

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

Chloride penetration resistance of concrete with expansive agent

นางสาวณัฏฐา เต่าทอง

นางสาวจิตติมา ทั้นประโยชน์

โครงการทางวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2560

Chloride penetration resistance of concrete with expansive agent

Nattaya Taotong

Thitima Thanprayot

This Civil Engineering Project Submitted in Partial Fulfillment of Requirement

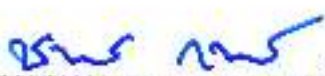
For the Degree of Bachelor of Engineering

Department of Civil Engineering, Faculty of engineering

Burapha University 2017

วัตถุประสงค์โครงการ การศึกษาประสิทธิภาพการระดมทุนจากสังคมเพื่อใช้ในการดำเนินงานโครงการ
โดย นายอภิสิทธิ์ ห้วยสูงจิตรโชติ
นายสมยศ ห้วยสูงจิตรโชติ
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา ๒๕๖๓
อาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.สุชนา บุญประเสริฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ขออนุมัติโครงการของนักศึกษา
เป็นวิทยาทานให้ศึกษาตามระเบียบของรัฐบาล วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

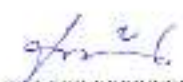

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา
(ดร.สมยศ ห้วยสูงจิตรโชติ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.สมยศ ห้วยสูงจิตรโชติ)

คณะกรรมการสอบโครงการ


.....ประธานกรรมการ
(ดร.สมยศ ห้วยสูงจิตรโชติ)


.....กรรมการ
(ดร.สุรวิชัย อัมภานันท์)


.....กรรมการ
(ดร.สุรวิชัย อัมภานันท์)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยสารขยายตัวเท่ากับ 20 กิโลกรัม อัตราการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และอัตราการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าและการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน และทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.0% เป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน ภายหลังการบ่มน้ำ 28 วัน และหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ซม.³ สำหรับทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน

จากผลการทดลองพบว่า สารขยายตัวมีผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวชนิด EA และ ET มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน แต่เมื่อนำสารขยายตัวร่วมกับเถ้าลอยทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน สุดท้ายพบว่าสารขยายตัวชนิด EA เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวชนิด ET

คำสำคัญ: สารขยายตัว เถ้าลอย เถ้าก้นเตา คอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ กำลังอัด

Abstract

This research aims to study the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete containing expansive agent. The ratios of water to binder were kept at 0.45. The expansive agent was used at binder replacement content of 20 kg of binder. The fly ash was used at binder replacement content of 30% by weight of binder. The bottom ash was used at fine aggregate replacement content of 10% by volume of fine aggregate. Type I Portland cement was used as a main binder. Cylindrical specimens of 10-cm diameter and 20-cm height were cast for electrical resistivity and rapid chloride penetration tests of concrete at 28, 56 and 91 days and chloride penetration test of concrete in the submersion of 3.0% solution of sodium chloride for 28, 56 and 91 days after curing in pure water for 28 days. Cube specimens of 10x10x10 cm³ size were cast for compressive strength test of concrete at 28, 56 and 91 days.

From the experimental results, it was found that the expansive agents affect to the electrical resistivity, rapid chloride penetration resistance, chloride penetration resistance and compressive strength of concrete. Concretes containing expansive agent types EA and ET have lower chloride penetration resistance and compressive strength than cement-only concrete at 28, 56 and 91 days. However, when fly ash is introduced to concrete containing expansive agent, the chloride penetration resistance is higher than cement-only concrete. Finally, it was found that expansive agent type EA is more appropriate for concrete under chloride environment than expansive agent type ET.

Keywords: Expansive agent, Fly ash, Bottom ash, Concrete, Chloride penetration resistance, Compressive strength

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมโยธานี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำปรึกษาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ซึ่งทำให้โครงการนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง และติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินการทำโครงการอย่างประจำสม่ำเสมอ ขอขอบคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมโยธารวมถึงรุ่นพี่ปริญญเอกและปริญญโทที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำโครงการ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการทำการทดลอง ผู้จัดทำโครงการรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา ความเมตตา และความปรารถนาดีของท่านเป็นอย่างยิ่งจึงกราบขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

นางสาวณัททยา เต่าทอง

นางสาวธิติมา ทันประโยชน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์	3
2.2 สารผสมเพิ่ม (Concrete Admixtures)	9
2.3 สารขยายตัว (Expansive agent)	11
2.4 เถ้าลอย (Fly ash)	16
2.5 เถ้าก้นเตา (Bottom ash)	19
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	20
3.2 วิธีการทดสอบ	
3.2.1 ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต	26
3.2.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต	29
3.2.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีต	33
3.2.4 กำลังอัดของคอนกรีต	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต	39
4.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต	53
4.3 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต	60
4.4 กำลังอัดของคอนกรีต	67

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล	
5.1 สรุปผล	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618	17
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014	18
ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545	18
ตารางที่ 2.4 ชนิดเถ้าลอยที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน	18
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	22
ประเภทที่ 1 สารขยายตัว เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา	
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีต	25
ตารางที่ 3.3 เกณฑ์พิจารณาคุณภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต (AASHTO TP 95)	27
ตารางที่ 3.4 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202	32

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์	3
รูปที่ 2.2 กลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี (ทวิชัย, 2550)	6
รูปที่ 2.3 กลไกการดึงดูดอออนเข้าไปในคอนกรีต (ทวิชัย, 2550)	6
รูปที่ 2.4 ประเภทของสารผสมเพิ่ม	10
รูปที่ 2.5 การหดตัวอิสระของคอนกรีตที่ใส่และไม่ใส่สารขยายตัว	12
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความเครียดในตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกจำกัดปริมาตร	12
รูปที่ 2.7 ผลกระทบของปริมาณสารขยายตัว	13
รูปที่ 2.8 ผลของสภาพการบ่มต่อการขยายตัวของคอนกรีต	14
รูปที่ 2.9 อุณหภูมิในการบ่มที่มีผลต่อการขยายตัวของคอนกรีต	15
รูปที่ 2.10 ภาพขยายของ Bottom ash ที่ 5000x	19
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	20
รูปที่ 3.2 สารขยายตัว (Expansive agent)	20
รูปที่ 3.3 เถ้าลอย (Fly ash)	21
รูปที่ 3.4 เถ้าก้นเตา (Bottom ash) จากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง	21
รูปที่ 3.5 เถ้าก้นเตา (Bottom ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	21
รูปที่ 3.6 มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)	22
รูปที่ 3.7 มวลรวมละเอียด (Fine aggregate)	23
รูปที่ 3.8 เครื่องผสมคอนกรีต	23
รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ที่มีความละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง	24
รูปที่ 3.10 การทำเครื่องหมายที่มุม 0, 90, 180 และ 270 องศา บนตัวอย่างทดสอบ	26
รูปที่ 3.11 การเทียบเครื่องมือ	27
รูปที่ 3.12 การวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต	27
รูปที่ 3.13 การต่อสายไฟเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบ	28
รูปที่ 3.14 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ฟองน้ำด้านบน	28
รูปที่ 3.15 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ฟองน้ำด้านล่าง	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว	44
รูปที่ 4.7 ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และสารขยายตัว	45
รูปที่ 4.8 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต	46
รูปที่ 4.9 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน	47
รูปที่ 4.10 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต ที่ผสมเถ้าลอย	48
รูปที่ 4.11 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต ที่ผสมเถ้าก้นเตา	49
รูปที่ 4.12 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสม เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา	50
รูปที่ 4.13 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ ผสมสารขยายตัว	51
รูปที่ 4.14 ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และสารขยายตัว	52
รูปที่ 4.15 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง ของคอนกรีต	53
รูปที่ 4.16 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของ คอนกรีตซีเมนต์ล้วน	54
รูปที่ 4.17 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของ คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย	55
รูปที่ 4.18 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของ คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา	56
รูปที่ 4.19 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของ คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา	57
รูปที่ 4.20 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต ที่ผสมสารขยายตัว	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.21 ผลกระทบของเก้าอี้เตาต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของ คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว	59
รูปที่ 4.22 ผลกระทบของระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของ คอนกรีต	60
รูปที่ 4.23 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน	61
รูปที่ 4.24 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสม เถ้าลอย	62
รูปที่ 4.25 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสม เก้าอี้เตา	63
รูปที่ 4.26 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสม เถ้าลอยและเก้าอี้เตา	64
รูปที่ 4.27 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสม สารขยายตัว	65
รูปที่ 4.28 ผลกระทบของเก้าอี้เตาต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสม เถ้าลอยและสารขยายตัว	66
รูปที่ 4.29 ผลกระทบของระยะเวลาย่นน้ำต่อกำลังอัดของคอนกรีต	67
รูปที่ 4.30 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน	68
รูปที่ 4.31 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อกำลังอัดคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย	69
รูปที่ 4.32 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อกำลังอัดคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเก้าอี้เตา	70
รูปที่ 4.33 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อกำลังอัดคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและ เก้าอี้เตา	71
รูปที่ 4.34 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อกำลังอัดคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว	72
รูปที่ 4.35 ผลกระทบของเก้าอี้เตาต่อกำลังอัดคอนกรีตของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและ สารขยายตัว	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สารขยายตัว (Expansive agent) เป็นสารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical admixture) ที่ใช้แทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน (Partial replacement of binder) เพื่อชดเชยการหดตัวของคอนกรีต ใช้ในงานซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพหรือเสียหายชำรุด (Deterioration of concrete structure) เนื่องจากสารขยายตัวช่วยเพิ่มการขยายตัว เพื่อชดเชยการหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) ของคอนกรีต ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่สำคัญของการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีต ที่ไม่เกี่ยวกับแรงกระทำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างมากในงานด้านวิศวกรรมโยธา ในอดีตที่ผ่านมาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการกำหนดข้อกำหนดของคอนกรีตเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แม้ว่าสภาพแวดล้อมของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ซึ่งการนำคอนกรีตไปใช้ในงานก่อสร้างนั้นควรคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตและสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตจะต้องเผชิญ เพื่อให้คอนกรีตที่นำไปใช้นั้นมีประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมในอนาคต

สภาพแวดล้อมมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการรับแรงอัดในระยะยาวอาจมีค่าลดลง หรืออาจส่งผลต่อเหล็กเสริมที่อยู่ภายในโครงสร้างของคอนกรีตทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเกิดสนิมได้ โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน หินทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน หินทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเลหรือในน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ซึ่งจะมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากมาจากคลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาพแวดล้อมทะเล จากดิน เป็นต้น

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาการใช้สารขยายตัวในงานคอนกรีตซีเมนต์ล้วน คอนกรีตผสมถั่วลอย และถั่วกันเตาที่ใช้สารขยายตัว เพื่อหาชนิดของสารขยายตัวที่เหมาะสมในการช่วยลดรอยแตกร้าวของคอนกรีตที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์และเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีต
2. เพื่อศึกษาชนิดของสารขยายตัวที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าลอย (Fly ash) และเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ต่อความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีต เมื่อใส่สารขยายตัว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต (Electrical resistivity) โดยทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว (Surface electrical resistivity) และทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด (Bulk electrical resistivity) ของคอนกรีต ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) และแบบแช่ในสารละลายคลอไรด์ โดยการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่จะทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ (Total chloride) และทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในระบบ (Free chloride) และการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength)

การศึกษาในครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.45 เท่ากันทุกตัวอย่าง ใช้สารขยายตัว (Expansive agent) ประเภท EA และ ET ในปริมาณ 20 กิโลกรัม ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ใช้เถ้าลอย (Fly ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชนิด High CaO และ High FL and High SO₃ ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และเถ้าก้นเตา (Bottom ash) จากโรงงานไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง และโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชนิด Low WR และ High WR ในปริมาณ 10% โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด โดยทดสอบเมื่อตัวอย่างอายุครบ 28, 56 และ 91 วัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

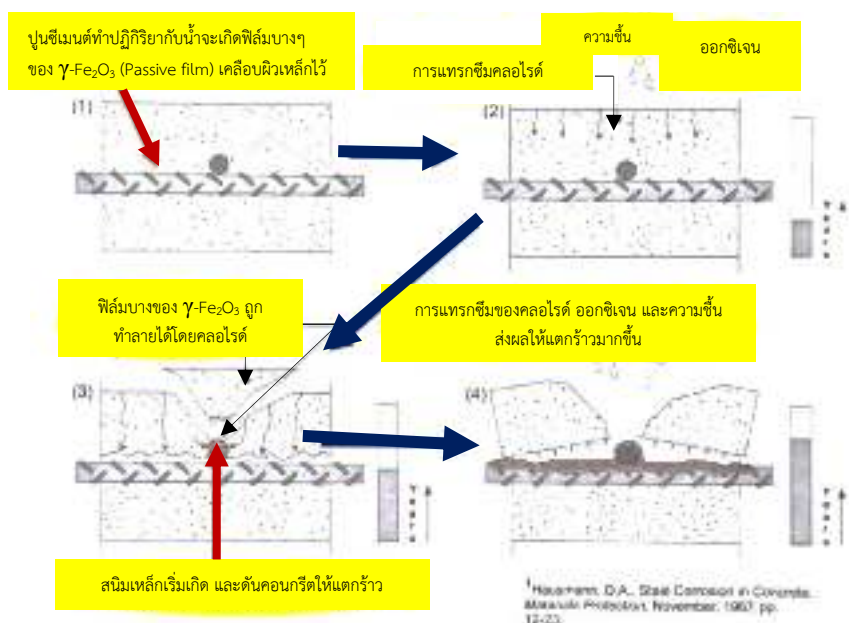
1. ทำให้ทราบถึงผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีต
2. ทำให้ทราบถึงชนิดของสารขยายตัวที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์
3. ทำให้ทราบถึงผลกระทบของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา ต่อความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีต เมื่อใส่สารขยายตัว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากเกลือคลอไรด์

คลอไรด์เป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดฟิล์มบางๆ (Passive film) ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างเคลือบผิวเหล็กไว้ เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมในเหล็ก และถ้าคลอไรด์ออสอนสามารถแทรกซึมผ่านเนื้อคอนกรีตและสะสมรวมตัวกันที่ผิวเหล็กเสริม จนมีปริมาณมากพอจนถึงค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) หมายถึงระดับหรือปริมาณคลอไรด์ที่มากเพียงพอที่ทำให้เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม ฟิล์มนี้จึงถูกทำลาย และเมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอบริเวณที่เหล็กเสริมไม่มีฟิล์มป้องกันอยู่ ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม (Depassivation) โครงสร้างเกิดการแตกร้าวและคอนกรีตหลุดออกเป็นแผ่นๆ (Delamination) เมื่อการเกิดสนิมเพิ่มมากขึ้น ทำให้คอนกรีตหลุดร่อนออกเป็นชั้นๆ เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้สูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด ส่งผลให้โครงสร้างขาดความมั่นคงแข็งแรงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง อัตราการพัฒนการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จะมีปริมาณที่มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมรอบโครงสร้าง คลอไรด์ในเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในเนื้อคอนกรีตเอง หรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

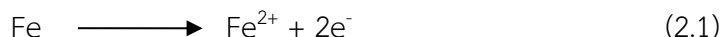


รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ (Hausmann, 1967)

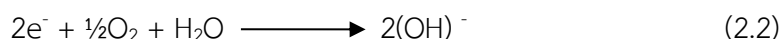
2.1.1 กลไกการทำลายโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยคลอไรด์

2.1.1.1 ปฏิริยาเคมีของการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

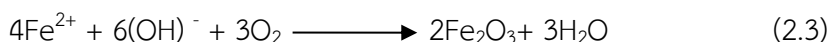
กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเริ่มต้นจากบริเวณที่ฟิล์มถูกทำลาย เมื่อมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) จะเกิดขึ้น กล่าวคือบริเวณที่ฟิล์มออกไซด์ถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ปฏิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ดังสมการเคมีต่อไปนี้



อิเล็กตรอน (e^-) ที่เกิดขึ้นนี้จะวิ่งผ่านไปยังฟิล์มที่ไม่ได้ถูกทำลาย ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Cathodic) ทำปฏิริยากับน้ำ และออกซิเจน จนเกิดกระบวนการแคโทดิก (Cathodic process) เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน ($(\text{OH})^-$) ดังสมการเคมีต่อไปนี้



หลังจากนั้นปฏิริยาการเกิดสนิมจะเกิดขึ้น โดยที่ Fe_2O_3 ก็คือ เฟอริกออกไซด์ หรือสนิม (Rust) นั้นเอง ดังสมการต่อไปนี้



2.1.1.2 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543)

คลอไรด์ไอออนเป็นตัวการที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิม เมื่อคลอไรด์ไอออนเข้าไปสะสมที่ผิวของเหล็กเสริมมากจนถึงจุดวิกฤต เหล็กเสริมจะเริ่มเกิดสนิมและพัฒนาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต จนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ โดยกระบวนการเกิดสนิมจากสาเหตุของการซึมผ่านของน้ำที่มีคลอไรด์ไอออน ผ่านเนื้อคอนกรีตนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอน ได้แก่

1. Initial period หรือ ระยะเวลาช่วงแรก (t_0) หมายถึง ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่หล่อคอนกรีตเสร็จจนถึงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิม โดยในช่วงนี้คลอไรด์ไอออนจะแพร่ผ่านเข้ามาสะสมในเนื้อคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต นอกจากนั้นออกซิเจนและน้ำจะซึมผ่านคอนกรีตเข้าไปยังเหล็กเสริมเช่นกัน ซึ่งระยะเวลาช่วงแรก (t_0) นี้จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ความสามารถซึมผ่านได้ของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต และความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม เป็นต้น

2. Propagation period หรือ ระยะเวลาช่วงขยายตัวต่อเนื่อง (t_1) หมายถึง ช่วงระยะเวลาของการพัฒนาการเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในคอนกรีต คือ เป็นช่วงที่เกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงสร้างอาคารเกิดการวิบัติ หรืออาจอยู่ในสภาพที่ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน

2.1.2 กลไกการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิริยากับส่วนประกอบต่างๆ ของคอนกรีต ซึ่งมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเสื่อมสภาพลง โดยการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า

นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสสารที่เคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้น กลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อัดตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์ไอออนในกลไกนี้เกิดจากความเข้มข้นของไอออนโดยคลอไรด์ไอออนแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนต่ำ ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งแสดงดังสมการ 2.4

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x} \quad (2.4)$$

โดยที่ $C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

$C_f(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)

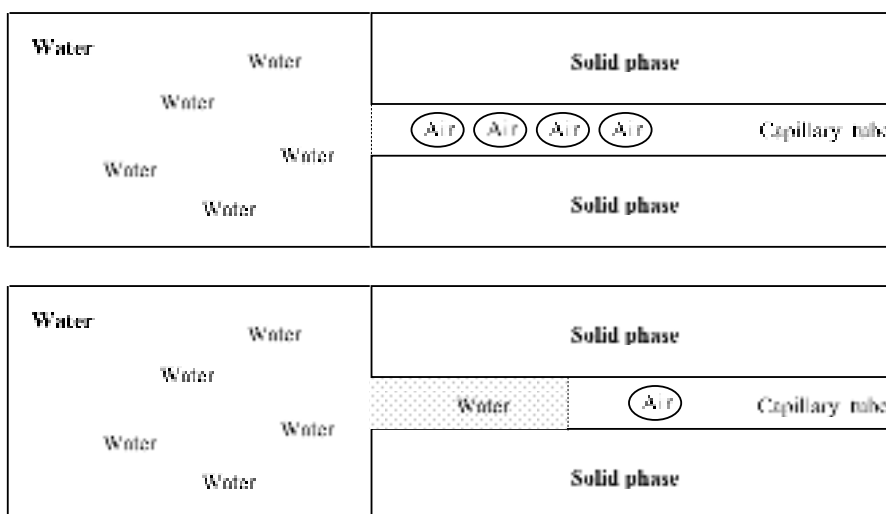
D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.²/ปี)

x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)

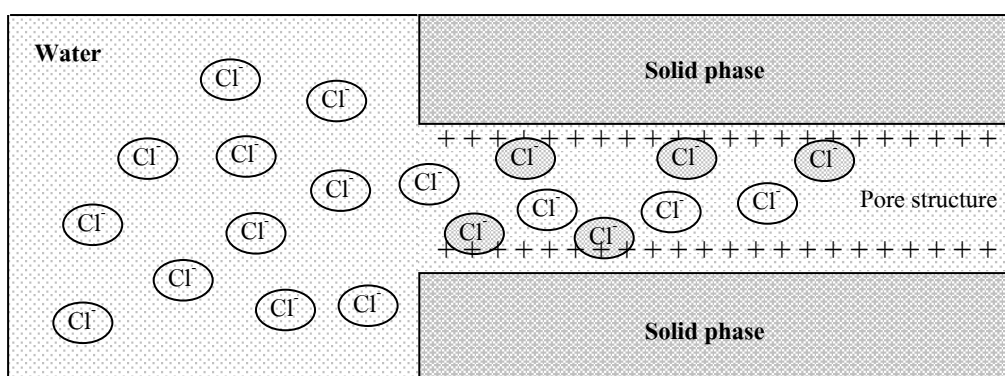
t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

2. การดึงดูดแบบคาพิลลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบคาพิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือ ผ่านเข้าไปในโพรงขนาดเล็กในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่บริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลมักจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล ทำให้น้ำทะเลถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็กๆ ภายในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี ซึ่งกลไกนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และใช้ระยะเวลาอันสั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2

3. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่น้ำทะเลตลอดเวลา พบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีต มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สลายละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์นี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่ยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกการดึงดูดไอออนจะเกิดสูงขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกและ บริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะดึงดูดคลอไรด์ไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 กลไกการดึงดูดแบบคาพิลลารี (ทริซัย, 2550)



โดย Cl^- Free chloride Cl^- Fixed Chloride

รูปที่ 2.3 กลไกการดึงดูดไอออนเข้าไปในคอนกรีต (ทริซัย, 2550)

4. แรงดันน้ำ (Permeability /Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำ

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ เช่น คอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเล เกิดขึ้นเนื่องจากแพร่เป็นหลัก โดยที่คลอไรด์จากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่คอนกรีตนั้นสัมผัสอยู่แพร่จากคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูง ไปสู่คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า และเมื่อคลอไรด์เข้ามาอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต แล้วคลอไรด์ก็แพร่จากที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงไปสู่ที่ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่า จึงทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้นคลอไรด์เป็นไปตามระดับความลึกจากผิวภายนอกของคอนกรีตเข้าไปภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

2.1.3 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสารที่สามารถพบอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ซึ่งมีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยน้ำธรรมชาติตามภูเขาหรือในพื้นที่สูงมีคลอไรด์น้อย ขณะที่น้ำในแม่น้ำและน้ำใต้ดินมีคลอไรด์สูง และน้ำในทะเลมีปริมาณคลอไรด์สูงมาก เพราะเป็นแหล่งรวมของน้ำจากที่ต่างๆ และมีการระเหยของน้ำตลอดเวลาจึงเกิดตะกอนเกลือในปริมาณมาก

น้ำในธรรมชาตินั้นได้รับคลอไรด์เพิ่มขึ้นได้หลายทาง เนื่องจากความสามารถในการละลายของน้ำ ทำให้สามารถละลายคลอไรด์จากชั้นดินต่างๆ ละอองน้ำจากมหาสมุทรถูกพัดเข้ามาสู่แผ่นดินในสภาพของหยดน้ำเล็กๆ ซึ่งมีเกลืออยู่ ปัจจุบันเหล่านี้เป็นตัวทำให้ปริมาณคลอไรด์บนพื้นดินสูงขึ้น น้ำจากทะเลและมหาสมุทรไหลขึ้นมาตามลำน้ำที่ไหลทอดตัวลงสู่มหาสมุทรได้ โดยเฉพาะในแม่น้ำที่มีความลึกมาก ๆ น้ำทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าจะไหลทวนน้ำในแม่น้ำขึ้นมาภายใต้แรงดันที่ไหลลงทะเลจึงเกิดการผสมกันระหว่างน้ำทะเลกับน้ำจืด

น้ำใต้ดินที่อยู่บริเวณใกล้ๆ กับทะเลและมหาสมุทรจะมีแรงดันของน้ำเท่ากับน้ำทะเลแต่ถ้ามีการดูดเอาน้ำใต้ดินมาใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจึงเกิดความแตกต่างของ Hydrostatic head ทำให้น้ำทะเลที่มีความดันมากกว่าไหลขึ้นสู่น้ำจืด

สิ่งขับถ่ายของมนุษย์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คือ ปัสสาวะมีคลอไรด์อยู่ในปริมาณเท่ากับคลอไรด์ ที่บริโภคเข้าไปกับอาหารและน้ำซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6 กรัม ของคลอไรด์ต่อคนต่อวัน ซึ่งจะทำให้ในน้ำในแม่น้ำลำธารมีปริมาณคลอไรด์สูงขึ้นด้วย น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก็เป็นอีกแหล่งหนึ่งที่มีคลอไรด์ในปริมาณสูงดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมการปนเปื้อนของน้ำผิวดินจากคลอไรด์ในน้ำทิ้งที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตหรือที่ปนเปื้อนมากับหิน หวาย โดยเฉพาะทรายที่มีแหล่งที่มาจากบริเวณใกล้ทะเล รวมถึงมีแหล่งที่มาจากน้ำยาผสมคอนกรีตบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากนั้นมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกคอนกรีตในช่วงของการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย จากดิน โดยทั่วไปแล้วแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างนั้น มาจากน้ำทะเลซึ่งสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจนถึงแม้ว่าคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้แต่เนื่องจากมีปริมาณของออกซิเจนที่ไม่เพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมจึงไม่เกิดขึ้น

Bakker (1988) กล่าวว่า ในกรณีที่คอนกรีตปนเปื้อนคลอไรด์ตั้งแต่เริ่มผสม การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่วนกรณีสัมผัสกับเกลือที่ละลายในน้ำทะเล ปริมาณของคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามเวลา และอาจนำไปสู่สถานะที่คอนกรีตไม่สามารถปกป้องเหล็กเสริมจากการกัดกร่อนได้อีกต่อไป

2.1.4 ความเสี่ยงของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ความเสี่ยงเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น มีมากที่สุดบริเวณโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณคลื่นละอองน้ำ รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงเกิดสนิมบนเหล็กเสริมในโครงสร้างได้น้อยมาก

การที่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเสี่ยงเกิดสนิมบนเหล็กเสริมในโครงสร้างน้อยกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำ เนื่องมาจากช่องว่างภายในคอนกรีตอึดตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยมากเป็นผลทำให้อัตราการแพร่ในคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยถึงแม้ว่ามีปริมาณออกซิเจนมากในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นถูกจำกัดไปด้วย อัตราการแพร่ของออกซิเจนที่ต่ำ ผ่านช่องว่างที่อึดตัวด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่สภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการแพร่ หรือการซึมผ่าน จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อึดตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง ทำให้น้ำที่ผิวของคอนกรีตระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีตสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อคลอไรด์อึดตัวที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และกระจายเข้าสู่ภายในคอนกรีต ทำให้คลอไรด์เข้าสู่บริเวณผิวของเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติคอนกรีตเปียกได้เร็วแต่แห้งได้ช้า และภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ได้ ดังนั้นการแพร่ของคลอไรด์อึดตัวเข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปในคอนกรีตของคลอไรด์อึดตัวในสภาพเปียกสลับแห้ง

การเคลื่อนตัวของคลอไรด์อึดตัวเข้าไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางของลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และสภาพการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันในแต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกช่วยเร่งให้คลอไรด์อึดตัวเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง โดยมีช่วงแห้งที่นานกว่านั้น มีโอกาสเกิดปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้มากกว่า และสนิมเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์อึดตัวที่ผิวของเหล็กเสริมมีมากพอที่ทำให้เหล็กเสริมนั้นเริ่มเกิดสนิมได้

2.1.5 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูญเสียการรับแรงลงไป เนื่องจากสาเหตุการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีอยู่ 2 ประการ คือ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543)

1. ขนาดของเหล็กเสริมบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (เหล็กเสริมสูญเสียอิเล็กตรอน) มีหน้าตัดของเหล็กเสริมเล็กลงอย่างต่อเนื่อง เนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน (e^-) ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเพื่อรับแรงของโครงสร้างในบริเวณนั้นๆ ลดลง
2. การเกิดสนิมบนเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตที่อยู่บริเวณรอบๆ เหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กมีปริมาตรมากกว่าเนื้อเหล็กเดิม ซึ่งในบางกรณีสนิมเหล็กอาจจะมีปริมาตรที่มากกว่า 6 เท่าของเนื้อเหล็กเดิม โดยทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่นั้นแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ (Splitting crack)

ดังนั้น ผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุข้างต้นนี้ คือ ส่งผลทำให้กำลังรับแรงของโครงสร้างนั้นลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ยังทำให้ความยืดหยุ่น (Stiffness) ลดลง ทั้งนี้การเกิดรอยร้าวเป็นการเร่งให้น้ำ และออกซิเจน เข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็ว และมากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แรงอัดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็ว และรุนแรงมากขึ้น

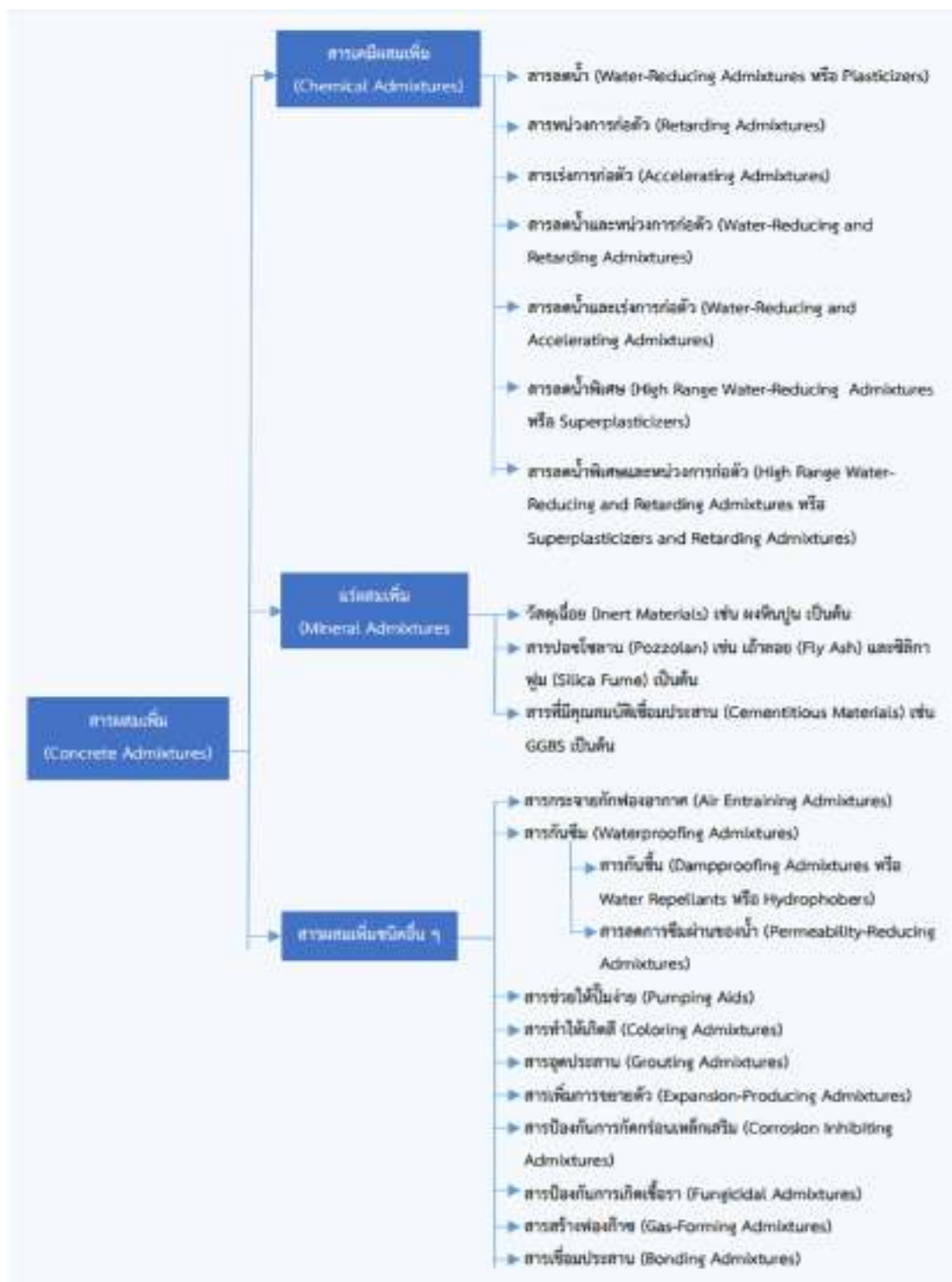
2.2 สารผสมเพิ่ม (Concrete Admixtures)

สารผสมเพิ่ม หมายถึง สารใดๆ นอกเหนือไปจากปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวม ที่ใช้เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าก่อนหรือกำลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 3 ประเภท คือ (เครือซีเมนต์ไทย, 2548)

1. สารเคมีผสมเพิ่ม เป็นสารเคมีที่ใช้เติมลงในส่วนผสมคอนกรีตก่อนผสมหรือขณะผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่น ลดปริมาณน้ำในส่วนผสม เร่งหรือหน่วงการก่อตัวและการแข็งตัว ปรับปรุงความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสด เป็นต้น

2. แร่ผสมเพิ่ม มีลักษณะเป็นผงละเอียด ที่เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อช่วยปรับปรุงความสามารถในการใช้งาน เช่น เพิ่มกำลัง เพิ่มความคงทน ทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการยึดเกาะดีขึ้น สามารถใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วน เป็นต้น

3. สารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ ได้แก่ สารผสมเพิ่มอื่นๆ ที่ไม่จัดอยู่ใน 2 ประเภทแรก ซึ่งผลิตขึ้นมาใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้น



รูปที่ 2.4 ประเภทของสารผสมเพิ่ม (เครือข่ายซีเมนต์ไทย, 2548)

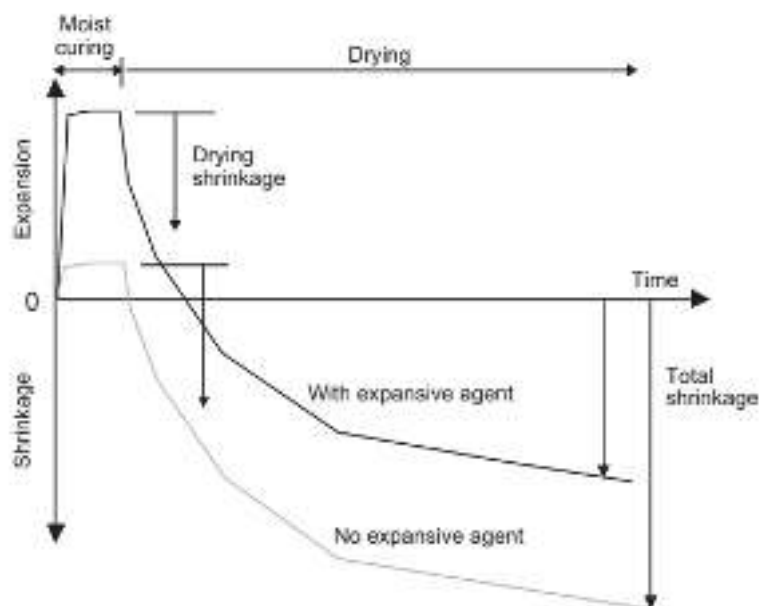
2.3 สารขยายตัว (Expansive agent)

สารขยายตัว (Expansive agent) คือ สารผสมเพิ่ม (Admixtures) ที่ใช้แทนที่บางส่วนของวัสดุประสาน มีลักษณะเป็นผง มีสารเคมีหลักคือ แคลเซียมอลูมิเนต และซัลเฟตหรือแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ซึ่งขยายตัวในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต หรือทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่นๆ ในคอนกรีตก่อนที่คอนกรีตแข็งตัว สารขยายตัวทำปฏิกิริยาควบคุมภายในเพื่อให้ปริมาณคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตที่มีสารขยายตัวช่วยเพิ่มการขยายตัวเพื่อชดเชยการหดตัวของคอนกรีต (ACI, 2011) โดยอาศัยการทำให้เกิดสารเอทริงไกต์ในช่วงอายุเริ่มแรกโดยการใส่สารแคลเซียมอลูมิเนตและสารซัลเฟต หรือใช้สารแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เมื่อทำการปรับส่วนผสมให้พอเหมาะ สามารถทำให้เกิดการขยายตัวเริ่มแรกและการหดตัวภายหลังได้ใกล้เคียงกัน การผสมสารขยายตัวเพิ่มในคอนกรีต เพื่อลดผลกระทบจากการหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) ให้เหลือน้อยที่สุด ใช้ทดแทนการหดตัวของคอนกรีตในการก่อสร้างทั่วไป การก่อสร้างแผ่นพื้นคอนกรีตบนพื้นดินขนาดใหญ่ ผนังคอนกรีตขนาดใหญ่ และการซ่อมแซมคอนกรีต (R.Gagné, 2008) ทั้งงานคอนกรีตชนิดที่มีการยึดรั้งและไม่ยึดรั้ง (ปริญาและชัย, 2552) โดยสารขยายตัวแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ประเภท G แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ส่วนใหญ่เกิดจากแคลเซียมออกไซด์ที่ก่อตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยแทนที่ลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3-10% ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การขยายตัวที่สังเกตได้ค่อนข้างรวดเร็วและถึงขีดสูงสุดภายในเวลา 48 ชั่วโมง จากผลการวิจัยพบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของ (CaO) กับ Ca(OH)_2 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสามารถแล้วเสร็จได้ใน 3 วัน ภายใต้การบ่มน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
2. ประเภท K เอทริงไกต์ เป็นส่วนผสมของแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และแคลเซียมซัลเฟต ที่ช่วยในการสร้างเอทริงไกต์ ซึ่งเพิ่มลงในคอนกรีตโดยตรงในระหว่างการผลิต โดยแทนที่สารขยายตัวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 10-16% ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการบ่มน้ำนาน 7 วัน มีความเพียงพอสำหรับการขยายตัวสูงสุด
3. ประเภทแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ผลการวิจัยพบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของ MgO กับ Mg(OH)_2 ชะลอตัว และ 57% ของ MgO กลายเป็น Mg(OH)_2 ภายในระยะเวลา 180 วัน ที่สภาวะเดียวกัน

Lam และคณะ (2008) ศึกษาคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตกับสารขยายตัวทำการทดสอบความต้านทานคาร์บอนชั้น ความต้านทานซัลเฟต ความต้านทานคลอไรด์และความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ พบว่าเมื่อเติมสารขยายตัวควบคุมให้ไม่เกิน 30 kg/m^3 ค่าความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์มีค่าลดลง แต่มีแนวโน้มลดค่าการซึมผ่านของคลอไรด์

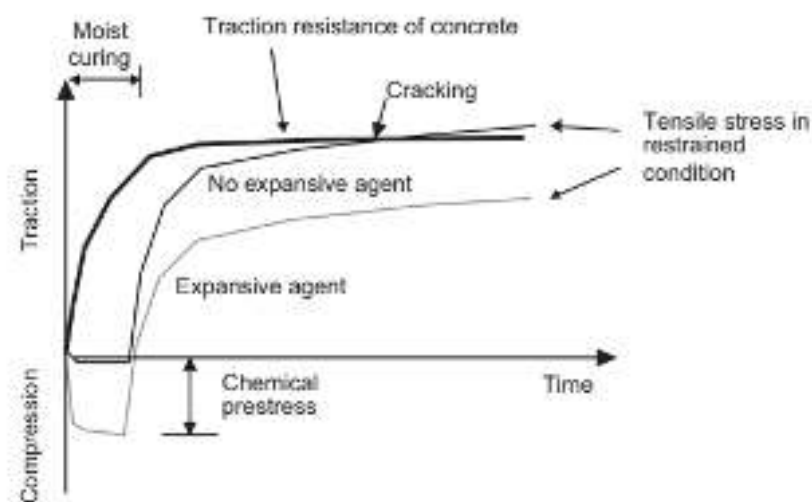
คอนกรีตที่มีสารขยายตัวแสดงให้เห็นถึงการขยายตัวที่มากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีสารขยายตัวซึ่งการขยายตัวนี้เกิดขึ้นในระหว่างการบ่มคอนกรีต การขยายตัวสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงระหว่างวันที่ 2-7 ของการบ่มน้ำ จากนั้นการหดตัวแบบแห้งเริ่มขึ้นทันทีหลังสิ้นสุดการบ่มน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การหดตัวอิสระของคอนกรีตที่ใส่และไม่ใส่สารขยายตัว (R.Gagné, 2016)

คอนกรีตที่ไม่มีสารขยายตัวแสดงให้เห็นถึงการขยายตัวเล็กน้อยเมื่อเริ่มบ่มด้วยน้ำ ทันทันทีหลังสิ้นสุดการบ่มน้ำคอนกรีตที่แห้งแล้วเกิดการสูญเสียน้ำซึ่งเป็นผลของการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต โดยระยะเริ่มต้นการหดตัวดำเนินไปอย่างรวดเร็วแต่ในระยะยาวมีความคงที่สม่ำเสมอ ขอบเขตสุดท้ายของการหดตัวแบบแห้งนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบของคอนกรีต สภาพแวดล้อม เป็นต้น

