และคลอไรด์อิออน (Cl-) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น ซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ซึ่งมีลักษณะเป็นสีขาว ซึ่งบริเวณที่ปรากฏเป็นสีขาวหลังฉีด พ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทแสดงว่ามีการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าถึง ส่วนบริเวณที่ไม่มีเกลือคลอไรด์จะปรากฏเป็นสีน้ำตาลซึ่งเป็นสารประกอบซิลเวอร์ไฮดรอกไซด์ (AgOH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง ซิลเวอร์อิออน (Ag+) กับ ไฮดรอกซิลอิออน (OH-) จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)2) ในคอนกรีต ซึ่ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.17 และ 2.18

$$Ag^{+} + Cl^{-} \longrightarrow AgCl \text{ (สีขาว)} \quad (2.17)$$

$$Ag^{+} + OH^{-} \longrightarrow AgOH \text{ (สีน้ำตาล)} \quad (2.18)$$

2.2.10 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ในคอนกรีตเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการแพร่ของคลอไรด์ที่เข้าไปทำอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลชัดเจนต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเล โดยทั่วไปการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_a) สามารถทำได้หลายวิธี โดยแต่ละวิธีก็จะให้ค่าที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จากเส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration profile) นิยมใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick’s second law) [27,28] เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายและรวดเร็ว

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick’s second law) โดยหลักที่ถูกต้องแล้ว การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตต้องเป็นลักษณะ ของการแพร่ที่เป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งในกรณีของการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไม่ได้อยู่ในลักษณะของการแพร่เพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ควบคู่กันไป เช่น การแพร่ (Diffusion) แรงดันน้ำ (Hydrostatic pressure) และการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง คาปิลลารี (Capillary suction) ของคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้น การประยุกต์ใช้กฎการแพร่

ข้อที่สองของฟิค เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ กับการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สภาวะดังกล่าว จะไม่นิยมเรียกว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) แต่จะเรียกเป็นสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏของคลอไรด์ (Apparent diffusion coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้เส้นกราฟแสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ เริ่มจากกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick’s second law) ดังสมการ (2.19)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \qquad (2.19)$$

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ 2.19 สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.20 ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_0)\left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] + C_0 \qquad (2.20)$$

เมื่อ $C_{(x,\,t)}$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้าที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ t (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

C_0 คือ ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่บริเวณผิวเหล็กเสริม โดยเป็นคลอไรด์ส่วนที่อยู่ในส่วนผสมของคอนกรีตตั้งแต่แรก (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ซม.^{2}/วัน)

x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

erf คือ ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function) ดังสมการที่ 2.21

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n z^{(2n+1)}}{n!(2n+1)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{10} - \frac{z^7}{42} + \ldots\ldots\right) \qquad (2.21)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตทำได้โดยการปรับค่า D_a และ C_s ในสมการที่ 2.14 เพื่อให้เส้นกราฟที่ได้จากสมการสอดคล้องกับกราฟที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด

2.2.11 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต

คาร์บอเนชั่นเป็นขบวนการที่เปลี่ยนผลิตผลบางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งโดยปกติ มักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอเนต โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.2.12 กลไกของการเกิดคาร์บอเนชั่น

คาร์บอเนชั่นเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) บริเวณผิวหน้าหรือใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ตามสมการของปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

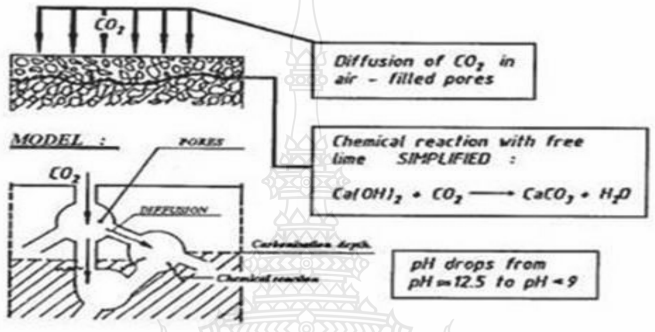
$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2.22)$$

หรือ

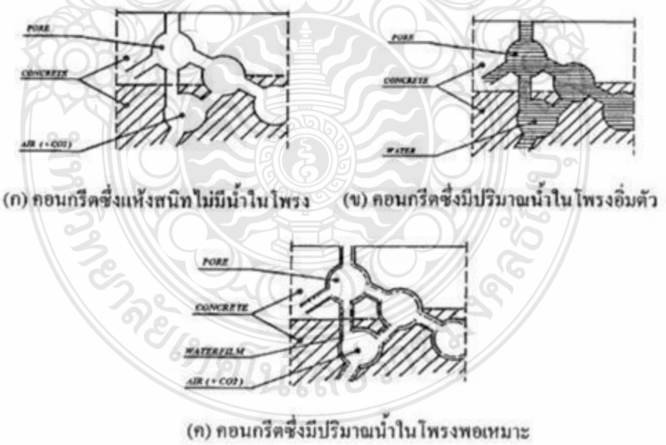
$$3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3CO_2 \longrightarrow 3CaCO3.2SiO_2.3H_2O \quad (2.23)$$

ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยา (2.22) มากกว่า (2.23) และในความเป็นจริงแล้วทั้งสองปฏิกิริยาก็ต้องการให้น้ำในการทำปฏิกิริยาด้วยเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของสารละลาย คอนกรีตที่ถูกคาร์บอเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลงเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นจะอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีตลักษณะการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาศสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังนั้นคาร์บอเนชั่นจะค่อยๆคืบหน้าเข้าในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่า (Pores Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอเนตไปแล้วซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปยากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์

บอเนชั่นต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิทจะไม่เกิดคาร์บอเนชั่น เนื่องจากคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วนน้ำจะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทจะไม่มีน้ำทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ดังนั้นคาร์บอเนชั่นจะรุนแรงในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-Dry) นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาก



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในคอนกรีต



รูปที่ 2.12 ภาพจำลองแสดงสภาวะของความชื้นของโพรงในคอนกรีต

2.2.13 ผลของคาร์บอเนชั่น

คาร์บอเนชั่นทำให้เกิดผลที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1) ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอเนชั่นต่ำลง

2) ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอเนชั่นต่ำลงเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องความคงทน แต่ผลประการหลังจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอเนชั่นเข้าไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤติ

3) ทำให้หดตัว (Carbonation Shrinkage) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้หน่วยแรงอัด ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ผลของคาร์บอเนชั่นทั้ง 3 กรณี ในกรณีที่ 2 คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อการคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่ดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ดีในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอเนชั่นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการละความพรุน

2.2.14 ปัจจัยที่มีผลต่อคาร์บอเนชั่น

1) ควมชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น ความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ชื้นและแห้งเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นรุนแรง

2) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศยิ่งมาก จะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นรุนแรง

3) อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นดำเนินไปได้เร็ว

4) ความพรุนของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำต่ำจะเกิดได้คาร์บอเนชั่นได้เร็วมาก

5) การใช้สารปอซโซลานบางชนิด จะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นมากขึ้นถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไป

2.2.15 การป้องกันการเกิดคาร์บอเนชั่น

1) ออกแบบให้คอนกรีตมีความพรุนต่ำ เช่น ใช้ปริมาณน้ำที่น้อย อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ หรือใช้วัสดุเติมช่องว่าง (Filler) เช่น ซิลิกาฟูม จะช่วยให้เกิดคาร์บอเนชั่นลดลง

2) บ่มคอนกรีตให้ดี การบ่มคอนกรีตให้ยาวนานขึ้นจะทำให้คอนกรีตบริเวณผิวและใกล้ผิวคอนกรีตมีความทึบน้ำดีขึ้น

3) สำหรับการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กควรออกแบบคอนกรีตหุ้มเหล็กให้หนาขึ้นถ้าทราบว่าโครงสร้างดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่คาร์บอเนชั่นรุนแรง

ตัวอย่างความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตที่เกิดจากคาร์บอเนชั่น

รูปที่ 2.13 ราวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอเนชัน

รูปที่ 2.14 แบริเออร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอเนชัน

รูปที่ 2.13 และ 2.14 ราวสะพานและแบริเออร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ริมถนน ซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีความชื้นสัมพัทธ์พอประมาณ ทำให้เกิดคาร์บอเนชันได้ง่าย เมื่อความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤตแล้ว จะทำให้เกิดการเป็นสนิมในเหล็กเสริมขึ้น ทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกะเทาะออกตามแนวเหล็กเสริม [24]

รูปที่ 2.15 สภาพผิวของถังน้ำคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากคาร์บอเนชัน

รูปที่ 2.15 สภาพผิวของถังน้ำคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากคาร์บอเนชัน ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมหลุดร่อนออกเห็นเหล็กเสริม ซึ่งทำให้มีโอกาสเกิดสนิมได้เร็วขึ้น เพราะน้ำและออกซิเจนสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้ง่าย [24]

2.2.16 การทดสอบคาร์บอเนชั่น

การทดสอบคาร์บอเนชั่น สามารถทำได้หลายวิธีแต่สำหรับในการทดสอบครั้งนี้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 และ ASTM C856 คือการฉีดสารละลายฟินอล์ฟทาลีนในตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มิลลิเมตรที่ผ่าเป็น 2 ซีก ซึ่งปรากฎเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอเนชั่น ส่วนคอนกรีตที่เกิดคาร์บอเนชั่นจะไม่มีสี

2.2.17 การเกิดสนิมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน

เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่เข้าไปในคอนกรีต และทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชันซึ่งจะทำให้ความสามารถของคอนกรีตในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลงจนทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ตัวอย่างของสภาพแวดล้อมที่มีคาร์บอเนชัน เช่น โครงสร้างในที่จอดรถ โครงสร้างริมถนนหรือใต้สะพานบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น โครงสร้างใต้สะพานที่เผชิญกับเขม่าควันต่างๆ ตลอดจนในอาคารที่มีผู้คนอยู่มากเป็นต้นเพื่อให้โครงสร้างคอนกรีตมีความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและมีอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-free service life) ตามที่กำหนด ต้องควบคุมให้ความลึกคาร์บอเนชันในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซมมีค่าน้อยกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการ (2.24) ต่อไปนี้ในการออกแบบ

$$X_c \leq c \qquad (2.24)$$

โดยที่ c = ระยะหุ้มเหล็กเสริม

X_c = ความลึกคาร์บอเนชั่น (มิลลิเมตร) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) ดังต่อไปนี้

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_r} \qquad (2.25)$$

โดยที่ α_1 สัมประสิทธิ์สัมผัสความเปียกชื้น

คอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกชื้นในขณะใช้งาน เท่ากับ 1.00

คอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้นในขณะใช้งาน เท่ากับ 0.95

α_2 สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น

สามารถกำหนดได้จากตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สัมประสิทธิ์ของระดับความรุนแรงสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน [24]

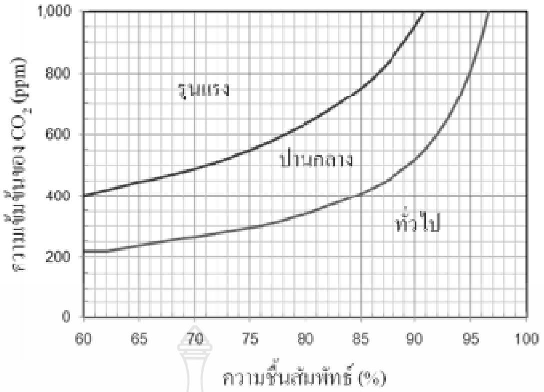
ความรุนแรงของสภาพแวดล้อม	สัมประสิทธิ์ของระดับความรุนแรงสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน (α_2)
1. เสี่ยงต่อคาร์บอเนชันน้อย	0.65
2. เสี่ยงต่อคาร์บอเนชันปานกลาง	0.85
3. เสี่ยงต่อคาร์บอเนชันรุนแรง	1.00

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชัน สามารถกำหนดได้โดยใช้รูปที่ 2.16 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้าง ในช่วงอายุการใช้งาน สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชัน (k) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.20) ดังต่อไปนี้

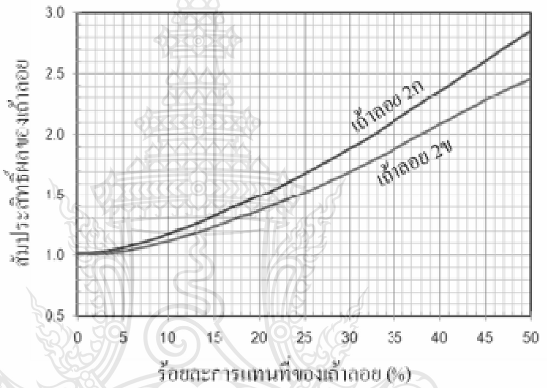
$$K = 1.75 \bullet k_r \bullet (w/b)^3 \qquad (2.26)$$

โดยที่ k_r กรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าเท่ากับ 1 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

กำหนดค่าโดยใช้รูปที่ 2.17 ขึ้นอยู่กับชนิดและสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าลอย (เถ้าลอยชนิด 2ก และ 2ข ตาม มอก.2135 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)



รูปที่ 2.16 การแบ่งระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น [32]



รูปที่ 2.17 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน [30]

2.2.18 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น

สมการ Fick’s first law of diffusion เมื่อทราบอายุของโครงสร้างและระยะความลึกคาร์บอเนชั่น สามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธ์คาร์บอเนชั่นดังสมการ (2.27)

$$d = k\sqrt{t} \quad (2.27)$$

โดยที่ d คือ ระยะคาร์บอเนชั่น (มิลลิเมตร)

t คือ อายุของโครงสร้าง (เดือน)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

สำหรับในส่วนของวิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 80-2517

2) เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blast-furnace slag)

4) ซิลิกาฟูม (Silica fume)

5) ผงหินปูน (Limestone powder) ขนาด 8 ไมโครเมตร

6) เถ้าก้นเตา (Bottom ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

7) ทรายใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

8) หินที่ใช้ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4

9) น้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีต และบ่มคอนกรีต เป็นน้ำประปา

10) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

11) สารละลายฟินอล์ฟทาลีน

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษา สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ศึกษา สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้

สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดของวัสดุประสาน ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา ลักษณะอนุภาคของวัสดุ และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้

การหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188-95 โดยขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (Le Chatelier Flask) (รูปที่ 3.1)

รูปที่ 3.1 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์

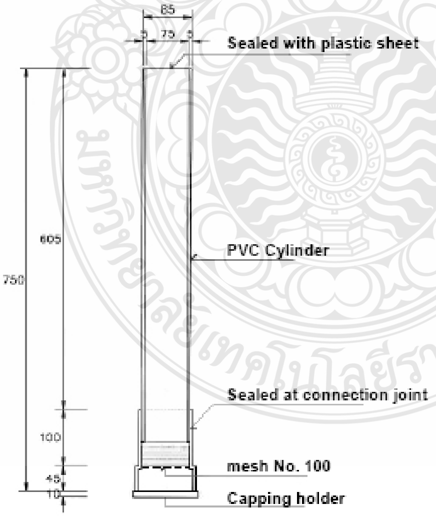
2) ความละเอียดของวัสดุประสาน

การหาค่าความละเอียดของวัสดุประสาน ได้ทำการศึกษาโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 204-00 ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (air permeability apparatus) (รูปที่ 3.2)

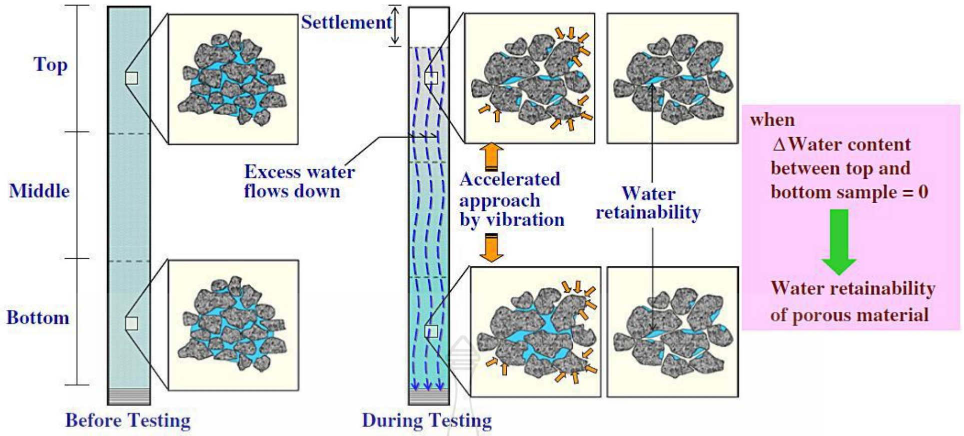
รูปที่ 3.2 เครื่องมือหาความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์

2) ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา

ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา กระทำตามขั้นตอนของ Kasemchaisiri and Tangtermsirikul [29] คือทดสอบหาค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา เปรียบเทียบกับวิธีการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C128 โดยใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วน ร้อยละ 0, 10 และ 20 และเก็บรักษาความชื้นให้ทั่วถึงกันก่อนการทดสอบประมาณ 24 ± 4 ชั่วโมง โดยการทดสอบใช้ท่อ PVC ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ยาว 750 มิลลิเมตร คลุมด้วยพลาสติกด้านบนและด้านล่างของท่อ เพื่อป้องกันความชื้น จากนั้นนำกระบอกทดสอบที่ได้เข้าเครื่องเขย่า และเปิดเครื่องเขย่าด้วยความเร็วคงที่เป็นระยะเวลา 24 นาที ซึ่งใช้เถ้าก้นเตาประมาณ 3 - 5 กิโลกรัม ดังรูปที่ 3.3 จากนั้นนำเถ้าก้นเตาจากกระบอกทดสอบไปอบ โดยในการนำไปอบนั้นต้องแยกระหว่างส่วนบนและส่วนล่างส่วนละ 500 ± 10 กรัม เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 ± 5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเถ้าก้นเตาออกจากตู้อบ และคำนวณค่าการดูดซึมน้ำหรือค่าการกักเก็บน้ำ สำหรับแนวคิดของการทดสอบ พบว่าน้ำจะเข้าไปเติมเต็มในรูของเถ้าก้นเตาและอิ่มตัวที่ผิวด้านนอก เมื่อเกิดการเขย่าขึ้นน้ำส่วนเกินจะไหลลงจากบนลงล่างของท่อทรงกระบอกทดสอบ ดังนั้นค่าความชื้นของเถ้าก้นเตาทั้งบนและล่างของกระบอกทดสอบต้องมีค่าเท่ากันและค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนมวลที่มากที่สุดของน้ำต่อมวลรวมที่แห้ง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่าการกักเก็บน้ำในวัสดุพรุน [29]



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงแนวคิดการหาค่าความกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา [29]

3) ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 โดยหาความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาในสภาวะแห้งด้วยเตาอบจากการกระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188-95 โดยขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (Le Chatelier Flask) (รูปที่ 3.1) ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาในสภาวะค่าการกักเก็บน้ำ หาได้จากการกระทำตามขั้นตอนของ Kasemchaisiri and Tangtermsirikul ดังที่กล่าวมาแล้ว

$$\rho_{WR} = \rho_{OD}\,(1 + WR) \qquad (3.1)$$

เมื่อ ρ_{WR} คือ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาในสภาวะค่าการกักเก็บน้ำ

ρ_{OD} คือ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ

WR คือ ค่าการกักเก็บน้ำ (%)

4) ลักษณะอนุภาคของวัสดุที่ใช้

ลักษณะอนุภาคของวัสดุที่ใช้ กระทำโดยใช้เครื่องโดย Scanning Electronic Microscope (SEM) ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาค

5) องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้นั้นได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบ โดยใช้วิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

3.2.2 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (chloride binding capacity) ของคอนกรีต มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

1) การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

- ทำความสะอาดแบบหล่อแบบหล่อกำลังอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร x 300 มิลลิเมตร และทาน้ำมันป้องกันผิวคอนกรีตติดกับแบบหล่อ โดยใช้จำนวน 3 แบบต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม
- ชั่งตวงวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ตามสัดส่วนผสมของคอนกรีตดังตารางที่ 3.1
- ผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนผสม
- เทคอนกรีตที่ผสมตามอัตราส่วนผสมลงแบบหล่อที่เตรียมไว้ กระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้งจำนวน 3 ชั้น ใช้ค้อนตีข้างแบบในแต่ละชั้นเพื่อไล่ฟองอากาศและทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น
- ชั้นสุดท้ายให้ใส่คอนกรีตให้เกินแบบเล็กน้อย แล้วปาดผิวหน้าให้เรียบ
- ถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง พร้อมทั้งเขียนชื่อตัวอย่างหมายเลขและวันที่หล่อคอนกรีต และบ่มตัวอย่างในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน

รูปที่ 3.5 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

2) การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต

- บ่มในน้ำ 28 วัน นำขึ้นมาจากน้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงให้ผิวตัวอย่างแห้ง

- เคลือบผิวคอนกรีตด้านข้างและด้านล่างให้รอบโดยอีพ็อกซี Epoxy (1:2) เว้นผิวด้านบนหนึ่งด้านจำนวน 3 รอบทิ้งระยะห่างในการเคลือบผิวประมาณ 4-6 ชั่วโมง ต้องมั่นใจว่าไม่มีรูหรือรอยให้น้ำซึมเข้าได้ที่ผิวเคลือบ ทิ้งให้สารเคลือบผิวคอนกรีตแห้งระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (น้ำเกลือ) ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนร้อยละ 5 (50 กรัม/ลิตร) แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ตามระยะเวลาการทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน
- เมื่ออายุการทดสอบ นำตัวอย่างคว่ำผิวบนลงให้น้ำระบายออก 24 ชั่วโมง
- เก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยการเจาะเอาผงตัวอย่างชั้นละ 10 มิลลิเมตร ชั้นละ 20 กรัมทุกๆ ชั้นโดยวัดจากผิวหน้าของคอนกรีตที่คลอไรด์ซึมผ่านจำนวน 5 ชั้น นำไปไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตต่อไป

รูปที่ 3.6 การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต

3) การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับการเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบโดยมีรายละเอียดวิธีการเตรียม

- การเตรียมสาร 5M NaNo 3 : ISA24 Contents : 42.5% Sodium Nitrate (7631-99-4) 57.5% Water (7732-18-5)

- การเตรียมสาร 1000 ppm. Chloride Standard : ISC24 Contents : 0.20% Sodium Chloride (7647-14-5) 99.8% Water (7732-18-5)

- การเตรียมกรดไนตริก (HNO_3) เจือจาง (1:1)

วิธีทำ ผสมกรดไนตริกกับน้ำกลั่นในบีกเกอร์ในอัตราส่วน 1:1 โดยเติมน้ำกลั่นลงไปก่อนแล้วเติมกรดไนตริกทีหลังคนให้เข้ากัน

- การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 100 ppm.

