

คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

**DURABILITY PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING  
STRENGTH ENHANCING MINERAL ADMIXTURE**

วริศ มณีรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

วริศ มณีรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

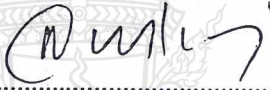
ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

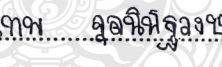
หัวข้อวิทยานิพนธ์      คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด  
Durability Properties of Concrete Containing Strength Enhancing  
Mineral Admixture  
ชื่อ - นามสกุล      นายวิศ มณีรัตน์  
สาขาวิชา      วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      อาจารย์ปานเทพ จุฬนิพิฐวงษ์, Ph.D.  
ปีการศึกษา      2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... จตุพล ตั้งปกาศิต  
(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)      ประธานกรรมการ


.....   
(ศาสตราจารย์สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, D.Eng.)      กรรมการ

.....   
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์หมิง จิ่ง, D.Eng.)      กรรมการ

.....   
(อาจารย์ปานเทพ จุฬนิพิฐวงษ์, Ph.D.)      กรรมการ

.....   
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.)      กรรมการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....   
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 1 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด
ชื่อ – นามสกุล	นายวิศ มณีรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ปานเทพ จุณิพิฐวงษ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2558

### บทคัดย่อ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างมากในงานด้านวิศวกรรมโยธาในอดีตที่ผ่านมา การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการกำหนดข้อกำหนดของคอนกรีตเป็นลักษณะเดียวกัน แม้ว่าสภาพแวดล้อมของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานสั้นลง การนำคอนกรีตไปใช้ในงานก่อสร้างควรคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตและสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตจะต้องเผชิญ เพื่อที่คอนกรีตที่นำไปใช้นั้นมีประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมในอนาคต

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสม โดยใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และผสมโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผลการศึกษาพบว่าการหาค่าแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ส่วนการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด Addition มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่คอนกรีต Replacement มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน นอกจากนี้ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และเมื่อผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากมีค่าความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ได้มากขึ้น สุดท้ายพบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด Addition มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ส่วนมอร์ต้าร์ Replacement มีค่าน้อย

กว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียม  
ซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน

**คำสำคัญ:** สารเพิ่มกำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง คาร์บอนชั่น การต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์  
การต้านทานซัลเฟต



<b>Thesis Title</b>	Durability Properties of Concrete Containing Strength Enhancing Mineral Admixture
<b>Name – Surname</b>	Mr. Waris Maneerat
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Mr. Panthep Julnipitawong, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2015

## ABSTRACT

Concrete is a material widely used in civil engineering in the past. The design of reinforced concrete structures with the requirements of the concrete is the same way. Although the environment is different. Concrete structures in the harsh environment shortened lifespan. Bringing concrete used in construction should take into consideration the durability of concrete and concrete environment will have to face. The concrete used was effective throughout the lifetime required. It also reduces the cost of maintenance. And future repairs.

This research was aimed to study the durability properties of concrete were tested Portland cement Type 1 (OPC1) as follows OPC1 with added and replaced strength enhancing mineral admixture of 5.5%, 6.5% and 7.5% by weight.

The results of this study revealed that the drying shrinkage of the mortar containing strength enhancing mineral admixture was lesser than that of OPC1 mortar, and the carbonation of the concrete with strength enhancing mineral admixture addition was lesser than that of OPC1 concrete whereas, the concrete with partial replacement strength enhancing mineral admixture was higher. In addition, the resistance to chloride penetration of the concrete containing strength enhancing mineral admixture was higher than that of OPC1 concrete. Moreover, the more strength enhancing mineral admixture was mixed, the higher the resistance of penetration of chloride was found. The expansion in sodium sulfate solution of the mortar contained strength enhancing mineral admixture addition was not different to that of OPC1 mortar while the mortar with partial

replacement was lesser. Finally, the weight loss in magnesium sulfate solution of mortar containing strength enhancing mineral admixture was lesser than that of OPC1 mortar.

**Keywords:** strength enhancing mineral admixture, drying shrinkage, carbonation, resistance to chloride penetration, sulfate resistance

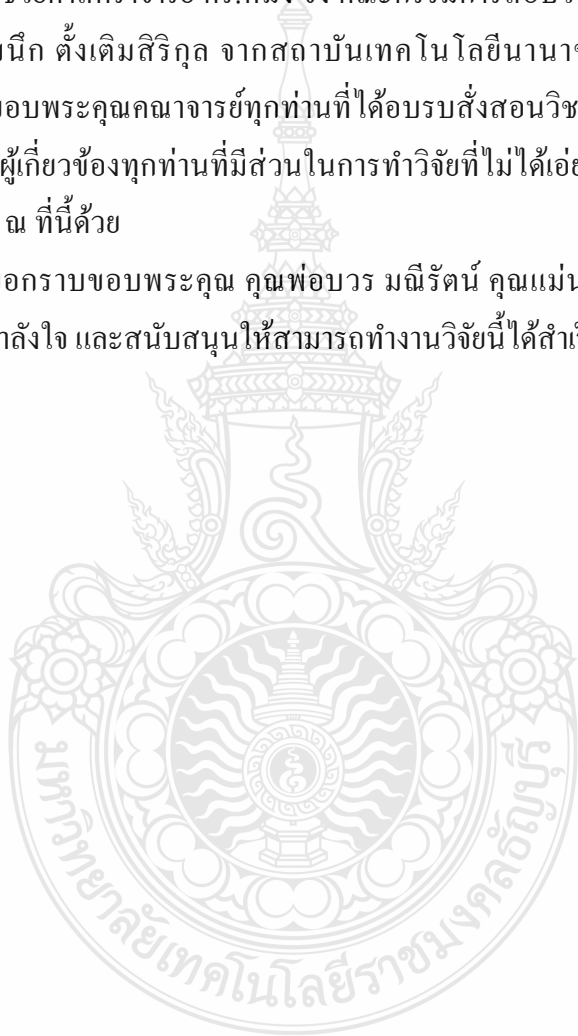


## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศักดิ์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาแนะนำและเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบพระคุณ ดร.ปานเทพ จุณนิพิฐวงษ์ ที่ช่วยแนะนำในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หิมิง จิ่ง คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ และประสบการณ์ทางวิชาการ ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนในการทำวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ผู้ทำวิจัยต้องกราบขออภัยเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อบวร มณีรัตน์ คุณแม่ นวลนิตย์ ดวงคำ คุณภรรยา ตันติธรรณัท ที่เป็นกำลังใจ และสนับสนุนให้สามารถทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จ กระทั่งจบการศึกษา

วิศ มณีรัตน์



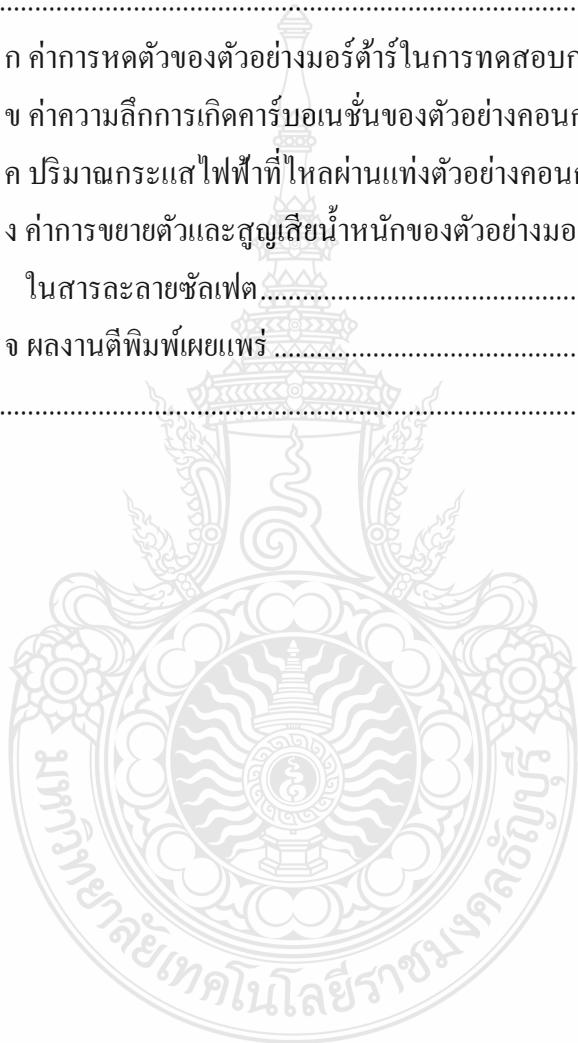


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	15
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	16
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	43
3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	43
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	44
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	59
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน.....	59
4.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน.....	62
4.3 การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์.....	69
4.4 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต.....	72
4.5 ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต.....	75
4.6 การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์.....	76
4.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด.....	81

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุป .....	83
บรรณานุกรม .....	84
ภาคผนวก .....	86
ภาคผนวก ก ค่าการหัดตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ท์ในการทดสอบการหัดตัวแบบแห้ง .....	87
ภาคผนวก ข ค่าความถี่การเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ.....	89
ภาคผนวก ค ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีต .....	91
ภาคผนวก ง ค่าการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ท์ ในสารละลายซัลเฟต.....	93
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	96
ประวัติผู้เขียน .....	106



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 .....	19
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	19
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	20
ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 .....	25
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ.....	26
ตารางที่ 2.6 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกอาคาร.....	31
ตารางที่ 2.7 แหล่งที่มาของคลอไรด์.....	32
ตารางที่ 2.8 เกณฑ์กำหนดสำหรับออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับซัลเฟต.....	37
ตารางที่ 3.1 การใช้จำนวนลู่ออมป์ ในการจำแนกคอนกรีตตามระดับความต้านทานการแทรกซึม คลอไรด์แบบเร่ง.....	48
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง ของมอร์ตาร์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55.....	56
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบ การเกิด คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5 .....	56
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบความ สามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต โดยใช้อัตรา ส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.30 .....	57
ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานซัลเฟต ของมอร์ตาร์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55.....	57
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ..	60
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา.....	61
ตารางที่ 4.3 การก่อตัวของเพสต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา .....	62
ตารางที่ 4.4 การทดสอบการไหลแผ่ของตัวอย่างมอร์ตาร์.....	64
ตารางที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์โดยใช้น้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 วัน .....	65

## สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้น้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.30 ที่อายุ 28 วัน .....	67
ตารางที่ 4.7 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้น้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 ที่อายุ 7 และ 28 วัน.....	68
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน .....	82
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต.....	82



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นในคอนกรีต (Schiessl, 1988).....	30
รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย .....	33
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์.....	33
รูปที่ 3.1 สารเพิ่มกำลังอัด .....	43
รูปที่ 3.2 เครื่องวัดความยาว (length comparator) .....	44
รูปที่ 3.3 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์.....	45
รูปที่ 3.4 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย $30 \pm 2$ °C .....	45
รูปที่ 3.5 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มม. ....	47
รูปที่ 3.6 ตู้อบคาร์บอนชั้น.....	47
รูปที่ 3.7 ความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต.....	48
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.....	49
รูปที่ 3.9 Cell.....	50
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างคอนกรีตที่ประกอบใน Cell.....	50
รูปที่ 3.11 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า .....	50
รูปที่ 3.12 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ ในสารละลายซัลเฟต.....	52
รูปที่ 3.13 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต .....	53
รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม .....	54
รูปที่ 3.15 แบบหล่อและตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ ในสารละลายซัลเฟต.....	54
รูปที่ 3.16 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต .....	55
รูปที่ 4.1 รูปถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาควัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา.....	60
รูปที่ 4.2 การก่อตัวของเพชรของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา .....	63
รูปที่ 4.3 การไหลผ่านของตัวอย่างมอร์ตาร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 .....	64