สิ่งที่สำคัญที่สุดคือผลรวมของการหดตัว การเปลี่ยนแปลงขนาดเริ่มต้นและขนาดสุดท้ายดังแสดงในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าสารขยายตัวช่วยลดผลรวมของการหดตัวได้ ส่งผลให้คอนกรีตไม่อยู่ภายใต้ความเครียดใดๆ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อถูกควบคุมปริมาตร พัฒนาการของการหดตัวแบบแห้งทำให้เกิดแรงดึงภายในที่อาจทำให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีต



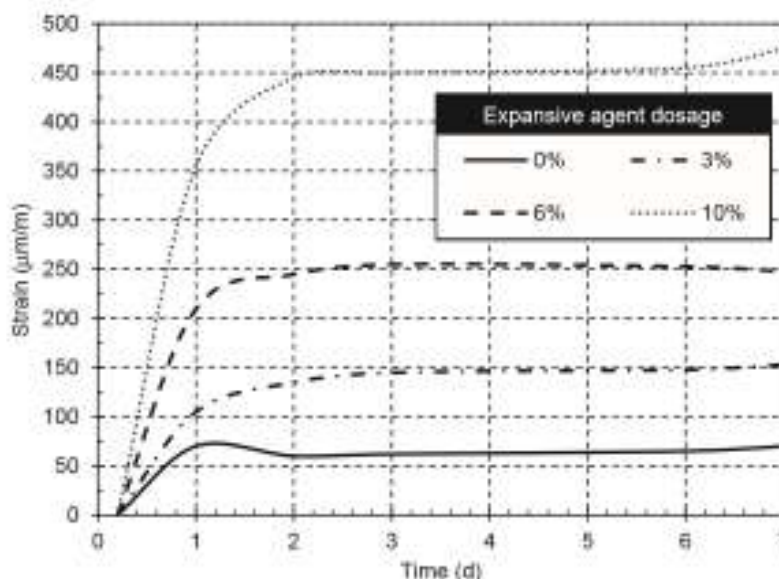
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความเครียดในตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกจำกัดปริมาตร (R.Gagné, 2016)

ในกรณีของคอนกรีตที่ไม่มีสารขยายตัวการยับยั้งการหดตัวแบบแห้ง ทำให้เกิดแรงดึงเมื่อเกิดการหดตัว การแตกร้าวเกิดขึ้นเมื่อความเค้นดึงที่พัฒนาขึ้นจากการหดตัวที่มีค่ามากกว่าแรงดึงของคอนกรีต ในกรณีที่คอนกรีตผสมสารขยายตัวมีการยับยั้งการขยายตัวของคอนกรีต เพื่อสร้างความเครียดที่เกิดขึ้นภายในระหว่างการบ่มน้ำ เมื่อสิ้นสุดระยะของการขยายตัวการหดตัวมีพัฒนาการเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการบีบอัดภายในลดลง

2.3.1 ตัวแปรที่มีผลต่อการขยายตัว

2.3.1.1 ปริมาณสารขยายตัว

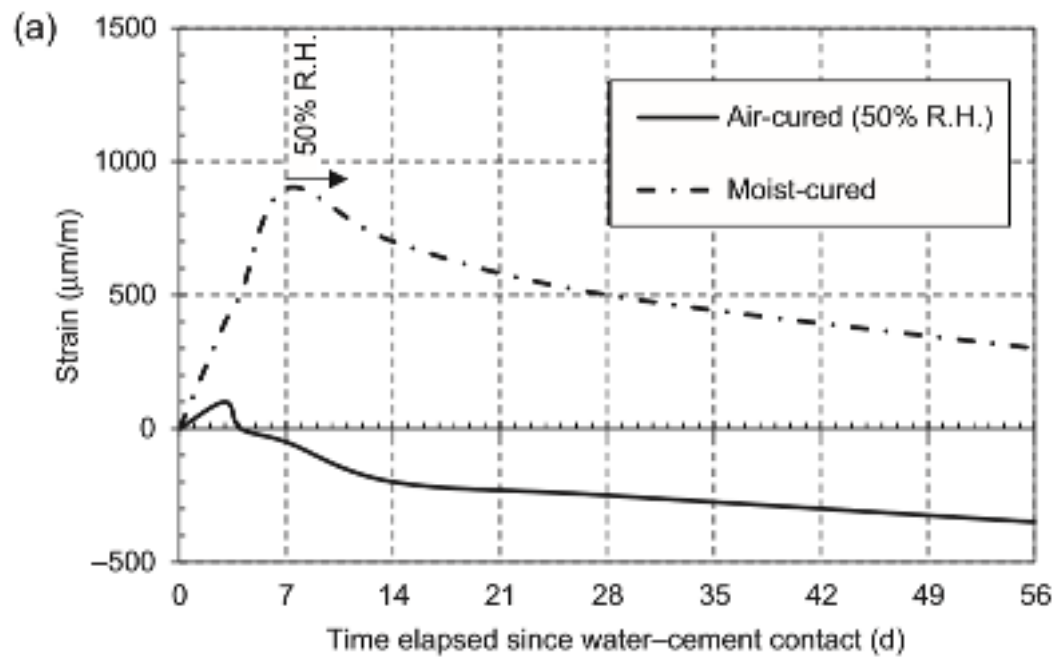
ปริมาณของสารขยายตัว คือ เปอร์เซ็นต์ของสารขยายตัว ต่อมวลของวัสดุประสาน รูปที่ 2.7 แสดงการขยายตัวอิสระของคอนกรีต พบว่ายิ่งมีปริมาณสารขยายตัวสูง ทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวมากขึ้น ซึ่งการขยายตัวสูงสุดสามารถเกิดขึ้นภายใน 2 วัน ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 100%



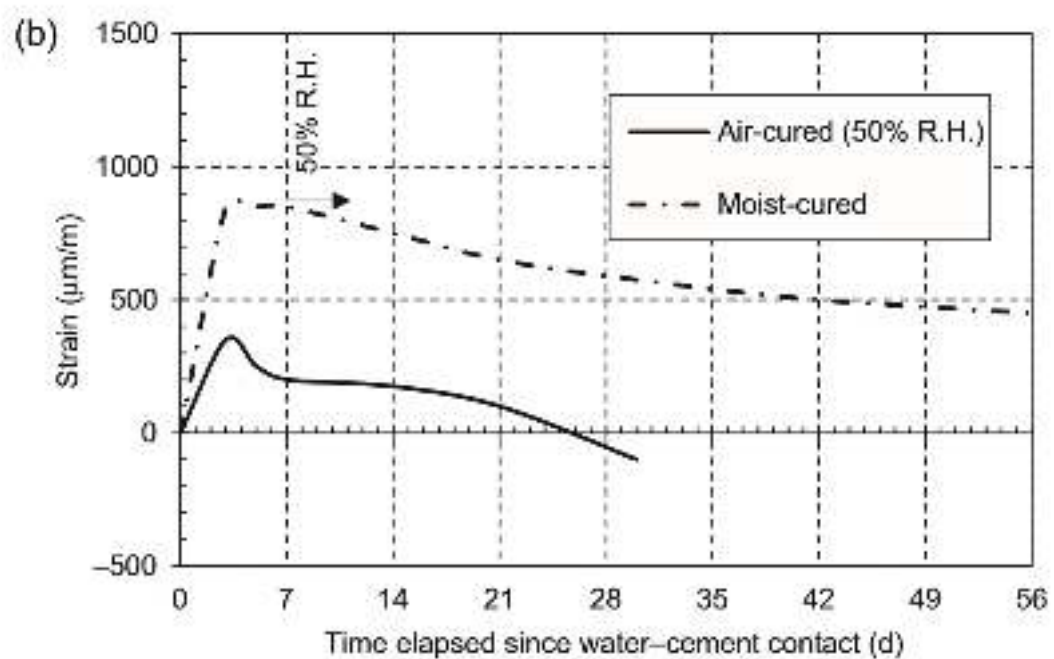
รูปที่ 2.7 ผลกระทบของปริมาณสารขยายตัว (Aïssi และคณะ, 2014)

2.3.1.2 สภาพการบ่ม

การบ่มน้ำมีอิทธิพลต่อการขยายตัวขั้นสุดท้าย เพราะน้ำจำเป็นอย่างยิ่ง ที่ช่วยทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นเพื่อให้เกิดการพัฒนาศักยภาพของการขยายตัวได้อย่างเต็มที่สิ่งที่สำคัญคือต้องเตรียมสภาพการบ่มให้เพียงพอ ดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงการขยายตัวของคอนกรีต 2 ชนิดที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) = 0.38 คอนกรีตชนิดแรกได้รับการบ่มน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% ในช่วง 7 วันแรกและต่อมาที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% คอนกรีตชนิดที่ 2 ได้รับการบ่มในอากาศ หลังจากถอดแบบเพียง 6 ชั่วโมงหลังการหล่อ การบ่มมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการขยายตัว เห็นได้ชัดสำหรับสารขยายตัวทั้งสองประเภท สำหรับสารขยายตัวชนิดซิลิโพลูมินเนต การขาดการบ่มน้ำ (การบ่มในอากาศ) ไม่ทำให้เกิดการขยายตัวใดๆ สำหรับสารขยายตัวชนิดแคลเซียมออกไซด์การขาดการบ่มน้ำ ทำให้เกิดการขยายตัวเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ของการขยายตัวที่เกิดขึ้นภายใต้การบ่มด้วยน้ำ



(w/b) = 0.38 ปริมาณสารขยายตัวชนิดซิลิโพลูมินเนต 16%

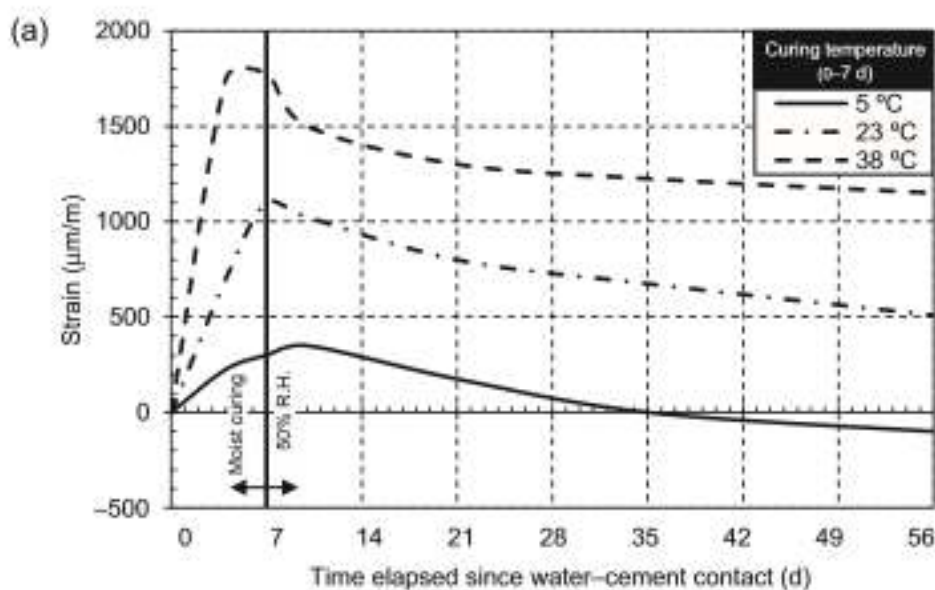


(w/b) = 0.38 ปริมาณสารขยายตัวชนิดแคลเซียมออกไซด์ 8%

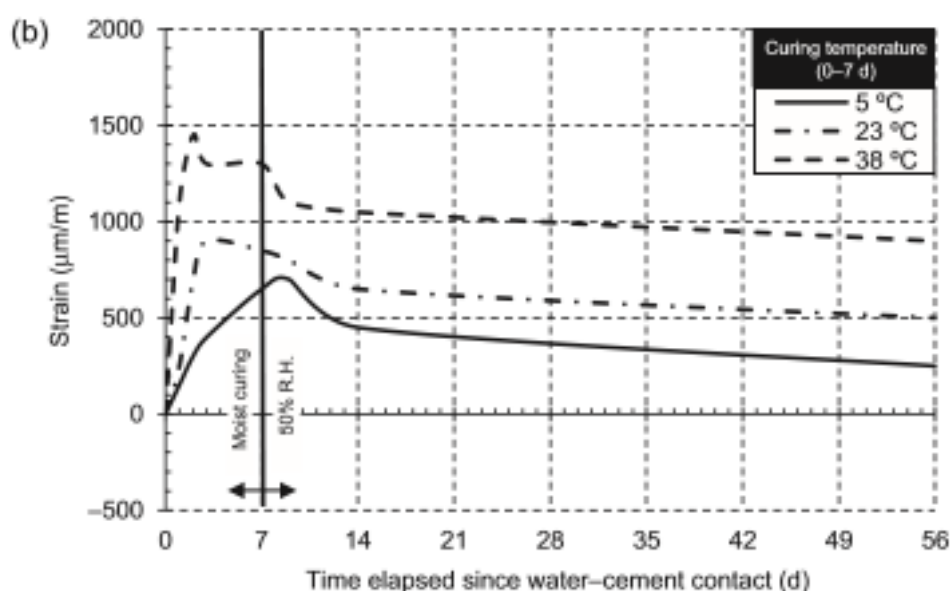
รูปที่ 2.8 ผลของสภาพการบ่มต่อการขยายตัวของคอนกรีต (Bissonnette และคณะ, 2014)

2.3.1.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิการบ่มมีอิทธิพลอย่างมากต่อการขยายตัวของคอนกรีต รูปที่ 2.9 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิ ในการบ่มที่มีผลต่อการขยายตัวอิสระของคอนกรีตสองชนิด โดยมีค่า $w/b = 0.38$ ซึ่งมีปริมาณสารขยายตัว ชนิดซิลิโพลูมินเตและแคลเซียมออกไซด์ 16% พบว่าอุณหภูมิของการบ่มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วย



$w/b = 0.38$ มีปริมาณสารขยายตัวชนิดซิลิโพลูมินเต 16%



$w/b = 0.38$ มีปริมาณสารขยายตัวชนิดแคลเซียมออกไซด์ 16%

รูปที่ 2.9 อุณหภูมิในการบ่มที่มีผลต่อการขยายตัวของคอนกรีต (Bissonnette และคณะ, 2014)

2.4 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอย (Fly ash) มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ที่เป็นกากของเสียที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าในแต่ละปีประเทศไทยจะเกิดเถ้าลอยประมาณ 3 ล้านตัน (ปริญญาและชัย, 2549) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไฟฟ้าและต้องใช้งบประมาณมหาศาลในการกำจัดหรือหาที่กองเก็บ ซึ่งนอกจากก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อม ยังก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะทางอากาศเกิดเป็นปัญหาด้านสุขภาพกับชุมชนอาศัยใกล้เคียง ดังนั้นการนำเถ้าลอยมาใช้ให้เกิดประโยชน์นอกจากเป็นการช่วยลดปัญหาดังกล่าวแล้วยังช่วยลดการสูญเสียของสมมูลธรรมชาติจากการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดในการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้ประหยัดงบประมาณมหาศาล ในการกำจัดของเสียและยังช่วยลดปัญหาโลกร้อน (Global warming) ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากอุตสาหกรรมและการผลิตปูนซีเมนต์

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตโดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุน ของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ ซึ่งรวมถึงการเพิ่มความทนทานให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete structures) ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ดังนั้นจึงได้มีการนำเถ้าลอยไปใช้เป็นส่วนผสมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ ในงานจริงอย่างแพร่หลาย แต่การผสมเถ้าลอยในงาน คอนกรีตก็มีข้อด้อยบางประการ เช่น ต้องใช้เวลาในการบ่มนาน กำลังคอนกรีตในช่วงต้นขึ้นช้าเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (ปริญญาและชัย, 2548)

Thomas (1996) ศึกษาประสิทธิภาพของคอนกรีตที่เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน ที่เผชิญในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเผชิญในสภาวะน้ำขึ้นน้ำลงในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 4 ปี เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเหล็กเสริมใน ตัวอย่างคอนกรีต ที่ใช้เหล็กเสริมที่มีคุณภาพ และการใช้เถ้าลอยในปริมาณต่าง ๆ พบว่าปริมาณเกลือคลอไรด์ วิกฤติมีค่าที่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้น โดยจะมีค่าปริมาณเกลือคลอไรด์วิกฤติ 0.70%, 0.65%, 0.50%, และ 0.20% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 0%, 15%, 30% และ 50% ตามลำดับ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถป้องกันเหล็กเสริมภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลได้ เนื่องจากเถ้าลอยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์อออน

Thomas และ Bamforth (1999) พบว่า เถ้าลอยส่งผลกระทบต่ออัตราการแทรกซึมของคลอไรด์สำหรับคอนกรีตในช่วงอายุสั้นๆ แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุยาวนานขึ้นเถ้าลอยจะช่วยปรับปรุงความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้อย่างมาก

2.4.1 ประเภทของเถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถแบ่งประเภทตามมาตรฐานเป็น 3 มาตรฐาน คือ มาตรฐาน ASTM C618, มาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 และ มาตรฐาน มอก. 2135-2545

สำหรับมาตรฐาน ASTM C618 ได้แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ประเภท F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ปริมาณรวมของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ ดังนั้น จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) มาจากรังดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีแร่ดินเหนียวสูงจึงทำให้เถ้าลอยมีซิลิกาออกไซด์สูง

2. ประเภท C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่มีปริมาณของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันมากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มาจากรังดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ต่ำ ทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากจะมีซิลิกาออกไซด์ต่ำแล้วยังมีอลูมิเนียมออกไซด์ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์และเฟอร์ริกออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) 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
ปริมาณอัลคาไลน์สูงสุดเมื่อเทียบกับ Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5

สำหรับเกณฑ์ ว.ส.ท.1014 กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยว่าใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 2 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์และเฟอร์ริกออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อย่างต่ำ, ร้อยละ	-	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	5.0
ปริมาณอัลคาไลน์สูงสุดเมื่อเทียบกับ Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.2135-2545) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยที่ใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้น คุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก.	ชนิด ข.	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อย่างต่ำ, ร้อยละ	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ร้อย ละ	-	<10.0	≥ 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

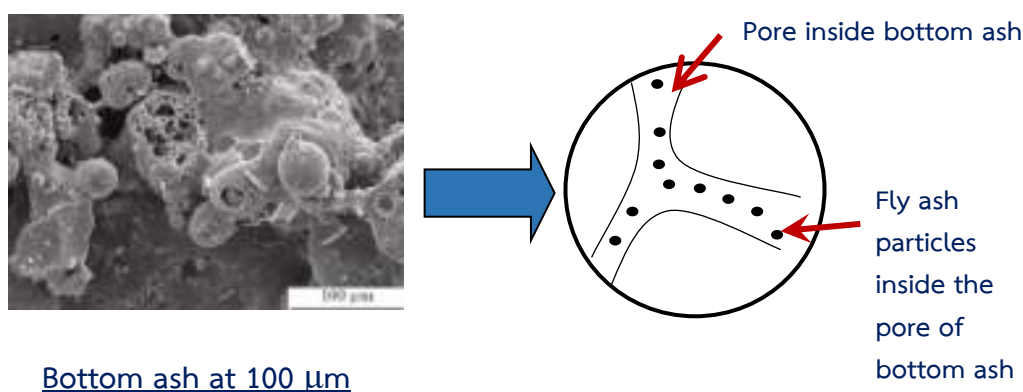
ตารางที่ 2.4 ชนิดเถ้าลอยที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน

ชนิด	มาตรฐาน		
	ASTM C618	ว.ส.ท. 1014	มอก. 2135-2545
เถ้าลอย FA	ชนิด F	ประเภทที่ 1	ชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ข.
เถ้าลอย FB	ชนิด C	ประเภทที่ 2	-

2.5 เถ้าก้นเตา (Bottom ash)

เถ้าก้นเตา (Bottom ash) เกิดจากการรวมตัวของเถ้าถ่านหินที่ถูกหลอมเหลว และมีขนาดค่อนข้างใหญ่และพรุน เป็นวัสดุที่มีจากผลพลอยได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีการนำเถ้าถ่านหินมาเผาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า แหล่งใหญ่ของเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาจากการผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยอยู่ที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากนั้นได้ส่วนที่เหลือคือเถ้าทิ้ง ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และชุมชนใกล้เคียงเถ้าทิ้งเหล่านี้ถูกนำไปใช้ทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต วัสดุเหล่านี้เรียกว่า วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ สารเหล่านี้จะทำให้ปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน ผลที่ได้ทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น การนำปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุปอซโซลานในสัดส่วนที่เหมาะสมอาจทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านความทนทานและลดปัญหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ลดพื้นที่การกำจัดทิ้งเถ้าถ่านหินหรือเถ้าทิ้งได้เป็นอย่างดี (สำเร็จ และคณะ, 2555)