วิธีทำ ผสมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 15 มิลลิลิตรกับน้ำกลั่นปริมาตร 135 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ โดยเติมน้ำกลั่นลงไปก่อนแล้วเติมโซเดียมคลอไรด์ทีหลังคนให้เข้ากัน

- การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 10 ppm.

วิธีทำ ผสมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 15 มิลลิลิตรกับน้ำกลั่นปริมาตร 135 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ โดยเติมน้ำกลั่นลงไปก่อน แล้วเติมโซเดียมคลอไรด์ทีหลังคนให้เข้ากัน

4) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152

- ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- เติมน้ำกลั่นปริมาณ 75 มิลลิลิตร และเติมกรดไนตริก (HNO_3) เจือจาง (1:1) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ แล้วคนให้เข้ากันประมาณ 1-2 นาที
- ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องนำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น

5) การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในระบบโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย (Water soluble Chlordide) ตามมาตรฐาน ASTM C 1218

- ชั่งตัวอย่าง ประมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- เติมน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ แล้วคนให้เข้ากันประมาณ 1-2 นาที

- ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งไว้จนกระทั่งเย็นตัว นำไปกรองผ่านกระดาษกรองใช้กระดาษกรอง 2 แผ่น

6) การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องวัดคลอไรด์อัตโนมัติ

- ตั้งค่าเครื่องวัดคลอไรด์ โดยเลือกค่าสอบเทียบในเครื่องวัดเป็น สารละลายโซเดียมคลอไรด์มาตรฐาน ความเข้มข้น 100 ppm. และสารละลายโซเดียมคลอไรด์มาตรฐาน ความเข้มข้น 10 ppm.

- ปิเปตต์ตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ไปใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ทำการวัดปริมาณคลอไรด์โดยเครื่องอ่านอัตโนมัติ ซึ่งจะได้ข้อมูลเป็นหน่วยความขุ่นในล้านส่วน (ppm.)

รูปที่ 3.7 การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องวัดคลอไรด์อัตโนมัติ

7) การคำนวณหาปริมาณคลอไรด์

- ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด Total Chloride ได้จากการทดสอบโดยใช้กรด
- ปริมาณคลอไรด์อิสระ Free Chloride ได้จากการทดสอบโดยใช้น้ำกลั่น
- ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกจับยึด Fixed Chloride เท่ากับ Total Chloride – Free Chloride

8) หลังจากทราบค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และปริมาณคลอไรด์อิสระ จากการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต โดยวิธีไทเทรต จะนำค่าที่ได้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้วิธีการ

ปรับค่า Da และ Cs ในคำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) (สมการที่ 2.14) เพื่อให้เส้นกราฟที่ได้จากสมการสอดคล้องกับกราฟที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด (วิธีลองผิดลองถูก)

3.2.3 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น

สำหรับการทดสอบคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต ทดสอบตามมตรฐาน ASTM C109 และ ASTM C856

1) หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุที่ใช้ในการศึกษาตามตารางที่ 3.3 และ 3.4

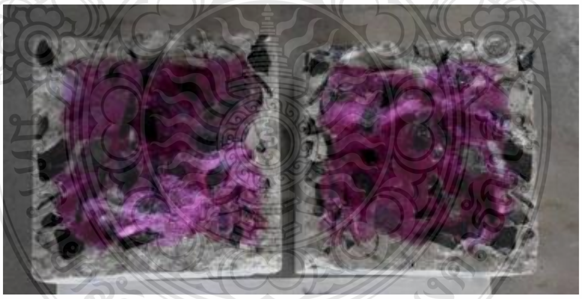
รูปที่ 3.8 แบบหล่อตัวอย่างขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร

2) หลังจากหล่อแบบตัวอย่าง ทำการบ่มตัวอย่างในบ่อ โดยถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างไปบ่ม 2 แบบ คือ บ่มอากาศและบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน

3) หลังจากบ่มแต่ละแบบครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างดังกล่าวไปอบในตู้เร่งการเกิดคาร์บอเนชั่น (อุณหภูมิ 40 – 50 องศาเซลเซียส) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซต์ (CO_2) จะถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมควมชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 40 ถึง 60 ทิ้งตัวอย่างคอนกรีตโดยระยะเวลาที่เผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 วันและ 90 วัน

รูปที่ 3.9 อบตัวอย่างในตู้เร่งการเกิดคาร์บอเนชั่น

4) เมื่อครบอายุที่กำหนด นำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชั่น มีขั้นตอนการทดสอบโดยแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ที่ก้อนตัวอย่างซึ่งปรากฎสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอเนชั่น แต่ในส่วนที่เกิดคาร์บอเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสี ใช้เวอร์เนียร์วัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยค่าความลึกคาร์บอเนชั่นและทำการวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างคอนกรีตฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

5) หลังจากทราบระยะความลึกคาร์บอเนชั่นและอายุของโครงสร้าง สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น k โดยสมการ Fick’s first law (สมการที่ 2.20)

3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3.1และ 3.2

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการศึกษาค่าสัมประสิทธ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น โดยใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ลำดับ	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมของคอนกรีตใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์ ประเภท 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
1	C	308	-	-	-	-	899	1002	169
2	C-20FA	246	62	-	-	-	899	990	169
3	C-40FA	185	123	-	-	-	899	977	169
4	C-30SL	216	-	92	-	-	899	997	169
5	C-50SL	154	-	154	-	-	899	994	169
6	C-5SF	293	-	-	15	-	899	998	169
7	C-10SF	277	-	-	31	-	899	993	169
8	C-5LP	293	-	-	-	15	899	999	169
9	C-10LP	277	-	-	-	31	899	998	169
10	C-15FA-5LP	246	47	-	-	15	899	990	169
11	C-10FA-10LP	246	31	-	-	31	899	991	169
12	C-35FA-5LP	185	108	-	-	15	899	978	169
13	C-30FA-10LP	185	92	-	-	31	899	979	169
14	C-25SL-5LP	216	-	77	-	15	899	995	169
15	C-20SL-10LP	216	-	61	-	31	899	995	169
16	C-45SL-5SF	154	-	139	15	-	899	990	169
17	C-40SL-10SF	154	-	123	31	-	899	986	169

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาค่าสัมประสิทธ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ลำดับ	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมของคอนกรีตใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)								
		ปูนซีเมนต์ ประเภท 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	เถ้าก้นเตา Volume
1	C	308	-	-	-	-	899	1002	169	-
2	C-10BA	308	-	-	-	-	809	1002	169	10% Vol.
3	C-30BA	308	-	-	-	-	629	1002	169	30% Vol.
4	C-40FA	185	123	-	-	-	899	977	169	-
5	C-40FA-10BA	185	123	-	-	-	809	977	169	10% Vol.
6	C-40FA-30BA	185	123				629	977	169	30% Vol.
7	C-50SL	154	-	154	-	-	899	994	169	-
8	C-50SL-10BA	154	-	154	-	-	809	994	169	10% Vol.
9	C-50SL-30BA	154	-	154	-	-	629	994	169	30% Vol.
10	C-10SF	277	-	-	31	-	899	993	169	-
11	C-10SF-10BA	277	-	-	31	-	809	993	169	10% Vol.
12	C-10SF-30BA	277	-	-	31	-	629	993	169	30% Vol.
13	C-10LP	277	-	-	-	31	899	998	169	-
14	C-10LP-10BA	277	-	-	-	31	809	998	169	10% Vol.
15	C-10LP-30BA	277	-	-	-	31	629	998	169	30% Vol.

หมายเหตุ **C** หมายถึง ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1, **LP** หมายถึง ผงหินปูน, **SF** หมายถึง ซิลิกาฟูม
FA หมายถึง เถ้าลอย, **SL** หมายถึง ตะกรันเตาถลุงเหล็ก, **BA** หมายถึง เถ้าก้นเตา
ตัวเลข 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, และ 50 หมายถึง ร้อยละการแทนที่ของวัสดุนั้นๆ

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

ในส่วนผลการศึกษาและวิเคราะห์ประกอบด้วย สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้

สำหรับสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย ในส่วนสมบัติของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน) ประกอบด้วยความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี ในขณะสมบัติเบื้องต้นของเถ้าก้นเตาประกอบด้วยความถ่วงจำเพาะ ความสามารถในการกักเก็บน้ำ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี โดยผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

1) ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลน

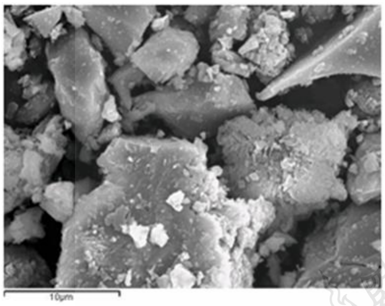
ตารางที่ 4.1 แสดงความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน

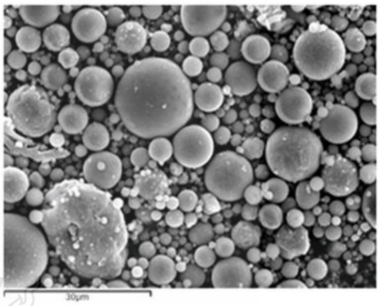
คุณสมบัติ	ชนิดวัสดุ				
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.53	2.96	2.32	2.69
ความละเอียด (ซม.^{2}/ก.)	3,100	2,867	4,600	-	5,210

2) ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน

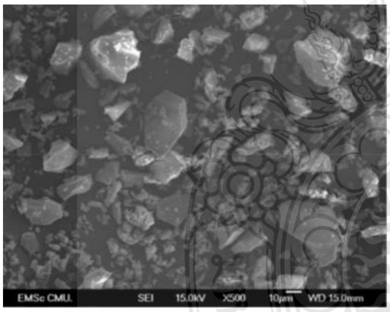
รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM) พบว่า รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยมคม ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูน ส่วนรูปร่างของอนุภาคของเถ้าลอย มีลักษณะกลมเรียบมีขนาดต่างๆกันกระจายอยู่เห็นได้ชัดเจน ซึ่งคล้ายๆกับของซิลิกาฟูม แต่ของซิลิกาฟูมจะมีขนาดค่อนข้างละเอียดกว่ามาก



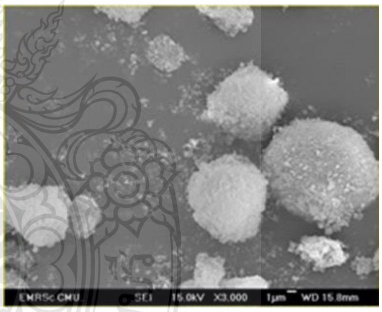
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



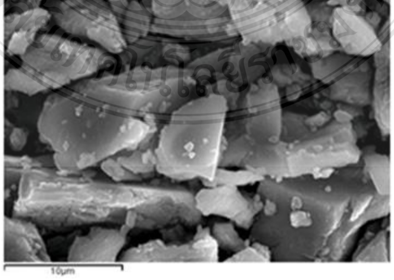
ข) เถ้าลอย



ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ง) ซิลิกาฟูม



จ) ผงหินปูน

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค (ขยาย 3500 เท่า) โดยใช้เครื่อง SEM

3) องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูนและเถ้าก้นเตา โดยใช้วิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้

ร้อยละองค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	เถ้าก้นเตา
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	18.93	35.71	34.06	92.00	0.45	35.29
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.51	20.44	16.27	0.70	0.05	18.93
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.31	15.54	1.7	1.20	0.03	15.53
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.53	16.52	36.05	0.20	55.2	17.44
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	2.00	7.38	0.20	0.34	1.97
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.15	1.15	2.16	-	<0.01	2.02
โปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.31	2.41	0.21	-	<0.01	0.66
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.88	4.26	1.09	1.50	0.01	2.07
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	-	0.49	1.44	-	43.12	4.45
แคลเซียมออกไซด์อิสระ	1.00	1.71	-	-	-	0.17

4.1.2 สมบัติเบื้องต้นของเถ้าก้นเตา

1) ความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำ

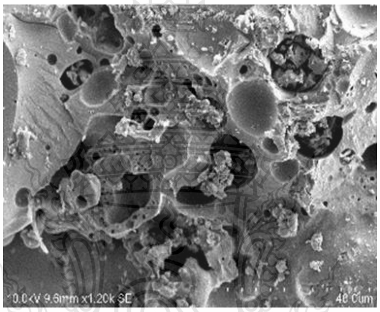
ตารางที่ 4.3 แสดงความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 4.3 ความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา

ชนิด	ความถ่วงจำเพาะ	ความสามารถในการกักเก็บน้ำ (ร้อยละ)
เถ้าก้นเตา	1.76	27

2) ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของเถ้าก้นเตา

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของเถ้าก้นเตา โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM) พบว่า รูปร่างอนุภาคของเถ้าก้นเตามีลักษณะเป็นเหลี่ยม แต่จะมีโพรงและรูพรุนกระจายไปทั่วอนุภาค



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของเถ้าก้นเตา (ขยาย 3500 เท่า) โดยใช้เครื่อง SEM

3) องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา โดยใช้วิธี X-ray fluorescence spectrometry (XRF) แสดงดังตารางที่ 4.2

4.2 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

จากการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปไทเทรต (Titration test) หาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะความลึกต่างๆ เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) จากนั้นคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต (Chloride penetration coefficient : D_a) ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้วิธีการปรับค่า D_a และ C_s ในคำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's

second law of diffusion) (สมการที่ 2.20) เพื่อให้เส้นกราฟที่ได้จากสมการสอดคล้องกับกราฟที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด (วิธีลองผิดลองถูก)

ในการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (D_a) ในคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยอายุการบ่มน้ำและบ่มอากาศที่ 28 วัน ก่อนนำไปเผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.9

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วันเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
1	C	5	7.786	2.831	4.955	0.636	0.668	8.631
		15	2.123	0.637	1.486	0.700		
		25	0.637	0.212	0.425	0.667		
		35	0.212	0.000	0.212	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
2	C-20FA	5	9.202	3.539	5.663	0.615	0.608	6.281
		15	1.770	0.708	1.062	0.600		
		25	0.708	0.000	0.708	1.000		
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.354	0.000	0.354	1.000		
3	C-40FA	5	9.910	2.831	7.078	0.714	0.714	3.319
		15	0.708	0.000	0.708	1.000		
		25	0.708	0.000	0.708	1.000		
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.354	0.000	0.354	1.000		

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วันเผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
		5	9.202	3.539	5.663	0.615		
		15	1.416	0.708	0.708	0.500		
4	C-30SL	25	1.062	0.000	1.062	1.000	0.558	5.422
		35	0.000	0.000	0.000	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
		5	7.786	2.123	5.663	0.727		
		15	0.708	0.000	0.708	1.000		
5	C-50SL	25	0.354	0.000	0.354	1.000	0.727	3.722
		35	0.354	0.000	0.354	1.000		
		45	0.283	0.000	0.283	1.000		
		5	7.786	3.539	4.247	0.545		
		15	1.416	0.708	0.708	0.500		
6	C-5SF	25	0.354	0.142	0.212	0.600	0.548	5.805
		35	0.212	0.071	0.142	0.667		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
		5	6.370	2.831	3.539	0.556		
		15	3.539	1.416	2.123	0.600		
7	C-10SF	25	0.708	0.354	0.354	0.500	0.552	5.325
		35	0.212	0.071	0.142	0.667		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วันเผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
8	C-5LP	5	6.370	2.831	3.539	0.556	0.611	8.936
		15	2.123	0.708	1.416	0.667		
		25	0.708	0.000	0.708	1.000		
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
9	C-10LP	5	8.494	3.539	4.955	0.583	0.592	11.315
		15	3.539	1.416	2.123	0.600		
		25	0.708	0.000	0.708	1.000		
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.708	0.000	0.708	1.000		
10	C-15FA-5LP	5	7.078	2.123	4.955	0.700	0.600	4.011
		15	0.708	0.354	0.354	0.500		
		25	0.708	0.000	0.708	1.000		
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
11	C-10FA-10LP	5	6.370	2.831	3.539	0.556	0.444	7.300
		15	2.123	1.416	0.708	0.333		
		25	1.416	0.000	1.416	1.000		
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.354	0.000	0.354	1.000		

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วันเผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
12	C-35FA-5LP	5	9.910	3.539	6.370	0.643	0.643	3.307
		15	0.708	0.000	0.708	1.000		
		25	0.566	0.000	0.566	1.000		
		35	0.354	0.000	0.354	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
13	C-30FA-10LP	5	7.078	2.831	4.247	0.600	0.300	4.011
		15	0.708	0.708	0.000	0.000		
		25	0.708	0.000	0.708	1.000		
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
14	C-25SL-5LP	5	10.617	3.539	7.078	0.667	0.667	3.208
		15	0.708	0.000	0.708	1.000		
		25	0.708	0.000	0.708	1.000		
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
15	C-20SL-10LP	5	7.786	3.539	4.247	0.545	0.523	3.758
		15	0.708	0.354	0.354	0.500		
		25	0.566	0.000	0.566	1.000		
		35	0.354	0.000	0.354	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วันเผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
16	C-45SL-5LP	5	10.617	2.123	8.494	0.800	0.800	3.161
		15	0.708	0.000	0.708	1.000		
		25	0.000	0.000	0.000	1.000		
		35	0.000	0.000	0.000	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
17	C-40SL-10LP	5	8.494	1.416	7.078	0.833	0.833	3.510
		15	0.708	0.000	0.708	1.000		
		25	0.000	0.000	0.000	1.000		
		35	0.000	0.000	0.000	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
1	C	5	7.786	2.831	4.955	0.636	0.668	8.631
		15	2.123	0.637	1.486	0.700		
		25	0.637	0.212	0.425	0.667		
		35	0.212	0.000	0.212	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
2	C-10BA	5	6.370	2.831	3.539	0.556	0.519	52.309
		15	4.247	2.123	2.123	0.500		
		25	2.831	1.416	1.416	0.500		
		35	1.416	0.708	0.708	0.500		
		45	1.416	0.000	1.416	1.000		
3	C-30BA	5	7.078	4.247	2.831	0.400	0.433	45.378
		15	5.663	2.831	2.831	0.500		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
4	C-40FA	5	9.91	2.83	7.078	0.714	0.905	3.319
		15	0.71	0.00	0.708	1.000		
		25	0.71	0.00	0.708	1.000		
		35	0.71	0.00	0.708	1.000		
		45	0.35	0.00	0.354	1.000		
5	C-40FA-10BA	5	5.663	2.831	2.831	0.500	0.533	73.483
		15	2.831	1.416	1.416	0.500		
		25	3.539	1.416	2.123	0.600		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
6	C-40FA-30BA	5	7.078	3.539	3.539	0.500	0.467	59.537
		15	3.539	2.123	1.416			
		25	2.831	1.416	1.416	0.500		
		35	2.123	0.708	1.416	0.667		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
7	C-50SL	5	7.79	2.12	5.663	0.727	0.909	3.722
		15	0.71	0.00	0.708	1.000		
		25	0.35	0.00	0.354	1.000		
		35	0.35	0.00	0.354	1.000		
		45	0.28	0.00	0.283	1.000		
8	C-50SL-10BA	5	4.247	2.123	2.123	0.500	0.533	77.873
		15	3.539	1.416	2.123	0.600		
		25	2.831	1.416	1.416	0.500		
		35	1.416	0.708	0.708	0.500		
		45	1.416	0.000	1.416	1.000		
9	C-50SL-30BA	5	3.539	2.123	1.416	0.400	0.522	58.449
		15	2.831	1.416	1.416	0.500		
		25	2.123	0.708	1.416	0.667		
		35	0.708	0.212	0.495	0.700		
		45	0.708	0.000	0.708	1.000		