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์โดยใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 วัน	66
รูปที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ที่อายุ 28 วัน .....	67
รูปที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ที่อายุ 7 และ 28 วัน .....	69
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม.....	70
รูปที่ 4.8 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ต้าร์ ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ที่อายุ 91 วัน.....	71
รูปที่ 4.9 ความถี่การเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม เมื่อสัมผัสก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 28 และ 56 วัน .....	73
รูปที่ 4.10 ความถี่การเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม โดยบ่มในน้ำ ที่ 7 และ 28 วัน .....	74
รูปที่ 4.11 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม .....	76
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม .....	77
รูปที่ 4.13 การขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ที่อายุ 420 วัน .....	78
รูปที่ 4.14 รูปถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 420 วัน .....	79

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ที่อายุ 420 วัน .....	80
รูปที่ 4.16 รูปถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 420 วัน.....	81



# บทที่ 1

## บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างมากในงานด้านวิศวกรรมโยธาในอดีตที่ผ่านมา การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการกำหนดข้อกำหนดของคอนกรีตเป็นลักษณะเดียวกัน แม้ว่าสภาพแวดล้อมของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานสั้นลง การนำคอนกรีตไปใช้ในงานก่อสร้างควรคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตและสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตจะต้องเผชิญ เพื่อที่คอนกรีตที่นำไปใช้นั้นมีประสิทธิภาพตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมในอนาคต

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอนกรีตในปัจจุบันช่วยให้นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรมีความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีต ปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์สามารถสังเคราะห์และคิดค้นสารเพิ่มกำลังอัดพิเศษเพื่อที่จะปรับปรุงปฏิกิริยาในบางส่วนของปูนซีเมนต์ตามความต้องการ ส่วนผสมสังเคราะห์นี้สามารถที่จะเกี่ยวข้องในการทำปฏิกิริยา ไฮเดรชัน (Hydration) จากปูนซีเมนต์โดยตรง โดยสารเพิ่มกำลังอัดมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับบางส่วนขององค์ประกอบซีเมนต์ที่ให้ปฏิกิริยาในช่วงอายุเริ่มแรก ซึ่งสารเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีตที่มีอยู่อาจถือเป็นความเปลี่ยนแปลงของปูนซีเมนต์ทั้งในแง่ของคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต คุณสมบัติของคอนกรีตมีการแยกตามอายุของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติในช่วงอายุต้นและคุณสมบัติในระยะยาว คุณสมบัติอายุช่วงต้นอาจจะมีการใช้ในการศึกษาเบื้องต้น สำหรับการตรวจสอบว่าสารเพิ่มกำลังอัดบางอย่างอาจจะใช้กับคอนกรีตโดยปราศจากผลข้างเคียงหรือไม่ รวมถึงความสามารถการใช้งาน เวลาการก่อตัว การรับแรงกด และเสถียรภาพการหดตัวหรือขยายตัว อย่างไรก็ตามคุณสมบัติในระยะยาว ซึ่งส่วนใหญ่เป็นคุณสมบัติด้านความคงทน ยังต้องได้ตามความต้องการในแต่ละงานคอนกรีต

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของสารเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานสารเพิ่มกำลังอัดอย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของ



คอนกรีต ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนชั่น ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่าน  
คลอไรด์ และความต้านทานซัลเฟต ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด เพื่อนำผลวิจัยไปพัฒนา  
เทคโนโลยีด้านวัสดุคอนกรีตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นและคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด
- 1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด
- 1.2.3 ศึกษาผลกระทบของสารเพิ่มกำลังอัด ต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์  
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 สารเพิ่มกำลังอัด และเกลือยวโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของสารเพิ่มกำลังอัด

1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด ประกอบด้วย

1.3.3.1 ทดสอบการหดตัวแห้งใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม.

1.3.3.2 ทดสอบการเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด  
100x100x100 มม.

1.3.3.3 ทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต ใช้  
ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.

1.3.3.4 การทดสอบความต้านทานซัลเฟต ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม.  
สำหรับวัดการขยายตัว (Expansion) แซ่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) และใช้ตัวอย่าง  
มอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม. สำหรับวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) แซ่ในสารละลาย  
แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ )

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่

1.4.1 เพื่อทราบถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.4.2 เพื่อทราบถึงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

1.4.3 เพื่อทราบถึงผลกระทบของสารเพิ่มกำลังอัด ต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

1.4.4 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่มีสารเพิ่มกำลังอัด สำหรับนำไปใช้ในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ได้อย่างมีคุณภาพ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีหัวข้อคือ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของ อเมริกา (ASTM C 150) [1] ได้แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท คือ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Normal Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้กันมากในงานคอนกรีต เหมาะกับงานก่อสร้างคอนกรีตทั่วไป เช่น คาน เสา พื้น ถนน ค.ส.ล. เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้แก่ ตราช้าง ตราเพชร (เม็ดเดียว) ตราพญานาคเขียว ตราTPI(แดง) ตราภูเขา ตราดาวเทียม และตรานกอิทรีย์(เพชร)

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 2 (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงเพื่อให้สามารถต้านทานเกลือซัลเฟตได้ปานกลาง และจะเกิดความร้อนปานกลางในช่วงหล่อ เหมาะกับงานโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อ สะพาน ท่าเทียบเรือ เขื่อน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่เคยมีจำหน่ายได้แก่ ตราพญานาคเจ็ดเศียร

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 (High-early Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่สามารถให้กำลังได้รวดเร็วในเวลาอันสั้น หลังจากเทแล้วสามารถใช้งานได้ภายใน 3-7 วัน เหมาะกับงานที่เร่งด่วน เช่น คอนกรีตอัดแรง เสาเข็ม พื้นถนนที่จราจรคับคั่ง เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่มีจำหน่ายได้แก่ ตราเอราวัณ สามเพชร และ TPI(ดำ)

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 4 (Low-heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดพิเศษที่มีอัตราความร้อนต่ำกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งส่งผลดีทำให้การขยายตัวน้อยช่วยลดการแตกร้าว เหมาะกับงานสร้างเขื่อนขนาดใหญ่

5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 (Sulfate-resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ทนต่อเกลือซัลเฟตได้สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีปริมาณของ  $C_3A$  ต่ำมากโดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 5 เพราะ  $C_3A$  จะทำให้เกิดการรวมตัวกับซัลเฟตได้ง่ายดังนั้นเมื่อ  $C_3A$  มีปริมาณน้อยจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลย ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จึงเหมาะกับการก่อสร้าง

บริเวณดินเค็มหรือใกล้กับทะเล ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้แก่ ตราTPI(ฟ้า) ตราช้าง(ฟ้า) และปลาฉลาม(ฟ้า)

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ  $C_3S$   $C_2S$   $C_3A$  และ  $C_4AF$  เนื่องจากมีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ แสดงดังตารางที่ 2.1 คุณสมบัติที่สำคัญสรุปไว้แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 [2]

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
$C_3S$	49	46	56	25	30
$C_2S$	25	29	15	50	46
$C_3A$	12	6	12	5	5
$C_4AF$	8	12	8	12	13
ความละเอียดของเบเลน (ชม <sup>2</sup> /กรัม)	3000	3000	4500	3000	3000
กำลังอัดที่อายุ 3 วัน (กก/ชม <sup>2</sup> )	180	150	310	80	120
ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 28 วัน (จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

\*หมายเหตุ กำลังอัดของคอนกรีตวัดจากลูกบาศก์มอร์ตาร์ขนาด 50 มม.

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

ก. องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก และออกไซด์รอง ปริมาณประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

1) ออกไซด์หลัก (Major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันได้กว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2) ออกไซด์รอง (Minor oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na<sub>2</sub>O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K<sub>2</sub>O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>)

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue)

### ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละ โดยน้ำหนัก
CaO	C	60-67
SiO <sub>2</sub>	S	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	0.5-6.0
MgO	M	0.1-4.0
Na <sub>2</sub> O	N	0.1-1.8
K <sub>2</sub> O	K	0.1-1.8
SO <sub>3</sub>	S̄	0.5-3.0
สารประกอบอื่น	-	0.5-3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา	LOI	0.1-3.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง	-	0.20-0.75

#### ข. สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

ออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3CaO.SiO<sub>2</sub> หรือ C<sub>3</sub>S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสี่เหลี่ยม แก่คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลัง

ค่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

2) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{C}_2\text{S}$ ) มีหลายรูปแบบ โดยที่อนุกรมปกติ  $\text{C}_2\text{S}$  จะอยู่ในรูปแบบตัวไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\beta\text{C}_2\text{S}$ ) ไตรแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างค่อนข้างช้าและช้ากว่า  $\text{C}_3\text{S}$  มาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ  $\text{C}_3\text{S}$  โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  หรือ  $\text{C}_3\text{A}$ ) มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยมทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ก่อตัวทันที (Flash Set) การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังค่อนข้างต่ำ ปริมาณเมื่อเทียบกับ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15

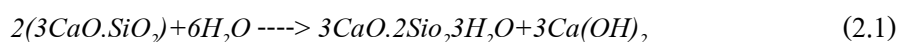
4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ  $\text{C}_4\text{AF}$ ) อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า  $\text{C}_3\text{A}$  โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

#### ค. ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

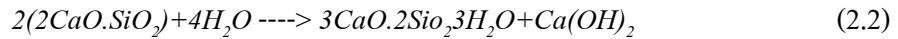
##### 1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate,  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide :  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  หรือ CH) แสดงดังสมการที่ 2.1



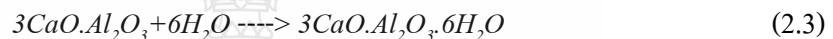
2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไคแคลเซียมซิลิเกต

ไคแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH แสดงดังสมการที่ 2.2



3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เฟสตั้งก่อตัวอย่างรวดเร็ว แสดงดังสมการที่ 2.3

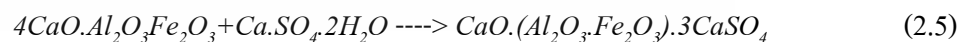


เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum :  $CaSO_4.2H_2O$ ) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของเอตริงไจท์ (Ettringite :  $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$ ) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต แสดงดังสมการที่ 2.4



4) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ  $C_3A$  แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำให้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม แสดงดังสมการที่ 2.5



2.1.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ ( $SiO_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) รวมกันเป็นปริมาณ

ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) และถึงแม้ว่า ปอซโซลานชนิดนั้น มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วน ไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ก. ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และ ปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) ดังนี้

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) ภูเขาไฟ (Volcanic Ash) หินภูมิไซท์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (Limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

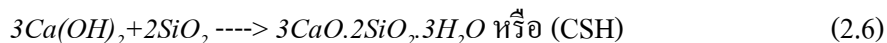
ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan) เกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบัน ปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาหลอมเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

ข. ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

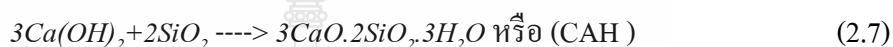
วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะผลิตพันธะเป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.7