วัชรพงษ์ และคณะ (2555) ศึกษา กำลังอัดของคอนกรีตด้วยการใช้เถ้าก้นเตาที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สำหรับแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตเบา โดยใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และใช้ผงอลูมิเนียมร้อยละ 0.2 ทดสอบการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำ 6 ชั่วโมงและจากนั้นบ่มอากาศ 7 วัน ผลการทดสอบพบว่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเบามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ส่วนการต้านทานการดัดของคอนกรีตเบา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตาในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



Bottom ash at 100 μ m

รูปที่ 2.10 ภาพขยายของ Bottom ash ที่ 100 μ m (Hussain และคณะ, 2013)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย ใช้ในงานก่อสร้างผสมทำคอนกรีตในงานโครงสร้างทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ซึ่งให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่เร็วมากนัก และให้ความร้อนปานกลาง



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 สารขยายตัว (Expansive agent)

ใช้สารขยายตัวชนิด EA และ ET ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวดังรูปที่ 3.2 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่าสารขยายตัวมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อเปรียบเทียบสารขยายตัวทั้ง 2 ชนิด พบว่า สารขยายตัวชนิด ET มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าสารขยายตัวชนิด EA



รูปที่ 3.2 สารขยายตัว (Expansive agent)

3.1.3 เถ้าลอย (Fly ash)

ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลดังรูปที่ 3.3 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่าเถ้าลอยมีปริมาณซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก



รูปที่ 3.3 เถ้าลอย (Fly ash)

3.1.4 เถ้าก้นเตา (Bottom ash)

ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่าเถ้าก้นเตามีปริมาณซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อเปรียบเทียบเถ้าก้นเตาทั้ง 2 แหล่งพบว่า เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้า BLCP มีปริมาณซิลิกอนออกไซด์มากกว่าเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เถ้าก้นเตา (Bottom ash) จากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง



รูปที่ 3.5 เถ้าก้นเตา (Bottom ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
สารขยายตัว แก้วลอย และแก้วกันตะ

Chemical composition (% by weight)/ Physical property	Cement	Expansive additive		Fly ash		Bottom ash		
	C1	ET	EA	FA	FB	BL	MM	MH
		(Taiheiyo)	(SRI Y10)	(Mae Moh power plant)		(BLCP power plant)	(Mae Moh power plant)	
SiO ₂	19.51	9.04	2.45	37.09	26.61	63.18	30.13	36.29
Al ₂ O ₃	4.97	2.53	5.21	19.69	13.60	19.48	17.84	19.96
Fe ₂ O ₃	3.78	1.47	0.19	14.18	18.34	7.32	15.99	14.56
CaO	65.38	68.60	61.85	19.36	24.97	2.05	27.78	20.84
MgO	1.08	0.78	0.60	2.32	2.33	1.28	2.19	1.96
SO ₃	2.16	12.19	25.80	3.24	8.53	0.96	1.92	0.96
Na ₂ O	0.01	0.23	-	0.35	1.75	1.05	0.90	0.77
K ₂ O	0.44	0.13	-	2.92	1.77	1.10	2.27	2.61
TiO ₂	-	0.14	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	-	0.10	-	-	-	-	-	-
MnO	-	0.03	-	-	-	-	-	-
SrO	-	0.03	0.11	-	-	-	-	-
ZnO	-	0.02	-	-	-	-	-	-
CuO	-	0.02	-	-	-	-	-	-
Free lime	0.79	27.98	23.61	2.36	3.93	-	-	-
LOI	2.27	4.65	3.70	0.01	0.53	2.80	0.20	1.36
Physical properties								
Specific gravity	3.15	3.02	-	2.20	2.57	1.64	1.84	1.87
Blaine fineness (cm ² /g)	3,550	-	-	2,790	2,820	-	-	-
Water retainability (%)	-	-	-	-	-	28.02	30.49	36.42

3.1.5 น้ำ (Water)

น้ำที่นำมาใช้ในการทำการทดลอง คือน้ำประปาจากห้องปฏิบัติการคอนกรีตและวัสดุ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

3.1.6 มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)

หินที่ค้างอยู่บนตะแกรงขนาดมาตรฐานเบอร์ 4 หรือหินที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร
นำมาล้างน้ำเพื่อกำจัดเศษผง แล้วผึ่งทิ้งไว้ให้อยู่ในลักษณะอิ่มตัวผิวแห้ง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)

3.1.7 มวลรวมละเอียด (Fine aggregate)

ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 หรือทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร นำมาล้างน้ำเพื่อกำจัดเศษผง แล้วผึ่งทิ้งไว้ให้อยู่ในลักษณะอิมตัวผิวแห้งดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 มวลรวมละเอียด (Fine aggregate)

3.1.8 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และ สูง 10 เซนติเมตร

3.1.9 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

3.1.10 เครื่องผสมคอนกรีต ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องผสมคอนกรีต

3.1.11 เครื่องเขย่าคอนกรีต

3.1.12 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ที่มีความละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ที่มีความละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

No.	Mix id.	w/b	Mix proportion of concrete 1 m ³									
			Portland cement	Expansive agent		Fly ash		Bottom ash		Rock (SSD)	Sand (SSD)	Water (SSD)
			Wt. (kg)	type	Wt. (kg)	type	Wt. (kg)	type	Wt. (kg)	Wt. (kg)	Wt. (kg)	Wt. (kg)
1	C1	0.45	394	-	-	-	-	-	-	1,032	884	62
2	C1ET	0.45	373	ET	20	-	-	-	-	1,022	836	120
3	C1EA	0.45	373	EA	20	-	-	-	-	1,023	805	149
4	C1FA30	0.45	262	-	-	FA	112	-	-	1,029	822	118
5	C1FB30	0.45	268	-	-	FB	115	-	-	1,023	793	157
6	C1BL10	0.45	394	-	-	-	-	BL	45	1,026	727	151
7	C1FA30BL10	0.45	262	-	-	FA	112	BL	45	1,026	727	142
8	C1ETFA30	0.45	241	ET	20	FA	112	-	-	1,023	793	153
9	C1EAFA30	0.45	241	EA	20	FA	112	-	-	1,023	819	127
10	C1EAFB30	0.45	248	EA	20	FB	115	-	-	1,023	819	131
11	C1EABL10	0.45	373	EA	20	-	-	BL	44	1,026	713	166
12	C1EAFA30BL10	0.45	241	EA	20	FA	112	BL	44	1,026	713	157
13	C1EAFA30MM10	0.45	241	EA	20	FA	112	MM	44	1,056	747	100
14	C1EAFA30MH10	0.45	241	EA	20	FA	112	MH	44	1,026	739	138

หมายเหตุ

C1	หมายถึง	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
EA	หมายถึง	สารขยายตัวชนิด SRI Y10
ET	หมายถึง	สารขยายตัวชนิด Taiheiyo
FA	หมายถึง	เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชนิด High CaO
FB	หมายถึง	เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชนิด High FL และ High SO ₃
BL	หมายถึง	เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง
MM	หมายถึง	เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชนิด Low WR
MH	หมายถึง	เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชนิด High WR

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

C1EAFA30MH10 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ใส่สารขยายตัวชนิด SRI Y10 20 กิโลกรัม ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ใส่เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชนิด High CaO 30% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ชนิด High WR 10% โดยปริมาตรของทราย

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต (Electrical resistivity)

3.2.1.1 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต (Surface electrical resistivity)

วิธีการทดสอบ

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยใช้สัดส่วนผสมตามตารางที่ 3.3 และถอดแบบเมื่ออายุคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนอายุตัวอย่างครบ 28, 56 และ 91 วัน
2. เมื่ออายุตัวอย่างครบ 28, 56 และ 91 วันแล้ว นำชิ้นมาจากน้ำ แล้วทำเครื่องหมายที่มุม 0, 90, 180 และ 270 องศา บนตัวอย่างทดสอบ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การทำเครื่องหมายที่มุม 0, 90, 180 และ 270 องศา บนตัวอย่างทดสอบ

3. เทียบเครื่องมือก่อนทำการทดสอบ โดยนำเครื่องมือวัดแผ่นเทียบเครื่องมือ จะต้องได้ค่า 16.0 $k\Omega\text{-cm}$ และ 120.0 $k\Omega\text{-cm}$ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเทียบเครื่องมือ

4. เมื่อเทียบเครื่องมือเรียบร้อยแล้ว นำมาวัดตัวอย่างทดสอบโดยวัดตามแนวยาวที่มุมต่างๆที่ได้ทำเครื่องหมายไว้ รอจนกว่าค่าหยุดนิ่ง ดังรูปที่ 3.12 จากนั้นบันทึกผลที่ได้



รูปที่ 3.12 การวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

โดยเกณฑ์พิจารณาคุณภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต (AASHTO TP 95) แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์พิจารณาคุณภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต (AASHTO TP 95)

Value ($k\Omega\text{-cm}$)	Chloride ion penetrability
< 12	High
12–21	Moderate
21–37	Low
37–254	Very low
> 254	Negligible

3.2.1.2 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต (Bulk electrical resistivity)

วิธีการทดสอบ

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยใช้ส่วนผสมตามตารางที่ 3.3 และถอดแบบเมื่ออายุคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนอายุตัวอย่างครบ 28, 56 และ 91 วัน
2. ต่อสายไฟเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การต่อสายไฟเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบ

3. วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ฟองน้ำด้านบน ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ฟองน้ำด้านบน

4. วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ฟองน้ำด้านล่าง ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ฟองน้ำด้านล่าง

5. วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต ดังรูปที่ 3.16

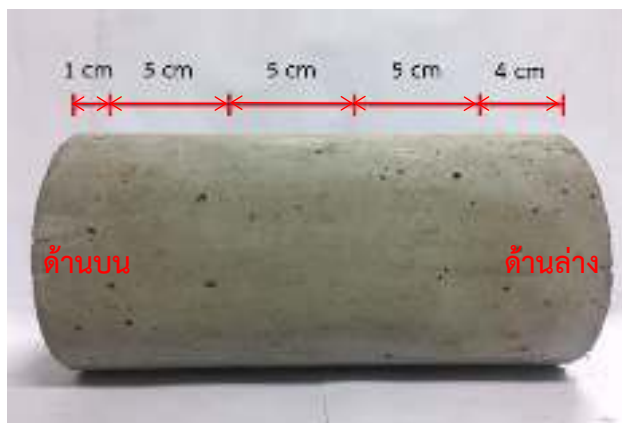


รูปที่ 3.16 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

3.2.2 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT)

วิธีการทดสอบ

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยใช้ส่วนผสมตามตารางที่ 3.3 และถอดแบบเมื่ออายุคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนอายุตัวอย่าง ครบ 28, 56 และ 91 วัน
2. เมื่อตัวอย่างคอนกรีตอายุครบ 28, 56 และ 91 วัน นำตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำทิ้งไว้ให้แห้งและนำไปตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร ระยะการตัดดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยเขียนลำดับชั้น 1, 2 และ 3 จากด้านบนสุด พร้อมทั้งเขียนลูกศรเพื่อบ่งบอกด้านหัวและด้านท้าย



รูปที่ 3.17 ระยะการตัดตัวอย่าง



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร

3. นำตัวอย่างมาประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ จากนั้นทดสอบการร่วซึมด้วยน้ำเปล่า ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การประกอบตัวอย่างเข้ากับเซลล์ทดสอบ

4. เตรียมสารละลาย NaCl เข้มข้น 3.0% โดยการชั่งน้ำหนัก NaCl 30 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรสารครบ 1,000 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยใช้แท่งแก้วคนสาร จนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การเตรียมสารละลาย NaCl

5. เตรียมสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.3M โดยการชั่งน้ำหนัก NaOH 12 กรัม จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนมี ปริมาตรครบ 1,000 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยใช้แท่งแก้วคนสาร จนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การเตรียมสารละลาย NaOH

6. เติมสารละลาย NaCl เข้มข้น 3.0% และสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.3M ในเซลล์ทดสอบตามชื่อที่ติดอยู่บนเซลล์ทดสอบ
7. ต่อสายไฟจากเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ทดสอบ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 60V ต่อขั้วบวกเข้ากับสารละลาย NaOH และต่อขั้วลบเข้ากับสารละลาย NaCl จากนั้นเปิดเครื่องและวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไปยังเซลล์ทดสอบด้วยมัลติมิเตอร์ดิจิทัล (Digital Multimeter) ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 วิธีการต่อสายไฟจากเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าเข้ากับเซลล์ทดสอบ

8. เปิดโปรแกรม RAPID CHLORIDE ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ไอคอนโปรแกรม RAPID CHLORIDE

9. เมื่อเปิดโปรแกรมแล้ว จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.24 เลือกคำสั่ง TESTING



รูปที่ 3.24 หน้าต่างโปรแกรม RAPID CHLORIDE

10. กดปุ่ม START เพื่อเริ่มการทดสอบ และรอจนโปรแกรมทดสอบครบ 360 นาที กด SAVE เลือกโพลเดอร์ที่ต้องการบันทึก โดยค่าที่ได้จะแสดงผลเป็นค่า Charge passed ในหน่วย Coulomb จากนั้นปิดเครื่องและทำความสะอาดเซลล์ทดสอบ ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 หน้าต่างโปรแกรม RAPID CHLORIDE สำหรับเริ่มทดสอบ

โดยเกณฑ์การพิจารณาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์พิจารณาการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202

Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
>4000	High
2,000-4,000	Moderate
1,000-2,000	Low
100-1,000	Very low
<100	Negligible

3.2.3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซในสารละลายคลอไรด์

การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ภายในตัวอย่างคอนกรีตตามวิธี ASTM C1152 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) และทดสอบหาปริมาณสารคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ภายในตัวอย่างคอนกรีตตามวิธีการทดสอบ ASTM C1218 ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble chloride) ซึ่งการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและปริมาณคลอไรด์อิสระ พิจารณาจุดยุติของปฏิกิริยาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกวิธีการหาปริมาณคลอไรด์นี้ว่า Potentiometric titration หลังจากนั้นแสดงผลการทดสอบที่ได้เป็นกราฟปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ระยะความลึกเฉลี่ย 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, และ 4.5 เซนติเมตร จากผิวด้านนอก โดยมีรายละเอียดของวิธีการทดสอบดังนี้

3.2.3.1 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบ

วิธีการทดสอบ

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยใช้สัดส่วนผสมตามตารางที่ 3.3 และถอดแบบเมื่ออายุคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนอายุตัวอย่างครบ 28 วัน
2. นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ทิ้งไว้จนแห้งและนำมาเคลือบอีพ็อกซี ดังรูปที่ 3.26 ยกเว้นบริเวณด้านบนของตัวอย่างเพื่อให้ คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปได้ ทิ้งไว้จนอีพ็อกซีแห้งสนิทและนำไปแช่ในสารละลายคลอไรด์เข้มข้น 3.0% (โดยชั่ง NaCl 49.44 กรัม ละลายในน้ำ 1,000 ลูกบาศก์เมตร) เป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน



รูปที่ 3.26 การเคลือบอีพ็อกซี

3. เมื่อแช่ตัวอย่างจนอายุครบ 28, 56 และ 91 วัน แล้วนำตัวอย่างขึ้นมาตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร จำนวน 5 ชิ้น ที่ระดับความลึก 1, 2, 3, 4 และ 5 เซนติเมตร จากผิวด้านบนสุด
4. นำชิ้นคอนกรีตที่ตัดมาบดให้เป็นผงละเอียด โดยแยกตามระดับความลึก ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ผงคอนกรีตที่บดละเอียด และแยกตามระดับความลึก

5. ชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.28



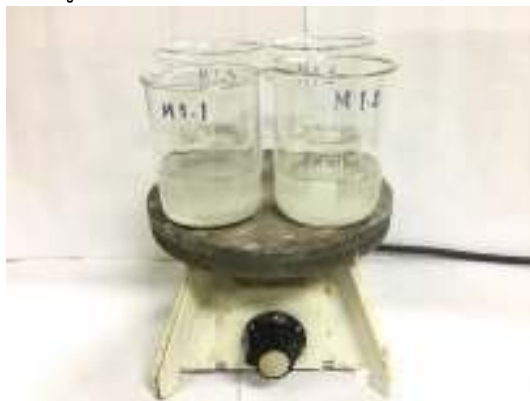
รูปที่ 3.28 ตัวอย่าง 5 กรัม และน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร

6. เติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 69% ที่เจือจางในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 25 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 กรดไนตริกเข้มข้น 69%

7. นำตัวอย่างไปให้ความร้อนเพื่อเร่งการทำปฏิกิริยา โดยต้มให้เดือด 2-3 นาที จากนั้นนำมาวางพักไว้ให้เย็นก่อนนำไปกรอง ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 ต้มตัวอย่างเพื่อเร่งการทำปฏิกิริยา

8. นำกระดาษกรองมาวางในกรวยกรอง โดยให้กรวยกรองอยู่บนขวดรูปชมพู่ ต่อสายยางเข้ากับเครื่องดูดและขวดรูปชมพู่ ดังรูปที่ 3.31 และดังรูปที่ 3.32 เปิดเครื่องดูดและฉีดน้ำกลั่นลงบนกระดาษกรองให้เปียกเล็กน้อย เพื่อให้กระดาษแนบสนิทกับกรวยกรอง สังเกตดูไม่ให้มีรูรั่วที่จะทำให้ผงตกลงไป เทสารในปิกเกอร์ลงในกรวยกรองและใช้น้ำกลั่นฉีดทำความสะอาดปิกเกอร์



รูปที่ 3.31 เครื่องดูด (Suction apparatus)



รูปที่ 3.32 การกรองตัวอย่าง

9. นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration โดยวางบีกเกอร์สารบนเครื่องกวนแม่เหล็ก เริ่มกวนอย่างช้าๆ เครื่องทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า เมื่อถึงจุดยุติ (End point) จอแสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณซิลเวอร์ไนเตรตที่ใช้และประจุ ทำการบันทึกผลที่ได้ ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 การทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration

3.2.3.2 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์อิสระในระบบ

วิธีการทดสอบ

1. ทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในระบบตามข้อ 1-4
2. ชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
3. นำตัวอย่างไปให้ความร้อนเพื่อเร่งการทำปฏิกิริยา โดยต้มให้เดือด 2-3 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงนำมากรอง

4. นำกระดาษกรองมาวางในกรวยกรอง โดยให้กรวยกรองอยู่บนขวดรูปชมพู่ ต่อสายยางเข้ากับเครื่องดูดและขวดรูปชมพู่ และเปิดเครื่องดูดและฉีดน้ำกลั่นลงบนกระดาษกรองให้เปียกเล็กน้อย เพื่อให้กระดาษแนบสนิทกับกรวยกรอง สังเกตดูไม่ให้มีรูรั่วที่จะทำให้ผงตกลงไป เทสารในบีกเกอร์ลงในกรวยกรองและใช้น้ำกลั่นฉีดทำความสะอาดบีกเกอร์
5. นำสารที่กรองได้มาเติมสารละลายกรดไนตริก ที่เจือจางในอัตราส่วน 1:1 ลงไป 3 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30% ลงไป 3 มิลลิลิตรดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) 30%

6. นำตัวอย่างไปให้ความร้อนเพื่อเร่งการทำปฏิกิริยา โดยต้มให้เดือด 2-3 นาที จากนั้นพักไว้ให้เย็นจึงนำไปทดสอบ
7. นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Potentiometric titration โดยวางบีกเกอร์สารบนเครื่องกวนแม่เหล็ก เริ่มกวนอย่างช้าๆ เครื่องทำการไตเตรทให้โดยอัตโนมัติโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าเมื่อถึงจุดยุติ (End point) แสดงปริมาณคลอไรด์และปริมาณซิลเวอร์ไนเตรตที่ใช้และประจุ ทำการบันทึกผลที่ได้
8. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์

จากผลการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์แบบแซนในสารละลายสามารถนำมาคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_a) ในคอนกรีตได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 3.1 ในกรณีที่ D_a มีค่าต่ำหมายความว่า การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าน้อย

$$C(x, t) = (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{C}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] + C_0 \quad (3.1)$$

โดย $C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)
 $C_f(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์อิสระที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)
 D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (เซนติเมตร²/ปี)
 x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (เซนติเมตร)
 t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)

3.2.4. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

วิธีการทดสอบ

1. หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร โดยใช้สัดส่วนผสมตามตารางที่ 3.3 และถอดแบบเมื่ออายุคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนอายุตัวอย่างครบ 28, 56 และ 91 วัน
2. เมื่ออายุตัวอย่างครบ 28, 56 และ 91 วันแล้ว นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก
3. นำตัวอย่างไปทดสอบหาลังอัดของคอนกรีต ดังรูปที่ 3.35 บันทึกผลที่ได้จากเครื่องทดสอบหาลังอัด