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
		5	6.370	2.831	3.539	0.556		
		15	3.539	1.416	2.123	0.600		
10	C-10SF	25	0.708	0.354	0.354	0.500	0.552	5.325
		35	0.212	0.071	0.142	0.667		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
		5	13.449	7.786	5.663	0.421		
		15	5.663	3.539	2.123	0.375		
11	C-10SF-10BA	25	4.955	2.831	2.123	0.429	0.408	54.887
		35	4.247	2.123	2.123	0.500		
		45	3.539	0.000	3.539	1.000		
		5	10.617	7.078	3.539	0.333		
		15	4.955	2.831	2.123	0.429		
12	C-10SF-30BA	25	4.247	2.123	2.123	0.500	0.421	54.225
		35	3.539	1.416	2.123	0.600		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
		5	8.49	3.54	4.955	0.583		
		15	3.54	1.42	2.123	0.600		
13	C-10LP	25	0.71	0.00	0.708	1.000	0.728	11.315
		35	0.71	0.00	0.708	1.000		
		45	0.71	0.00	0.708	1.000		

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
14	C-10LP-10BA	5	10.617	7.078	3.539	0.333	0.421	54.225
		15	4.955	2.831	2.123	0.429		
		25	4.247	2.123	2.123	0.500		
		35	3.539	1.416	2.123	0.600		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
15	C-10LP-30BA	5	12.033	2.831	9.202	0.765	0.555	41.197
		15	4.247	2.123	2.123	0.500		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	1.416	0.000	1.416	1.000		

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุ บ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
1	C-10BA	5	8.069	4.955	3.114	0.386	0.438	56.180
		15	4.955	2.831	2.123	0.429		
		25	4.247	2.123	2.123	0.500		
		35	2.123	1.416	0.708	0.333		
		45	1.416	0.000	1.416	1.000		
2	C-30BA	5	8.494	4.955	3.539	0.417	0.394	48.021
		15	4.247	3.539	0.708	0.167		
		25	3.539	1.416	2.123	0.600		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	0.708	0.000	0.708	1.000		
3	C-40FA-10BA	5	7.786	5.663	2.123	0.273	0.481	80.175
		15	4.955	2.123	2.831	0.571		
		25	3.539	1.416	2.123	0.600		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
4	C-40FA-30BA	5	8.494	4.955	3.539	0.417	0.415	66.546
		15	4.955	2.831	2.123	0.429		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.831	0.000	2.831	1.000		

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุ บ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
5	C-50SL-10BA	5	7.786	5.663	2.123	0.273	0.285	83.760
		15	2.831	2.123	0.708	0.250		
		25	2.123	1.416	0.708	0.333		
		35	1.416	0.708	0.708	0.500		
		45	1.416	0.000	1.416	1.000		
6	C-50SL-30BA	5	6.370	4.955	1.416	0.222	0.307	68.117
		15	3.539	2.831	0.708	0.200		
		25	2.831	1.416	1.416	0.500		
		35	2.123	0.708	1.416	0.667		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
7	C-10SF-10BA	5	6.370	3.539	2.831	0.444	0.565	63.160
		15	4.247	2.123	2.123	0.500		
		25	2.831	0.708	2.123	0.750		
		35	2.123	0.708	1.416	0.667		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
8	C-10SF-30BA	5	5.663	2.831	2.831	0.500	0.467	61.342
		15	3.539	2.123	1.416	0.400		
		25	2.831	1.416	1.416	0.500		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	1.416	0.000	1.416	1.000		

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุ บ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
9	C-10LP-10BA	5	5.663	2.831	2.831	0.500	0.467	61.342
		15	3.539	2.123	1.416	0.400		
		25	2.831	1.416	1.416	0.500		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	1.416	0.000	1.416	1.000		
10	C-10LP-30BA	5	6.370	4.247	2.123	0.333	0.340	48.639
		15	4.955	3.539	1.416	0.286		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
1	C	5	17.696	8.494	9.202	0.520	0.573	7.981
		15	12.033	6.370	5.663	0.471		
		25	7.786	2.123	5.663	0.727		
		35	5.663	0.354	5.309	0.938		
		45	4.247	0.000	4.247	1.000		

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
		5	14.157	4.955	9.202	0.650		
		15	2.123	0.708	1.416	0.667		
2	C-20FA	25	1.416	0.000	1.416	1.000	0.658	1.619
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.354	0.000	0.354	1.000		
		5	10.617	2.831	7.786	0.733		
		15	1.416	0.000	1.416	1.000		
3	C-40FA	25	0.708	0.000	0.708	1.000	0.733	1.455
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.354	0.000	0.354	1.000		
		5	11.325	4.247	7.078	0.625		
		15	1.416	0.000	1.416	1.000		
4	C-30SL	25	0.708	0.071	0.637	0.900	0.625	2.358
		35	0.495	0.000	0.495	1.000		
		45	0.354	0.000	0.354	1.000		
		5	9.202	2.831	6.370	0.692		
		15	2.123	0.000	2.123	1.000		
5	C-50SL	25	0.708	0.000	0.708	1.000	0.692	2.262
		35	0.354	0.000	0.354	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
		5	16.280	7.786	8.494	0.522		
		15	7.786	3.539	4.247	0.545		
6	C-5SF	25	6.370	2.831	3.539	0.556	0.541	5.078
		35	4.247	2.123	2.123	0.500		
		45	3.539	0.000	3.539	1.000		
		5	14.864	7.078	7.786	0.524		
		15	6.370	2.831	3.539	0.556		
7	C-10SF	25	4.955	2.123	2.831	0.571	0.550	4.631
		35	4.247	0.708	3.539	0.833		
		45	2.831	0.000	2.831	1.000		
		5	12.033	4.247	7.786	0.647		
		15	6.831	0.708	6.123	0.896		
8	C-5LP	25	2.507	0.000	2.507	1.000	0.772	8.329
		35	2.208	0.000	2.208	1.000		
		45	0.708	0.000	0.708	1.000		
		5	13.325	4.247	9.078	0.681		
		15	7.651	0.708	6.943	0.907		
9	C-10LP	25	3.416	0.000	3.416	1.000	0.794	10.300
		35	3.008	0.000	3.008	1.000		
		45	1.354	0.000	1.354	1.000		

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
		5	7.786	3.539	4.247	0.545		
		15	2.123	0.708	1.416	0.667		
10	C-15FA-5LP	25	0.708	0.000	0.708	1.000	0.606	2.731
		35	0.566	0.000	0.566	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
		5	13.449	6.370	7.078	0.526		
		15	2.831	1.416	1.416	0.500		
11	C-10FA-10LP	25	1.416	0.708	0.708	0.500	0.509	3.246
		35	0.708	0.000	0.708	1.000		
		45	0.354	0.000	0.354	1.000		
		5	12.387	4.247	8.140	0.657		
		15	1.416	0.708	0.708	0.500		
12	C-35FA-5LP	25	0.708	0.000	0.708	1.000	0.579	1.311
		35	0.354	0.000	0.354	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
		5	9.910	3.539	6.370	0.643		
		15	1.416	0.708	0.708	0.500		
13	C-30FA-10LP	25	0.708	0.000	0.708	1.000	0.571	1.529
		35	0.283	0.000	0.283	1.000		
		45	0.142	0.000	0.142	1.000		

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
14	C-25SL-5LP	5	12.033	3.539	8.494	0.706	0.706	1.303
		15	1.416	0.000	1.416	1.000		
		25	0.071	0.000	0.071	1.000		
		35	0.212	0.000	0.212	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
15	C-20SL-10LP	5	13.449	4.247	9.202	0.684	0.717	1.547
		15	1.416	0.354	1.062	0.750		
		25	0.708	0.000	0.708	1.000		
		35	0.566	0.000	0.566	1.000		
		45	0.354	0.000	0.354	1.000		
16	C-45SL-5LP	5	10.971	2.831	8.140	0.742	0.796	1.421
		15	1.416	0.212	1.203	0.850		
		25	0.708	0.000	0.708	1.000		
		35	0.354	0.000	0.354	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		
17	C-40SL-10LP	5	9.202	2.831	6.370	0.692	0.692	1.491
		15	0.708	0.000	0.708	1.000		
		25	0.354	0.000	0.354	1.000		
		35	0.142	0.000	0.142	1.000		
		45	0.000	0.000	0.000	1.000		

ตารางที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
1	C	5	17.696	8.494	9.202	0.520	0.573	7.981
		15	12.033	6.370	5.663	0.471		
		25	7.786	2.123	5.663	0.727		
		35	5.663	0.354	5.309	0.938		
		45	4.247	0.000	4.247	1.000		
2	C-10BA	5	14.157	7.786	6.370	0.450	0.465	14.474
		15	6.370	3.539	2.831	0.444		
		25	5.663	2.831	2.831	0.500		
		35	3.539	2.123	1.416	0.400		
		45	2.831	0.000	2.831	1.000		
3	C-30BA	5	15.572	8.494	7.078	0.455	0.421	12.800
		15	7.786	4.955	2.831	0.364		
		25	6.370	3.539	2.831	0.444		
		35	5.663	2.831	2.831	0.500		
		45	4.955	0.000	4.955	1.000		
4	C-40FA	5	10.62	2.83	7.786	0.733	0.733	1.455
		15	1.42	0.00	1.416	1.000		
		25	0.71	0.00	0.708	1.000		
		35	0.71	0.00	0.708	1.000		
		45	0.35	0.00	0.354	1.000		

ตารางที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
5	C-40FA-10BA	5	6.370	3.539	2.831	0.444	0.424	24.946
		15	4.955	2.831	2.123	0.429		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
6	C-40FA-30BA	5	6.370	3.539	2.831	0.444	0.448	20.903
		15	4.247	2.123	2.123	0.500		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.831	0.000	2.831	1.000		
7	C-50SL	5	9.20	2.83	6.370	0.692	0.692	2.262
		15	2.12	0.00	2.123	1.000		
		25	0.71	0.00	0.708	1.000		
		35	0.35	0.00	0.354	1.000		
		45	0.00	0.00	0.000	1.000		
8	C-50SL-10BA	5	3.539	2.123	1.416	0.400	0.433	26.636
		15	3.539	2.123	1.416	0.400		
		25	2.831	1.416	1.416	0.500		
		35	2.123	0.708	1.416	0.667		
		45	2.123	0.708	1.416	0.667		

ตารางที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
9	C-50SL-30BA	5	4.247	2.123	2.123	0.500	0.467	22.499
		15	3.539	2.123	1.416	0.400		
		25	2.831	1.416	1.416	0.500		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
10	C-10SF	5	14.86	7.08	7.786	0.524	0.550	4.631
		15	6.37	2.83	3.539	0.556		
		25	4.95	2.12	2.831	0.571		
		35	4.25	0.71	3.539	0.833		
		45	2.83	0.00	2.831	1.000		
11	C-10SF-10BA	5	16.280	10.617	5.663	0.348	0.404	16.232
		15	7.786	4.955	2.831	0.364		
		25	7.078	3.539	3.539	0.500		
		35	7.078	3.539	3.539	0.500		
		45	6.370	0.000	6.370	1.000		
12	C-10SF-30BA	5	19.111	9.910	9.202	0.481	0.623	14.657
		15	11.325	3.539	7.786	0.688		
		25	7.078	2.123	4.955	0.700		
		35	5.663	2.831	2.831	0.500		
		45	4.247	0.000	4.247	1.000		

ตารางที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
13	C-10LP	5	13.325	4.247	9.078	0.681	0.794	10.300
		15	7.651	0.708	6.943	0.907		
		25	3.416	0.000	3.416	1.000		
		35	3.008	0.000	3.008	1.000		
		45	1.354	0.000	1.354	1.000		
14	C-10LP-10BA	5	20.527	11.325	9.202	0.448	0.507	14.575
		15	10.617	4.955	5.663	0.533		
		25	9.202	4.247	4.955	0.538		
		35	5.663	3.539	2.123	0.375		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
15	C-10LP-30BA	5	20.527	12.741	7.786	0.379	0.450	12.827
		15	10.617	6.370	4.247	0.400		
		25	9.910	4.247	5.663	0.571		
		35	7.786	3.539	4.247	0.545		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
1	C-10BA	5	9.202	4.247	4.955	0.538	0.479	18.930
		15	7.078	3.539	3.539	0.500		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.831	0.000	2.831	1.000		
2	C-30BA	5	12.033	4.955	7.078	0.588	0.545	16.251
		15	7.786	3.539	4.247	0.545		
		25	4.247	2.123	2.123	0.500		
		35	3.539	1.416	2.123	0.600		
		45	2.831	0.000	2.831	1.000		
3	C-40FA-10BA	5	10.617	6.370	4.247	0.400	0.378	27.961
		15	4.247	2.831	1.416	0.333		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
4	C-40FA-30BA	5	9.202	5.663	3.539	0.385	0.428	24.295
		15	5.663	2.831	2.831	0.500		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		

ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
5	C-50SL-10BA	5	9.202	5.663	3.539	0.385	0.462	28.439
		15	2.831	1.416	1.416	0.500		
		25	2.831	1.416	1.416	0.500		
		35	2.123	0.708	1.416	0.667		
		45	1.416	0.708	0.708	0.500		
6	C-50SL-30BA	5	8.494	6.370	2.123	0.250	0.350	26.903
		15	3.539	2.123	1.416	0.400		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.831	0.000	2.831	1.000		
7	C-10SF-10BA	5	7.786	4.247	3.539	0.455	0.396	20.396
		15	4.247	2.831	1.416	0.333		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
8	C-10SF-30BA	5	7.786	4.247	3.539	0.455	0.396	17.849
		15	4.247	2.831	1.416	0.333		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	3.539	1.416	2.123	0.600		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		

ตารางที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด	คลอไรด์อิสระ	คลอไรด์ยึดจับ	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	เฉลี่ยอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (ซม.^{2}/ปี)
9	C-10LP-10BA	5	7.786	4.955	2.831	0.364	0.350	20.442
		15	4.955	3.539	1.416	0.286		
		25	3.539	2.123	1.416	0.400		
		35	2.831	1.416	1.416	0.500		
		45	2.123	0.000	2.123	1.000		
10	C-10LP-30BA	5	9.910	4.955	4.955	0.500	0.461	16.902
		15	7.786	4.247	3.539	0.455		
		25	4.955	2.831	2.123	0.429		
		35	3.539	2.123	1.416	0.400		
		45	2.831	0.000	2.831	1.000		

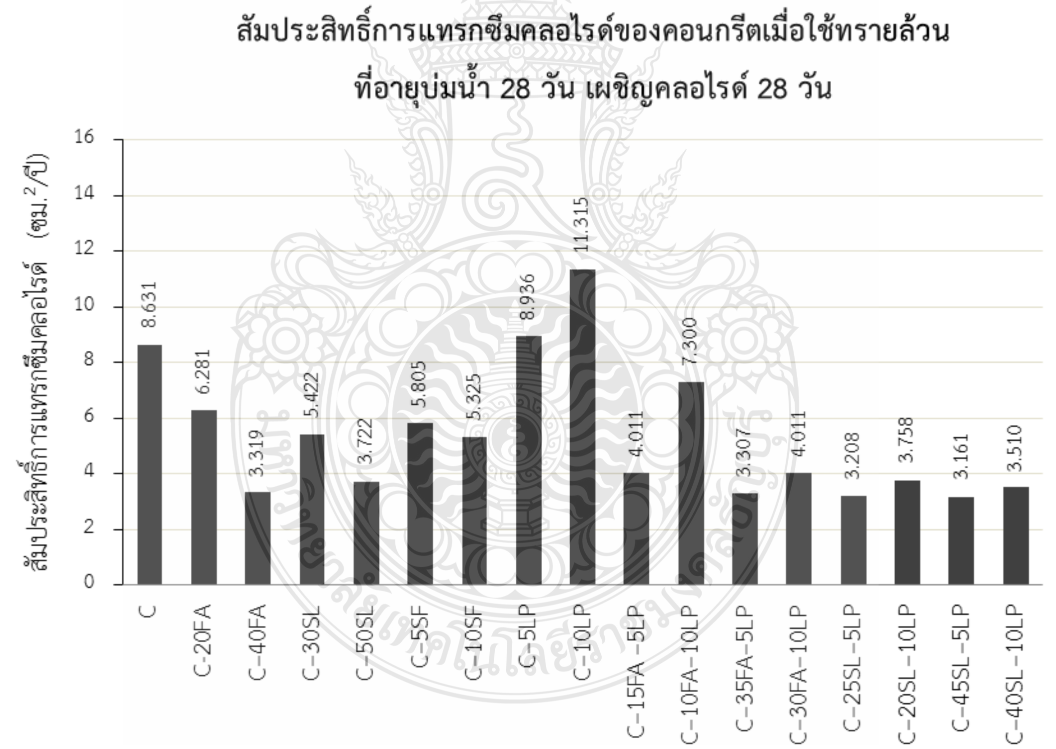
สำหรับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต จะพิจารณาผลกระทบจาก 1) ชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย 3) อายุการเผชิญคลอไรด์ และ 4) ชนิดของการบ่ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

- ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

รูปที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน โดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน พบว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม เป็นวัสดุปอซโซลาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น คลอไรด์จึงแทรกซึมได้ยากขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

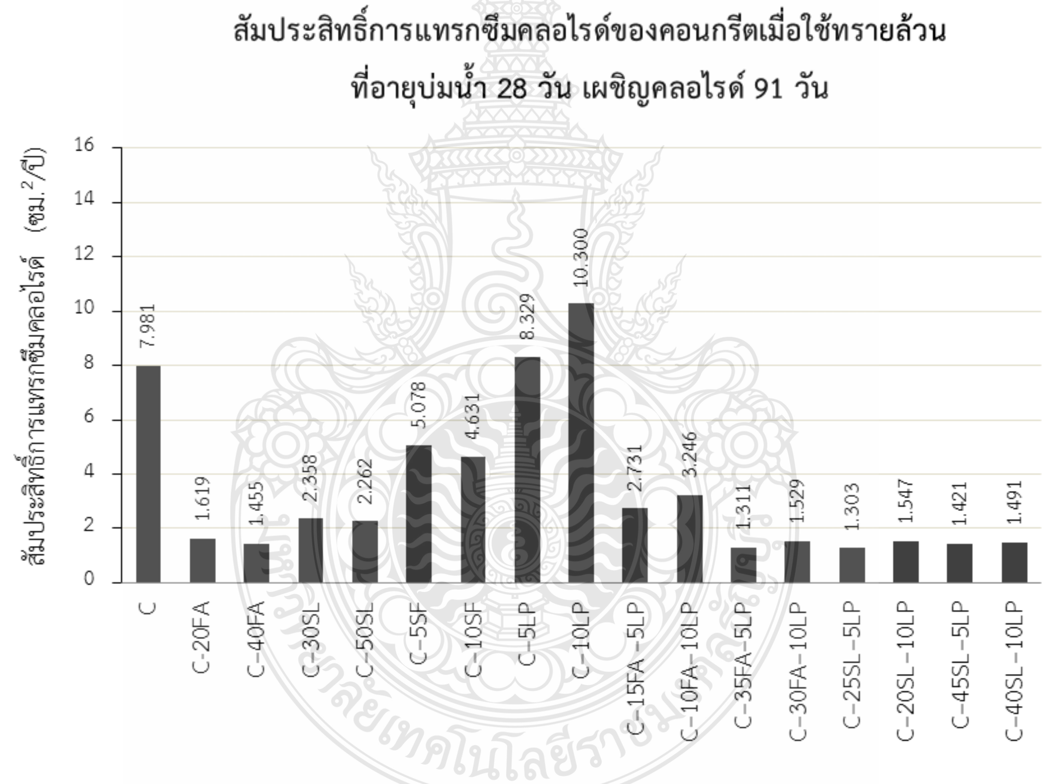
บดละเอียด และซิลิกาฟูม มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และผงหินปูนไม่ใช่สารปอซโซลาน จึงทำให้เพสต์ไม่ทึบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 กลับมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่มากกว่าการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจเพราะปริมาณร้อยละ 10 เป็นปริมาณที่มากไป ทำให้มีความพรุนเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มากกว่า ส่วนเมื่อเป็นคอนกรีตที่ผสม 3 วัสดุประสาน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ เป็นไปตามการแทนที่ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน



รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน

- ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

รูปที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน โดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน ทำให้เหตุผลเป็นไปตามดังที่ได้กล่าวแล้ว