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



### 2.1.3 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้ (By Products) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนมาใช้ ถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกกันว่าถ่านก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้ โดยตามมาตรฐาน ASTM C618-80 [3] ได้ให้คำนิยามของเถ้าลอยไว้ว่า เถ้าลอย คือวัสดุเม็ดละเอียดที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหิน โดยส่วนมากจะได้มาจากขบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด เช่น แอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub Bituminous) และลิกไนต์ (Lignite) โดยถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนสูงสุด และปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ ตามลำดับ

#### ก. ชนิดของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยเป็น 2 ชนิดคือ

1) เถ้าลอยชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica , SiO<sub>2</sub>) อลูมินา (Alumina , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric

Oxide , Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 แสดงดังตารางที่ 2.4 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide , CaO) ต่ำ

2) เถ้าลอยชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซบพิทুমินัส เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณ SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ตั้งแต่ร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70 และปริมาณ CaO สูง โดยมีคุณสมบัติตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 แสดงดังตารางที่ 2.4 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO<sub>2</sub> ต่ำแล้วยังมี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [3]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) อย่างต่ำ , ร้อยละ	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> ) อย่างสูง , ร้อยละ	5	5
ปริมาณความชื้นสูงสุด , ร้อยละ	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง , ร้อยละ	6	6
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na <sub>2</sub> O , ร้อยละ	1.5	1.5

#### ข. คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO<sub>2</sub> , Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และมี MgO , Na<sub>2</sub>O , K<sub>2</sub>O , SO<sub>3</sub> เป็นองค์ประกอบรอง แสดงดังตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ยังประกอบด้วยความชื้น (H<sub>2</sub>O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition , LOI) เถ้าลอยมี SiO<sub>2</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ของเถ้าลอยไว้้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ

ตัวอย่าง เถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

### ค. ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub> หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งพบว่ามีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน

#### 2.1.4 สารลดน้ำสำหรับคอนกรีต (Concrete Admixture)

สารลดน้ำคืออะไรสารผสมเพิ่มได้จากธรรมชาติหรือผลิตจากกรรมวิธีสังเคราะห์ทางเคมี โดยสารผสมเพิ่มจะใช้ผสมเพิ่มลงไปในส่วนผสมคอนกรีตก่อนผสมหรือขณะผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต ที่มักนิยมนำมาใช้ในประเทศไทย ได้แก่ สารกักกระจายฟองอากาศ สารลดน้ำ สารลดน้ำและหน่วงการก่อตัว และสารเร่งการก่อตัว แบ่งตาม มาตรฐาน มอก. 733 [4] ได้ 8 ประเภท

1) ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducers หรือ Plasticizers) หมายถึง สารลดน้ำซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีตได้โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม

2) ประเภท B สารหน่วงการแข็งตัว (Retarders) หมายถึง สารลดน้ำซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น

3) ประเภท C สารเร่งการก่อตัว (Accelerators) หมายถึง สารลดน้ำซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสั้นลง

4) ประเภท D สารลดน้ำ และ หน่วงการก่อตัว (Water Reducing And Set Retarding Admixtures) หมายถึง สารลดน้ำซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต โดยความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม และ ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น

5) ประเภท E สารลดน้ำ และ เร่งการก่อตัว (Water Reducing And Set Accelerating Admixtures) หมายถึง สารลดน้ำซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้วสามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม และ ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสั้นลง

6) ประเภท F สารลดน้ำระดับสูง (High Range Water Reducing Admixtures หรือ Superplasticizer) หมายถึง สารลดน้ำซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีตได้ อย่างน้อยร้อยละ 12 โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม

7) ประเภท G สารลดน้ำระดับสูงและหน่วงการแข็งตัว (High Range Water Reducing And Set Retarding Admixture หรือ Set retarding Superplasticizer) หมายถึง สารลดน้ำซึ่งเมื่อใช้ผสมคอนกรีตแล้ว สามารถลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีตได้ อย่างน้อยร้อยละ 12 โดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม และ ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยาวนานขึ้น

8) ประเภทอื่น ๆ

- สารป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม
- สารกันซึม
- สารกักกระจายฟองอากาศ (Air Entraining Agents)
- สารเพิ่มความหนืด (Thickening)
- สารผสมเพิ่มเพื่อช่วยในการปั๊มคอนกรีต (Pumping Aids)

2.1.5 สารเพิ่มกำลังอัด (Strength Enhancing Mineral Admixture)

สารเพิ่มกำลังอัดสำหรับคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C465 และมอก.15 เป็นผงเคมีผสมคอนกรีตที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารประกอบของแคลเซียมที่สามารถปลดปล่อยแคลเซียมได้ หลังจากคอนกรีตเริ่มเซตตัว มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว – เทา มีความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 0.94-1.60 และมีคุณสมบัติของการใช้งานได้แก่

- ช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีตทั้งในช่วงต้นและช่วงปลาย
- ช่วยลดการเยิ้ม (Bleeding) ของคอนกรีตสด
- ช่วยลดการหดตัว (Shrinkage) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการแตกร้าวของคอนกรีต

- ช่วยให้คอนกรีตมีการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) น้อย ทำให้สะดวกในการเท
- เป็นสารเคมีที่ไม่ส่งผลในการเร่งการก่อตัว (Sitting Time) ของคอนกรีต
- สามารถใช้งานได้ดีกับตัวประสานอื่น ๆ

#### 2.1.6 ความคงทนของคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากประการหนึ่งซึ่งหมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงต่อสภาพแวดล้อม ทนต่อการทำลายจากสารเคมี ทนต่อแรงกระแทกหรือการกระทำอื่นๆ ตลอดจนอายุการใช้งานของโครงสร้าง ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตควรคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตด้วย

สาเหตุของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิด [5] ดังนี้

1) สาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) ได้แก่ การหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage), การหดตัวแบบพลาสติก (Plastic Shrinkage), การทรุดตัว (Settlement)

2) สาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) ได้แก่ การเกิดคาร์บอนเนชั่น (Carbonation), การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack), การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack)

3) สาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) ได้แก่ การขัดสี (Abrasion) การกัดกร่อนด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) การแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitation)

4) สาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) ได้แก่ ตะไคร่รา หรือแบคทีเรีย

5) สาเหตุรวม (Mixed Process) ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

#### 2.1.7 การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการหดตัวแห้ง

การหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีตเกิดจากสาเหตุการสูญเสียน้ำของคอนกรีต หลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยกลไกการหดตัวของคอนกรีตนั้นเกิดจากน้ำที่เติมเต็มอยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Capillary Pore) เกิดการระเหยออกเนื่องจากสภาวะแวดล้อมซึ่งได้แก่ อุณหภูมิที่สูง หรือความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ทำให้เกิดแรงดึงผิวในช่องว่างคาปิลลารี (Capillary Surface Tension) และทำให้คอนกรีตที่อยู่โดยรอบช่องว่างคาปิลลารีนั้นเกิดการอัดตัวเข้ามา เนื่องจากการรักษาสมดุลของแรง ก่อให้เกิดการหดตัวของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเกิดขึ้น และจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายในภายหลังได้

ก. หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจเกิดปัญหาการหดตัวแห้ง

การแก้ปัญหาการหดตัวแบบแห้ง อาจทำได้โดยการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสม เช่นปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตและลดปริมาณช่องว่างคาปิลลารี (Capillary) เพื่อลดการระเหยของน้ำ หรือใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดช่องว่างในคอนกรีต

การใช้มวลรวมที่มีปริมาณและขนาดละเอียดที่เหมาะสม ก็จะช่วยลดโอกาสการเกิดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากมวลรวมไม่มีการหดตัวจึงทำหน้าที่ต้านทานการหดตัวของซีเมนต์เพสต์

สารผสมเพิ่มเพื่อแก้ปัญหาการเกิดการแตกร้าวเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้งมีหลายชนิด เช่น สารเพิ่มการขยายตัวของคอนกรีต (Expansive Agent) ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวในเบื้องต้นเพื่อชดเชยการหดตัวในภายหลัง (Shrinkage Compensation) โดยสารผสมเพิ่มชนิดนี้จะมีมากกว่าส่วนผสมคอนกรีตปกติทั่วไป ทำให้เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำแล้วจะเกิด Ettringite เพิ่มมากขึ้นและเกิดการขยายตัวของคอนกรีต ทั้งนี้ในการทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวเนื่องจาก Expansive จำเป็นต้องมีน้ำในการทำปฏิกิริยาที่พอเพียง ดังนั้นจึงต้องมีการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำหรือบ่มชื้นเป็นเวลาที่เหมาะสม

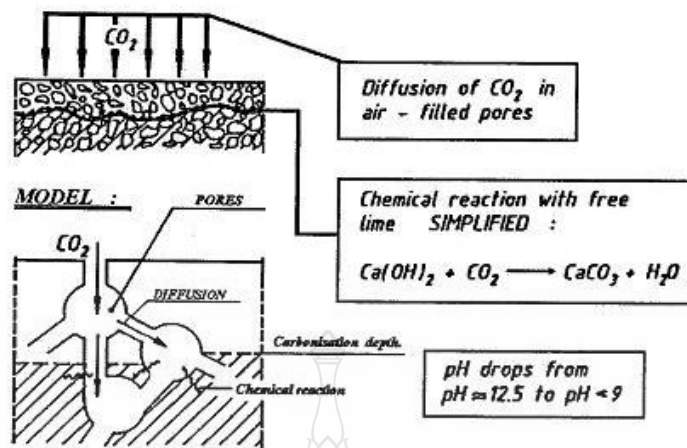
นอกจากนี้การใช้สารลดการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage Reducing Admixture) จะทำหน้าที่ไปลดแรงดึงผิวในโพรงคาปิลารี อย่างไรก็ตามสารผสมเพิ่มเหล่านี้ไม่ช่วยควบคุมขนาดความกว้างของรอยร้าวภายหลังการแตกร้าว จำเป็นต้องมีการออกแบบเหล็กเสริมและรอยต่อ (Joint) ที่เหมาะสมเพื่อช่วยบรรเทาปัญหาการแตกร้าว

#### 2.1.8 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชัน (Carbonation) เป็นการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลักทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) แสดงดังสมการที่ 2.8



ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของสารละลายและคอนกรีตที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้แสดงดังรูปที่ 2.1 ดังนั้น คาร์บอนเนชันจะค่อยๆคืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นในคอนกรีต (Schiesl, 1988)

นอกจากนี้ยังอาจเกิดสารประกอบอื่นๆ เช่น ไฮดรอกไซด์ของซิลิกา ไฮดรอกไซด์ของอลูมินา เป็นต้น การเกิดคาร์บอนชั่นโดยตัวของมันเองไม่ได้ทำให้คอนกรีตเสียหายแต่จะทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลง ปกติซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างสูงโดยมีค่า pH ระหว่าง 12.6 ถึง 13.5 และอาจลดลงเหลือเพียง 8 ถึง 9 ถ้าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ทำปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นจนหมด

โดยทั่วไปเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมีแผ่นฟิล์มบางที่ได้จากไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์เคลือบที่ผิว ซึ่งฟิล์มบางนี้จะป้องกันเหล็กไม่ให้เหล็กทำปฏิกิริยากับความชื้นและก๊าซออกซิเจน ดังนั้นเหล็กจึงไม่เป็นสนิมแต่คาร์บอนชั่นทำให้ความด่างหรือ pH ของคอนกรีตลดลงและฟิล์มบางที่เคลือบผิวถูกทำลาย ทำให้ความชื้นและก๊าซออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม เกิดสนิม เกิดการขยายตัว เบ่งคอนกรีต ทำให้เกิดแรงดึงขึ้น และดันคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม เกิดร้าวหรือหลุดร่อนออกมาในที่สุด