รูปที่ 3.35 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

บทที่ 4

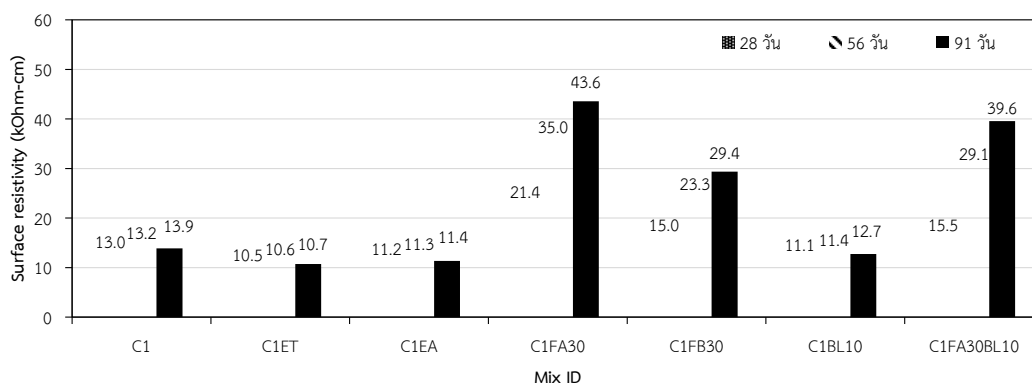
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต (Electrical resistivity)

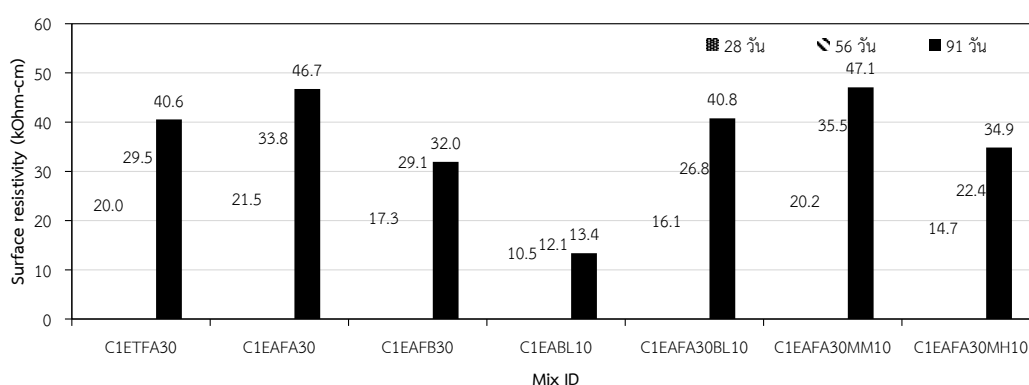
4.1.1 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต (Surface electrical resistivity)

4.1.1.1 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อคอนกรีต

จากรูปที่ 4.1 พิจารณาระยะเวลาการบ่มที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีอายุการบ่มนานกว่า มีความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าที่ผิวได้ดีกว่า เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ความพรุนน้อยลง ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากขึ้นด้วย



ก. ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

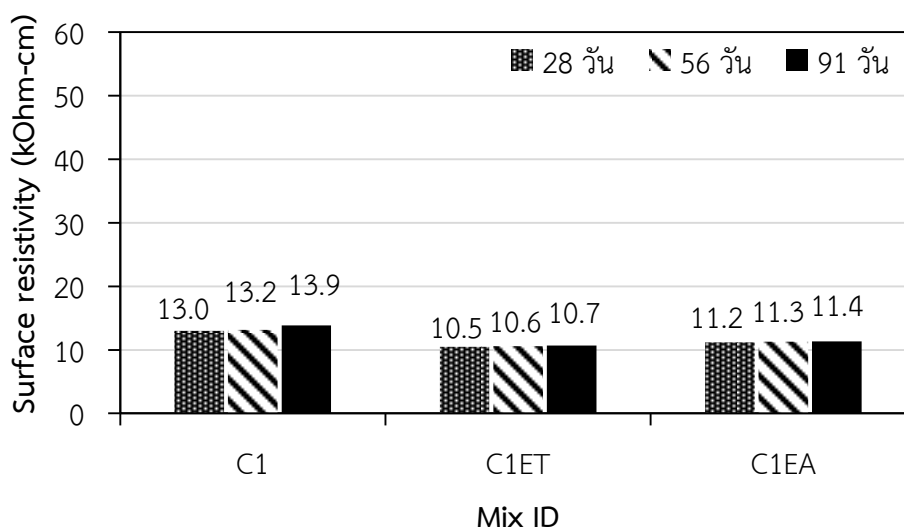


ข. ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

รูปที่ 4.1 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

4.1.1.2 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

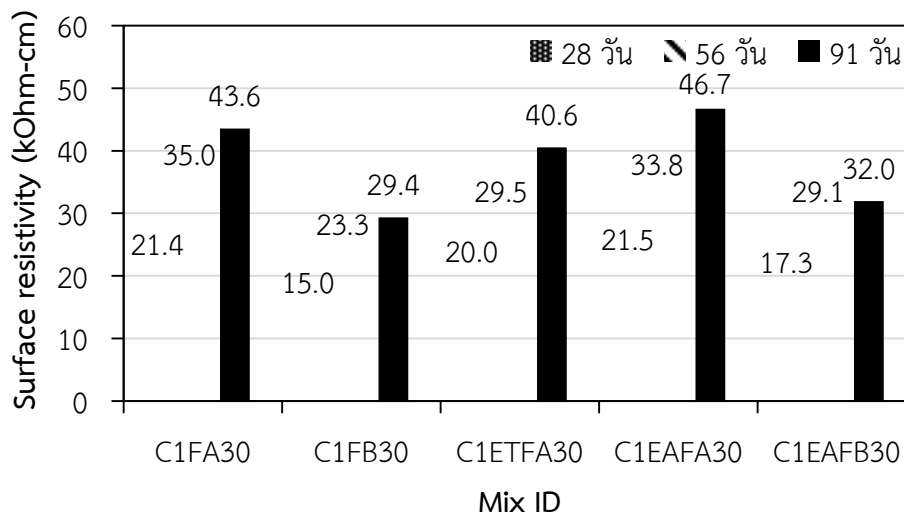
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว ET เนื่องจากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเอททริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ด้วยเหตุนี้สารขยายตัว EA มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) มากกว่าสารขยายตัว ET ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของสารขยายตัว EA มากกว่าสารขยายตัว ET แต่ทั้งนี้ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) จะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวจึงมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.2 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

4.1.1.3 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

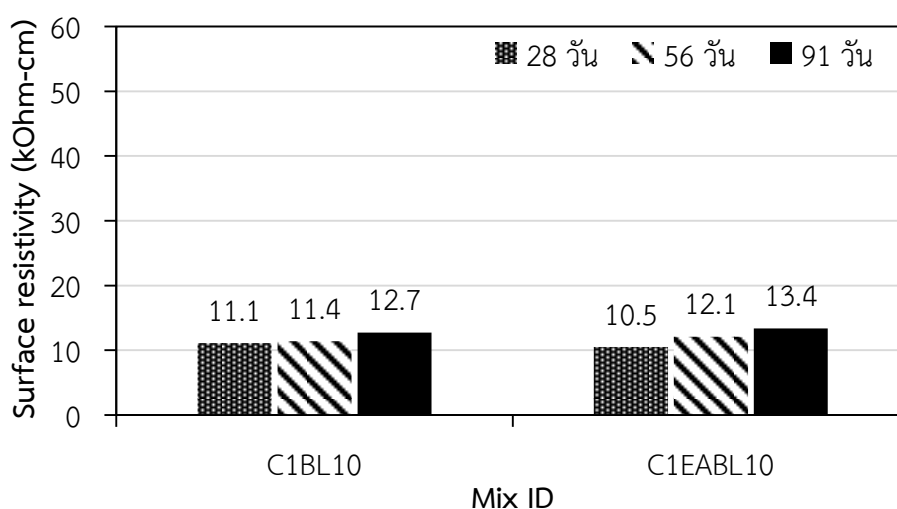
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB เนื่องจากเถ้าลอย FA มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือ จากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานนิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นสำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB (High FL และ High SO_3) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทำให้โพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันเป็นเหตุให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวลดลง และเมื่อนำมาผสมกับสารขยายตัวพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA กับสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA กับสารขยายตัว ET เนื่องจากสารขยายตัว EA มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) มากกว่าสารขยายตัว ET ซึ่งซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) สามารถทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของสารขยายตัว EA ดีกว่าสารขยายตัว ET



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

4.1.1.4 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสม เถ้าก้นเตา

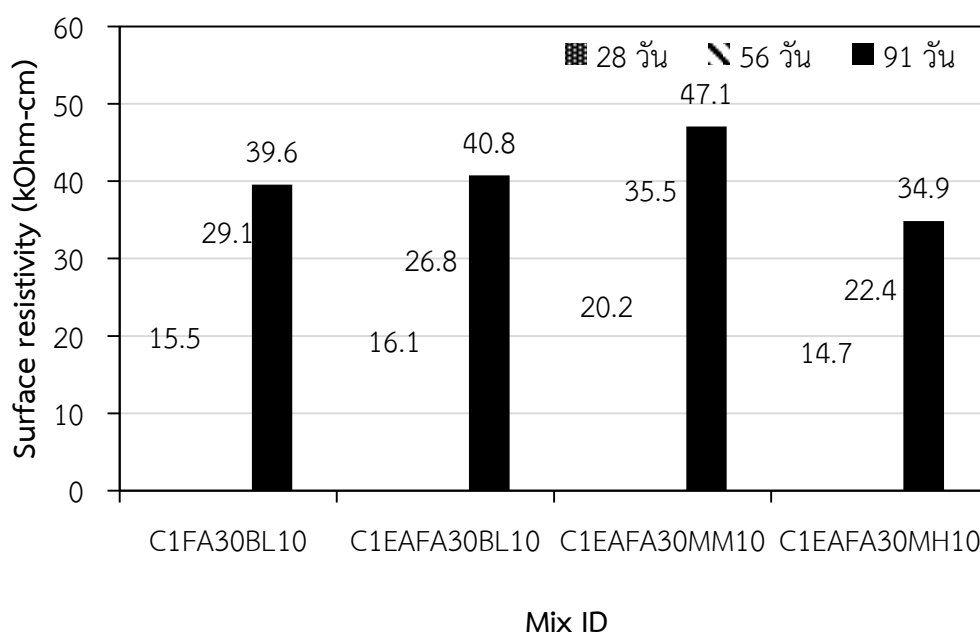
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL และสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวในช่วงอายุต้นน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL แต่ในระยะยาวคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL และสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากกว่าเนื่องจากเถ้าก้นเตาสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้รวมไปถึงเป็นวัสดุบ่มภายใน และบางส่วนของเถ้าก้นเตามีเถ้าลอยแทรกตัวอยู่ซึ่งเถ้าลอยในส่วนนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้



รูปที่ 4.4 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

4.1.1.5 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

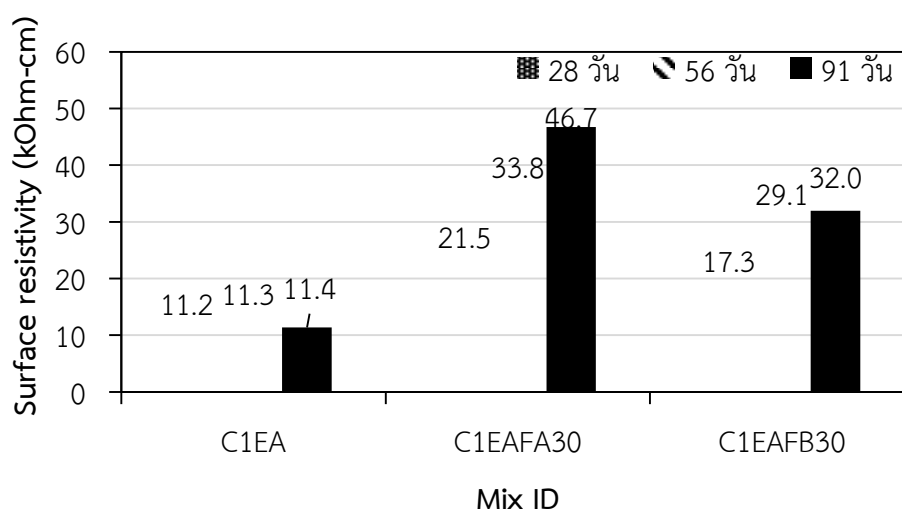
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตาชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำ ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากที่สุด



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

4.1.1.6. ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

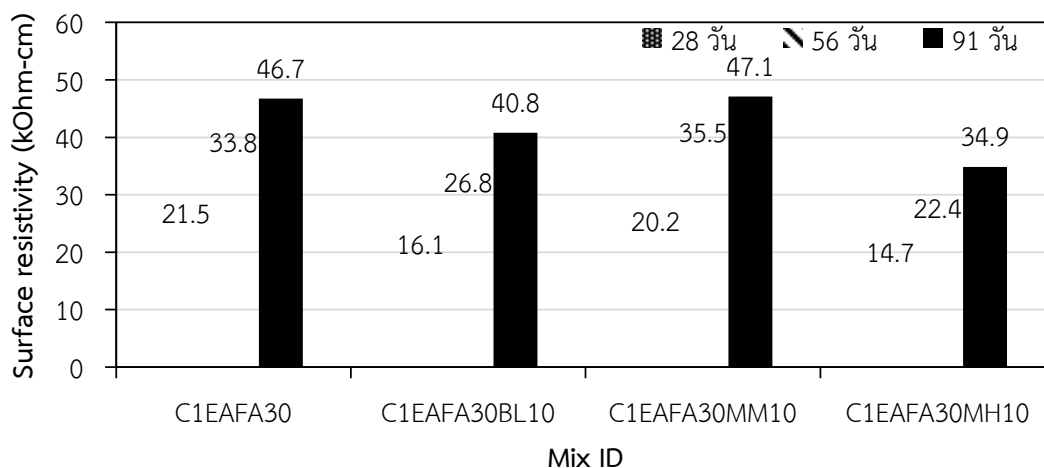
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA และเถ้าลอย FA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA เถ้าลอย FB เนื่องจากเถ้าลอย FA มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB (High FL และ High SO₃) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทำให้โพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันเป็นเหตุให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวลดลง



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

4.1.1.7 ผลกระทบของชนิดเถ้าก้นเตาต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตาชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำ ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวมากที่สุด

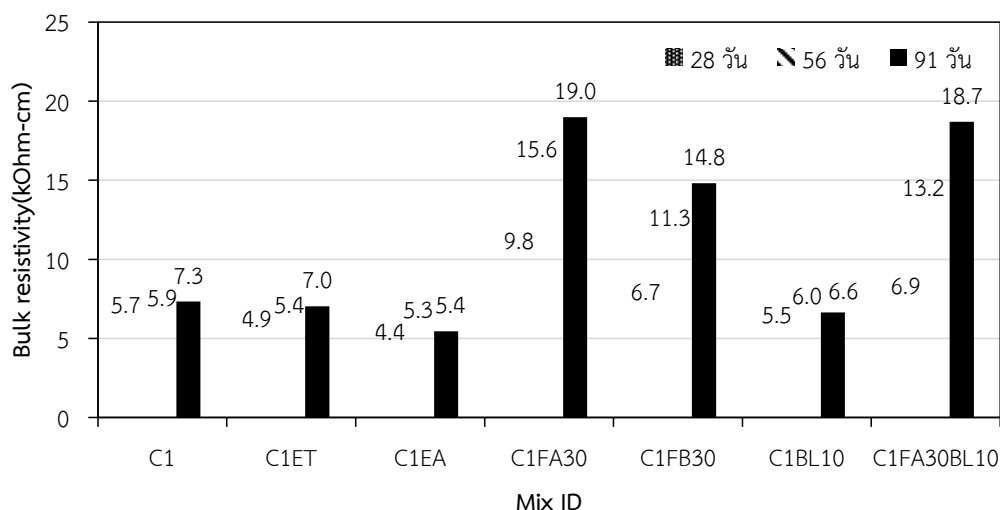


รูปที่ 4.7 ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

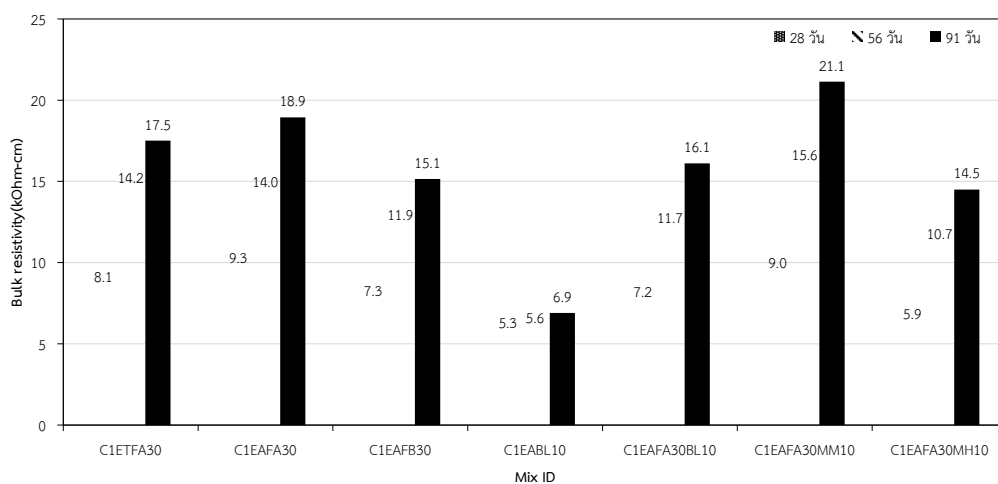
4.1.2 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต (Bulk electrical resistivity)

4.1.2.1 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อของคอนกรีต

จากรูปที่ 4.8 พิจารณาระยะเวลาการบ่มที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน พบว่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ระยะเวลา 91 วัน ดีที่สุด เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ ทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำมากขึ้น ความพรุนน้อยลง ส่งผลให้ไฟฟ้าเคลื่อนผ่านได้น้อยลง



ก. ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

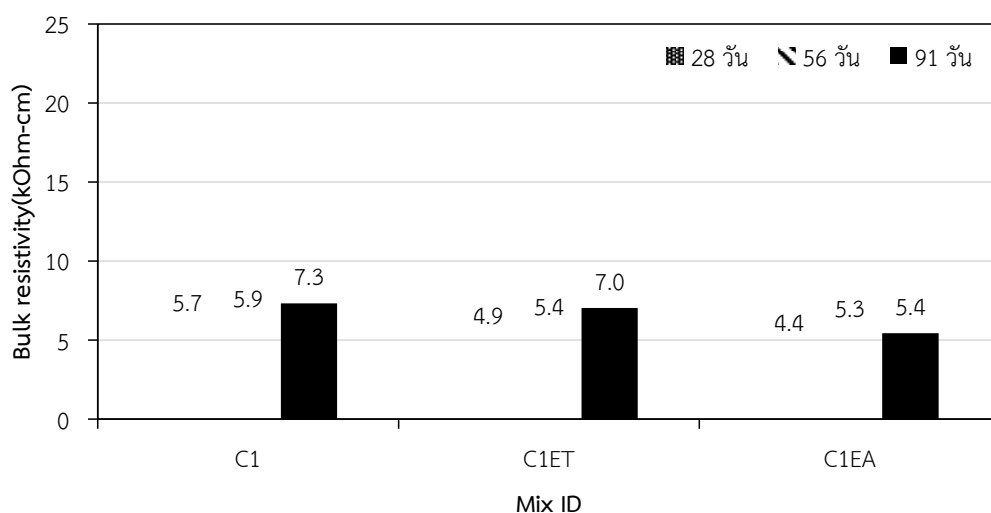


ข. ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

รูปที่ 4.8 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

4.1.2.2 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

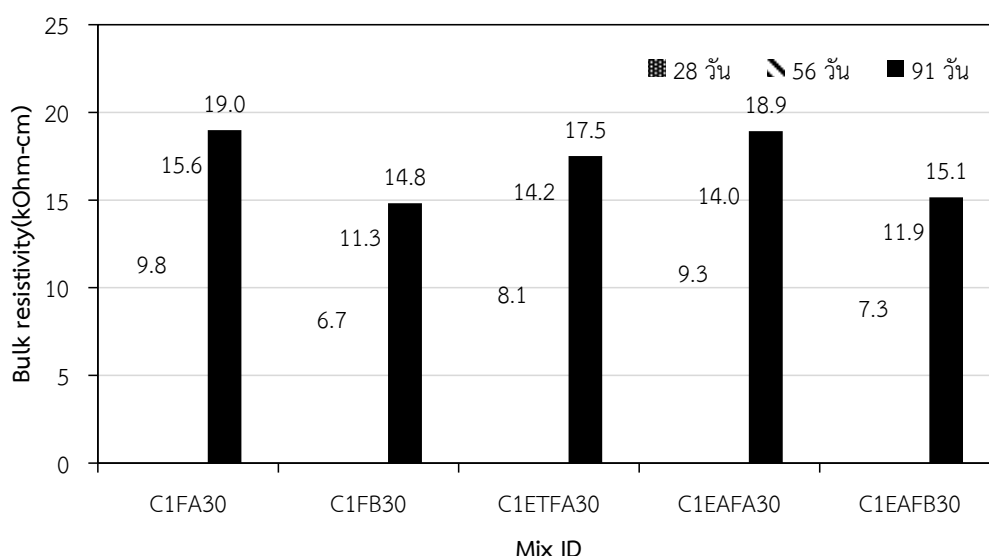
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว ET เนื่องจากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ด้วยเหตุนี้สารขยายตัว EA มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) มากกว่าสารขยายตัว ET ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของสารขยายตัว EA ดีกว่าสารขยายตัว ET แต่ทั้งนี้ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) จะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวจึงมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