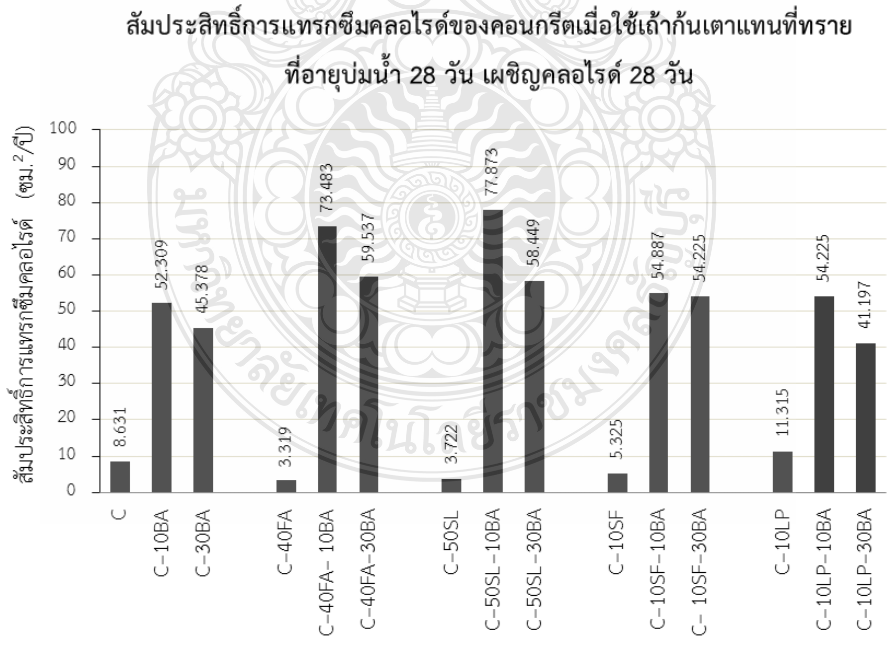
รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน

2) ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

- ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

- กรณีบ่มน้ำ

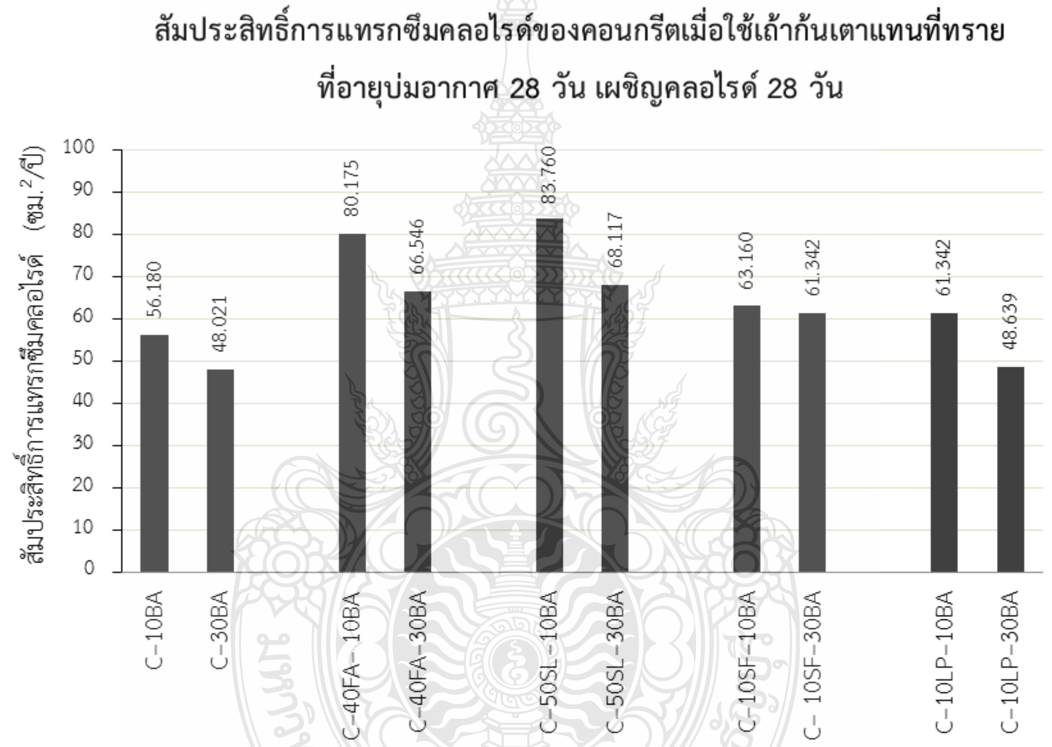
รูปที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน โดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ล้วน เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย มีค่ามากกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีความพรุนที่มากกว่าทราย ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มีค่ามากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30 จะพบว่าเมื่อใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณมาก (ร้อยละ 30) มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อยกว่าเมื่อใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณน้อย (ร้อยละ 10) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าก้นเตาเป็นสารปอซโซลาน เมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากกว่าอาจสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานและไฮเดรชั่นได้ดีกว่า เมื่อแทนที่ในปริมาณน้อย (ร้อยละ 10) ในทำนองเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตที่มีการแทนที่ของวัสดุประสานเป็นเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วนกับเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย มีแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ล้วน ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน

- กรณีบ่มอากาศ

รูปที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน โดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย พบว่าค่าประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณมาก (ร้อยละ 30) มีค่าที่น้อยกว่าเมื่อใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณน้อย (ร้อยละ 10) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าก้นเตาเป็นสารปอซโซลาน เมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากกว่า อาจสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานและไฮเดรชั่นได้ดีกว่า เมื่อแทนที่ในปริมาณน้อย (ร้อยละ 10) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีบ่มน้ำ



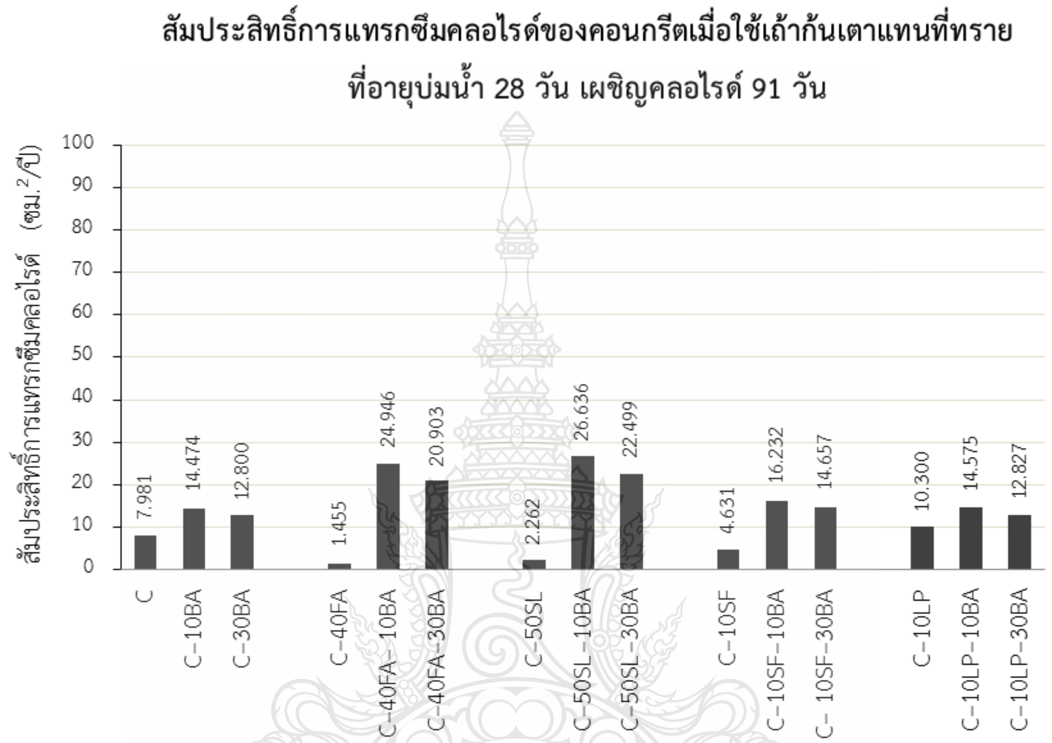
รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน

- ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

- กรณีบ่มน้ำ

รูปที่ 4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน โดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย พบว่าค่าประสิทธิ์การ

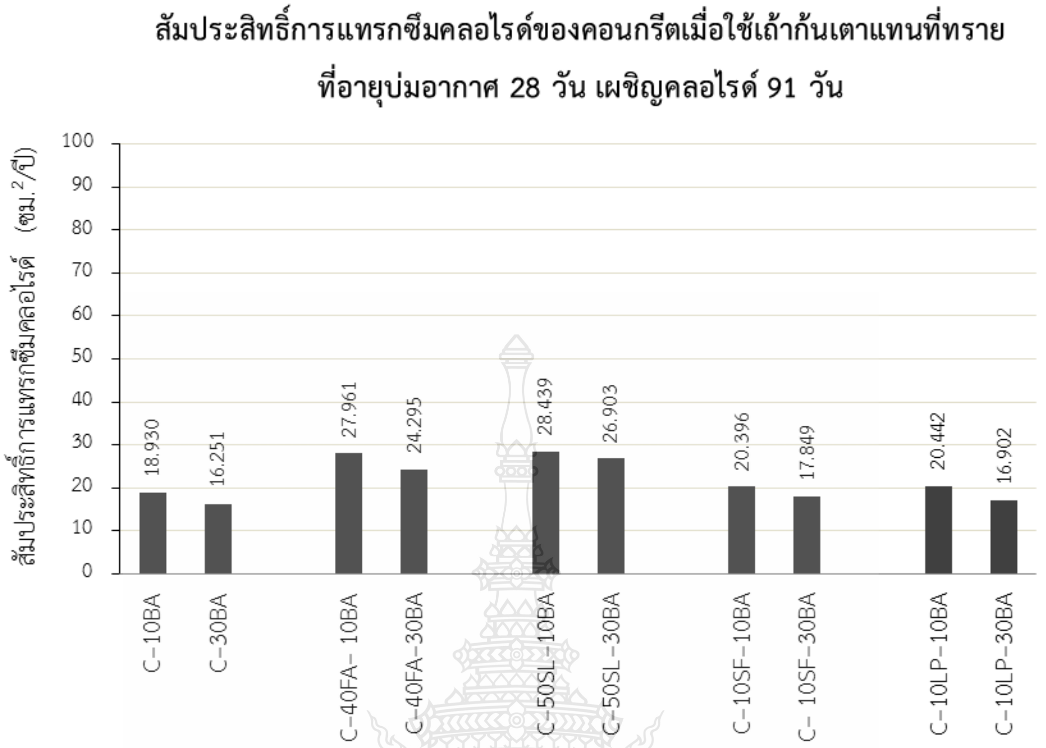
แทรกซึมคลอไรด์ มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน ซึ่งเหตุผลเป็นตามที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน

- กรณีบ่มอากาศ

รูปที่ 4.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน โดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย พบว่าค่าประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน ซึ่งเหตุผลเป็นตามที่กล่าวมาแล้ว

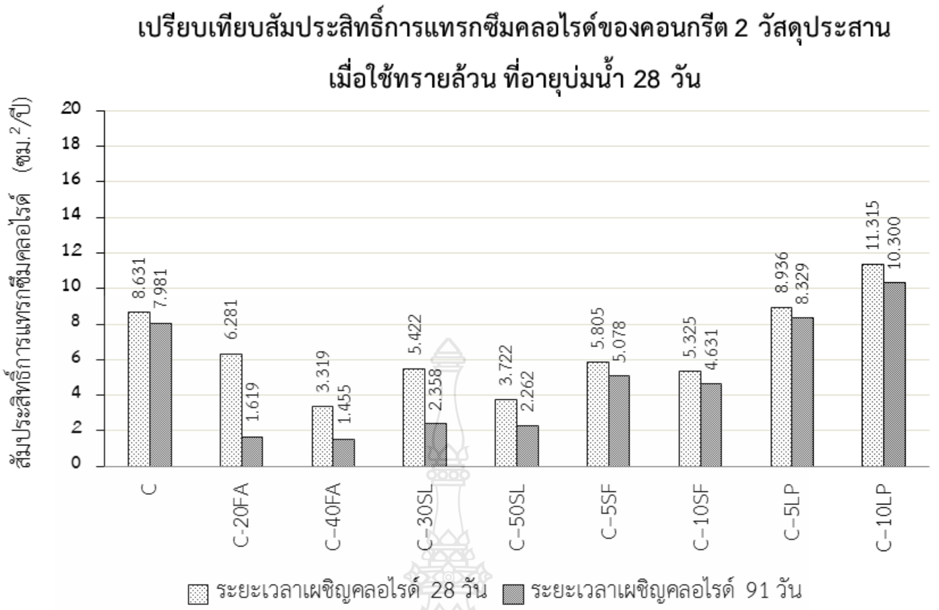


รูปที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน

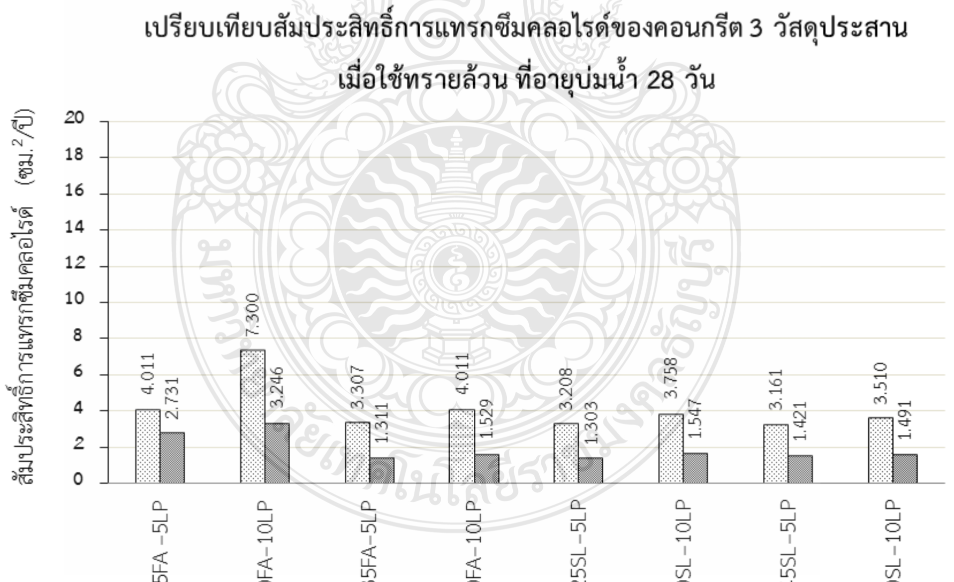
3) ผลกระทบจากอายุการเผชิญคลอไรด์

- ผลกระทบจากอายุการเผชิญคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

รูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 แสดงค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสม 2 วัสดุประสาน (รูปที่ 4.19) และ 3 วัสดุประสาน (รูปที่ 10) ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน โดยเปรียบเทียบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 28 กับ 91 วัน ของค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน (ทั้ง 2 และ 3 วัสดุประสาน) เมื่อใช้ทรายล้วน พบว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน มีค่าน้อยกว่าที่ 28 วัน ทั้งนี้เพราะคอนกรีตเมื่ออายุมากขึ้นจะมีความทึบแน่นขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มีค่าน้อยลง



รูปที่ 4.9 ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 2 วัสดุประสาน เมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

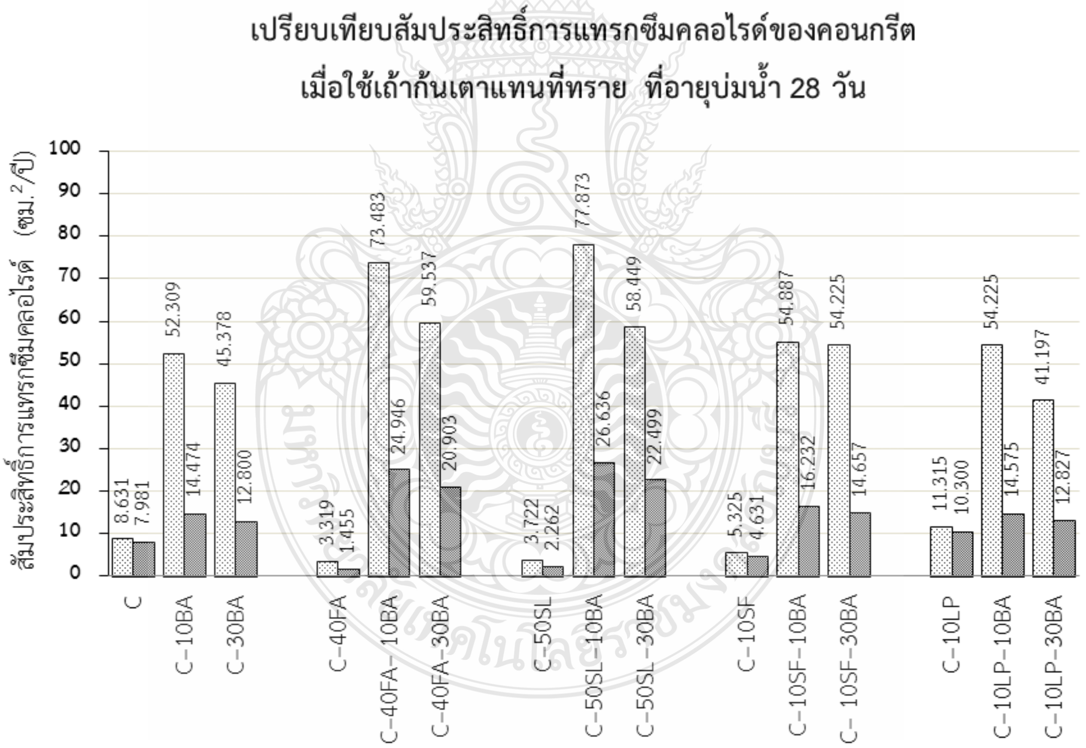


รูปที่ 4.10 ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 3 วัสดุประสาน เมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

- ผลกระทบจากอายุการเผชิญคลอไรด์คอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

- กรณีบ่มน้ำ

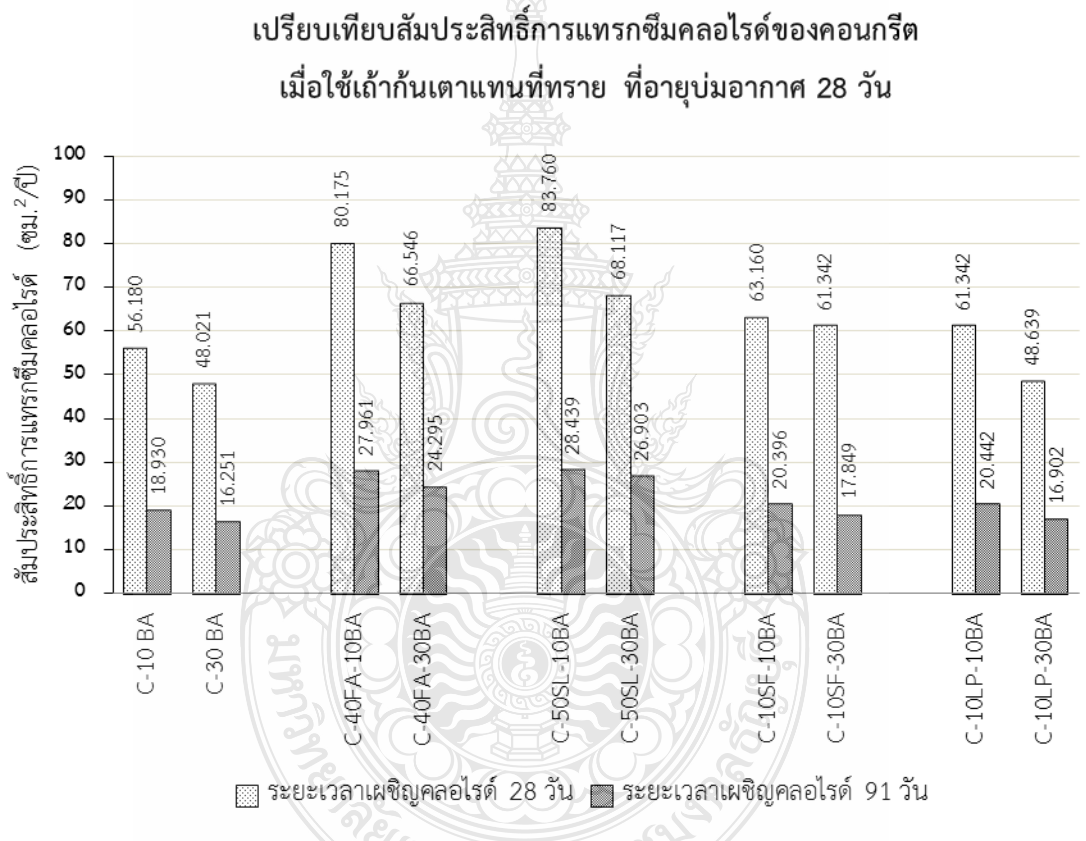
รูปที่ 4.11 แสดงค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน โดยเปรียบเทียบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 28 กับ 91 วัน พบว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน มีค่าน้อยกว่าที่ 28 วัน อย่างไรก็ตาม สังเกตได้ว่าในกรณีคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่ออายุคอนกรีตที่มากขึ้น ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ทั้งนี้เพราะเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลาน เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น จึงส่งผลให้คอนกรีตทำปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ดี คอนกรีตจึงมีความทึบแน่นมากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มีค่าน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.11 ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

- กรณีบ่มอากาศ

รูปที่ 4.12 แสดงค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน โดยเปรียบเทียบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 28 กับ 91 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