คาร์บอนชั่นเกิดจากผิวหน้าของคอนกรีตเข้าสู่เนื้อข้างใน ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั่น ได้แก่ ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวคอนกรีต ความพรุนของเนื้อคอนกรีตซึ่งมีผลต่อการซึมเข้าสู่คอนกรีตของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือความแข็งแรงของคอนกรีต ตารางที่ 2.6 แสดงการเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีตที่เวลา 30 ปี โดยพิจารณาจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่างกัน

## ตารางที่ 2.6 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกอาคาร

กำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (เมกะปาสกาล)	ความลึกของคาร์บอนชั้นที่เวลา 30 ปี (มม.)
20	45
40	17
60	5
80	2

ซึ่งพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนชั้นลดลงจาก 45 มม. เหลือเพียง 2 มม. เมื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตจาก 20 เป็น 80 เมกะปาสกาล [6] นอกจากนี้ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่รอบคอนกรีตก็มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้น เพราะคาร์บอนชั้นเกิดได้ยากเมื่อคอนกรีตแห้งมากหรือชื้นมาก โดยอัตราการเกิดคาร์บอนชั้นสูงสุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 50 ถึง 70 [7]

ก. ผลของคาร์บอนชั้นที่สำคัญมี 3 ประการ คือ

- 1) ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนชั้นต่ำลง
- 2) ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนชั้นต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนชั้นเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจน ใกล้เคียงต่ำกว่าระดับวิกฤติ
- 3) ทำให้เกิดการหดตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ภายใต้อิทธิพลของแรงอัด ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ในผลของคาร์บอนชั้นทั้ง 3 ประการนี้ ประการที่ 2 คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอนชั้นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

ข. หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจมีปัญหากการเกิดคาร์บอนชั้น

คอนกรีตที่ทนต่อการเกิดคาร์บอนชั้นจะเป็นคอนกรีตที่มีเนื้อแน่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปยาก ดังนั้นจึงควรเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำและมีการบ่มที่



ดี ปัจจุบันการทำคอนกรีตนิยมใส่วัสดุปอซโซลานซึ่งมีผลต่อคาร์บอนชั้นด้วยเพราะวัสดุปอซโซลานจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้คาร์บอนเพิ่มขึ้นได้ แต่การใส่วัสดุปอซโซลานเมื่อมีการบ่มที่ดีจะทำให้เนื้อซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้นจึงสามารถช่วยลดคาร์บอนชั้นได้ ดังนั้นการใช้สารปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก แม้ว่าจะทำให้คาร์บอนชั้นเกิดในระดับที่ยอมรับได้ นอกจากนี้เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านต่างๆดีขึ้น โดยเฉพาะทำให้ความพรุนลดลงซึ่งช่วยลดการซึมผ่านและการเกิดคาร์บอนชั้นได้

### 2.1.9 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์

เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเผชิญต่อสภาพแวดล้อมคลอไรด์ คลอไรด์จะซึมเข้าสู่คอนกรีต หากปริมาณคลอไรด์ ณตำแหน่งเหล็กเสริมมากเกินกว่าค่าวิกฤติจะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเป็นสนิมได้ ตัวอย่างของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ เช่น โครงสร้างใต้ทะเล โครงสร้างริมทะเล บริเวณน้ำขึ้น – น้ำลง หรือบริเวณที่สัมผัสคลื่นและละอองทะเล และโครงสร้างบนผิวดินที่มีเกลือคลอไรด์ เป็นต้น เพื่อให้คอนกรีตมีความทนทานต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ คอนกรีตจะต้องถูกออกแบบให้ปริมาณคลอไรด์ ณ ระยะเหล็กเสริมมีค่าไม่เกินค่าวิกฤติที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมได้ และแหล่งที่มาของคลอไรด์ได้แสดงดังตารางที่ 2.7

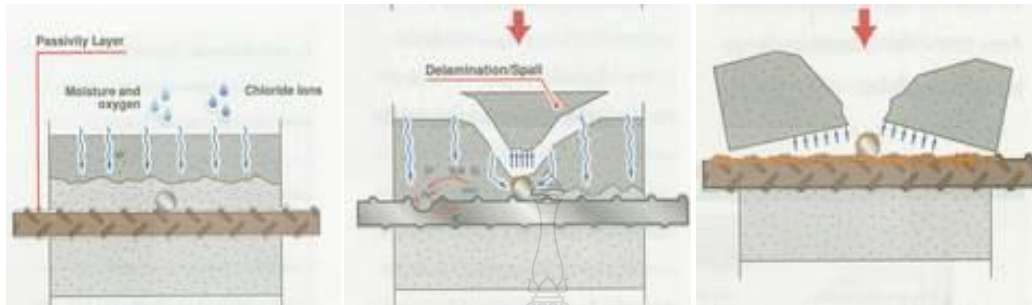
### ตารางที่ 2.7 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์ที่มาจากภายในคอนกรีต	คลอไรด์ที่มาจากภายนอกคอนกรีต
-น้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีต	-จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ติดกับทะเล
-วัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต ได้แก่ หินและทราย	-มาจากช่วงเวลาที่ใช้งานเป็นส่วนใหญ่ เช่น จากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว
-น้ำยาที่ใช้เพิ่มผสมคอนกรีต เช่น น้ำยาเร่งหรือหน่วงการก่อตัว น้ำยากันซึม เป็นต้น	

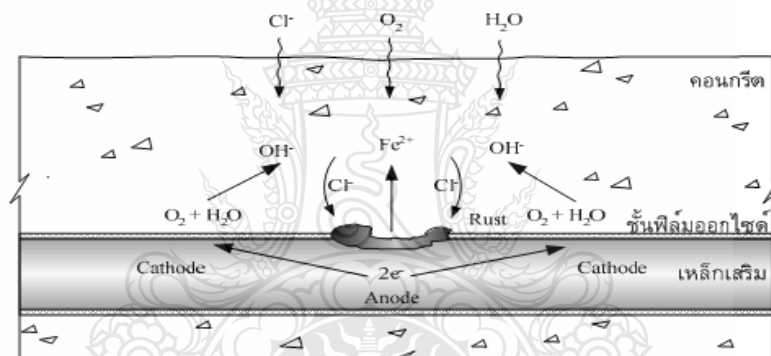
### ก. กระบวนการของการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์

โดยปกติคอนกรีตจะมีสภาพความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ระหว่าง 12.5-13.5 ทำให้เกิดชั้นฟิล์มของออกไซด์ (Protective Passivity Layer) บางๆเคลือบอยู่ที่ผิวเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ; Gamma ferric oxide) แต่เมื่อคลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้ (แสดงดังรูปที่ 2.2 และ 2.3) โดยชั้นของฟิล์มออกไซด์ดังกล่าวจะถูกทำลายจนกระทั่งเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤติ เหล็กเสริมในบริเวณนั้นก็จะเกิด

สนิมได้ ซึ่งเรียกว่า Depassivation และในขณะเดียวกันหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะ กระบวนการทางไฟฟ้า-เคมีก็จะเกิดขึ้น [8]



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย



รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

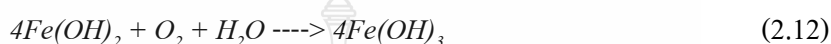
บริเวณที่ Passive film ถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ เรียกว่า “ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction)” สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.9)



ส่วนบริเวณที่ Passive film ไม่ถูกทำลาย จะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วบวก รับผิดชอบรับอิเล็กตรอนและทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน เรียกว่า “ปฏิกิริยาคาโทดิก (Cathodic Reaction)” สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.10)



และในขณะเดียวกัน  $Fe^{2+}$  ที่เกิดที่ขั้วลบส่วนหนึ่ง ทำปฏิกิริยากับน้ำออกซิเจน กลายเป็น “เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide)” แสดงดังสมการที่ (2.11) และ (2.12)



และเมื่อ  $Fe^{2+}$  ที่เกิดอีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบก็จะทำปฏิกิริยากับ  $Cl^-$  จะเกิดเป็น “เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_2$ )” และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ ก็จะกลายเป็นสนิมเหล็ก แสดงดังสมการที่ (2.13) และ (2.14)



#### ข. ผลของการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

ผลกระทบจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์คือ กำลังรับแรงต่างๆของคอนกรีตลดลง ความสามารถความต้านทานความล้า (Fatigue Strength) และการแอ่นตัวของโครงสร้างเพิ่มขึ้น ผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นคือ การเริ่มเกิดการแตกร้าวของคอนกรีต เป็นส่วนหนึ่งที่เร่งให้น้ำและออกซิเจน เข้าถึงเหล็กได้เร็วขึ้น ส่งผลให้มีการเกิดสนิมเหล็ก โดยการเกิดสนิมดังกล่าวจะมีผลเสียกับโครงสร้างคือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมบริเวณที่เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนจะลดลง ส่วนบริเวณที่เป็นขั้วบวกจะเป็นสนิมพอกพูนขึ้น แรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตในส่วนนี้จะลดลงจนในที่สุดโครงสร้างคอนกรีตจะแตกเพิ่มขึ้น ด้วยการเบ่งตัวของสนิมเหล็ก

#### ค. หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจมีปัญหการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

การเลือกคอนกรีตที่มีปัญหการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ จะคล้ายกับหลักการเลือกคอนกรีตในกรณีที่สร้างบริเวณทะเล การใช้เสาถ้ำหินหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด หรือซิลิกาฟูมในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าสู่คอนกรีต วัสดุปอซโซลานจำเป็นมากยิ่งขึ้นในคอนกรีตที่ใช้งานในที่ที่มีอากาศร้อน และการใช้ระยะหุ้มคอนกรีตที่หนาขึ้นกว่าปกติทำให้คลอไรด์ออกต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการแทรกซึมจนถึงผิวเหล็ก การใช้คอนกรีตที่มี

ความชื้นผ่านน้ำต่ำทำได้โดยกำหนด w/c ที่ต่ำกว่า 0.5 ซึ่งอาจต้องใช้สารลดน้ำเข้าช่วย แต่ถ้าคอนกรีตเสริมเหล็กสัมผัสกับน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล หรือละอองของน้ำดังกล่าว w/c ควรมีค่าไม่เกิน 0.4

#### 2.1.10 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากซัลเฟต

สารประกอบทางเคมีที่มีผลต่อกระทบโดยตรงต่อความคงทนของคอนกรีต ที่สำคัญและพบมากในธรรมชาติ ประกอบด้วยเกลือของคลอไรด์ ซึ่งพบมากในน้ำทะเล เกลือของซัลเฟต ในดินหรือน้ำใต้ดิน (ในบางพื้นที่) ในน้ำเสียจากที่พักอาศัย ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และโรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท

เกลือของซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย มีผลค่อนข้างรุนแรงต่อการกัดกร่อนคอนกรีตโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเกลือของซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) ที่พบมากคือ โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ ) และแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) นอกจากนี้ก็ยังมีเกลือของโปรแตสเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ ) รวมอยู่ด้วย โดยกระบวนการกัดกร่อนของซัลเฟตที่มีต่อคอนกรีตนั้น