4.1.2.3 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

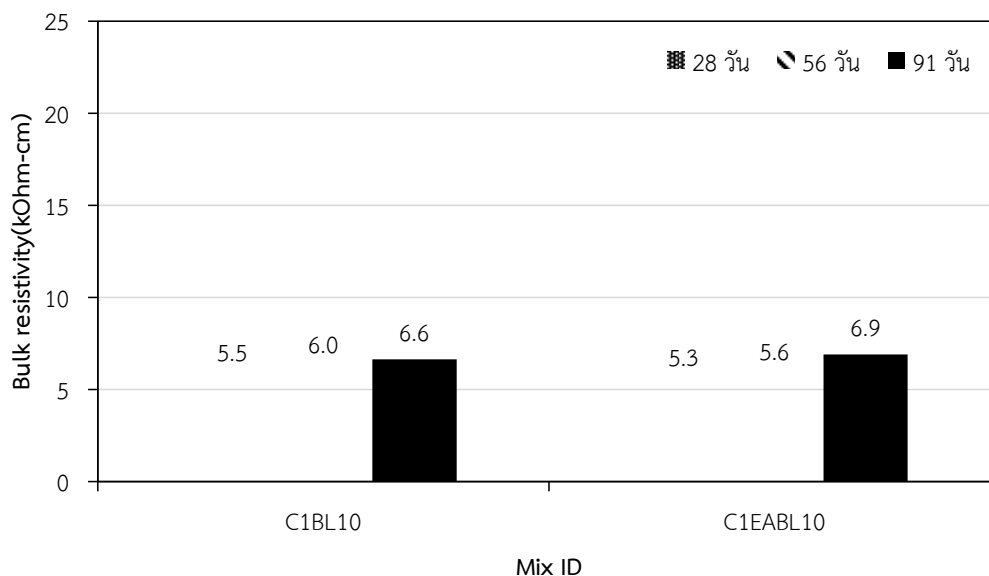
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB เนื่องจากเถ้าลอย FA มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB (High FL และ High SO_3) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทำให้โพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันเป็นเหตุให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดลดลง และเมื่อนำมาผสมกับสารขยายตัวพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA กับสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA กับสารขยายตัว ET เนื่องจากสารขยายตัว EA มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) มากกว่าสารขยายตัว ET ซึ่งซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) สามารถทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเอททริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของสารขยายตัว EA ดีกว่าสารขยายตัว ET



รูปที่ 4.10 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

4.1.2.4 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

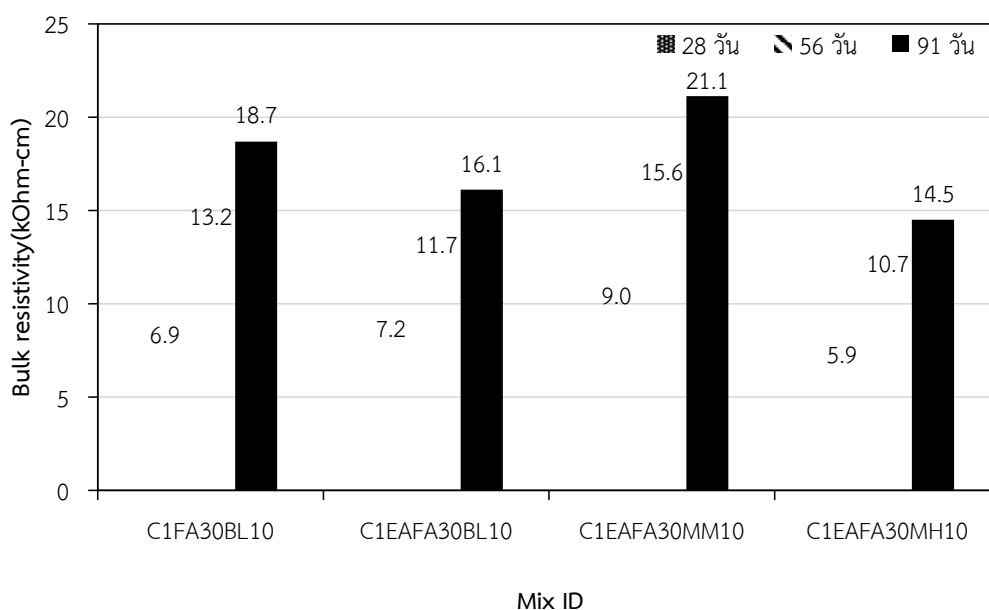
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL และสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดในช่วงอายุต้นน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL แต่ในระยะยาวคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL และสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมากกว่าเนื่องจากเถ้าก้นเตาสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้รวมไปถึงเป็นวัสดุบ่มภายใน และบางส่วนของเถ้าก้นเตามีเถ้าลอยแทรกตัวอยู่ซึ่งเถ้าลอยในส่วนนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้



รูปที่ 4.11 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

4.1.2.5 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

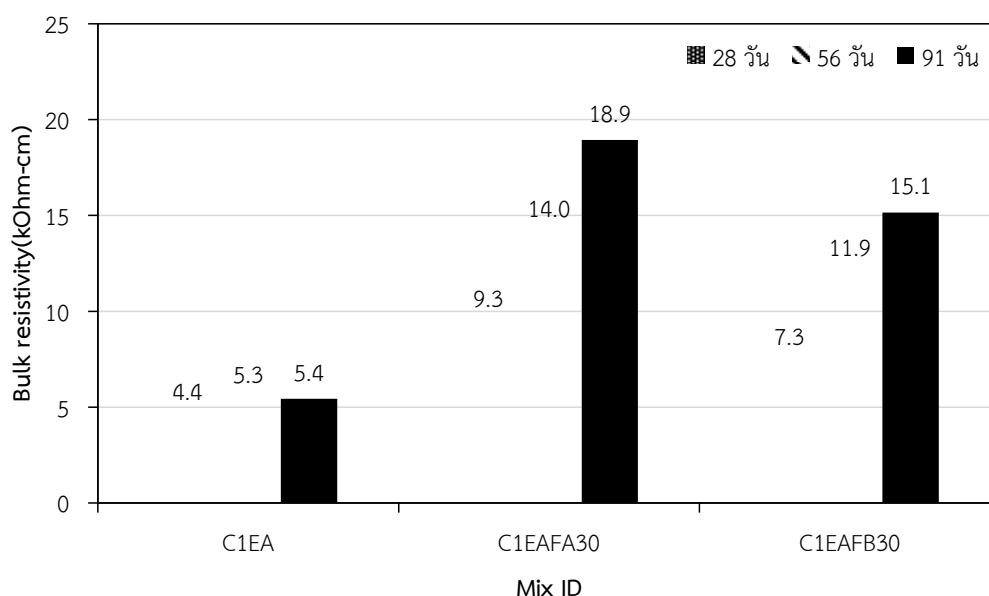
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตาชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมากที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมากที่สุด



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

4.1.2.6 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

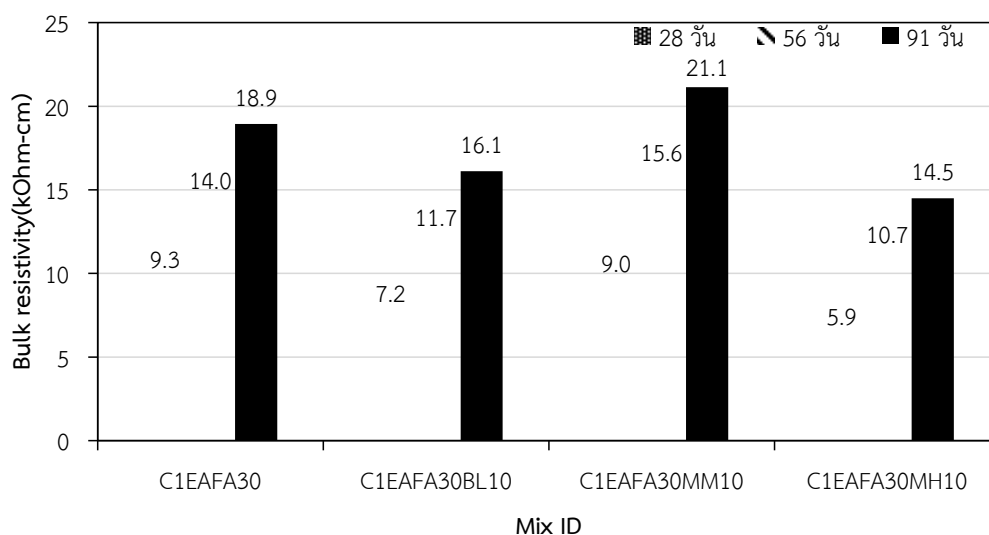
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA และเถ้าลอย FA มีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA เถ้าลอย FB เนื่องจากเถ้าลอย FA มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB (High FL และ High SO_3) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทำให้โพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันเป็นเหตุให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลง



รูปที่ 4.13 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

4.1.2.7 ผลกระทบของชนิดเถ้าก้นเตาต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตาชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมากที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่าทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำ ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดมากที่สุด



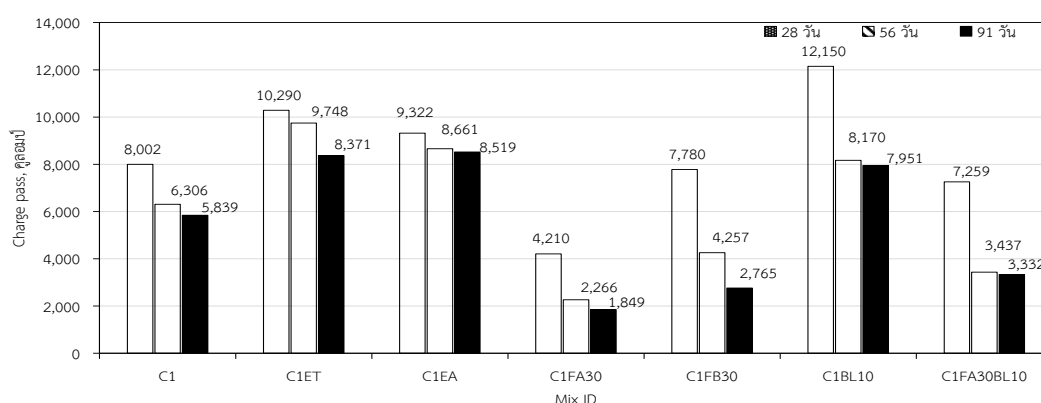
รูปที่ 4.14 ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

4.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

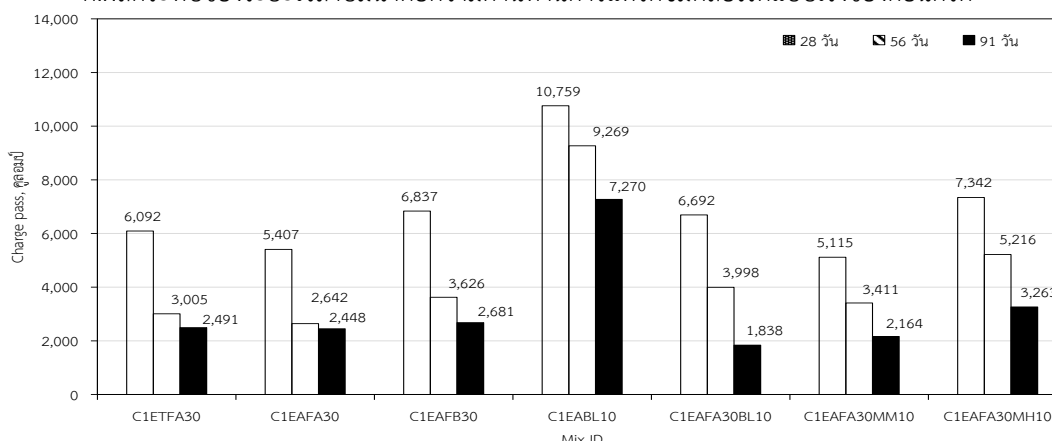
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต สามารถพิจารณาได้จากการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ซึ่งถูกแสดงด้วยค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตในหน่วยคูลอมบ์ (Coulomb) โดยเมื่อมีปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำ หมายถึงมีการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงต่ำ จะส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้

4.2.1 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อคอนกรีต

จากรูปที่ 4.15 พิจารณาระยะเวลาการบ่มที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีอายุการบ่มนานกว่าจะมีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง และสมบูรณ์ ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ความพรุนน้อยลง การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านคอนกรีตได้น้อยลง



ก.ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

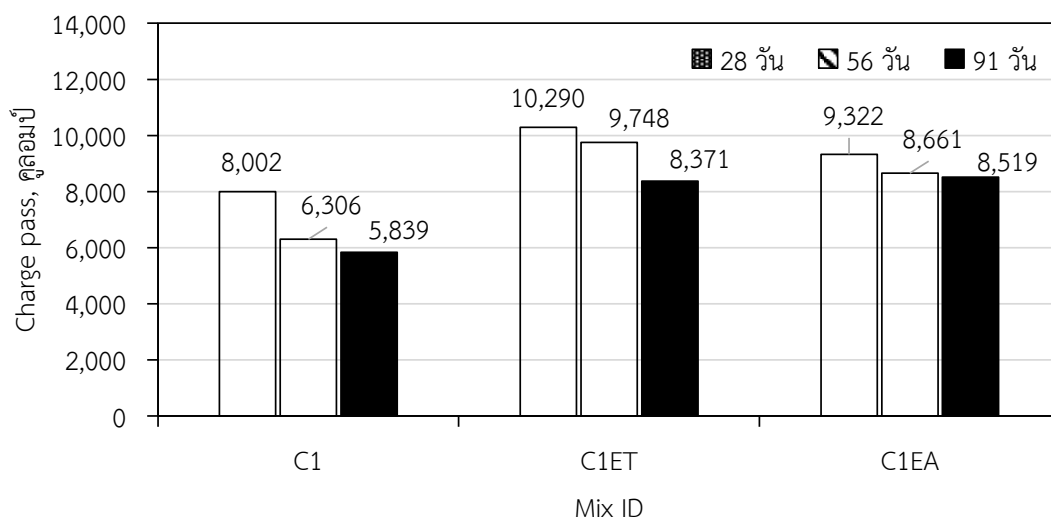


ข.ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

รูปที่ 4.15 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

4.2.2 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

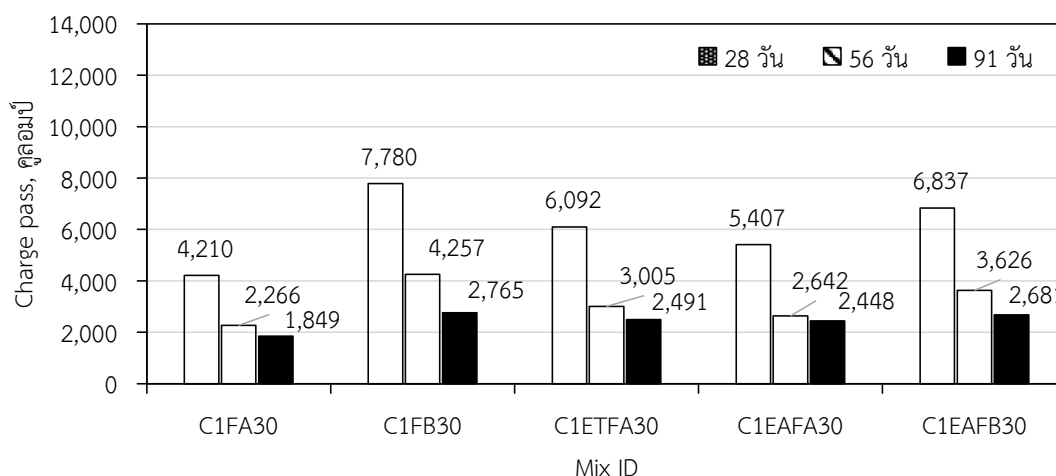
ผลการทดสอบ พบว่า เมื่อคอนกรีตผสมกับสารขยายตัว ทำให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้น้อยลงจากเดิมที่เป็นคอนกรีตซีเมนต์ล้วน โดยคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว ET เนื่องจากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ด้วยเหตุนี้สารขยายตัว EA มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) มากกว่าสารขยายตัว ET ทำให้ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของสารขยายตัว EA ดีกว่าสารขยายตัว ET แต่ทั้งนี้ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) จะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว ดังนั้นการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวจึงมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.16 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์
แบบแรงของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

4.2.3 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

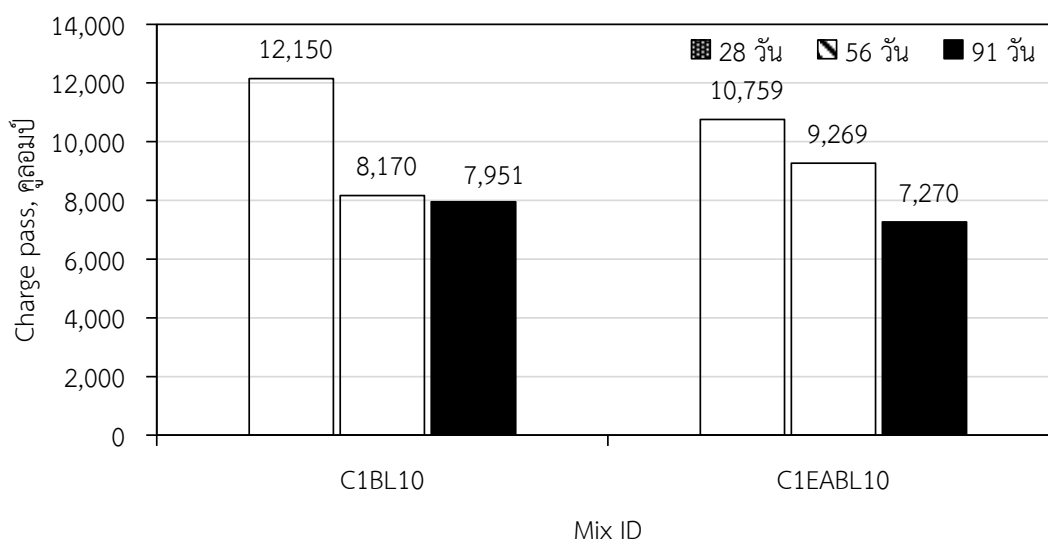
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB เนื่องจากเถ้าลอย FA มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือ จากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB (High FL และ High SO_3) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทำให้โพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันเป็นเหตุให้ค่าต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง และเมื่อนำมาผสมกับสารขยายตัวพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA กับสารขยายตัว EA มีค่าต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA กับสารขยายตัว ET เนื่องจากสารขยายตัว EA มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) มากกว่าสารขยายตัว ET ซึ่งซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) สามารถทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ค่าต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของสารขยายตัว EA ดีกว่าสารขยายตัว ET



รูปที่ 4.17 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์
แบบแรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

4.2.4 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

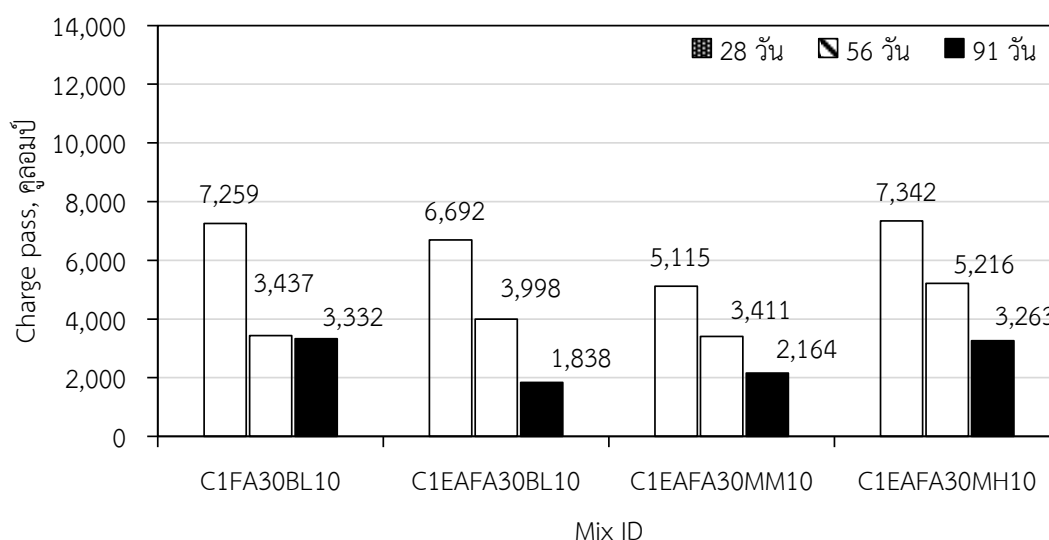
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL และสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในช่วงอายุต้นมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL แต่ในระยะยาว คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL และสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์น้อยกว่า เนื่องจากเถ้าก้นเตาสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้รวมไปถึงเป็นวัสดุปัมภายใน และบางส่วนของเถ้าก้นเตามีเถ้าลอยแทรกตัวอยู่ ซึ่งเถ้าลอยในส่วนนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้