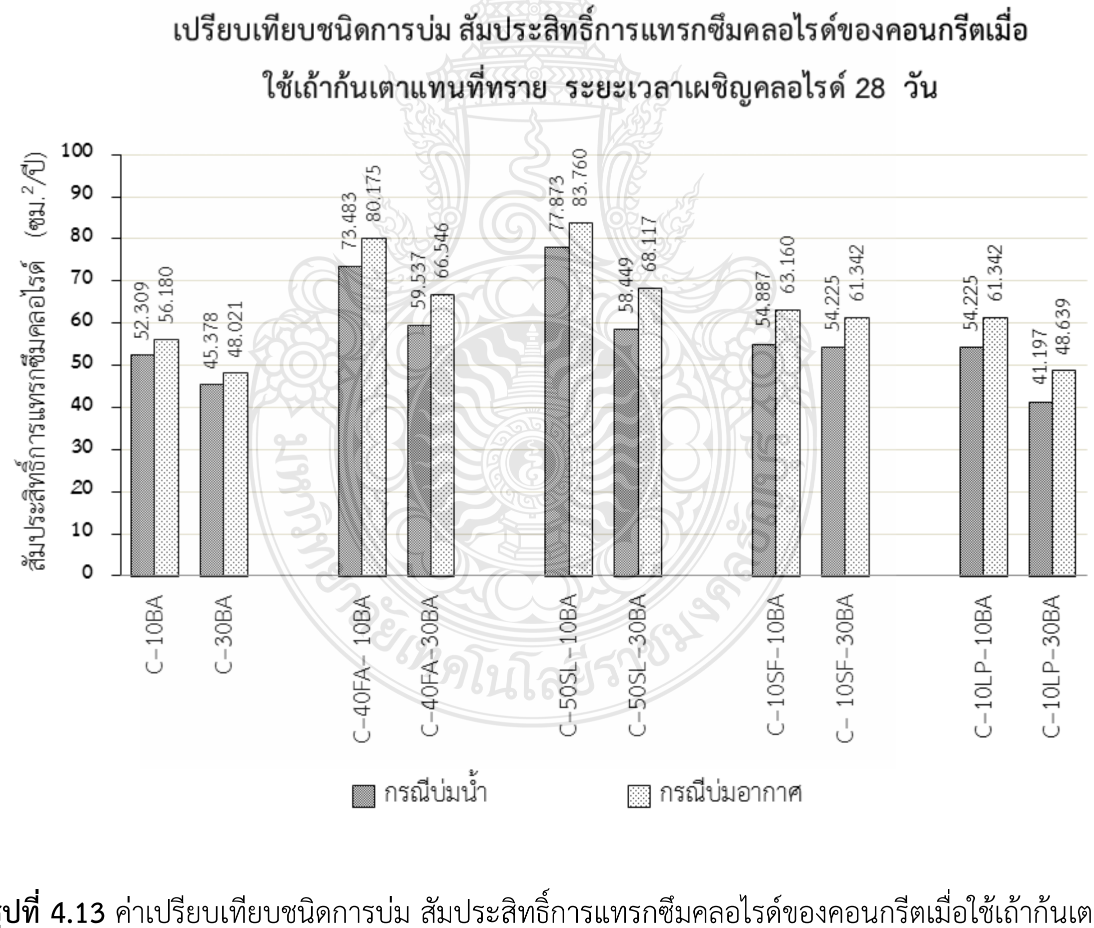


รูปที่ 4.12 ค่าเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน

4) ผลกระทบจากชนิดของการบ่ม

- ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

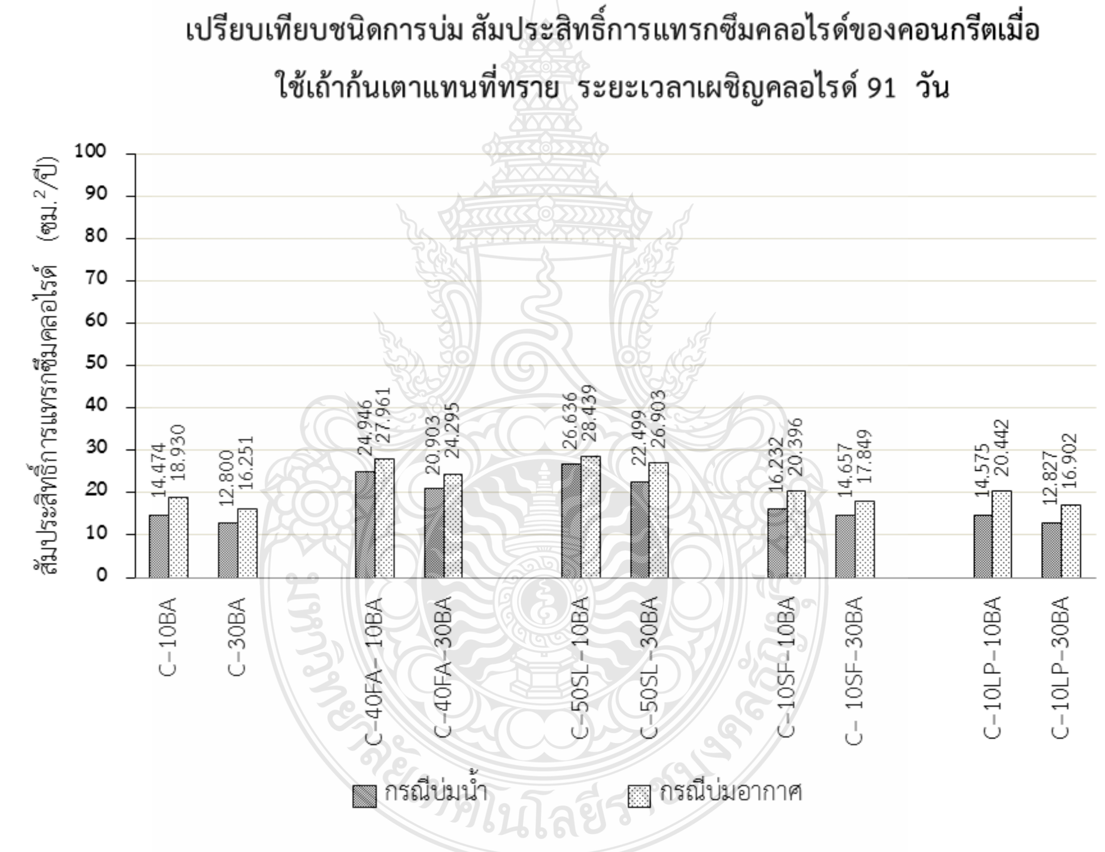
รูปที่ 4.13 แสดงค่าเปรียบเทียบชนิดการบ่ม สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน โดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ กรณีบ่มน้ำกับบ่มอากาศที่อายุ 28 วัน ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย พบว่ากรณีบ่มอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าบ่มน้ำ ทั้งนี้เพราะกรณีบ่มอากาศอาจจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำไปอย่างรวดเร็วเนื่อง จากการระเหยของน้ำ และน้ำที่ถูกกักอยู่ในโพรงของเถ้าก้นเตามีปริมาณไม่เพียงพอต่อการเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ไม่สมบูรณ์ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นที่น้อยกว่ากรณีบ่มน้ำ ส่งผลให้กรณีบ่มอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าบ่มน้ำ



รูปที่ 4.13 ค่าเปรียบเทียบชนิดการบ่ม สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน

- ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

รูปที่ 4.14 แสดงค่าเปรียบเทียบชนิดการบ่ม สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน โดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ กรณีบ่มน้ำกับบ่มอากาศที่อายุ 28 วัน ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย พบว่ามีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 28 วัน ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.14 ค่าเปรียบเทียบชนิดการบ่ม สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

4.3 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีต

สำหรับในการศึกษาสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีต โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 คอนกรีต คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ตามสมการ fick's first law of diffusion ดังสมการที่ (2.27) ในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบดังต่อไปนี้ 1) ชนิดและปริมาณแทนที่ของวัสดุประสาน 2) การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย และ 3) ผลกระทบของชนิดของการบ่ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

การศึกษาผลการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และผสมตะกันเตาถลุงเหล็กบดละอียดร่วมกับซิลิกาฟูม โดยศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นที่อายุ 28 และ 91 วัน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตเท่ากับ 0.55 โดยรูปที่ 4.15 ตัวอย่างของตอนกรีตที่ทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นโดยใช้น้ำยาฟินอฟทาลีนในแอลกอฮอฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน แสดงดังตารางที่ 4.10

รูปที่ 4.16 แสดงค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน แล้วเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน จากการศึกษาพบว่าเมื่อคอนกรีตกรณีที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน (รูปที่ 4.16 ก) ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ทั้ง 2 วัสดุประสาน และ 3 วัสดุประสาน (เป็นการผสมร่วมกับผงหินปูน) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะ การลดปริมาณปูนซีเมนต์ รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลาน จะเป็นการลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ จึงเป็นการเร่งการเกิดคาร์บอเนชั่น ส่วนในกรณีของผงหินปูนแม้ว่าไม่ได้เป็นสารปอซโซลาน แต่ก็เป็นการลดปูนซีเมนต์ลง จึงทำให้ลด $Ca(OH)_2$ จึงทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นมากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน (รูปที่ 4.16 ข) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ทั้ง 2 วัสดุประสาน และ 3 วัสดุประสาน ยังให้ผลการเกิดคาร์บอเนชั่นมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

สังเกตุว่าในคอนกรีตที่มีส่วนผลสมของผงหินปูนไม่ว่าจะเป็นทั้ง 2 วัสดุประสานและ 3 วัสดุประสาน จะให้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนซึ่งไม่ใช่วัสดุปอซโซลาน (ไม่ลด $Ca(OH)_2$) และตัวของผงหินปูนเองเป็น

สารเติมเต็มจึงเป็นการช่วนให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น จึงส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้ยากขึ้น

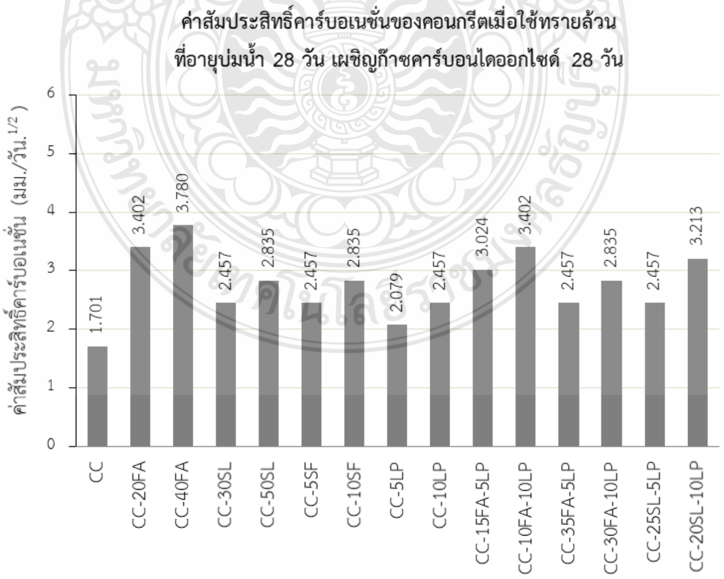
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างของคอนกรีตที่ทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นโดยใช้น้ำยาฟีนอฟทาลีนในแอลกอฮอล์ ฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน

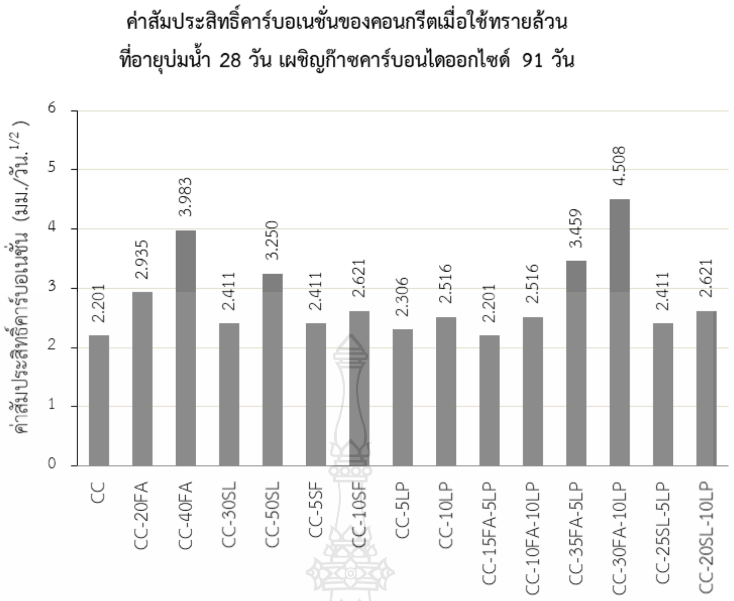
ลำดับ	สัญลักษณ์	เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน		เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน	
		ความลึกคาร์บอเนชั้น (มม.)	สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น k (มม/วัน$^{1/2}$)	ความลึกคาร์บอเนชั้น (มม.)	สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น k (มม/วัน$^{1/2}$)
1	CC	9	1.701	21	2.201
2	CC-20FA	18	3.402	28	2.935
3	CC-40FA	20	3.780	38	3.983
4	CC-30SL	13	2.457	23	2.411
5	CC-50SL	15	2.835	31	3.250
6	CC-5SF	13	2.457	23	2.411
7	CC-10SF	15	2.835	25	2.621

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน		เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน	
		ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น k (มม/วัน$^{1/2}$)	ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น k (มม/วัน$^{1/2}$)
8	CC-5LP	11	2.079	22	2.306
9	CC-10LP	13	2.457	24	2.516
10	CC-15FA-5LP	16	3.024	21	2.201
11	CC-10FA-10LP	18	3.402	24	2.516
12	CC-35FA-5LP	13	2.457	33	3.459
13	CC-30FA-10LP	15	2.835	43	4.508
14	CC-25SL-5LP	13	2.457	23	2.411
15	CC-20SL-10LP	17	3.213	25	2.621



ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



ข) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

รูปที่ 4.16 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

2) ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

ตารางที่ 4.11และ 4.12 และรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10 และ 30 ในกรณีบ่มน้ำและบ่มอากาศแล้วเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้ก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีบางส่วนสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (ส่วนที่มีความละเอียด) เมื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานจึงทำให้คอนกรีตทึบขึ้น ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้ยากทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นน้อยลง

อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และ 30 พบว่าการแทนที่ร้อยละ 30 กลับได้ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นมากกว่าร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเป็นไปได้เพราะว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 จึงเป็นการลด $Ca(OH)_2$ จึงทำให้เกิดคร์บอเนชั่นมากขึ้น

สังเกตุว่าเมื่อคอนกรีตเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 วันและ 91 วัน เมื่อเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นานขึ้นจะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นมากขึ้น

ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน

ลำดับ	สัญลักษณ์	กรณีบ่มน้ำ			
		เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน		เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน	
		ความลึก คาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์ คาร์บอเนชั่น , k (มม/วัน$^{1/2}$)	ความลึก คาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์. คาร์บอเนชั่น , k (มม/วัน$^{1/2}$)
1	CC	9	1.701	21	2.201
2	CC-10BA	3	0.567	11	1.153
3	CC-30BA	5	0.945	15	1.572
4	CC-40FA	20	3.780	38	3.983
5	CC-40FA-10BA	16	3.024	18	1.887
6	CC-40FA-30BA	18	3.402	31	3.250
7	CC-50SL	15	2.835	31	3.250
8	CC-50SL-10BA	10	1.890	15	1.572
9	CC-50SL-30BA	15	2.835	25	2.621
10	CC-10SF	15	2.835	25	2.621

ตารางที่ 4.11 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน (ต่อ)

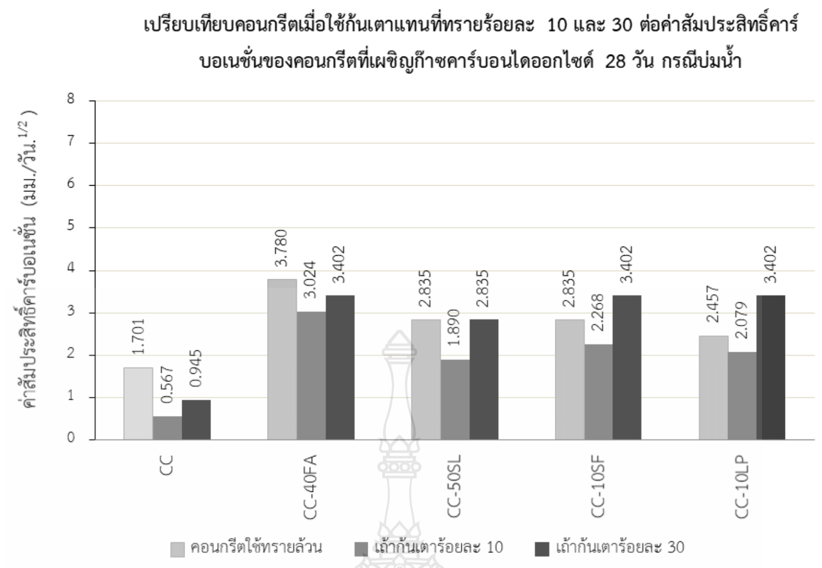
ลำดับ	สัญลักษณ์	กรณีบ่มน้ำ			
		เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน		เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน	
		ความลึก คาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์ คาร์บอเนชั่น , k (มม/วัน$^{1/2}$)	ความลึก คาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์. คาร์บอเนชั่น , k (มม/วัน$^{1/2}$)
11	CC-10SF-10BA	12	2.268	14	1.468
12	CC-10SF-30BA	18	3.402	24	2.516
13	CC-10LP	13	2.457	24	2.516
14	CC-10LP-10BA	11	2.079	12	1.258
15	CC-10LP-30BA	18	3.402	22	2.306

ตารางที่ 4.12 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน

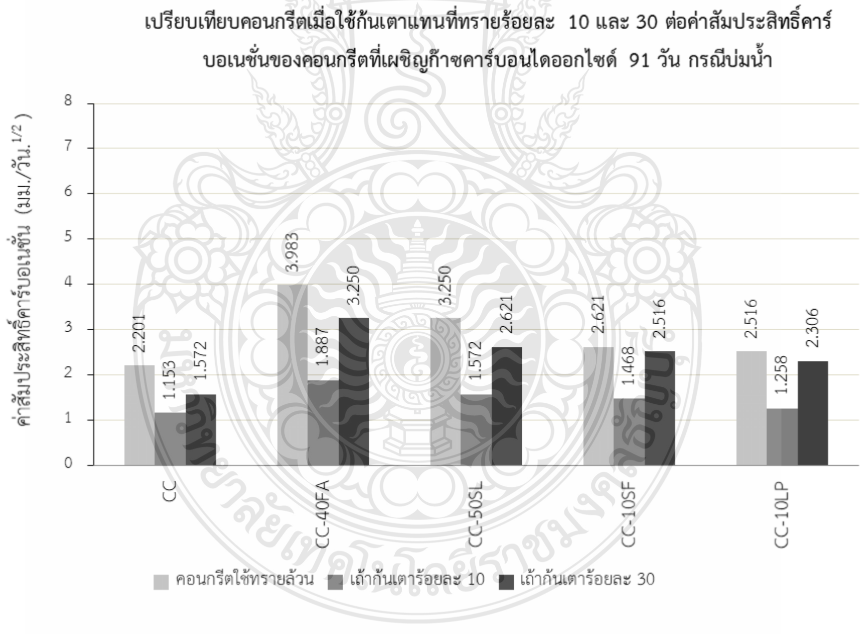
ลำดับ	สัญลักษณ์	กรณีบ่มอากาศ			
		เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน		เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน	
		ความลึก คาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์ คาร์บอเนชั่น , k (มม/วัน$^{1/2}$)	ความลึก คาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์. คาร์บอเนชั่น , k (มม/วัน$^{1/2}$)
1	CC	8	1.512	27	2.830
2	CC-10BA	2	0.378	23	2.411
3	CC-30BA	4	0.756	25	2.621

ตารางที่ 4.12 สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับ	สัญลักษณ์	กรณีบ่มอากาศ			
		เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน		เผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน	
		ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น , k (มม/วัน$^{1/2}$)	ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)	สัมประสิทธิ์. คาร์บอเนชั่น , k (มม/วัน$^{1/2}$)
4	CC-40FA	19	3.591	41	4.298
5	CC-40FA-10BA	14	2.646	35	3.669
6	CC-40FA-30BA	16	3.024	40	4.193
7	CC-50SL	13	2.457	43	4.508
8	CC-50SL-10BA	8	1.512	38	3.983
9	CC-50SL-30BA	12	2.268	42	4.403
10	CC-10SF	13	2.457	32	3.355
11	CC-10SF-10BA	11	2.079	23	2.411
12	CC-10SF-30BA	12	2.268	30	3.145
13	CC-10LP	12	2.268	29	3.040
14	CC-10LP-10BA	9	1.701	27	2.830
15	CC-10LP-30BA	16	3.024	36	3.774