##### ก. กลไกการทำลายคอนกรีตโดยโซเดียมซัลเฟต

กลไกการทำลายคอนกรีตโดยโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 2.15 ถึง 2.18 เริ่มต้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (NS) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ซึ่งทำให้ค่า pH ของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นเป็น 13.5 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า pH ของสารละลาย CH อิ่มตัวที่มีค่าเพียง 12.4 จึงเป็นการรักษาเสถียรภาพของ C-S-H และ Ettringite ( $C_6ASH_{32}$ ) ไม่ให้ทำปฏิกิริยากลายเป็นผลผลิตอื่น สารยิปซัม ( $CSH_2$ ) จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์บางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ( $C_4AH_{13}$ ), โมโนซัลเฟต ( $C_4ASH_{12}$ ) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ทำให้ได้ Secondary Ettringite ซึ่งจะมีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต



ข. กลไกการทำลายคอนกรีตโดยแมกนีเซียมซัลเฟต

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.19 ถึง 2.21 จะแตกต่างจากกรณีโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่ไม่สูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettingite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมดังแสดงในสมการที่ 2.20 จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 ทั้ง  $CSH_2$  และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย  $CSH_2$  จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล ( $S_2H$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.21 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย ดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม  $CSH_2$  โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต



ค. หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจมีปัญหากัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ซิลิกาฟูม และเมทาลิน ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถช่วยทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดีขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงสามารถลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตได้เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา คอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟตในสภาวะรุนแรงมากจะมีแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารผสมเพิ่มเพราะการใช้สารดังกล่าวทำให้การกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (ว.ส.ท) [9] ได้กำหนดเกณฑ์การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับซัลเฟตไว้ดังตารางที่ 2.8 นอกจากนี้ ACI 201 [10] ให้ใช้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง (มีการซึมผ่านของน้ำต่ำ) มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 ซึ่งมี  $C_3A$  ไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งช่วยให้คอนกรีตสามารถทนทานต่อสารละลายซัลเฟตได้มากขึ้น

**ตารางที่ 2.8** เกณฑ์กำหนดสำหรับออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับซัลเฟต

สภาวะการสัมผัสกับซัลเฟต	ปริมาณซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ในดิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณซัลเฟตในน้ำ (ส่วนในล้าน)	ประเภทของปูนซีเมนต์	คอนกรีตมวลรวมปกติ	คอนกรีตมวลรวมเบา
				ค่าสูงสุดของ w/c	กำลังอัดต่ำสุด (กก/ซม <sup>2</sup> )
น้อยมาก	0.00 - 0.10	0 - 150	-	-	-
ปานกลาง	0.10 - 0.20	150 - 1,500	1, 2	0.50	250
รุนแรง	0.20 - 2.00	1,500 - 10,000	5	0.45	300
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000	5 ผสมวัสดุปอซโซลาน	0.45	300

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บุรฉัตร นัตถวิระ , ทวีศักดิ์ คงทรัพย์ , 2545 [11] , ศึกษาความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบค่า คุณสมบัติที่ทำการศึกษาคือ การหดตัวแบบแห้ง การหดตัวแบบอโตจินัส ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น และการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและซัลฟูริก โดยใช้ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบค่าในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 อัตราส่วนโดยปริมาตรของซีเมนต์เฟลสต่อปริมาตรช่องว่างระหว่างมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.2 , 1.4 และ 1.6 ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.6 , 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบค่าจะมีการหดตัวแบบแห้งและความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าคอนกรีตปกติ โดยการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 จะมีค่ามากกว่าร้อยละ 40 และความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจะแปรตามกับอัตราส่วนผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมไดออกไซด์ และไอรอนออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) /CaO อย่างไรก็ตาม การหดตัวแบบอโตจินัสและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารละลายกรดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบค่าจะมีค่าต่ำกว่าปกติ

วิวัฒน์ พัทธสนานนท์ , ธนกร ทวีวุฒิ , เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย , สถาพร โภคา , 2554 [12] , ทำการ ศึกษาเรื่องผลของระยะเวลาในการบ่มเปียกต่อความลึกของคาร์บอนเนชั่นของ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ในการศึกษาที่ใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีความหนาแน่นแบบเปียกเท่ากับ 1,600 กก./ม<sup>3</sup> อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45, 0.50 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 แบ่งตัวอย่างออกเป็น 4 กลุ่ม ทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตแต่ละกลุ่มโดยการบ่มแห้ง 56 วัน และบ่มเปียกที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นนำ

ตัวอย่างไปเก็บไว้ภายนอกห้องปฏิบัติการ ทำการทดสอบหาความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อถึงกำหนดเวลาทดสอบ โดยกำหนดระยะเวลาทดสอบคาร์บอนชั้นของคอนกรีตสูงสุดอยู่ที่ 5 เดือน จากผลทดสอบพบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ผ่านการบ่มโดยการบ่มแห้งมีความลึกคาร์บอนชั้นสูงสุด และการบ่มเปียกทำให้ค่าความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยที่เมื่อระยะเวลาในการบ่มเปียกนานขึ้น จะทำให้คาร์บอนชั้นของคอนกรีตลดลง แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าระยะเวลาที่บ่มเปียกแทบจะไม่มีผลต่อความลึกคาร์บอนชั้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเมื่อบ่มอย่างน้อยเป็นระยะเวลา 14 วัน และยังพบอีกว่าการเพิ่มอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ของคอนกรีตหรือเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมจะทำให้ค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นในคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นทุกสูตรและทุกวิธีและอายุของการบ่ม

ตามยศ สมยาภักดี, ภัควัฒน์ แสนเจริญ, ปติสานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (2553) [13], ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเกิดสนิม มักพบปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตภายหลังการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ คือการเกิดสนิมอีกครั้งในระยะเวลาอันสั้น โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตเก่ากับวัสดุซ่อมแซม จุดประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ก็เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตแบบเฉพาะที่ ตัวอย่างที่ทดสอบแบ่งเป็นสองฝั่งคือ คอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมแซม โดยแปรผันปริมาณคลอไรด์ไอออนในแท่งตัวอย่างคอนกรีตเก่าร้อยละ 0, 2, 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของคอนกรีตเก่าและพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของวัสดุซ่อมแซม ได้แก่ 3:17, 10:10 และ 17:3 วัสดุที่ใช้ซ่อมแซมได้แก่ ซีเมนต์มอร์ตาร์ มอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์ และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม โดยทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และวัดค่ากระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตเพิ่มขึ้น อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดและแคโทดมีผลต่อค่าการเกิดสนิมเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนเพิ่มขึ้น วัสดุซ่อมแซมที่มีความทึบน้ำมากมีผลทำให้กระแสที่เกิดขึ้นนั้นน้อยลง การเลือกใช้วัสดุสำหรับซ่อมแซมที่ถูกต้องเหมาะสมจะเป็นการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม อายุการใช้งานของโครงสร้างหลังซ่อมแซมจะนานขึ้น เป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับซ่อมบำรุง สุดท้ายเพื่อเป็นแนวทางในการเสนอวิธีซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทน

Ominda Nanayakkara และ Yoshitaka Kato (2007) [14] , ได้ทำการศึกษา การเกิดสนิมแบบ Macrocell ของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ซ่อมแซมบางส่วน โดยเพิ่มแปรผันปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันระหว่างส่วนที่ไม่ได้ซ่อมแซมกับส่วนที่ซ่อมแซม สรุปผลได้ว่า สมมติฐานทั่วไปและการวิจัยสามารถพบการเกิดสนิมจากการที่ซ่อมแซม ส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณที่พื้นผิวติดกับกับส่วนที่ซ่อมแซม และยังพบว่ากระแสการเกิดสนิมแบบ Macrocell ที่ด้านแอนโอดส่วนหนึ่งเกิดจากผลของวัสดุซ่อมแซม ขณะที่กระแสด้านแคโทดปรากฏในส่วนของคอนกรีตเมื่อปริมาณคลอไรด์ต่ำ สามารถยืนยันได้ว่า การเกิดสนิมแบบ Macrocell ในวัสดุซ่อมแซมอาจสังเกตได้เมื่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากการซ่อมแซม โดยวัสดุที่มีค่าความต้านทานวัสดุ หรือการต้านทานซึมผ่านของน้ำและออกซิเจนที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่เป็นคอนกรีตเก่า กระบวนการเกิดสนิมนี้สามารถพบเห็นได้ทั่วไป เมื่อมีค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมีที่สูงมาก

Ominda Nanayakkara และ Yoshitaka Kato (2006) [15] , ได้ทำการศึกษาการเกิดสนิมแบบ Macrocell พิจารณาปริมาณคลอไรด์ตามแนวเหล็กเสริม โดยจุดประสงค์ของการศึกษาก็เพื่อความเข้าใจต่อการเกิดสนิมเหล็กเสริมแบบ Macrocell จากการปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันของคลอไรด์ที่เข้าสู่คอนกรีต ตัวอย่างที่หล่อเพื่อให้มีปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันทั้งสองด้านจากจุดกึ่งกลางของตัวอย่าง เหล็กเสริมที่แบ่งออกใช้เพื่อติดตามผลการเกิดสนิมเป็นระยะ และด้วยเหตุนี้เองความหนาแน่นของกระแสจึงถูกคำนวณ ซึ่งพบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสการเกิดสนิมสูงสุด พบการเกิดสนิมในพื้นที่ที่ติดกับของชิ้นงานที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับที่ปรากฏในด้านที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนสูง และยังเข้าใจถึงการเกิด Macrocell จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ความแตกต่างกัน และปริมาณคลอไรด์ไอออนทั้งหมด

Ominda Nanayakkara และ Yoshitaka Kato (2007) [16] , ได้ทำการศึกษาผลจากระยะเวลาต่อการเกิดสนิมเหล็กเสริมแบบ Macrocell ในชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากวัสดุและความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของสิ่งแวดล้อม เกี่ยวกับการทดลองด้วยพื้นฐานทางทฤษฎีเพื่อทราบถึงผลกระทบของปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันและสม่ำเสมอต่อพฤติกรรมการเกิดสนิมแบบ Macrocell เพื่อแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและต่างกันตามลำดับ ตัวอย่างคอนกรีตถูกหล่อขึ้นด้วยปริมาณคลอไรด์ไอออนที่แตกต่างกันในสองด้านจากจุดกึ่งกลางและปริมาณคลอไรด์ที่สม่ำเสมอตลอดชิ้นตัวอย่าง กระแสการเกิดสนิมแบบ Macrocell ได้จากการวัดตามแนวเหล็กเสริมเป็นระยะซึ่งจะจงเปรียบเทียบกับที่ถูกแบ่งออกเป็นพิเศษ และพบว่ากระแสการเกิดสนิมแบบ Macrocell ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ดังนั้นตำแหน่งแอนโอดเปลี่ยนปฏิกิริยาจาก



แอนโตนิกคู่แคะโทดิกตามระยะเวลา ซึ่งตำแหน่งแคะโทดิกจะเปลี่ยนปฏิกิริยาแคะโทดิกเป็นแอนโตนิกในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ในสถานการณ์อื่น บางตำแหน่งตามแนวเหล็กเสริมแสดงให้เห็นจุดที่มีอัตราการเกิดสนิมสูงสุดจุดเดียว และหลายๆจุด เป็นระยะๆ การสังเกตนี้ขึ้นอยู่กับเวลาของกระบวนการเกิดสนิม