รูปที่ 4.18 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

4.2.5 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

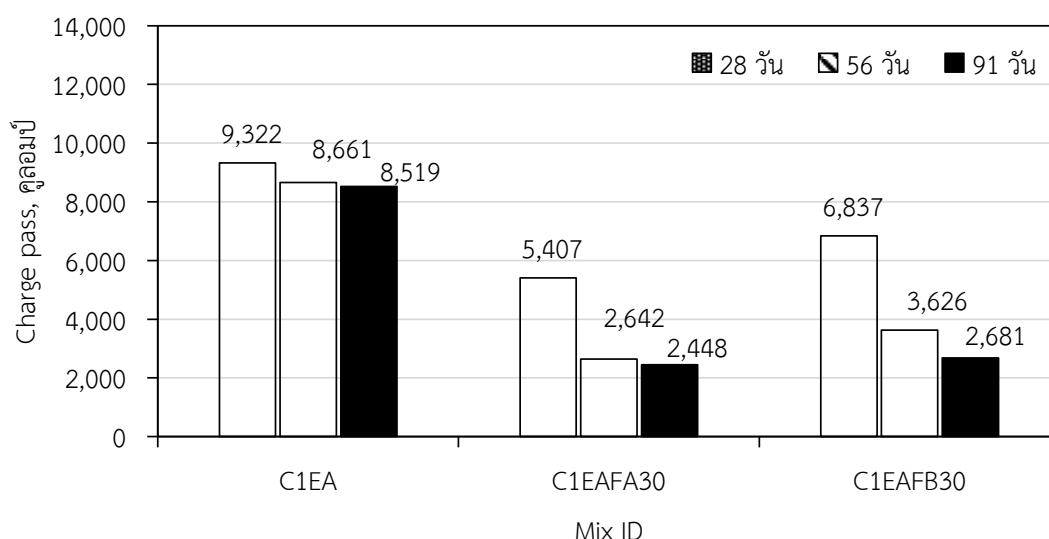
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตา ชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ ส่งผลให้ความสามารถในการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งน้อยกว่า



รูปที่ 4.19 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

4.2.6. ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

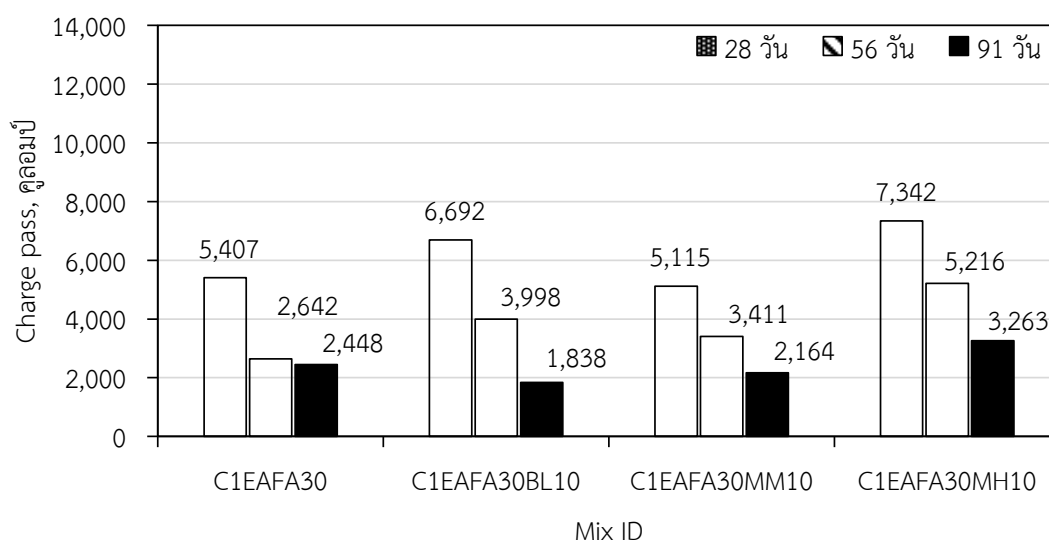
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ได้ดีขึ้นจากเดิมที่เป็นคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB เนื่องจากเถ้าลอย FA (High CaO) มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือ จากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB (High FL และ High SO₃) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทำให้โพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันเป็นเหตุให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตลดลง



รูปที่ 4.20 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

4.2.7 ผลกระทบของชนิดเถ้าก้นเตาต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตาชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ ส่งผลให้ความสามารถในการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งน้อยกว่า

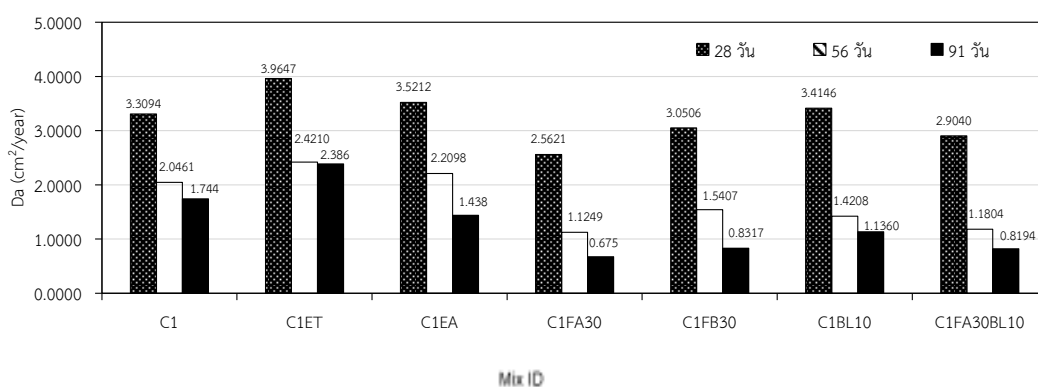


รูปที่ 4.21 ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

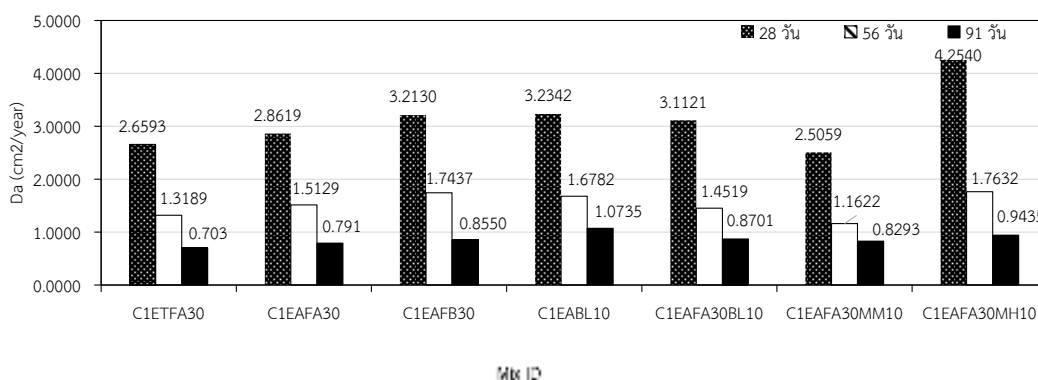
4.3 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

4.3.1 ผลกระทบของระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ต่อคอนกรีต

จากรูปที่ 4.22 ผลกระทบของระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคอนกรีต เมื่อพิจารณาระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 28, 56 และ 91 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์นานขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง เนื่องจากอายุคอนกรีตที่มากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาภายในเกิดได้สมบูรณ์ ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่น ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง



ก. ผลกระทบของระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

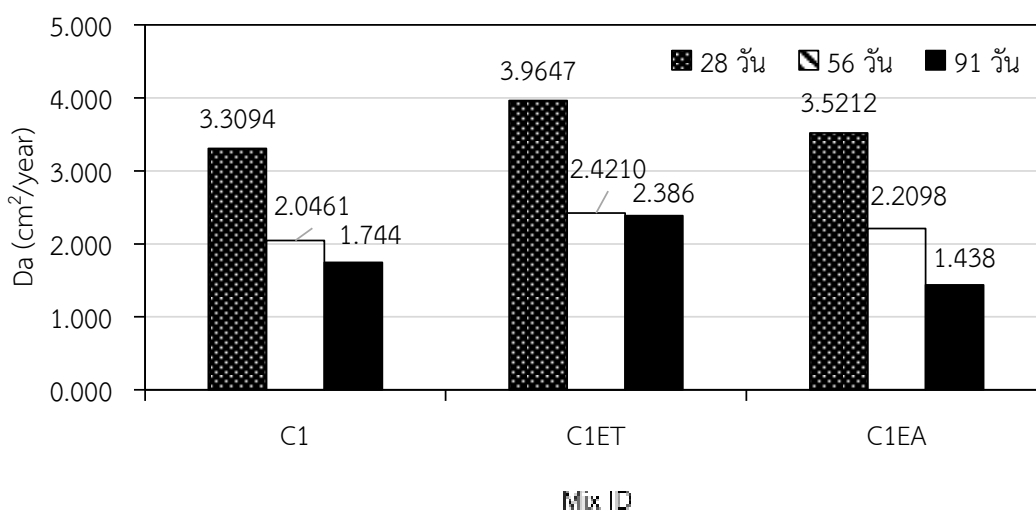


ข. ผลกระทบของระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 4.22 ผลกระทบของระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

4.3.2 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

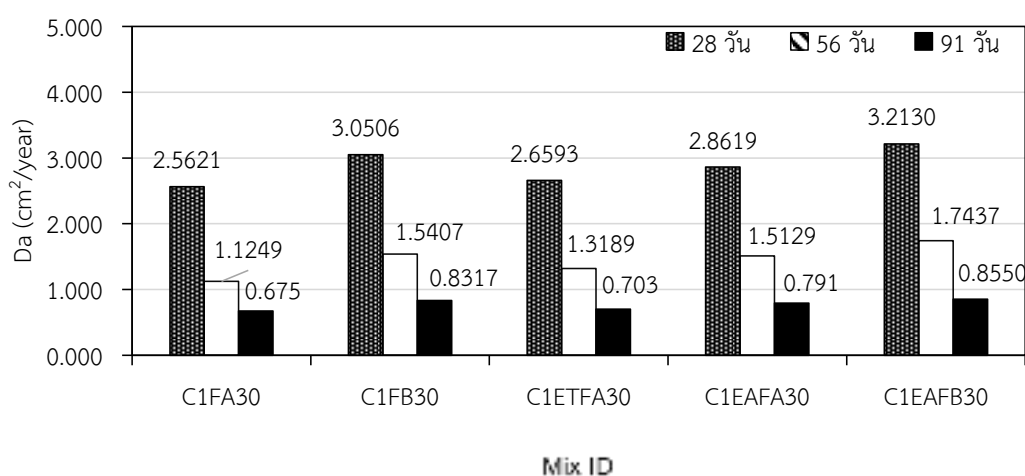
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว ET เนื่องจากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ด้วยเหตุนี้สารขยายตัว EA มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) มากกว่าสารขยายตัว ET ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ต่ำกว่าสารขยายตัว ET แต่ทั้งนี้ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) จะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว ดังนั้นการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวจึงมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.23 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

4.3.3 ผลกระทบของสารขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

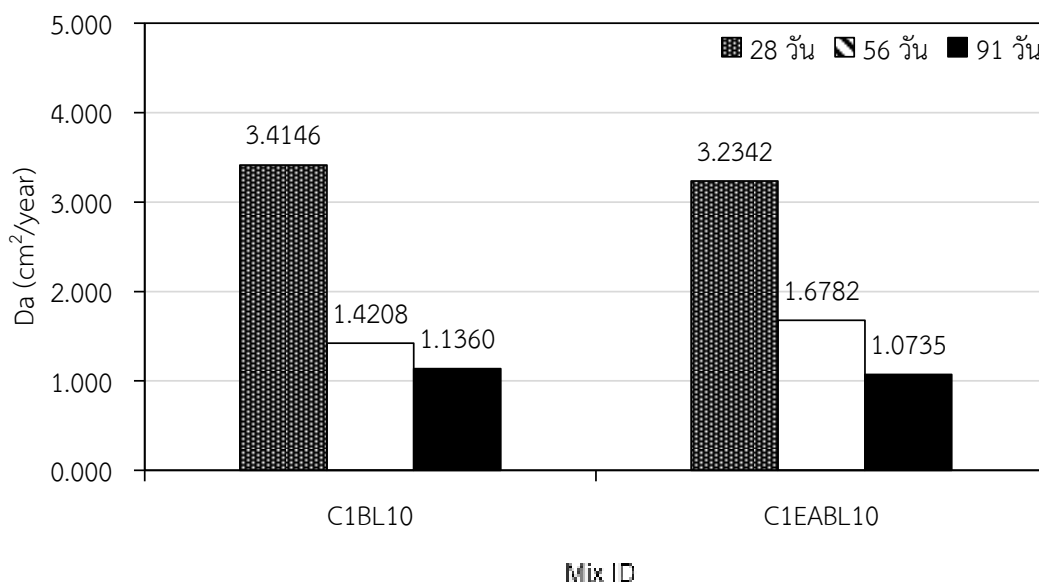
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA (High CaO) มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่น้อยที่สุด เนื่องจากเถ้าลอย FA (High CaO) มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA มีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่น้อยที่สุด



รูปที่ 4.24 ผลกระทบของสารขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

4.3.4 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

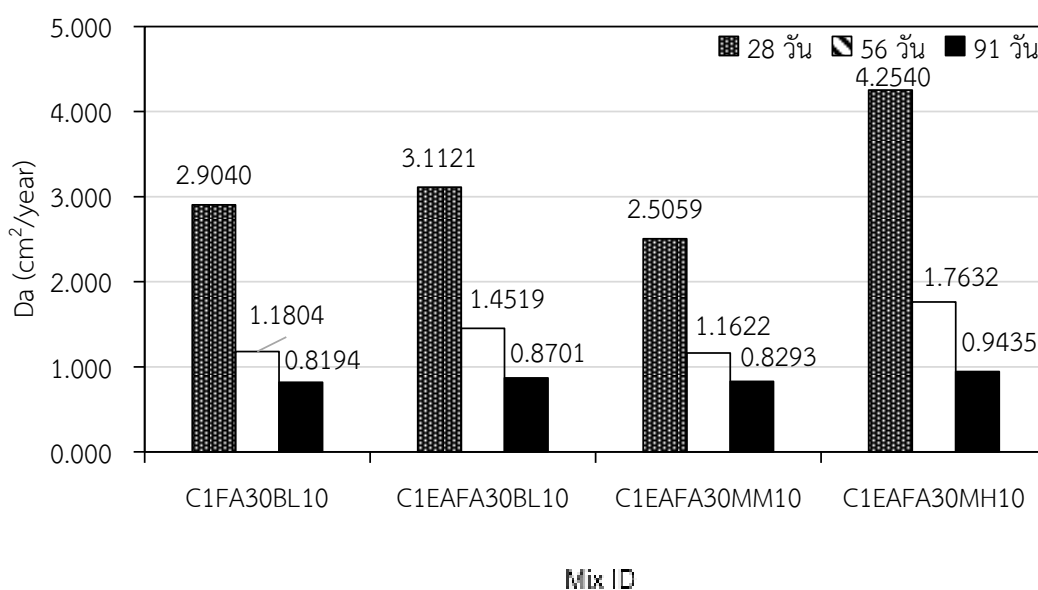
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL และสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ในช่วงอายุต้นมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL แต่ในระยะยาวคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL และสารขยายตัว EA มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์น้อยกว่าเนื่องจากเถ้าก้นเตาสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้รวมไปถึงเป็นวัสดุบ่มภายใน และบางส่วนของเถ้าก้นเตามีเถ้าลอยแทรกตัวอยู่ ซึ่งเถ้าลอยในส่วนนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้



รูปที่ 4.25 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

4.3.5 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

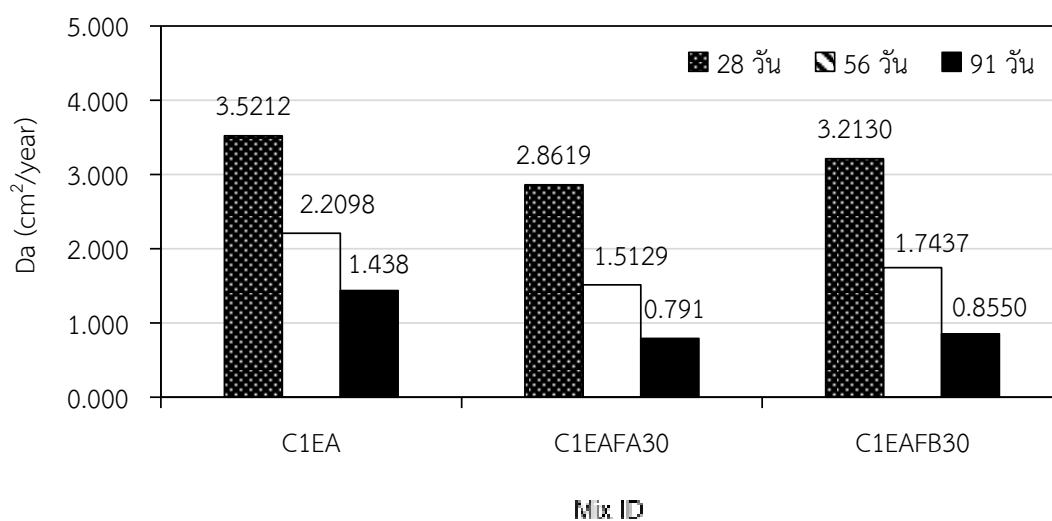
การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตาชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่น้อยที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.26 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

4.3.6 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

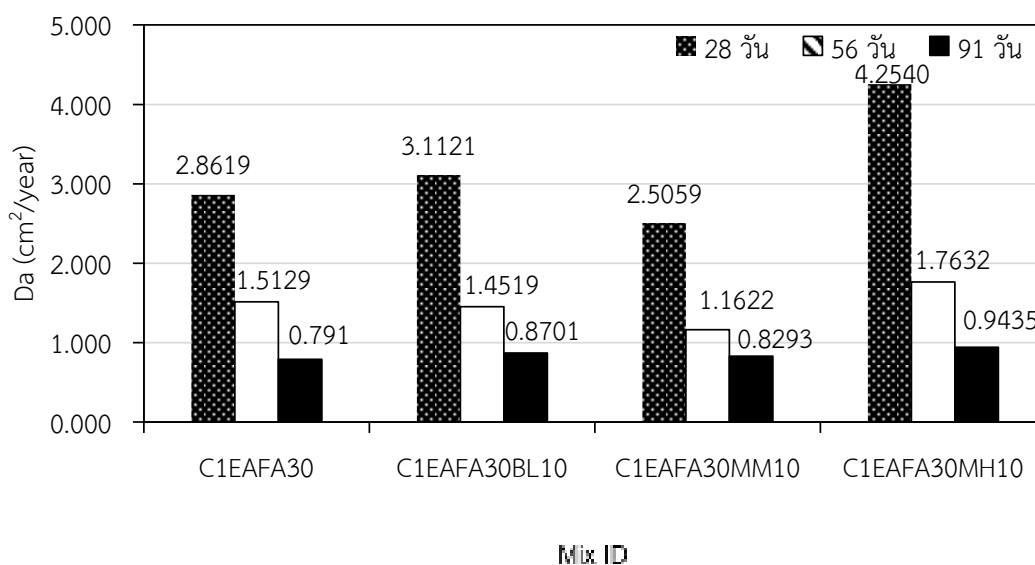
ผลการทดสอบ พบว่า เมื่อนำสารขยายตัว EA ผสมกับเถ้าลอย FA มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA และเถ้าลอย FB เนื่องจากเถ้าลอย FA มีปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) มากกว่าเถ้าลอย FB ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FA จึงมีความทึบน้ำมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB



รูปที่ 4.27 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

4.3.7 ผลกระทบของชนิดเถ้าก้นเตาต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

การทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตาชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่า