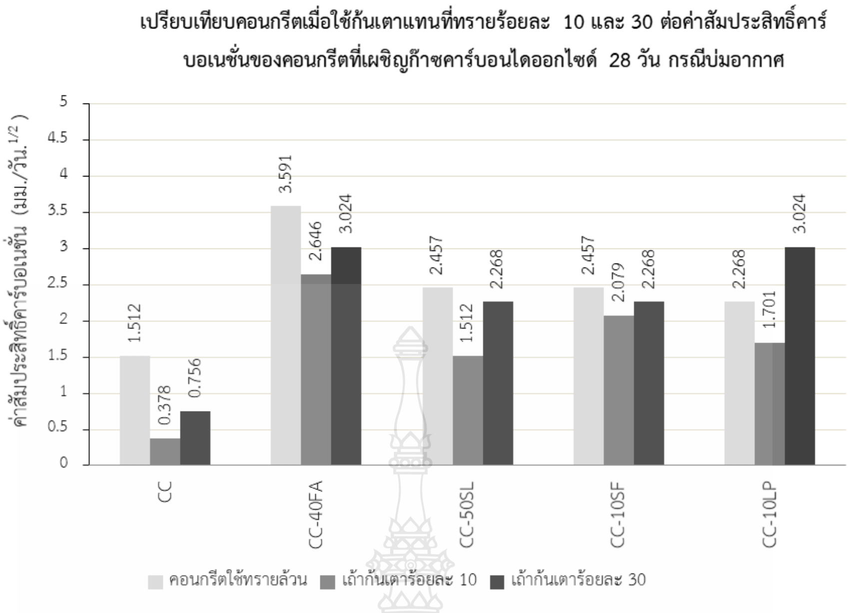


ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน

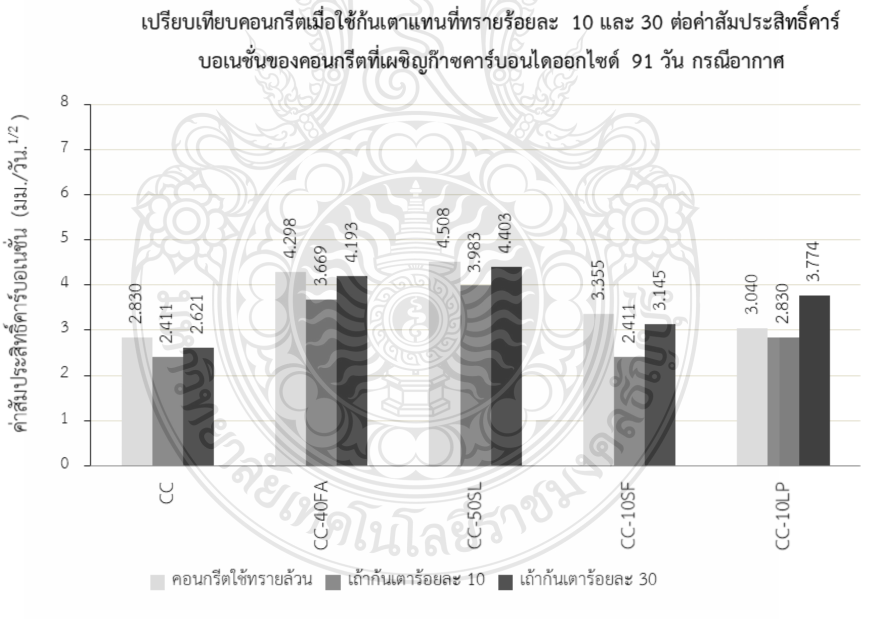


ข) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

รูปที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ



ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน

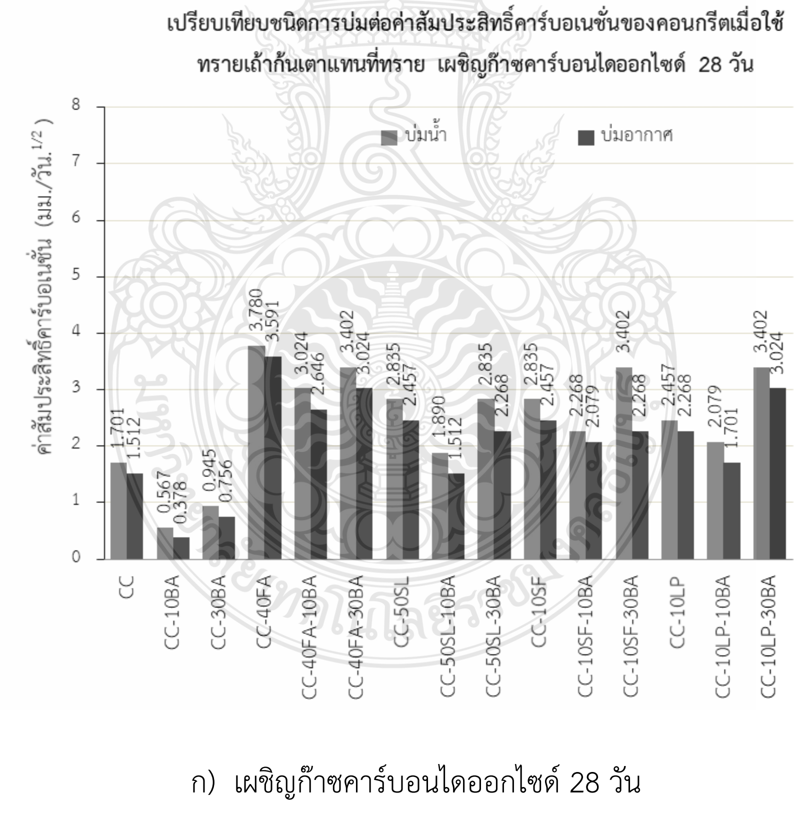


ข) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

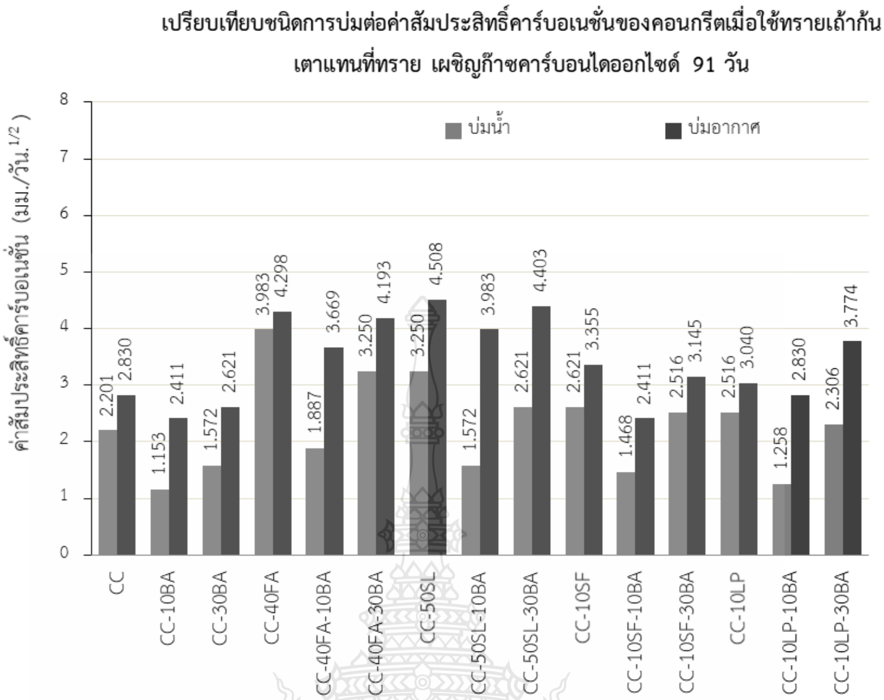
รูปที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มอากาศ

3) ผลกระทบจากชนิดของการบ่ม

รูปที่ 4.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นเนื่องจากการบ่มน้ำและบ่มอากาศแล้ว นำคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูนโดยใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 28 และ91 วัน พบว่าการที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วันนั้นค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่ามากกว่าของกรณีที่ บ่มอากาศเพราะการบ่มน้ำนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้จึงเป็นการไปลด $Ca(OH)_2$ มากกว่าคอนกรีตที่บ่มอากาศ แต่เมื่อเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 91 วัน กลับพบว่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตกรณีบ่มน้ำน้อยกว่าของคอนกรีตกรณีบ่มอากาศ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการบ่มน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดสมบูรณ์จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบขึ้นทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปได้ช้าส่งผลให้เกิดคาร์บอเนชั่นได้น้อย



ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



ข) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

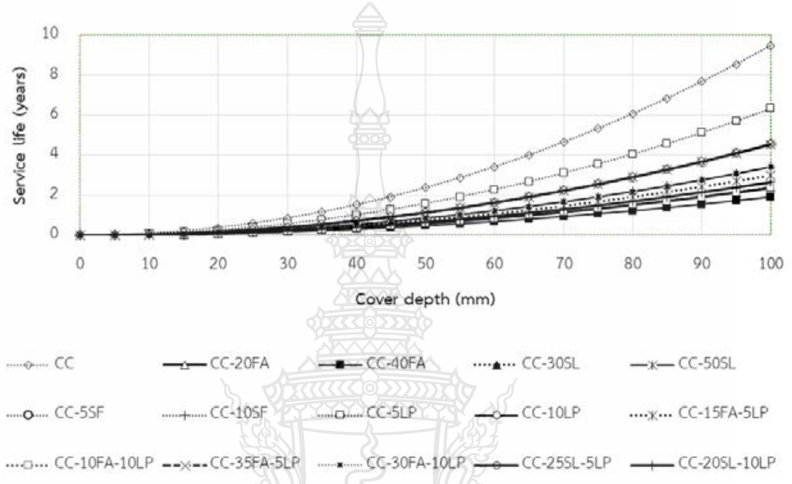
รูปที่ 4.19 ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำบ่มอากาศ

4) การทำนายอายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีต

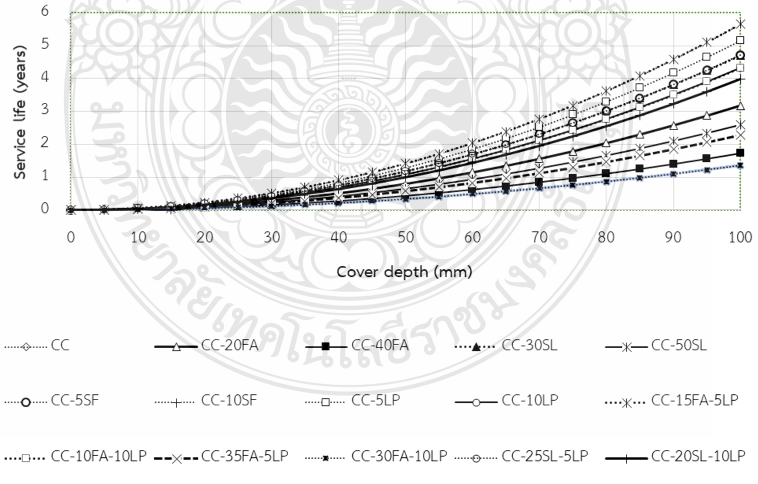
จากการนำคอนกรีตไปอบในตู้เร่งการเกิดคาร์บอเนชั่น โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm นำมาหาค่าความลึกคาร์บอเนชั่นและค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ดังตารางที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ ซึ่งแสดงค่าความลึกคาร์บอเนชั่นและค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่น การทำนายอายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีต ตามสมการ fick’s first law of diffusion โดยสมการคือ $X_c = k \cdot \sqrt{t}$ ได้พิจารณาผลจากระยะค่าความลึกคาร์บอเนชั่น และผลจากสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชัน ที่มีต่อการทำนายอายุการใช้งานของตัวอย่างคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกคาร์บอเนชั่นกับอายุการใช้งานตัวอย่างคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 และ 91 วัน เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอ้างอิงสมการ fick’s

first law of diffusion พบว่าตัวอย่างคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 และ 91 วัน ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ทั้งสองวัสดุ 2 ประสานและ 3 วัสดุประสาน มีแนวโน้มอายุการใช้งานที่น้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งนี้เพราะ การลดปูนซีเมนต์ จึงทำให้ลด $Ca(OH)_2$ จึงเป็นการเร่งการเกิดคาร์บอเนชั่น จึงทำให้อายุของตัวอย่างคอนกรีตที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณระหว่างตัวอย่างคอนกรีตที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมมากกว่า จะให้ค่าอายุการใช้งานที่นานกว่า



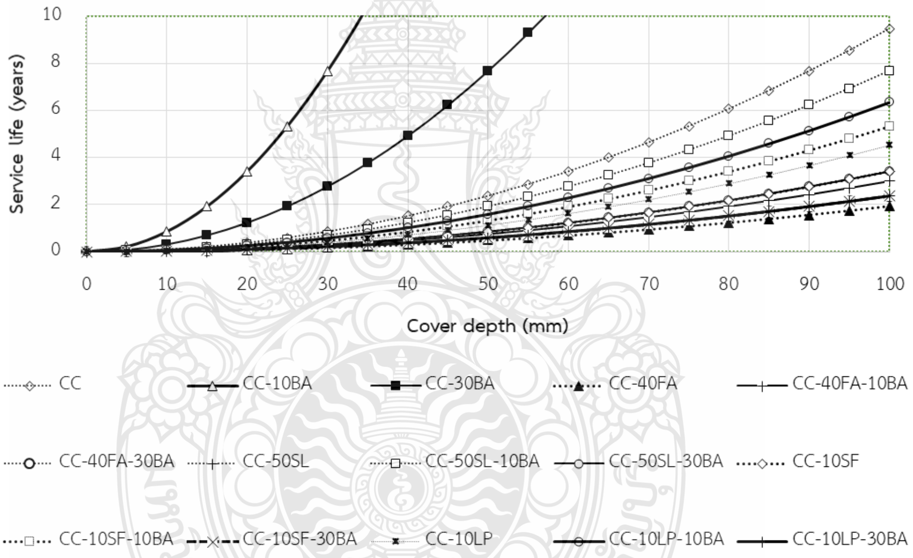
ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



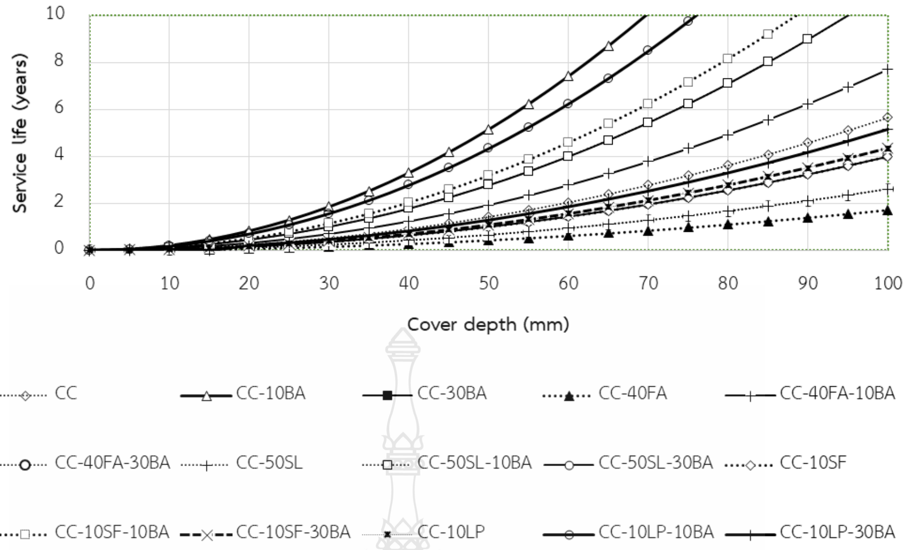
ข) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มคอนกรีตกับอายุการใช้งานตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยอ้างอิงสมการ fick’s first law of diffusion

รูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มคอนกรีตกับอายุการใช้งานตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำและบ่มอากาศ เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 91 วัน พบว่าในกรณีบ่มน้ำและบ่มอากาศ เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน มีผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้ก้นเตาแทนที่ทราย มีแน้วโน้มอายุการใช้งานที่มากกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนทั้งนี้เพราะเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุบางส่วนที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงทำให้คอนกรีตทึบขึ้นจึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้อยาก จึงทำให้อายุการใช้งานของคอนกรีตที่นานกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณระหว่างตัวอย่างคอนกรีตที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมมากกว่า จะให้ค่าอายุการใช้งานที่นานกว่า

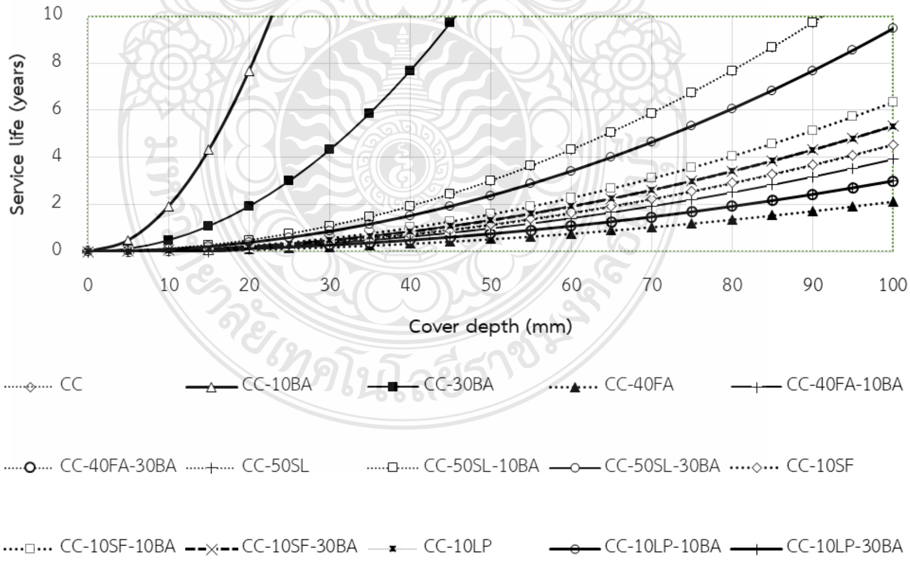


ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน

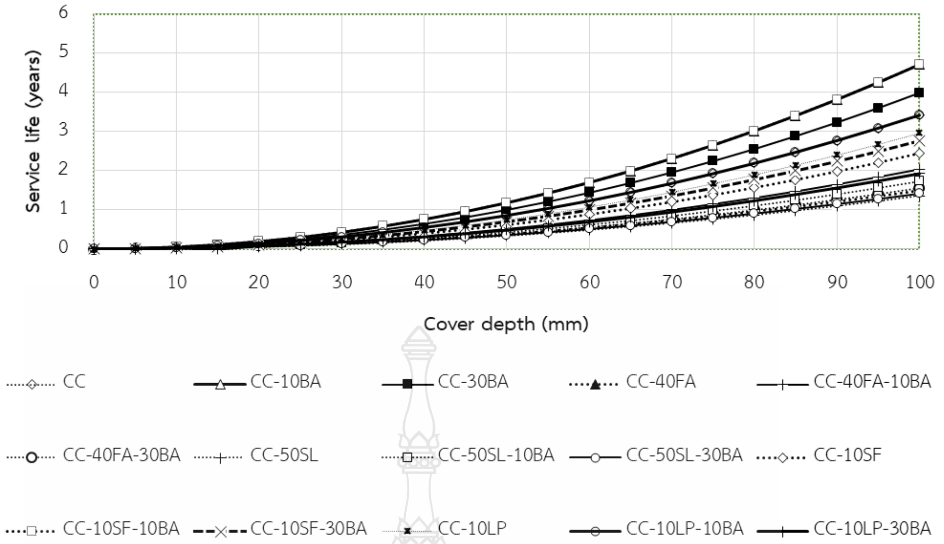


ข) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มคอนกรีตกับอายุการใช้งานตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย (กรณีบ่มน้ำ)โดยอ้างอิงสมการ fick’s first law of diffusion



ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



ข) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มคอนกรีตกับอายุการใช้งานตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย (กรณีบ่มอากาศ)โดยอ้างอิงสมการ fick’s first law of diffusion

บทที่ 5
สรุป

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์และสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต (เมื่อใช้ทรายล้วน) ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย มีค่ามากกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน ส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 10)

2) สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานกว่า มีค่าน้อยกว่าของที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์น้อยกว่า และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าเมื่อบ่มอากาศ

3) สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

4) สัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า ค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่ามากกว่าของกรณีที่บ่มอากาศ แต่เมื่อเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่นานกว่า กลับพบว่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตกรณีบ่มน้ำน้อยกว่าของคอนกรีตกรณีบ่มอากาศ

5) ทำนายอายุการใช้งานจากสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเมื่อผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนเมื่อใช้ทรายล้วน มีแนวโน้มอายุการใช้งานที่น้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้ก้นเตาแทนที่ทราย มีแน้วโน้มอายุการใช้งานที่มากกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระหว่างตัวอย่างคอนกรีตที่มีระยะหุ้มเหล็กเสริมมากกว่า จะให้ค่าอายุการใช้งานที่นานกว่า

บรรณานุกรม

[1] คม บัวคลี่ และ บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, “การผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย,” **เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งประเทศชาติ**, ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2546, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 103-108.

[2] Lane, R.0. and Best, J.F., “Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete,” **Concrete International : Design & Construction**, Vol. 4, No 7 (1982) : pp 81 - 92.

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย. 2556.

[4] American Concrete Institute, “ACI 234R-96 : Guide for the Use of Silica Fume in Concrete,” **ACI Manual of Concrete Practice**, Part 1, Michigan, 2000.

[5] กฤติยา แก้วมณี และ ศ.ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, “ผลกระทบคุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO3),” **วารสารคอนกรีต**, ฉบับที่ 2 (2007).

[6] Andrade, L. B., Rocha, J. C. and Cheriaf, M., “Infuence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete,” **Construction and Building Materials**, vol. 23, (2009) : pp 609-614.

[7] Kaewmanee K. and Tangtermsirikul S., “Use of bottom ash as a fine aggregate replacing material in concrete,” **Annual Concrete Conference**, 2nd. (2006) : pp 104-108.