Young-Shik Park, Jin-Kook Suh, Jae-Hoon Lee, Young-Shik Shin (1999) [17] ; ทำการวิจัยเรื่อง “Strength Determinate of high-strength concrete in sulfate environment” โดยออกแบบส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้า 7 ส่วนผสม โดยนำตัวอย่างแต่ละส่วนผสมจำนวน 50 ตัวอย่างไปแช่ในน้ำสะอาด, สารละลาย  $MgSO_4$  10% ,  $Na_2SO_4$  10% และสารละลายผสมระหว่าง  $MgSO_4$  10% และ  $Na_2SO_4$  10% ที่ PH=7 เป็นเวลา 270 วันแล้วนำไปทดสอบกำลังอัดได้ผลสรุปดังนี้

1)  $MgSO_4$  ,  $Na_2SO_4$  เป็นสาเหตุของความสึกกร่อน แต่อย่างไรก็ตาม  $MgSO_4$  ก็เป็นสาเหตุหลักในการทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำ

2) ในการกัดกร่อนจาก  $Na_2SO_4$  , ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีสาร Superplasticizer และ ซิลิกาฟูม มีความทนซัลเฟตต่ำและมีแนวโน้มที่จะมีกำลังอัดต่ำลง เนื่องจากมีความพรุนสูงเพราะมี w/c สูง

3) ในการกัดกร่อนจาก  $MgSO_4$  , HSC ที่ผสมสาร Superplasticizer และ ซิลิกาฟูม มีความสามารถที่แย่ และมีแนวโน้มที่จะให้กำลังอัดที่ต่ำลง ซึ่งหมายถึง HSC ที่ผสมเฉพาะซิลิกาฟูม จะทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต และการกัดกร่อนจาก  $MgSO_4$  และการกัดกร่อนจะลดลงต่อเมื่อมีการเพิ่มซิลิกาฟูมในส่วนผสมไม่น้อยกว่า 10 %

4) ในส่วนผสมที่มีซิลิกาฟูมสูง จะมีการขยายตัวของตัวอย่างทดสอบต่ำในการกัดกร่อนจาก  $Na_2SO_4$  แต่จะมีการขยายตัวสูงในการกัดกร่อนจาก  $MgSO_4$

5) น้ำหนักของตัวอย่างที่ 90 วันที่กัดกร่อนโดย  $Na_2SO_4$  จะลดลงน้อยมาก แต่น้ำหนักที่ลดลงของจากการกัดกร่อนโดย  $MgSO_4$  มีนัยสำคัญโดยเฉพาะที่ส่วนผสมที่มีซิลิกาฟูม 15%

Kazuyaki Torii and Mitsunori Kawamura (1994) [18] ; ทำการศึกษาเรื่อง “Effects of Fly ash and silicafume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack” ทำการทดสอบตัวอย่าง โดยการแทนที่ส่วนผสมด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟูม จากนั้นนำไปแช่ในกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$  2%),  $Na_2SO_4$  10% และ  $MgSO_4$  10% เป็นเวลา 3 ปี ผลปรากฏว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยและซิลิกาฟูม มีประสิทธิภาพในการต้านทานกรดซัลฟูริกและสารละลายซัลเฟต

S.T. Lee, H.Y.Moon, R.N. Swamy (2004) [19] , ทำการศึกษาเรื่อง “Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss” โดยออกแบบส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้า 8 ส่วนผสมแล้วนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  5% และสารละลายผสมระหว่าง  $MgSO_4$  5% และ  $Na_2SO_4$  5%

เป็นเวลา 510 วัน จากนั้นนำไปทดสอบกำลังอัดและทำ X-ray Diffraction (XRD) สรุปได้ว่าตัวอย่างที่ผสมซิลิกาฟุ่ม 10-15% มีการสูญเสียกำลังอัด 20% ในขณะที่ไม่ผสมจะสูญเสียถึงประมาณ 70% ที่ระยะเวลา 510 วัน

E.E. Hekel, E. Kishar, H. Mostafa (2002) [20] , ทำการศึกษาเรื่อง “Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances” โดยทำการออกแบบส่วนผสมทั้งหมด 11 ส่วนผสม ที่ได้จากซิลิกาฟุ่ม, Slag และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้  $w/c = 0.3$  โดยนำตัวอย่างที่ได้หลังจากบ่มในน้ำที่ 28 วัน ไปแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  10% เป็นเวลา 30, 60, 90, 120 วันที่สภาพต่างๆกัน ได้แก่ที่อุณหภูมิห้อง, ที่  $60^{\circ}C$  และที่  $60^{\circ}C$  ภายใต้วัฏจักรแบบเปียกสลับแห้ง ได้ผลปรากฏว่า Slag และแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถปรับปรุงความต้านทานซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1 (OPC) ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม 10-15% ไม่ได้เป็นการปรับปรุงการทนซัลเฟตให้ดีขึ้นของ hardened blended cement pastes และที่  $60^{\circ}C$  ภายใต้วัฏจักรแบบเปียกสลับแห้ง จะเป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟตได้เร็วยิ่งขึ้น

นพคุณ ผลโพธิ์, 2554 [21] , ทำการศึกษาเรื่องผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ชนิดวัสดุประสานและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต ในการทดลองการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ ใช้วิธีวัดค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ และพบว่าทั้งการแทนที่และการบดผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟตน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ยกเว้นกรณีของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และการแทนที่เถ้าลอย (ที่มีค่า CaO สูงๆ) ในปริมาณน้อยๆ ร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงหรือมากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์มากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต นอกจากนี้พบว่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟตทั้งมอร์ตาร์บดผสมและการแทนที่เถ้าลอยหรือผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าน้อยหรือไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์เถ้าลอยไม่ว่าบดผสม หรือแทนที่ (เถ้าลอยปริมาณสูง) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ค่า

มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะที่มอร์ตาร์ผงหินปูนไม่ว่าบดผสม หรือแทนที่ หรือ แทนที่ร่วมกับเถ้าลอย (เถ้าลอยปริมาณต่ำ) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และสุดท้ายทราบสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อม ชัลเฟต



## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

สำหรับในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการศึกษาโดยมีหัวข้อคือ วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา และรายละเอียดวิธีการศึกษา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มอก. 15-2547 และ/หรือ มาตรฐาน ASTM C150

3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มอก. 15 เล่ม 1-2547 และ/หรือ มาตรฐาน ASTM C150

3.1.3 ถังลอกจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

3.1.4 มวลรวมหยาบ ไซ้หิน

3.1.5 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำที่มีขนาดร่อนผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4

3.1.6 สารเพิ่มกำลังอัด (Strength Enhancing Mineral Admixture) ตามมาตรฐาน ASTM C465 และมอก.15 แสดงดังรูปที่ 3.1



#### รูปที่ 3.1 สารเพิ่มกำลังอัด

3.1.7 น้ำ ใช้น้ำประปา

3.1.8 แบบสำหรับหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม. และ 50x50x50 มม.

3.1.9 แบบสำหรับหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มม. และ  $\varnothing$  10x200 มม.

### 3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดการศึกษาในครั้งนี้ประกอบไปด้วย การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน การทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ การทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต และการทดสอบความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ได้ทำการศึกษาได้แก่

- 1) ความละเอียดของวัสดุประสาน โดยวิธีเบลน ตามมาตรฐาน ASTM C204
- 2) ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน ตามมาตรฐาน ASTM C188
- 3) ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน โดยวิธี Scanning Electronic

Microscope : (SEM)

- 4) องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry :

(XRF)

#### 3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

คุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาได้แก่

- 1) การก่อตัว (Setting time) ของเพสต์
- 2) การไหลแผ่ (Flow) ของมอร์ต้าร์
- 3) กำลังอัดประลัย (Compressive strength;  $f'_c$ ) ของมอร์ต้าร์ และคอนกรีต

#### 3.2.3 การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

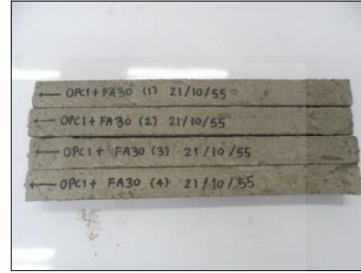
ทำการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C 596-96 โดยใช้เครื่องวัดความยาว (length comparator) แสดงดังรูปที่ 3.2 วัดความยาวที่เปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดความยาว (length comparator)

### ก. การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. แสดงดังรูปที่ 3.3 แต่ละสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้ชั้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ชั้น



(ก) แบบหล่อขนาด 25x25x285 มม. (ข) ชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม.

### รูปที่ 3.3 แบบหล่อและชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

#### ข. การบ่มและการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ตาร์

หลังจากหล่อชั้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ตาร์ 24 ชั่วโมง แล้วนำชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำ เป็นเวลา 7 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$  หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำ นำชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำทดสอบขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวเสร็จแล้ว นำชั้นตัวอย่างบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$  โดยวางชั้นตัวอย่างบนโต๊ะ (แสดงดังรูปที่ 3.4) ให้มีระยะห่างของแต่ละชั้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1 3 5 7 14 21 28 56 และ 91 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่อายุบ่มต่างๆกัน



รูปที่ 3.4 ชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$

### ค. การหาค่าการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ตาร์

เมื่อครบที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1 3 5 7 14 21 28 56 และ 91 วัน นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 4 วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน โดยสามารถหาค่าการหดตัวแห้งตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ได้จากสมการที่ (3.1)

$$\Delta L = \frac{L_i - L_x}{L_g} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย	$\Delta L$	คือ	ค่าการหดตัวแบบแห้ง (%)
	$L_i$	คือ	ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากบ่มในน้ำ เป็นเวลา 7 วัน (มิลลิเมตร)
	$L_x$	คือ	ค่าเฉลี่ยความยาวของตัวอย่างหลังจากบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ (มิลลิเมตร)
	$L_g$	คือ	ค่าความยาวของ Gauge Length (มิลลิเมตร)

### 3.2.4 การทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

#### ก. การเตรียมตัวอย่างและการบ่มตัวอย่างคอนกรีต

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตซึ่งเตรียมโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 100x100x100 มม. แสดงดังรูปที่ 3.5 เพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้นตามมาตรฐาน ASTM C109 หลังจากหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตแล้วทำการถอดแบบมอร์ตาร์ที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20±2°C เป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน (แบ่งตัวอย่าง 2 ส่วน) อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2°C หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20±2°C แล้ว นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่จะทำการทดสอบขึ้นจากน้ำ แล้วทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของชิ้นตัวอย่างออกแล้วเช็ดผิวชิ้นตัวอย่างด้วยผ้าสะอาด และทิ้งไว้จนแห้ง

นำตัวอย่างไปอบในตู้อบคาร์บอนชั้น แสดงดังรูปที่ 3.6 ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ 40,000 ppm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นร้อยละ 55 โดยใช้ระยะเวลาในการอบ 28 วัน และ 56 วัน รอจนครบอายุที่กำหนด จึงนำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้น



รูปที่ 3.5 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มม.