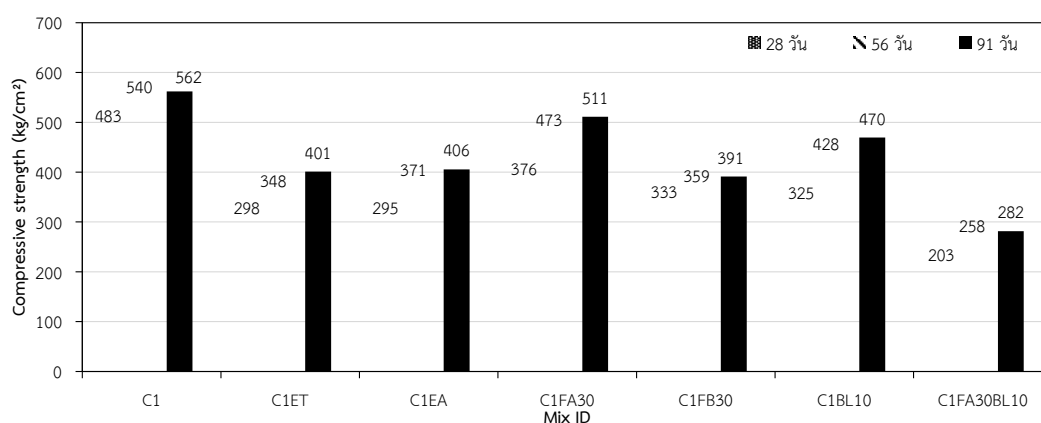


รูปที่ 4.28 ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

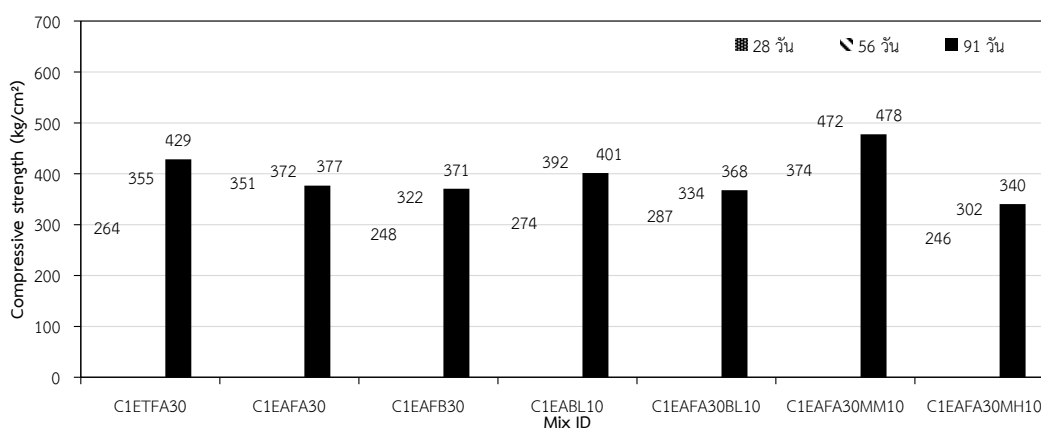
4.4 กำลังอัดของคอนกรีต

4.4.1 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อคอนกรีต

จากรูปที่ 4.29 พิจารณาระยะเวลาการบ่มที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 91 วัน มีค่ามากที่สุดในทุกส่วนผสม เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ คอนกรีตมีความชื้นน้ำมากขึ้น ความพรุนน้อยลง เป็นผลให้กำลังอัดมากขึ้นด้วย



ก. ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อกำลังอัดของคอนกรีต

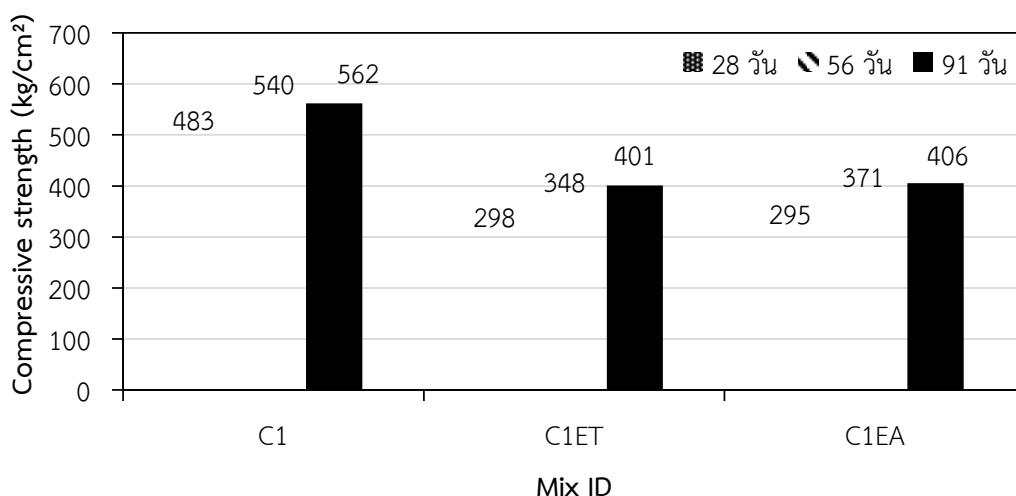


ข. ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อกำลังอัดของคอนกรีต

รูปที่ 4.29 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อกำลังอัดของคอนกรีต

4.4.2 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

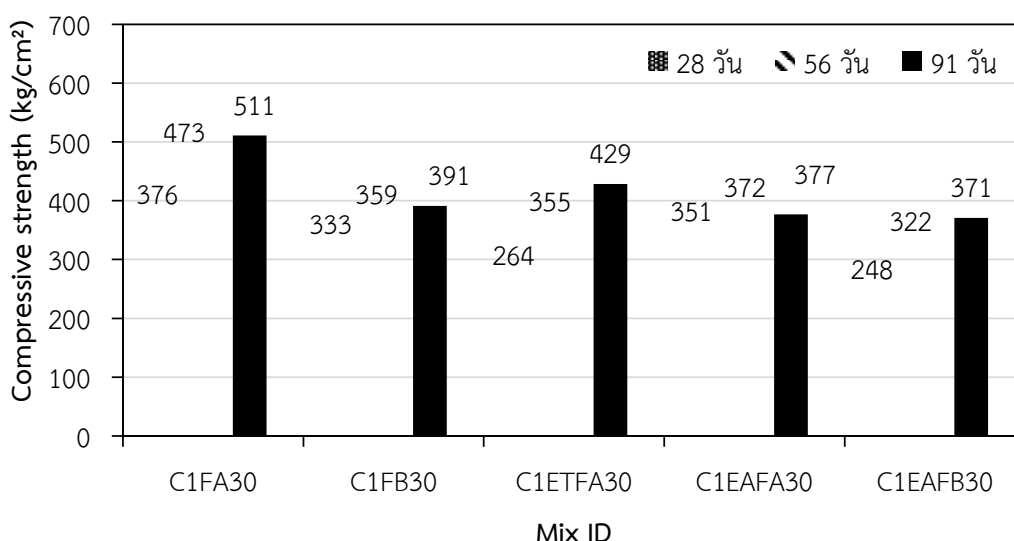
ผลการทดลอง พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว ET เนื่องจากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ด้วยเหตุนี้สารขยายตัว EA มีปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) มากกว่าสารขยายตัว ET ทำให้ค่ากำลังอัดของสารขยายตัว EA ดีกว่าสารขยายตัว ET แต่ทั้งนี้ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) จะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว ดังนั้นค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวจึงมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.30 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อกำลังอัดของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน

4.4.3 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

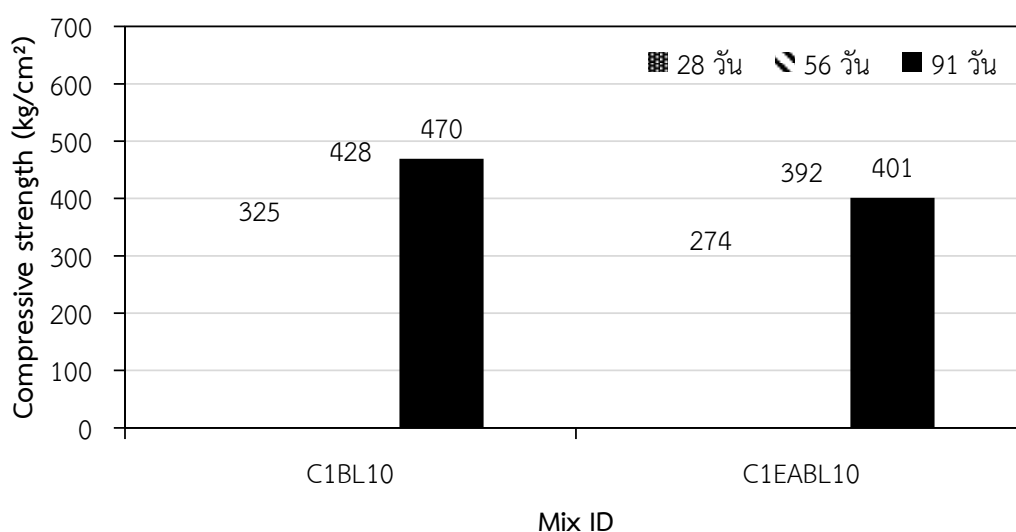
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA และเถ้าลอย FA มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB เนื่องจากเถ้าลอย FA มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิด เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้น สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB (High FL และ High SO_3) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทำให้โพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันเป็นเหตุให้ค่ากำลังอัดลดลง



รูปที่ 4.31 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย

4.4.4 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

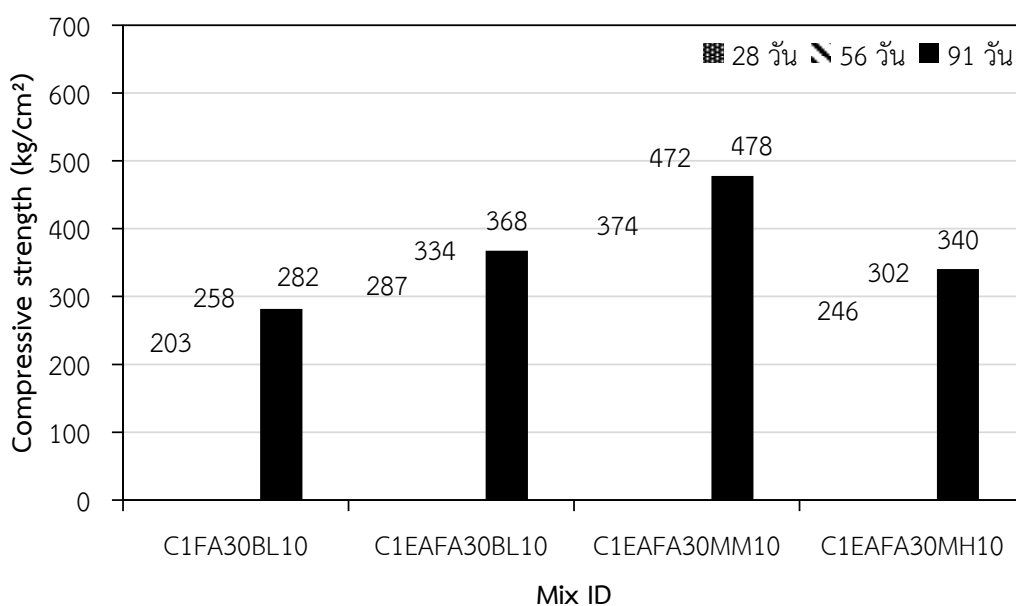
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL ค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา BL และสารขยายตัว EA เนื่องจากเถ้าก้นเตา BL มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากกว่าสารขยายตัว EA ซึ่งซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น



รูปที่ 4.32 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตา

4.4.5 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

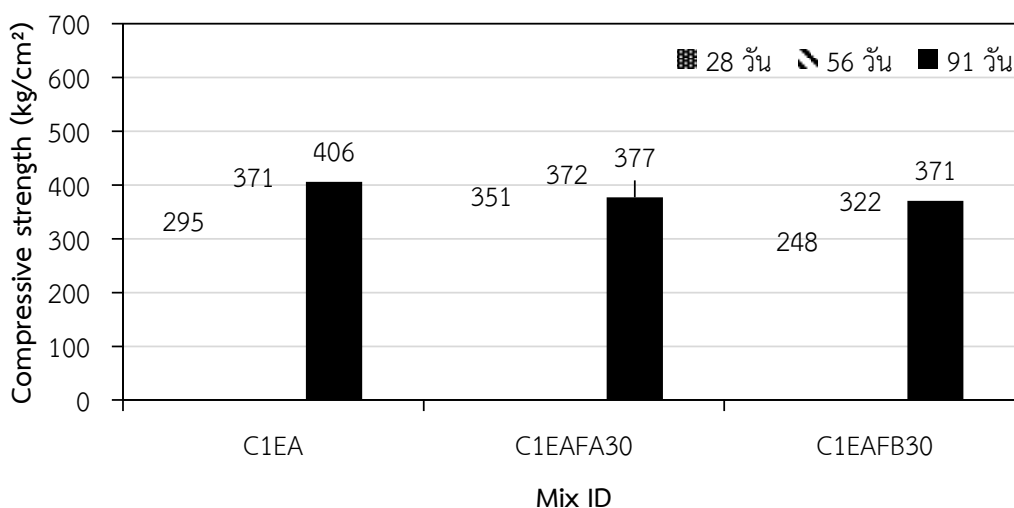
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตา ชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่ากำลังอัดมากที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.33 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำ



รูปที่ 4.33 ผลกระทบของสารขยายตัวต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

4.4.6 ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

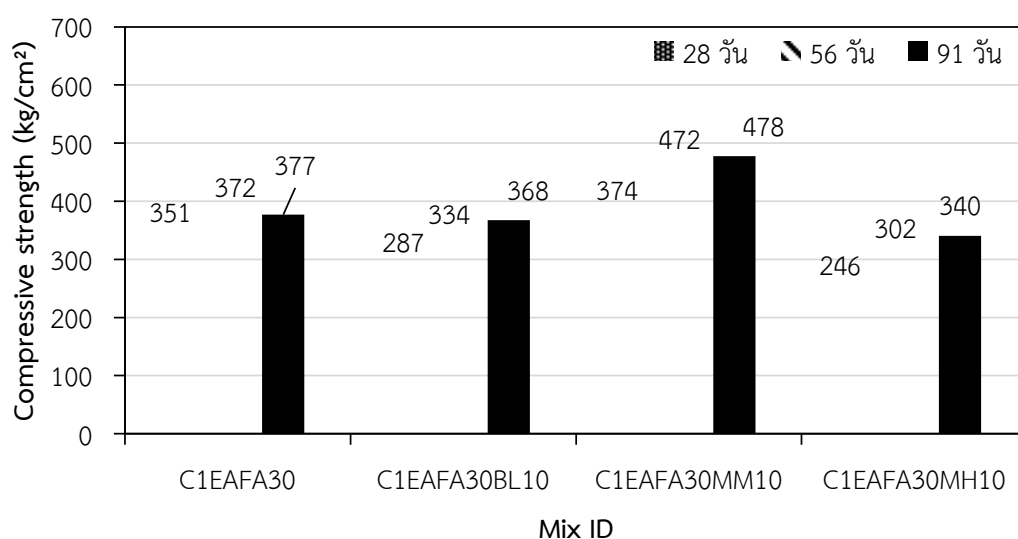
ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA และเถ้าลอย FA มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB เนื่องจากเถ้าลอย FA มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) นี้สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (CAH) ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย FB (High FL และ High SO_3) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทำให้โพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น อันเป็นเหตุให้ค่ากำลังอัดลดลง



รูปที่ 4.34 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว

4.4.7 ผลกระทบของชนิดเถ้าก้นเตาต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

ผลการทดสอบ พบว่า คอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว EA ร่วมกับเถ้าลอย FA และเถ้าก้นเตาชนิดต่างๆ พบว่าเถ้าก้นเตา MM มีค่ากำลังอัดมากที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา BL และ MH ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.35 เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของเถ้าก้นเตา MM น้อยกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงการกักเก็บน้ำในโพรงช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำ



รูปที่ 4.35 ผลกระทบของเถ้าก้นเตาต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัว

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สารขยายตัวมีผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีต และกำลังอัดของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวชนิด EA และ ET มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน
2. เมื่อใช้สารขยายตัวในคอนกรีตผสมเถ้าลอยส่งผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่และกำลังอัดของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวชนิด EA และ ET กับเถ้าลอย FA มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่มีกำลังอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน
3. สารขยายตัวชนิด EA เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวชนิด ET
4. การใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัว โดยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่น้อยลง แต่มีกำลังอัดที่สูงขึ้นที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวครั้งนี้ มีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปนี้

1. ควรศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเนื้อคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวด้วยเพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตที่ผสมสารขยายตัวที่มีผลต่อคุณสมบัติความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่และกำลังอัดของคอนกรีต
2. เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ใช้ปริมาณสารขยายตัวแทนที่วัสดุประสานเท่ากับ 20 กิโลกรัมต่อคอนกรีตหนึ่งลูกบาศก์เมตรเท่ากันในทุกส่วนผสม จึงควรศึกษาผลกระทบของปริมาณสารขยายตัวที่แตกต่างกันด้วย
3. เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เท่ากันในทุกส่วนผสม จึงควรศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันด้วย
4. เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ใช้ระยะเวลาการบ่มน้ำ 28 วัน และระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 28, 56 และ 91 วัน เท่านั้น จึงควรผลกระทบระยะเวลาการบ่มน้ำและระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่นานยิ่งขึ้นด้วย
5. เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ใช้การความเข้มข้นของสารละลายคลอไรด์ 3.0% ในการทดลองการแทรกซึมคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการ ยังไม่มีผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นคลอไรด์ และอุณหภูมิเหมือนในสิ่งแวดล้อมทะเลจริง จึงควรศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลจริงด้วย

บรรณานุกรม

- เจวีซีเนมส์ไทย. (2548). *ปูนซีเมนต์และการป่นปูนซีเมนต์*. ม.ป.ท.
- ทักท้อย สุภาวราภรณ์. (2550). *เทคนิคการตรวจสอบการร่อนสีจากคอนกรีต*. สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ปริญญ์ จินดาพรเสวีรัฐ. (2548). *การลอบสีจากคอนกรีต*. (ฉบับปรับปรุง).
- ปริญญ์ จินดาพรเสวีรัฐ, และจิ๋ จาตุรพีทักษ์กุล. (2552). *ปูนซีเมนต์ ปอปลีแกลบ และคอนกรีต*. มธ. 2552-2543, ถัดลงจากงานวิจัยใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- จิตรพงศ์ และคณะ. (2555). Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials. *Materials and Design*, (35): 434-439.
- เจ.ม.ท. 1014. *ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต*. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). *ความคงทนของคอนกรีต*. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์.
- เจ้าวัง รัชชอน และคณะ. (2556). *วัสดุผสมคอนกรีตด้วยปูนดำเอนกเสริมด้วยการใช้ใยสังเคราะห์ใยเส้นใยโพลีเอทิลีน*. กรุงเทพมหานคร: กรุงเทพฯมหานคร.
- AASHTO TP 95, Standard method of test for surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *AASHTO Standard*.
- ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards 2000 Volume 04.02*, 627-629.
- ASTM C1203-97, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *ASTM Standards*, Vol. 04.02.
- ASTM C1218, Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *ASTM Standards*.
- ASTM C1566, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. *Annual Book of ASTM Standard*, 04.02.
- ASTM C1760, Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. *ASTM Standards*.
- ASTM C311, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. *ASTM Standards*.
- ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *ASTM Standards*.
- Assi, B; et al. (2014.) Etude de l'influence d'un agent d'expansion interne et d'un agent réducteur de retrait sur les variations volumiques libres.

- etrestreintes d'un béton. In: Séminaire progrès dans le domaine du béton, *ACI e Section du Québec et de l'Est de l'Ontario*, Québec, 16 p.
- Bakker, H.M. (1988). *Corrosion of steel in concrete*. New York: Chapman and Hall.
- Bissonnette, J. et al. (2014). Evaluation of the Tackiness of Shrinkage-Compensating Concrete Repair Concretes Prepared with Expansive Components. *ACI C223 Special Publication*, 17 p.
- BS 1881-116:1963. Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes. *British Standards*.
- Calvo, et al. (2017). Comparison between the performance of expansive SCC and expansive conventional concretes in different expansion and curing conditions. *Construction and Building Materials*, (136), 277-285. Retrieved September 25, 2017.
- Çarı, et al. (2016). Understanding the shrinkage compensating ability of type K expansive agent in concrete. *Construction and Building Materials*, (116), 36-44. Retrieved September 25, 2017.
- Lam, et al. (2008). Expansion and compressive strength of concrete with expansive additive. In *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*, 19.
- Ma, et al. (2014). MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future. *Cement and Concrete Research*, (57), 1-12. Retrieved September 25, 2017.
- Gagné, R. (2016). Expansive agents. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, (22), 441-446. Retrieved September 25, 2017.
- Gagné, S. et al. (2008). Innovative concrete overlays for bridge deck rehabilitation in Montréal. In: 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town. Retrieved September 26, 2017.
- Thomas, M. D.A. (1996). Chloride Thresholds in marine concrete. *Cement and Concrete* Retrieved September 26, 2017, pp. 513-519.
- Pachnaga, Keerati. (1999). Use of Bottom Ash as Fine Aggregate in Concrete. M.S. Thesis, *Asian Institute of Technology*, Thailand.
- Chandler, R. (2000). Chloride Permeability of Bottom Ash Concrete. *ACI*, U.S.A.