[8] Mahdi V., Farhad P., Mohammad S., Sara K. and Masoud M., “metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. Construction and Building Materials,” in **Situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite**, 2013 : pp 63-70.

[9] อุดมพร กุลมงคล, **ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2556.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[10] กิรติกร เจริญพร้อม และ วิเชียร ชาลี, “ความลึกของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล,” **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3 (2554) : หน้า 522-531.

[11] Chalee, W., Ausapanit, P. and Jaturapitakkul, C., “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis.” **Materials and Design**, Vol. 31, (2010) : pp 1242-1249.

[12] Ann K.Y., Ahn J.H.,Ryou J.S., “The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures.” **Construction and building Materials**, Vol. 23, (2009) : pp 239-245.

[13] Song H – W, Hong C and Ann K Y., “Factors influencing chloride transport in concrete Structure exposed to marine environment.” **Cement & Concrete Composites**, Vol. 30, (2008) : pp 113-121.

[14] วิเชียร ชาลี, “สัมประสิทธ์การแทรกซึมของคลอไรด์ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล.” **เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี**, ครั้งที่ 3, 34-26 ตุลาคม 2550, หน้า 103 – 109.

[15] Dhir R. K., Jones M.R., “Development of chloride – resisting concrete using fly ash.” **Fuel**, Vol. 78, (1999) : pp 137-142.

[16] 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.

[17] Cengiz Duran Atis, “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash,” **Construction and Building Materials,** Vol 17, (April 2003) : pp.147–152.

[18] N.I. Fattuhi, “Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period ,” **Materials et Constructions,** Vol 19, (March 1986)

บรรณานุกรม (ต่อ)

[19] H. A1-Khayat 1, M. N. Haque I. and N. I. Fattuhi, “Concrete carbonation in arid climate,” **Materials and Structures/Materiaux et Constructions,** Vol. 35, (August 2002) : pp 421-426.

[20] American Society for Testing and Materials, “ASTM C618-00. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete,” **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, Philadelphia, 2001. pp 310-313.

[21] กระทรวงอุตสหกรรม, “กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต,” **มาตรฐาน มอก.2135-2545 ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม**, 2546, หน้า 3.

[22] สหลาภ หอมวุฒิวงค์, ดิลก คูรัตนเวช และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, “การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อเถ้าถ่านหิน,” **การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประ เทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต**, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจุลจอมเกล้าธนบุรี

[23] American Concrete Institute, “ACI 233R-96 : Ground Granulated Blast-Furnace Slag as aCementitious Constituet in Concrete,” **ACI Manual of Concrete Practice**, Part 1, Michigan, 2000.

[24] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, **ความคงทนของคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.

[25] Shamasd A., “Reinforcement corrosion in concrete structure its monitoring and service life prediction,” **Cement & concrete composites**, Vol. 25, (2003) : pp 459-474.

[26] นายวิเชียร ชาลี, **การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test**. รายงานวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2557.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[27] Chalee, W., and Jaturapitakkul, C., “Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment.” **Materials and Structures**, Vol. 42, (2009) : pp 505 -514.

[28] Thomas, M.D.A. and Matthews, J.D., “Performance of PFA Concrete in a Marine Environment – 10-year Results.” **Cement and Concrete Composites**, Vol. 26, (1), (2004) : pp 5-20.

[29] Kasemchaisiri, R. and Tangtermsirikul, S., “A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete.” **Construction and Building Materials**, Vol. 21, (6), (2007) : pp 1322-1334.

[30] Standard drawings, **Kingdom of Thailand ministry of transport and communications department of highways.** 1994.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
Thailand Concrete Association
SIRDC
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 องค์ปาฐกรับเชิญวิทยากรรับเชิญ ผู้เขียนบทความ ผู้นำเสนอบทความ ผู้เข้าร่วมประชุม บริษัทและห้างร้านต่างๆ ที่ได้สนับสนุนการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 15 เป็นอย่างดียิ่ง ทำให้การประชุมครั้งนี้ ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

- **สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา**
- **ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น**
- **สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญ

หน้า

คณะกรรมการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย	2
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาโครงสร้างคอนกรีต	3
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง	4
คณะกรรมการวิชาการและกรรมการสมทบ สาขาบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต	6
คณะกรรมการกลุ่มมอร์ตาร์	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 ตั้งเติมสิริกุล*
14.45 – 15.45น.	นำเสนอผลงาน TCA Concrete Practice Awards(Gold Medal) โครงการ Rose Wood Hotel Project *โดย ดร.อัศวิน วาณิชย์ก่อกุล,Aurecon Consulting (Thailand) Co.,Ltd.*
15.45 – 16.00น.	พักการบรรยาย
16.00 – 16.30 น.	บทความรับเชิญ เรื่อง "บริบทคอนกรีตกับงานก่อสร้าง ภายใต้สมาคมซีเมนต์และคอนกรีตโลก (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, ICCC 2023 in Bangkok Thailand
17:00-17:30 น.	แนะนำเจ้าภาพ ACC16มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

11

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

08.30 – 10.15 น. **หัวข้อบรรยายพิเศษ** ห้องที่ 1 (ชื่อเดิม Rayong Grand Ballroom)
"Development of ConstructionTechnology for EEC's Infrastructure"

ประธานภาค : *ผศ.ดร.ชูชัย สุจิวรกุล*

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. *"การประเมินความปลอดภัยในการวิ่งของรถไฟความเร็วสูงบนสะพานด้วยวิธีการทดสอบและการวิเคราะห์แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถไฟและสะพาน: 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 (ชื่อเดิม Banphe Grand Ballroom)
ประธานภาค : *ผศ.ดร.เกียรติสุดา สมนา*
รองประธานภาค : *รศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ*

MAT-001	การตรวจสอบรอยร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในรูปแบบมัลติสเกลโดยการประมวลผลภาพ *Piyawat Tonsrisakul*
MAT-003	สมบัติของคอนกรีตผสมเถ้ากันเตาบดละเอียด *Sathit Larpthaikarn*
MAT-004	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันและเถ้ากันเตาแทนที่ทราย *Chanawit koedsri*
MAT-005	การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก *Naragon Sudthamnong*
MAT-006	ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก *Ditthawat Dangchum*

MAT-007	การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้ในงานอุตสาหกรรมด้วยอัลคาไลน์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง *ธนกฤต เทพอุโมงค์*
MAT-008	ผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ *Surasit Pohboon*

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

ประธานภาค : *ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช*

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

10.15 – 10.30 น. พักการบรรยาย

10.30 – 12.15 น. การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 1 (ชื่อเดิม 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 *Saranyoo Srirach*
MAT-010	การศึกษาเบื้องต้นการประยุกต์ใช้แผ่น viscoelastic polymer ในการปรับปรุงคุณสมบัติการสั่นสะเทือนและเสียงในแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ *Jirawin Sanguansin*
MAT-011	EFFECT OF GRAPHENE OXIDE ON BOND STRENGTH OF STEEL FIBER *Suriyawan Kongtun*
MAT-012	THE EFFECT OF GRAPHENE OXIDE IN BOND STRENGTH OF SYNTHETIC FIBERS *Apisit Techaphatthanakon*

MAT-015	ผลกระทบของโซเดียมพอลิอะคริเลตต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูง *Chalisa Intamat*

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

ประธานภาค : *ผศ.ดร.รัฐพล สมนา*

รองประธานภาค : *รศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ*

STR-002	พฤติกรรมและการเสริมกำลังโครงสร้างเจดีย์ในจังหวัดพะเยา *Akarachai Jaima*
STR-003	TESTING OF EFFICIENCY OF CONCRETE-FILLED STEEL SQUARE TUBE COLUMNS AFTER EXPOSURE TO ELEVATED TEMPERATURES *Apichat Tipcharoen*
STR-004	SURVEY ON CARBONATION RATE OF RC BUILDING STRUCTURESIN COMMUNITY AREA OF UDON THANI PROVINCE *Apisit Parnvad, ปิติศานต์ กร้ำมาตร , Pinyo Poyen*
MAT-016	อิทธิพลของโพลิเมอร์ต่อกำลังอัดของดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ *กฤษณะพัฒน์ เจนปิยพงศ์*
MAT-017	USE OF GEOPOLYMER MORTAR AS REPAIR MATERAIL CONCRETE EXPOSE MAGNESIUM SUNFATE *BOONLERT SRIOPAS*
MAT-035	อิทธิพลของวัสดุพอลิเมอร์ที่มีต่อคุณสมบัติการดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว Chuchai Sujivorakul, Jiraporn Jaratguy, Namfon Kanin

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 *Warangkana Saengsoy*
MAT-019	Comparison of water permeability between laboratory test and in place test for pervious concrete *Mano Promde*
MAT-022	การเปรียบเทียบระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังต่ำ *ภูวดล ใยยินดี, ชิชญาสุ์ บุญมี, Kittipoom Rodsin*
MAT-024	เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าถ่านหินจีโอโพลิเมอร์ที่กระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง *ประชุม คำพุฒ, เกียรติสุดา สมนา, rattapon somna*
MAT-025	Effects of Expansive Additive on Setting Time and Compressive Strength of Alkali-Activated High-Calcium Fly Ash *Sakonwan Hanjitsuwan, Borwonrak Injorhor, Nattawat Sohsungnoen, Tanisorn sohsungnoen, Phattarapol Chanwanna, Akaraphol Wachum, Chattarika Phiangphimai, Tanakorn Phoo-ngernkham*

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

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 พีระพันธุ์*

13.30 – 14.00 น. การสาธิตผลิตภัณฑ์ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

14.00 – 14.30 น. การสาธิตผลิตภัณฑ์ของบริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง 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 *"การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการไฟฟ้าพลังน้ำไซยะบุรี"*
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 ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด, TCA Silver Medal

09.30 – 10.00น. *"การก่อสร้างระบบพื้นแบบกลวงรับแรงสองทาง (BIAXIAL SLAB) ของอาคารสำนักงาน T-ONE BUILDING"*
โดย บริษัท เจนเนอรัล เอนจิเนียริ่ง จำกัด (มหาชน), TCA Concrete PracticeAward

10.00 – 10.30 น.	*"การก่อสร้างฐานรากด้วยเสาเข็มสปัน (Spun pile) และระบบติดตั้งเสาเข็มเจาะสำเร็จรูป (Double rod auger) โครงการ The Uppergrounds"* *โดย บริษัท เจนเนอรัล เอนจิเนียริ่ง จำกัด (มหาชน), TCA Concrete PracticeAward*
10.30 – 11.00 น.	*"คอนกรีตสำหรับงานฐานรากและกำแพงกันดินระดับลึกมาก (Tremie concrete for very deep foundation and retaining wall)"* *โดย ดร. ธยานันท์ บุณยรักษ์,* *ผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรม, บริษัท ซีพโก้ จำกัด (มหาชน)*

วันที่ 27 มีนาคม 2563 [March 27, 2020]

08.30 – 11.30 น. การนำเสนอบทความวิจัย ห้องที่ 2 (ชื่อเดิม Banphe Grand Ballroom)

ประธานภาค : *ผศ.ดร.ภานุวัฒน์ จ้อยกลัด*

MAT-026	Compressive Strength of Concrete with Recycled Asphalt Pavement Aggregates under Tropical Temperatures *Jirayut Suebsuk*
MAT-027	Effect of Temperatures on Compressive Strength and Microstructure of Cement Mortar with Recycled Asphalt Pavement Aggregates *Jirayut Suebsuk*
MAT-028	Factors of Na2SiO3/NaOH Ratio and Portland Cement Content on Setting time,Compressive and Slant Shear Strengths of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar *Chirdsakul Lathulee, Thawatchai Sarachot, Sirichai Chobrak, Natthasin Wichit, Khattiya Chompoovong, Chudapak Detphan, ศตคุณ เดชพันธุ์, Tanakorn Phoo-ngernkham*
MAT-029	Workability, Strength and Chloride Diffusion Coefficient of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Incorporated with Silica Fume *Akaraphol Wachum, Siriwat Woravong, Songwut Klaoram, Mongkhon Phonsen, Chattarika Phiangphimai, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, Nattapong Damrongwiriyanupap, Tanakorn Phoo-ngernkham*
MAT-030	Development of Alkali-Activated Material Made From High-Calcium Fly Ash Containing Limestone Powder as Rendering Mortar *Tanakorn Phoo-ngernkham, Chattarika Phiangphimai, Sawat Guankrathok, Chudapak Detphan, Khattiya Chompoovong, ศตคุณ เดชพันธุ์, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, Piti Sukontasukkul*
MAT-031	ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF REINFORCING STEEL CORRODED BY CARBONATION *Sothyrak Rath, Pakawat Sancharoen*
MAT-032	Effects of High Volume of Bottom Ash on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of High Strength Recycled Aggregate Concrete *Nakarin Nakararoj, Weerachart Tangchirapat , Chai Jaturapitakkul*

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

ประธานภาค : *ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์*

รองประธานภาค : *ดร.ยุทธ ปณิธานวงศ์*

ENV-001	ผลกระทบของเถ้าชีวมวลที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพต่อสมรรถนะการไหลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและกำลังอัดของคอนกรีตชนิดอัดตัวแน่นได้เอง *Chaipak Suwachart*
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 *Puntana Suttiprapa, Weerachart Tangchirapat , Chai Jaturapitakkul*
MAT-034	Mechanical Properties of High Performance Concrete Using Ground Bottom Ash and Limestone Powder as a Cement Replacement *Piyanat Charoenamnuaysuk, Pakawat Pornmoon, Weerachart Tangchirapat , Anuwat Attachaiyawuth, Chai Jaturapitakkul*
MAT-036	ผลกระทบของซิลิกาฟูม เถ้าแกลบบด และเถ้าลอยต่อการพฤติกรรมการก่อตัว กำลังอัดและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในซีเมนต์เพสต์ *Mongkhon Narmluk, Phongphat Muleephan, Itinun Tesson, Thanakan Zatang*

11.30 –12.00น. ปิดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15

สารบัญบทความ

การบรรยายพิเศษ (Keynote Speaker)		หน้า

Keynote-001 การทำนายพฤติกรรมคอนกรีตเพื่อการประยุกต์ใช้งานและจัดทำมาตรฐาน (Modeling of Concrete Behavior for Applications and Standard Establishment) 24
ศ.ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล

Keynote-002 บริบทคอนกรีตกับงานก่อสร้าง ภายใต้สมาคมซีเมนต์และคอนกรีตโลก (Global Concrete and Cement Association, GCCA) 70
คุณณัฐวุฒิ อินทรส

บทความวิจัย สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง (MAT) **หน้า**

MAT-001 การตรวจสอบรอยร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในรูปแบบมัลติสเกลโดยการประมวลผลภาพ 79
Piyawat Tonsrisakul

MAT-003 สมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด 85
Sathit Larpthaikarn

MAT-004 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย 93
Chanawit koedsri

MAT-005 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก 102
Naragon Sudthamnong

MAT-006 ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก 111
Ditthawat Dangchum

MAT-007 การพัฒนาวัสดุควบคุมกำลังต่ำที่ผลิตจากการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้ในงานอุตสาหกรรมด้วยอัลคาไลน์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง 118
ธนกฤต เทพอุโมงค์

MAT-008 ผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตและการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ 124
Surasit Pohboon

MAT-009 INFLUENCES OF FINE AGGREGATE TYPES AND CONTENTS ON COMPRESSIVE STRENGTH AND RADIATION SEIELDING OF CONCRETE 132
Saranyoo Srirach

MAT-010 การศึกษาเบื้องต้นการประยุกต์ใช้แผ่น viscoelastic polymer ในการปรับปรุงคุณสมบัติการสั่นสะเทือนและเสียงในแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ 140
Jirawin Sanguansin

สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานต่างชนิดกันและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

CHLORIDE DIFFUSION COEFFICIENT OF CONCRETE USING DIFFERENT TYPES OF BINDERS AND BOTTOM ASH REPLECED IN SAND

ชนาวิทย์ เกิดศรี[1] (Chanawit Koedsri)[1]
ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2] (Pitisan Krammart)[2]
อภิชา หนูพันธ์[3] (Apicha Nhoophan)[3]

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Email: kwitce@gmail.com
[2]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Email: pitisan.k@en.rmutt.ac.th
[3]ครูชำนาญการพิเศษ ภาควิชาก่อสร้างและโยธา วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ สงขลา
Email: apicha.c5@hotmail.com

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (D_a) ของคอนกรีต ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GGBS) ซิลิกาฟูม และผงหินปูน แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนในทราย เพื่อพัฒนาคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ การศึกษาในครั้งนี้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ที่อายุ 28 และ 91 วัน ของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 แล้วนำไปหา D_a ของคอนกรีตโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิค ในการศึกษาครั้งนี้นั้น กรณีตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายจะใช้ทั้งบ่มน้ำและบ่มอากาศ ผลการศึกษาพบว่า D_a ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย GGBS และซิลิกาฟูม มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน ส่วน D_a ของคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน นอกจากนี้พบว่า D_a ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายทั้งที่บ่มน้ำและบ่มอากาศ มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่น้อย อย่างไรก็ตาม D_a ของคอนกรีตที่ระยะเผชิญคลอไรด์มากกว่า มีค่าน้อยกว่าของที่ระยะเผชิญคลอไรด์น้อยกว่า และ D_a ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายที่บ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าของที่บ่มอากาศ

ABSTRACT: This research studied the chloride diffusion coefficient (D_a) of concrete using fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBS), silica fume and limestone powder partially replaced of Portland cement type 1 (OPC) and using bottom ash instead of some parts in sand for development the concrete facing chloride environment. The concrete with a water to binder ratio of 0.55 was used. The ability of chloride binding at the age of 28 and 91 days of concrete specimens immersed in a sodium chloride solution with a percentage concentration 5% were tested. The D_a of concrete was obtained by using Fick's second law diffusion. In case of concrete specimens using bottom ash instead of some parts in sand, both water curing and air curing were considered. The results showed that D_a of concrete using fly ash, GGBS and silica fume was less than that of OPC concrete. Besides, D_a of concrete using limestone powder was closer to or more likely than those of OPC concrete. Moreover, it was found that the D_a of concrete using bottom ash instead of some parts in sand, both water curing and air curing was more than that of concrete using plain sand, especially when replacing a small amount of bottom ash. However, the D_a of concrete which having longer chloride face time was less than that of shorter chloride face time. Finally, the D_a of concrete using bottom ash instead of some parts in sand with water curing was less than that of air curing.