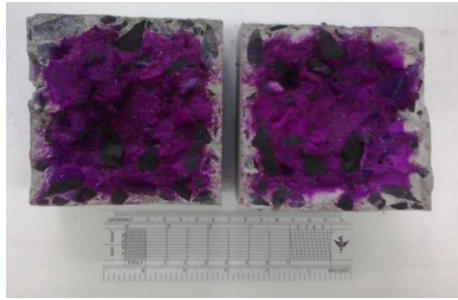


รูปที่ 3.6 ตู้อบคาร์บอนเนชั่น

ข. การทดสอบค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น

- 1) เมื่อตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 100 x 100 x 100) อยู่ในตู้อบคาร์บอนเนชั่นครบอายุตามที่กำหนดแล้ว ให้นำออกมาจากตู้อบคาร์บอนเนชั่น
- 2) นำตัวอย่างคอนกรีตออกเป็น 2 ซีก (โดยเครื่องUTM)
- 3) นำก้อนตัวอย่างมาวางแล้วฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลิน (Phenolphthalein) ที่ก้อนตัวอย่างซึ่งปรากฏเป็นสีม่วง
- 4) ปลอ่ยทิ้งไว้จนแห้งประมาณ 5 นาที แล้วทำการวัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง บริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่น แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยใช้เวอร์เนียรวัดทั้ง 4 ด้าน ด้านละ 6 ค่า
- 5) จดบันทึกค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น แล้วนำค่าที่ได้เฉลี่ยกัน





### รูปที่ 3.7 ความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

3.2.5 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต (Rapid Chloride Permeability Test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ในการประเมินความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. โดยมีหลักในการทดสอบ คือ ป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันคงที่ 60 VDC ระหว่างผิวหน้าทั้งสอง ทำการวัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างในการทดสอบในหน่วยของมิลลิแอมแปร์ ไว้ตลอดระยะเวลา 6 ชั่วโมง และอินทิเกรตเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นค่าแอมแปร์ – วินาที (Ampere – Second) ให้มีหน่วยเป็น คูลอมป์ (Coulomb) ซึ่งจำนวนคูลอมป์ที่วัดได้สามารถใช้อำเนกคอนกรีตตามระดับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การใช้จำนวนคูลอมป์ ในการจำแนกคอนกรีตตามระดับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

คูลอมป์	ระดับการแทรกซึมคลอไรด์
> 4,000	สูง
4,000 – 2,000	ปานกลาง
2,000 – 1,000	ต่ำ
1,000 - 100	ต่ำมาก
< 100	เล็กน้อย

### ก. การเตรียมแท่งตัวอย่างคอนกรีต

หล่อแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. หลังจากแกะแบบแล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำ 28 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มให้นำออกมาเช็คผิวคอนกรีตแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วตัดด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. แสดงดังรูปที่ 3.8



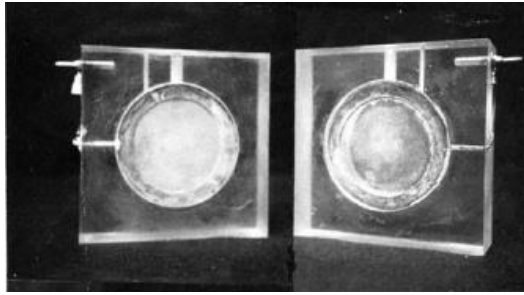
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.

### ข. การเตรียมสารละลาย

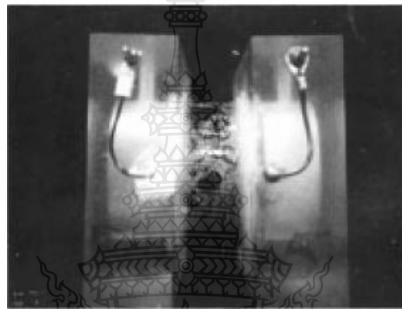
สารละลายที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ตาร์ ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ สำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เตรียมโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ 30 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เตรียมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัมละลายในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 1000 กรัม เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์

### ค. ขั้นตอนการทดสอบ

1) นำแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่เช็คสะอาดมาประกอบเข้าไปใน Cell แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งตัวอย่างที่พร้อมทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 Cell



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างคอนกรีตที่ประกอบใน Cell

2) เติมน้ำละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 % ( 3% NaCl ) กับเติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 N ( 0.3 N NaOH ) เข้าไปในช่องเก็บกักสารละลายแต่ละข้างของ Cell

3) เชื่อมต่อโดยสายไฟระหว่าง Cell กับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.11 ที่มีอุปกรณ์ในการอ่านค่าและพร้อมทำการทดสอบ เปิด Power Supply ตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า  $60 \pm 0.1$  VDC ทำการจดบันทึกค่าเริ่มต้น ในระหว่างการทดสอบอุณหภูมิของห้องควรอยู่ที่ 20 ถึง 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.11 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

4) อ่านและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างที่มีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ ทุกๆ 30 นาที เมื่อครบเวลาทำการทดสอบ 6 ชั่วโมงให้ทำการปิดเครื่องทดสอบ

ง. การหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่าง

นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำการจดบันทึกตลอดการทดสอบ 6 ชั่วโมง มาคำนวณหาปริมาณจำนวนประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีต มีหน่วยเป็น คูลอมป์ โดยการคำนวณแสดงดังสมการที่ (3.2)

$$Q = 900 ( I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360} ) \quad (3.2)$$

$Q$  = ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีต มีหน่วยเป็น คูลอมป์ (Coulomb)

$I_0$  = แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Amperes) ทันทีหลังจากที่เปิดแรงดันไฟฟ้า

$I_t$  = แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Amperes) แต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ

### 3.2.6 การทดสอบความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

การวัดความต้านทานซัลเฟต (sulfate resistance) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1012 ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม. สำหรับวัดการขยายตัว (Expansion) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) และใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ 50x50x50 มม. สำหรับวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) โดยเตรียมสารละลายแต่ละชนิดไว้ล่วงหน้า 1 วัน อุณหภูมิสารละลายขณะแช่ตัวอย่างประมาณ  $30 \pm 2^\circ\text{C}$  และใช้ความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือปริมาณไอออนซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) เท่ากับ 33800 ppm กรณีใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเตรียมโดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร ได้ปริมาณไอออนซัลเฟตเท่ากับ 33800 ppm ส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร ได้ปริมาณไอออนซัลเฟตที่เท่ากันคือ 33800 ppm โดยสารละลายซัลเฟตที่ใช้แช่ตัวอย่างจะมีทำการเปลี่ยนทุกๆ 2 เดือน

#### 3.2.6.1 วิธีทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์

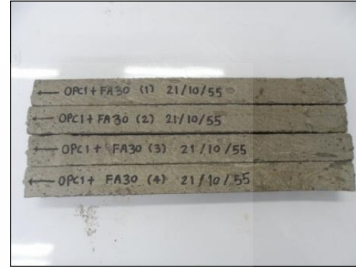
ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยใช้เครื่องวัดความยาว length comparator วัดความยาวที่เปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. แสดงดังรูปที่ 3.12 ในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้ชั้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ชั้น



(ก) แบบหล่อขนาด 25x25x285 มม.



(ข) ชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม.

รูปที่ 3.12 แบบหล่อและชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต

ข. การบ่มและการทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์

หลังจากหล่อชั้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ตาร์ 24 ชั่วโมง แล้วนำชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$  หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาวแล้ว นำชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวเสร็จแล้ว ให้นำชั้นตัวอย่างทั้ง 4 ชั้นไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เพื่อหาค่าเฉลี่ยการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่อายุแช่ในสารละลายครบ 2 4 8 13 20 28 36 44 52 และ 60 สัปดาห์ ตามลำดับ รูปที่ 3.13 แสดงชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 3.13 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ค. การหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์

เมื่อครบที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ 60 สัปดาห์ นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นขึ้นจากสารละลายซัลเฟตเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นำไปหาค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ได้จากสมการที่ (3.3)

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \quad (3.3)$$

โดย	$\Delta L$	คือ	ค่าการขยายตัว (%)
	$L_x$	คือ	ค่าเฉลี่ยความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุต่างๆ (มิลลิเมตร)
	$L_i$	คือ	ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน (มิลลิเมตร)
	$L_g$	คือ	ค่าความยาวของ Gauge Length (มิลลิเมตร)

### 3.2.6.2 วิธีทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยการหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม

ก. การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ ใช้ชิ้นตัวอย่าง มอร์ตาร์ซึ่งเตรียมโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 มม. แสดงดังรูปที่ 3.15 ในแต่ละสัปดาห์ผสมมอร์ตาร์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 3 ชิ้น



(ก). แบบหล่อขนาด 50x50x50 มม.



(ข). ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม.

รูปที่ 3.15 แบบหล่อและตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ใน

สารละลายซัลเฟต

ข. การบ่มและการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์แล้วทำการถอดแบบมอร์ตาร์ที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$  หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำ แล้วล้างทำความสะอาดเอาปูนขาวและสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของชิ้นตัวอย่างออกแล้วเช็ดผิวชิ้นตัวอย่างด้วยผ้าสะอาด เมื่อชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์อยู่ในสภาวะที่ผิวแห้ง นำชิ้นตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ชั่งได้นี้จะใช้เป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างมอร์ตาร์ หลังจากชั่งน้ำหนักเสร็จแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อหาค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ

แช่ในสารละลายครบ 2 4 8 13 20 28 36 44 52 และ 60 สัปดาห์ ตามลำดับ รูปที่ 3.16 แสดงขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ 3.16 ขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

#### ค. การหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์

เมื่อครบที่อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ 60 สัปดาห์ นำขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ทั้ง 3 ชิ้นของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ขึ้นจากสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นนำขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์มาเช็ดทำความสะอาดและซับผิวให้แห้งด้วยผ้า เมื่อขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์อยู่ในสถานะอิมตัวผิวแห้งนำขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าไปหาการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ได้จากสมการ (3.4)

$$\Delta W = \frac{W_i - W_x}{W_i} \times 100 \quad (3.4)$$

โดย  $\Delta W$  คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (%)  
 $W_i$  คือ ค่าน้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)  
 $W_x$  คือ ค่าน้ำหนักที่อายุต่างๆที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (กรัม)

#### 3.2.7 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 สารเพิ่มกำลังอัด และเถ้าลอยแม่เมาะ ซึ่งสัดส่วนผสมได้แสดงดังตารางที่ 3.2 ถึง 3.5



ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)					
		ปูนซีเมนต์ประเภท		เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด	ทราย	น้ำ
		ที่ 1	ที่ 5				
1	MC1	1.00	-	-	-	2.75	0.55
2	MC1FA30	0.70	-	0.30	-	2.75	0.55
3	MC1 5.5Ad	1.00	-	-	0.055	2.75	0.55
4	MC1 6.5Ad	1.00	-	-	0.065	2.75	0.55
5	MC1 7.5Ad	1.00	-	-	0.075	2.75	0.55
6	MC1 5.5Re	0.945	-	-	0.055	2.75	0.55
7	MC1 6.5Re	0.935	-	-	0.065	2.75	0.55
8	MC1 7.5Re	0.925	-	-	0.075	2.75	0.55

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบ การเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีต โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)					
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด	ทราย	หิน	น้ำ
2	CC1FA30	275	118	-	727	1047	196
3	CC1 5.5Ad	393	-	22	727	1047	196
4	CC1 6.5Ad	393	-	26	727	1047	196
5	CC1 7.5Ad	393	-	30	727	1047	196
6	CC1 5.5Re	372	-	22	727	1047	196
7	CC1 6.5Re	368	-	26	727	1047	196
8	CC1 7.5Re	364	-	30	727	1047	196

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.30

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)						สารลดน้ำ
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด	ทราย	หิน	น้ำ	
1	CC1	520	-	-	727	1047	151	5.2
2	CC1FA30	364	156	-	727	1047	151	5.2
3	CC1 5.5Ad	520	-	29	727	1047	151	5.2
4	CC1 6.5Ad	520	-	34	727	1047	151	5.2
5	CC1 7.5Ad	520	-	39	727	1047	151	5.2
6	CC1 5.5Re	491	-	29	727	1047	151	5.2
7	CC1 6.5Re	486	-	34	727	1047	151	5.2
8	CC1 7.5Re	481	-	39	727	1047	151	5.2