KEYWORDS: Chloride Diffusion Coefficient, Binder, Concrete, Bottom Ash

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้วัสดุทดแทนที่สามารถใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต เช่น เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และ

ผงหินปูน โดยเถ้าลอย (fly ash) เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ที่ประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุ ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุต่างๆนี้ สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ซึ่งเถ้าลอยมีขนาดค่อนข้างเล็ก เมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดในช่องว่างเล็กๆ ระหว่างซีเมนต์และหินหรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต เพิ่มความต้านทานในการกัดกร่อนของคอนกรีต เพิ่มกำลังอัดและกำลังแรงดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น และลักษณะอนุภาคทรงกลมทำให้คอนกรีตลื่นไถลได้ดีเพิ่มความสามารถในการเทได้ [1] แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยมีข้อเสียคือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น [2] ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ground granulated blast furnace slag) เกิดจากกระบวนการถลุงเหล็กแล้วนำตะกรันเตาถลุงเหล็กมาบดให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ และยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย โดยทั่วไปคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีความสามารถในการเทและเขย่าหรือทำให้แน่นได้ง่ายกว่าคอนกรีตธรรมดา [3] ในขณะที่ซิลิกาฟูม (silica fume) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ ซึ่งมีขนาดเล็กมาก ไม่เป็นผลึก และมีรูปร่างกลม จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีต คือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น [4] แต่ส่วนใหญ่การใช้ซิลิกาฟูมมักใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูงและใช้เพิ่มความต้านทานของคอนกรีตเป็นหลัก เนื่องจากการใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต และการแทรกซึมของคลอไรด์ [3] สำหรับผงหินปูน ($CaCO_3$) เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหิน มีความละเอียดหลายขนาดที่จำหน่ายในท้องตลาดในปัจจุบัน โดยทั่วไปมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร เมื่อแทนที่ผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถปรับปรุงคุณภาพบางประการของคอนกรีตได้ ซึ่งมีจุดเด่นของผงหินปูนแตกต่างจากเถ้าลอย คือทำให้การก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้นกำลังในระยะต้นสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดการเยิ้มน้ำ ลดการหดตัว เพิ่มความต้านทานซัลเฟต และความต้านทานกรด เป็นต้น จากจุดเด่นดังกล่าวนี้ปัจจุบันได้มีการนำผงหินปูนมาใช้ในในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จกันมากขึ้น [5]

เถ้าก้นเตา (bottom ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่นเดียวกับเถ้าลอย แต่เถ้าก้นเตาเกิดจากการรวมตัวกันของเถ้าถ่านหินที่หลอมเหลว ดังนั้นเถ้าก้นเตาจึงมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนสูงกว่าเถ้าลอยมาก ลักษณะโดยรวมของอนุภาคของเถ้าก้นเตาจะมีรูพรุน มีความเปราะ ขนาดคละใกล้เคียงกับทราย แต่ละเอียดกว่าทราย มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าทราย และมีค่าการดูดซึมมากกว่าทราย เถ้าก้นเตาที่ไม่ผ่านการบดจึงมีสมบัติความเป็นสารปอซโซลานต่ำ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและมีการกระจายอนุภาคใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ดังนั้นจึงมีการนำเถ้าก้นเตามาใช้ในรูปแบบของวัสดุบ่มภายใน [6,7]

สิ่งก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่มักจะพบปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยเฉพาะคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล น้ำกร่อย หรือบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล เนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือคลอไรด์ และซัลเฟตละลายอยู่ทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กประสบความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิม จึงส่งผลเสียต่อความสามารถด้านกำลังรับแรง และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตลดลงด้วย ซึ่งต้องสิ้นเปลืองงบประมาณค่อนข้างมากในการซ่อมบำรุงและแก้ไข จึงเป็นปัญหาอย่างมากด้านความคงทนของคอนกรีต ในปัจจุบันพบว่าปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น มีการศึกษาสาเหตุการเสื่อมสภาพของคอนกรีต แนวทางในการป้องกันและแก้ไขการเสื่อมสภาพของคอนกรีต

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน และคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย เพื่อเป็นการเพิ่มฐานข้อมูลในการพัฒนาการใช้วัสดุทดแทนนี้ในงานคอนกรีตตลอดจนใช้เป็นข้อมูลทางเลือกในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตต่อไป โดยเฉพาะคอนกรีตที่เผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าลอย (จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GGBS) และซิลิกาฟูมส่วนผงหินปูน (ขนาด 8 ไมโครเมตร) เป็นวัสดุเติมเต็ม สำหรับมวลรวมใช้ทรายแม่น้ำ หิน และเถ้ากันเตา (จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง)

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.2.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้

การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่อง x-ray fluorescence (XRF) ความละเอียดโดยวิธีของเบลน (blaine fineness) ตามมาตรฐาน ASTM C204 ค่าความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐาน ASTM C188 และภาพถ่ายกำลังสูงของอนุภาคโดยใช้เครื่อง scanning electronic microscope (SEM)

2.2.2 ความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร หลังจากบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำจนอายุครบ 28 วันแล้วทำการเคลือบผิวตัวอย่างคอนกรีตด้วย epoxy ยกเว้นด้านบนของตัวอย่างด้านเดียว แล้วนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (ใช้สารโซเดียมคลอไรด์ 82.4 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร) เป็นเวลา 28 และ 91 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาตัดที่ระยะความลึก 1 2 3 4 และ 5 เซนติเมตร โดยวัดจากผิวหน้าของคอนกรีต แล้วนำแต่ละชั้นของตัวอย่างมาบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ให้ได้ผงคอนกรีตประมาณ 20 กรัม จากนั้นนำผงตัวอย่างไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลาย (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 และปริมาณคลอไรด์อิสระใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย (Water-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1218

2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (D_a) ของคอนกรีต

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (D_a) ใช้สมการกฎของการแพร่ข้อที่ 2ของฟิค (Fick's Second Law) ดังแสดงสมการที่ (1)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \qquad (1)$$

ทั้งนี้ คำตอบของสมการที่ (1) สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2) ซึ่งเป็นคำตอบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function)

$$C_{(x,t)} = (C_s - C_0)\left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] + C_0 \qquad (2)$$

เมื่อ $C_{(x,\ t)}$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้าที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ t (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

C_0 คือ ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่บริเวณผิวเหล็กเสริม โดยเป็นคลอไรด์ส่วนที่อยู่ในส่วนผสมของคอนกรีตตั้งแต่แรก (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ซม.^{2}/วัน)

x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (วัน)

erf คือ ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function) ดังสมการที่ (3)

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n z^{(2n+1)}}{n!(2n+1)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(z - \frac{z^3}{3} + \right. \qquad (3)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตทำได้โดยการปรับค่า D_a และ C_s ในสมการที่ (2) เพื่อให้เส้นกราฟที่ได้จากสมการสอดคล้องกับกราฟที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด

2.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้

สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีต OPC ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วน และใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย (ตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) ที่ใช้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมของคอนกรีตใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)							
		OPC	เถ้าลอย	GGBS	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
1	C	332	-	-	-	-	970	1080	182
2	C-20FA	266	67	-	-	-	970	1080	182
3	C-40FA	200	132		-	-	970	1080	182
4	C-30SL	232	-	100	-	-	970	1080	182
5	C-50SL	166	-	166	-	-	970	1080	182
6	C-5SF	315	-	-	17	-	970	1080	182
7	C-10SF	298	-	-	34	-	970	1080	182
8	C-5LP	315	-	-	-	17	970	1080	182
9	C-10LP	298	-	-	-	34	970	1080	182
10	C-15FA-5LP	264	49	-	-	17	970	1080	182
11	C-10FA-	264	34	-	-	34	970	1080	182
12	C-35FA-5LP	199	116	-	-	17	970	1080	182
13	C-30FA-	199	99	-	-	34	970	1080	182
14	C-25SL-5LP	232	-	83	-	17	970	1080	182
15	C-20SL-	232	-	66	-	34	970	1080	182
16	C-45SL-5SF	166	-	149	17	-	970	1080	182
17	C-40SL-	166	-	132	34	-	970	1080	182

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ในส่วนผสมคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมของคอนกรีตใน 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)								
		OPC	เถ้าลอย	GGBS	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	เถ้าก้นเตา Volume
1	C	332	-	-	-	-	970	1080	182	-
2	C-10BA	332	-	-	-	-	873	1080	182	10% Vol.
3	C-30BA	332					679	1080	182	30% Vol.
4	C-40FA	200	132		-	-	970	1080	182	-
5	C-40FA-10BA	200	132	-	-	-	873	1080	182	10% Vol.
6	C-40FA-30BA	200	132				679	1080	182	30% Vol.
7	C-50SL	166	-	166	-	-	970	1080	182	-
8	C-50SL-10BA	166	-	166	-	-	873	1080	182	10% Vol.
9	C-50SL-30BA	166	-	166	-	-	679	1080	182	30% Vol.
10	C-10SF	298	-	-	34	-	970	1080	182	-
11	C-10SF-10BA	315	-	-	17	-	873	1080	182	10% Vol.
12	C-10SF-30BA	298	-	-	34	-	679	1080	182	30% Vol.
13	C-10LP	298	-	-	-	34	970	1080	182	-
14	C-10LP-10BA	298	-	-	-	34	873	1080	182	10% Vol.
15	C-10LP-30BA	298	-	-	-	34	679	1080	182	30% Vol.

หมายเหตุ C หมายถึง ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1, LP หมายถึง ผงหินปูน, SF หมายถึง ซิลิกาฟูม, FA หมายถึง เถ้าลอย, SL หมายถึงตะกรันเตาถลุงเหล็ก BA หมายถึง เถ้าก้นเตา

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้

3.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน

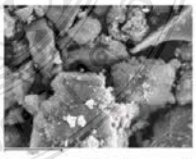
ตารางที่ 3 แสดงความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และความสามารถในการกักเก็บน้ำเถ้าก้นเตา

ตารางที่ 3 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความสามารถในการกักเก็บน้ำ

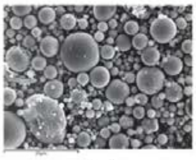
คุณสมบัติ	ชนิดวัสดุ					
	OPC	เถ้าลอย	GGSB	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	เถ้าก้นเตา
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.53	2.96	2.32	2.69	2.64
ความละเอียด (ซม.^{2}/ก.)	3,100	2,867	4,600	-	5,210	-
ความสามารถในการกักเก็บน้ำ (ร้อยละ)	-	-	-	-	-	27

3.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

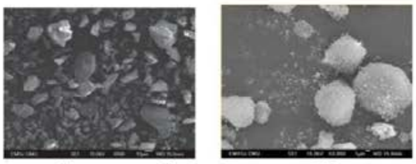
ภาพที่ 1 แสดงภายถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค (ขยาย 3,500 เท่า) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM) พบว่า รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยมคม ซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูน ส่วนรูปร่างของอนุภาคของเถ้าลอย มีลักษณะกลมเรียบมีขนาดต่างๆกันกระจายอยู่เห็นได้ชัดเจน ซึ่งคล้ายๆกับของซิลิกาฟูม แต่ของซิลิกาฟูมจะมีขนาดค่อนข้างละเอียดกว่ามาก และรูปร่างของเถ้าก้นเตาเป็นลักษณะเหลี่ยมแต่จะมีโพรงและรูพรุนกระจายไปทั่วอนุภาค



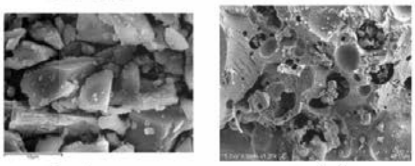
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1



ข) เถ้าลอย



ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ง) ซิลิกาฟูม



จ) ผงหินปูน ฉ) เถ้ากันเตา

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยวิธี SEM ของวัสดุที่ใช้

3.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้ากันเตา (XRF) แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้

รายการ	OPC	เถ้าลอย	GGBS	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	เถ้ากันเตา
SiO_2	18.93	35.71	34.06	92.00	0.45	35.29
Al_2O_3	5.51	20.44	16.27	0.70	0.05	18.93
Fe_2O_3	3.31	15.54	1.70	1.20	0.03	15.53
CaO	65.53	16.52	36.05	0.20	55.20	17.44
MgO	1.24	2.00	7.38	0.20	0.34	1.97
Na_2O	0.15	1.15	2.16	-	<0.01	2.02
K_2O	0.31	2.41	0.21	-	<0.01	0.66
SO_3	2.88	4.26	1.09	1.50	0.01	2.07
LOI	-	0.49	1.44	-	43.12	4.45
Free lime	1.00	1.71	-	-	-	0.17

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต

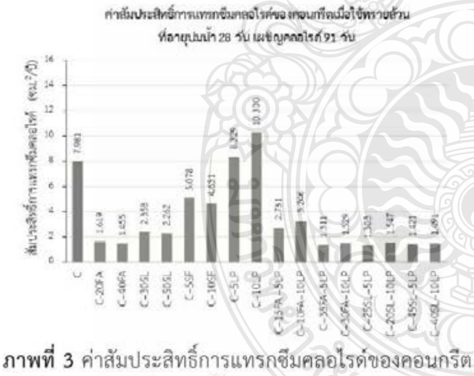
จากการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการเพื่อนำไปไทเทรต (Titration test) หาค่าปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะความลึกต่างๆ เพื่อให้ได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free chloride content) จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต (Chloride penetration coefficient : D_a) ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้วิธีการปรับค่า D_a และ C_s ในคำตอบของสมการกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) (สมการที่ 2) เพื่อให้เส้นกราฟที่ได้จากสมการสอดคล้องกับกราฟที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด (วิธีลองผิดลองถูก) โดยในที่นี้จะพิจารณาผลกระทบที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ดังนี้

3.2.1 ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

จากภาพที่ 2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม เป็นวัสดุปอซโซลาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น คลอไรด์จึงแทรกซึมได้ยากขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และผงหินปูนไม่ใช่สารปอซโซลาน จึงทำให้เพสต์ไม่ทึบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมากกว่าของการแทนที่ร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจเพราะปริมาณร้อยละ 10 เป็นปริมาณที่มากไป ทำให้มีความพรุนเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มากกว่า ส่วนเมื่อเป็นคอนกรีตที่ผสม 3 วัสดุประสาน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์เป็นไปตามการแทนที่ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน

ภาพที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน

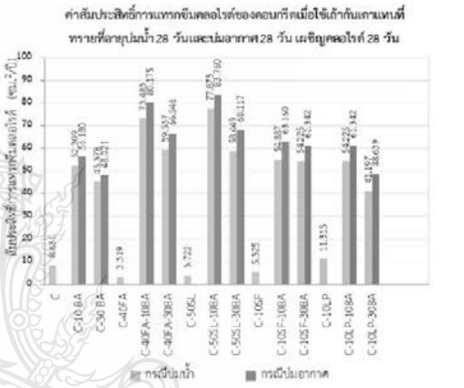
จากภาพที่ 3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีต ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



ภาพที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน

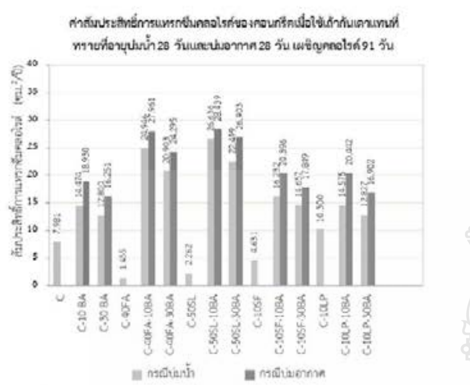
3.2.2 ผลกระทบจากการใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย

จากภาพที่ 4 พบว่าทั้งกรณีบ่มน้ำและบ่มอากาศให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน) เมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย มีค่ามากกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้ากันเตาเป็นวัสดุที่มีความพรุนที่มากกว่าทราย ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มีค่ามากกว่า และพบว่า เมื่อใช้เถ้ากันเตาในปริมาณมาก (ร้อยละ 30) ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่น้อยกว่าของเมื่อใช้เถ้ากันเตาในปริมาณน้อย (ร้อยละ 10) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้ากันเตาเป็นสารปอซโซลาน เมื่อแทนที่ในปริมาณที่ในปริมาณที่มากกว่า อาจสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า เมื่อแทนที่ในปริมาณน้อย



ภาพที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่ม น้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 28 วัน

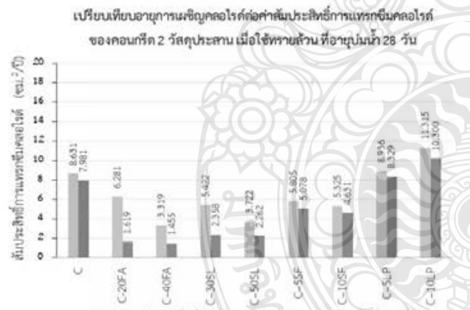
จากภาพที่ 5 พบว่าทั้งกรณีบ่มน้ำและบ่มอากาศให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน) เมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย มีค่ามากกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



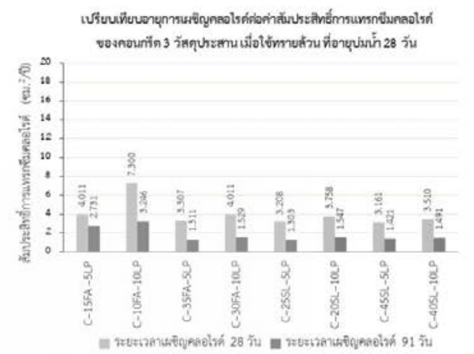
ภาพที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วันและบ่มอากาศ 28 วัน เผชิญคลอไรด์ 91 วัน

3.2.3 ผลกระทบจากอายุการเผชิญคลอไรด์

จากภาพที่ 6 และ 7 พบว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน มีค่าน้อยกว่าที่ 28 วัน ทั้งนี้เพราะคอนกรีตเมื่ออายุมากขึ้นจะมีความทึบแน่นขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มีค่าน้อยลง

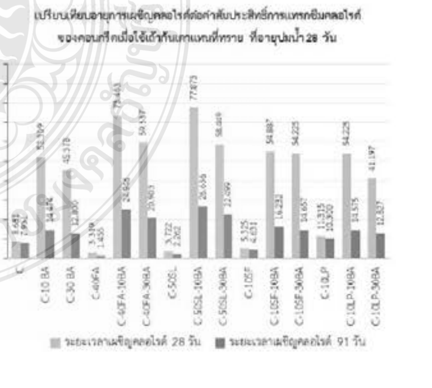


ภาพที่ 6 เปรียบเทียบอายุการเผชิญคลอไรด์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 2 วัสดุประสาน เมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบอายุการเผชิญคลอไรด์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 3 วัสดุประสาน เมื่อใช้ทรายล้วน ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

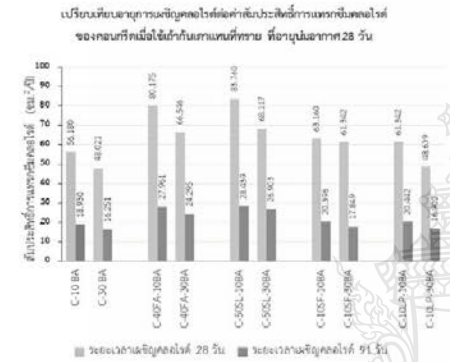
จากภาพที่ 8 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน มีค่าน้อยกว่าที่ 28 วัน และสังเกตได้ว่าในกรณีคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทรายนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่ออายุคอนกรีตที่มากขึ้น ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ทั้งนี้เพราะเถ้ากันเตาเป็นวัสดุปอซโซลาน เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น จึงส่งผลให้คอนกรีตทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้น คอนกรีตจึงมีความทึบแน่นมากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มีค่าน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด



99

ภาพที่ 8 เปรียบเทียบอายุการเผชิญคลอไรด์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

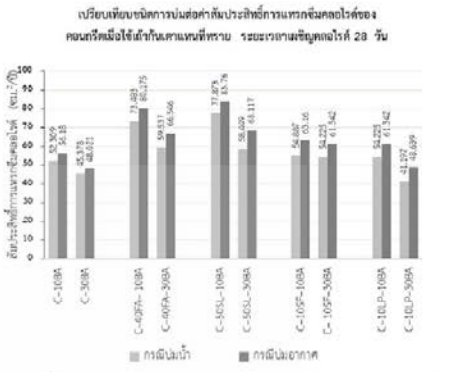
จากภาพที่ 9 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



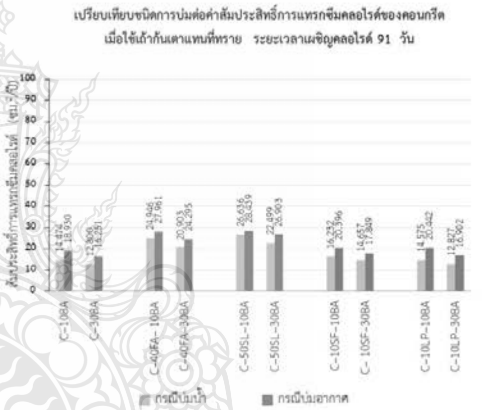
ภาพที่ 9 เปรียบเทียบอายุการเผชิญคลอไรด์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย ที่อายุบ่มอากาศ 28 วัน

3.2.4 ผลกระทบจากชนิดของการบ่ม

จากภาพที่ 10 และ 11 พบว่ากรณีบ่มอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าของกรณีบ่มน้ำ ทั้งนี้เพราะกรณีบ่มอากาศอาจจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำไปอย่างรวดเร็วเนื่อง จากการระเหยของน้ำ และน้ำที่ถูกกักอยู่ในโพรงของเถ้ากันเตามีปริมาณไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ไม่สมบูรณ์ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นที่น้อยกว่ากรณีบ่มน้ำ ส่งผลให้กรณีบ่มอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์มากกว่ากรณีบ่มน้ำ



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบชนิดการบ่มต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน



ภาพที่ 11 เปรียบเทียบชนิดการบ่มต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากันเตาแทนที่ทราย ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

4. สรุป

การศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต (เมื่อใช้ทรายล้วน) ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้

เถ้ากันเตาแทนที่ทราย มีค่ามากกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน ส่วนการแทนที่เถ้ากันเตาในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 10)

2) ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานกว่า มีค่าน้อยกว่าของที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์น้อยกว่า และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่กรณีบ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าเมื่อกรณีบ่มอากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] คม บัวคลี่ และ บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, "การผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย," **เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งประเทศชาติ**, ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2546, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 103-108.

[2] Lane, R.O. and Best, J.F., "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete," **Concrete International : Design & Construction**, Vol. 4, No 7 (1982): pp 81-92.

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย. 2556.

[4] American Concrete Institute, "ACI 234R-96: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete," **ACI Manual of Concrete Practice**, Part 1, Michigan, 2000.

[5] กฤติยา แก้วมณี และ ศ.ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, "ผลกระทบคุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)," **วารสารคอนกรีต**, ฉบับที่ 2 (2007).

[6] Andrade, L. B., Rocha, J. C. and Cheriaf, M., "Infuence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete," **Construction and Building Materials**, vol. 23, (2009): pp 609-614.

[7] Kaewmanee K. and Tangtermsirikul S., "Use of bottom ash as a fine aggregate replacing material in concrete," **Annual Concrete Conference**, 2^{nd}. (2006): pp 104-108.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นาสกุล	นายชนาวิทย์ เกิดศรี
วัน เดือน ปีเกิด	24 มิถุนายน 2533
ที่อยู่	36 หมู่ 4 ตำบลตลาดใหม่ อำเภอวิเศษชัญชาญ จังหวัดอ่างทอง
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
	สาขาวิศวกรรมโยธา
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ.2556
ประสบการณ์การทำงาน	บริษัท นอร์มาสคอนสตรัคชั่น จำกัด
	ตำแหน่ง วิศวกรโยธา
	ตั้งแต่ง พ.ศ. 2557 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	084-0181310
อีเมล	kwitce@gmail.com