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)					ทราย	น้ำ
		ปูนซีเมนต์ประเภท		เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด			
ที่ 1	ที่ 5							
1	MC1	1.00	-	-	-	2.75	0.55	
2	MC5	-	1.00	-	-	2.75	0.55	
3	MC1FA30	0.70	-	0.30	-	2.75	0.55	
4	MC1 5.5Ad	1.00	-	-	0.055	2.75	0.55	
5	MC1 6.5Ad	1.00	-	-	0.065	2.75	0.55	
6	MC1 7.5Ad	1.00	-	-	0.075	2.75	0.55	
7	MC1 5.5Re	0.945	-	-	0.055	2.75	0.55	
8	MC1 6.5Re	0.935	-	-	0.065	2.75	0.55	
9	MC1 7.5Re	0.925	-	-	0.075	2.75	0.55	

## การอ่านสัญลักษณ์

- CC1 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- MC5 หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน
- PC1 หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- CC1 5.5Ad หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมสารเพิ่มกำลังอัด  
แบบใส่เพิ่มร้อยละ 5.5
- MC1 7.5Re หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมสารเพิ่มกำลังอัด  
แบบแทนที่ร้อยละ 5.5
- CC1FA30 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยแบบแทนที่  
ร้อยละ 30



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์

สำหรับผลการศึกษาและวิเคราะห์ ได้พิจารณาถึง คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยแม่เมาะ และสารเพิ่มกำลังอัด โดยคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

##### 4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

###### 4.1.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน

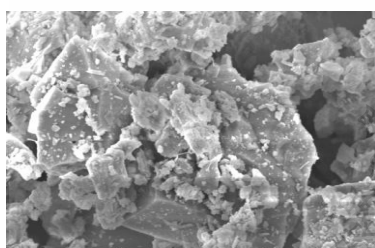
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยแม่เมาะ และสารเพิ่มกำลังอัด พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆที่ใช้ในการศึกษานี้ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงระหว่าง 3.12 ถึง 3.15 ซึ่งเป็นค่าทั่วไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยและสารเพิ่มกำลังอัดนั้นจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.38 และ 2.95 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3,300 ซม.<sup>2</sup>/ก. และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เท่ากับ 3,340 ซม.<sup>2</sup>/ก. ส่วนความละเอียดของเถ้าลอยและสารเพิ่มกำลังอัด มีค่าเท่ากับ 2,373 ซม.<sup>2</sup>/ก. และ 2,800 ซม.<sup>2</sup>/ก. ตามลำดับ

###### 4.1.1.2 ภาพถ่ายขยายของอนุภาค

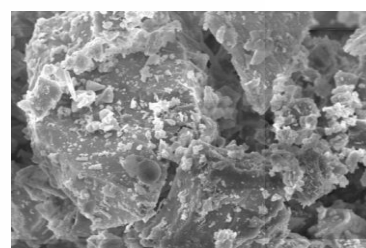
การถ่ายภาพขยายของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษานี้ ใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope : SEM ซึ่งขยาย 3,500 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่ารูปร่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 สารเพิ่มกำลังอัด มีลักษณะคล้ายกันเป็นรูปเหลี่ยม คม มีขนาดคละกัน ส่วนอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะกลมเรียบ

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

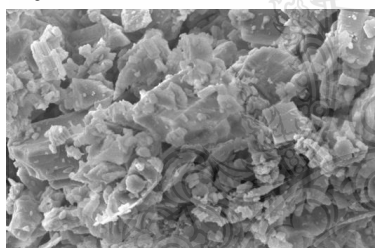
รายการ	ประเภทของวัสดุประสาน			
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5	เถ้าลอย	ผงเคมี ผสมเพิ่ม
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	3.15	2.38	2.95
ความละเอียดโดย วิธีเบลน (ชม. <sup>2</sup> /ก.)	3,300	3,340	2,373	2,800



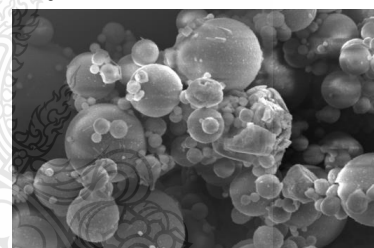
ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



ค. สารเพิ่มกำลังอัด



ง. เถ้าลอย

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาควัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

#### 4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry : XRF ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และสารเพิ่มกำลังอัด แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า SiO<sub>2</sub> ของสารเพิ่มกำลังอัดมีค่าค่อนข้างต่ำเท่ากับร้อยละ 1.94 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 18.93 และ 21.69 ตามลำดับ ในขณะที่ของเถ้าลอยมี SiO<sub>2</sub> ค่อนข้างสูงคือเท่ากับร้อยละ 37.61 ในกรณีของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก็เช่นกัน โดยที่สารเพิ่มกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 1.39 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 5.51 , 3.91

และ 20.21 ตามลำดับ และกรณีของ  $Fe_2O_3$  ก็ทำนองเดียวกันคือ สารเพิ่มกำลังอัด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.61 , 3.31 , 4.26 และ 11.51 ตามลำดับ ส่วนในกรณี  $CaO$  นั้นพบว่าของสารเพิ่มกำลังอัดมีค่าน้อยกว่าทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่มีค่ามากกว่าเถ้าลอย โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 42.97 (สารเพิ่มกำลังอัด) 65.53 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) 64.57 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5) และ 17.28 (เถ้าลอย)

ในส่วนออกไซด์รองอื่นๆ ได้แก่  $MgO$  ,  $Na_2O$  ,  $K_2O$  และ  $LOI$  จากออกไซด์ที่กล่าวมาแล้วพบว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าลอยมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ยกเว้นกรณีของ  $SO_3$  ของสารเพิ่มกำลังอัดค่อนข้างสูงคือร้อยละ 49.5 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.88 , 2.03 และ 2.28 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.2** องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สารประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5	เถ้าลอย	ผงเคมีผสมเพิ่ม
$SiO_2$	18.93	21.69	37.61	1.94
$Al_2O_3$	5.51	3.91	20.21	1.39
$Fe_2O_3$	3.31	4.26	11.51	0.61
$CaO$	65.53	64.57	17.28	42.97
$MgO$	1.24	1.16	7.24	0.1
$Na_2O$	<0.01	<0.01	0.78	-
$K_2O$	0.31	0.21	2.46	-
$SO_3$	2.88	2.03	2.28	49.5
$LOI$	2.24	1.62	0.48	2.68

## 4.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

คุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ (Cementitious properties) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วย การก่อตัว (Setting time) ของเพสต์ การไหลแผ่ (Flow) ของมอร์ตาร์ กำลังอัดประลัย (Compressive strength;  $f'c$ ) ของมอร์ตาร์ และคอนกรีต

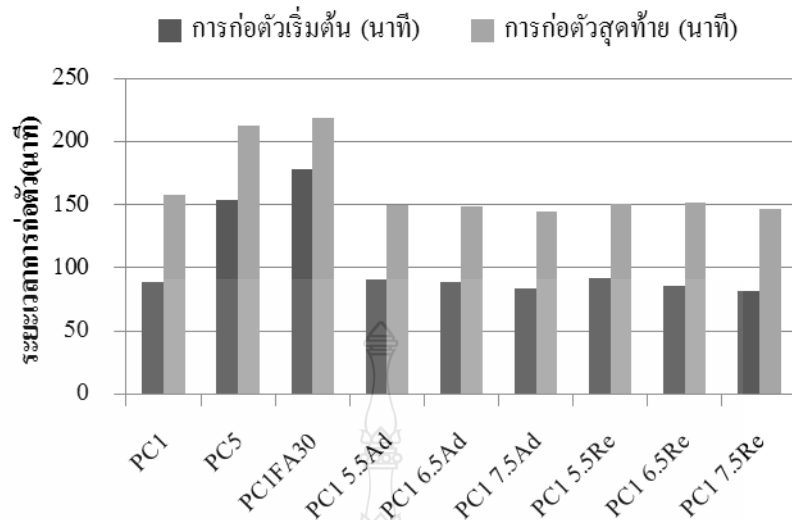
### 4.2.1 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.2 แสดงการก่อตัวของเพสต์ของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 9 สัดส่วนผสม โดยศึกษาทั้งการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และการก่อตัวขั้นสุดท้าย (Final setting time)

จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนมีค่าน้อยกว่าของประเภทที่ 5 ส่วน ส่วนระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน

ตารางที่ 4.3 การก่อตัวของเพสต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	สัดส่วนผสม	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
1	PC1	89	158
2	PC5	154	213
3	PC1FA30	178	219
4	PC1 5.5Ad	91	150
5	PC1 6.5Ad	89	149
6	PC1 7.5Ad	84	145
7	PC1 5.5Re	92	151
8	PC1 6.5Re	86	152
9	PC1 7.5Re	82	147



**รูปที่ 4.2** การก่อตัวของเพสต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

**4.2.2** ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

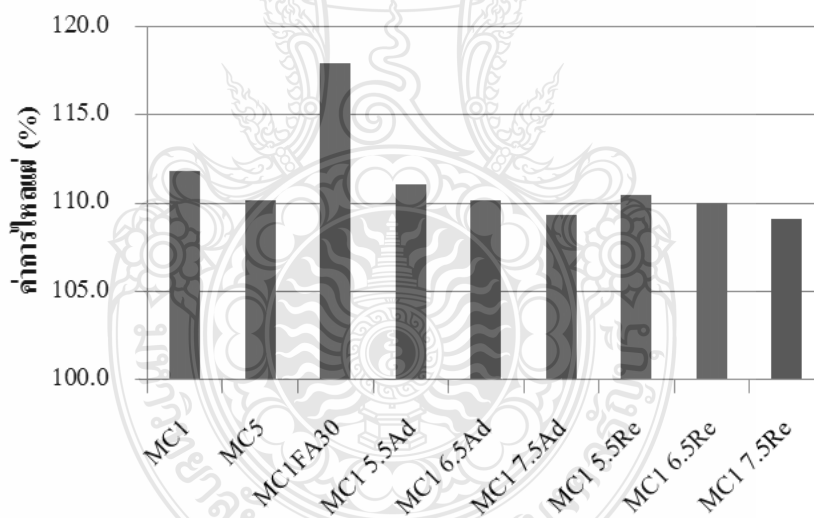
ตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.3 แสดงค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 9 สัดส่วนผสม โดยมอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

จากการศึกษาพบว่าค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากลักษณะของอนุภาคที่กลมของเถ้าลอยช่วยในการไหลลื่นทำให้การยุบตัวเพิ่มขึ้น และค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดแบบ Addition มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณร้อยละที่เพิ่มขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัดทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้นมอร์ตาร์จึงมีสภาพเหนียว สำหรับค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดแบบ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณร้อยละที่เพิ่มขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดจะช่วยเติมเต็ม จึงทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น จึงต้องการน้ำไปเคลือบผิวมากขึ้น



ตารางที่ 4.4 การทดสอบการไหลผ่านของตัวอย่างมอร์ตาร์

ลำดับ	สัดส่วนผสม	ค่าการไหลผ่าน (ร้อยละ)
1	MC1	111.8
2	MC5	110.2
3	MC1FA30	117.9
4	MC1 5.5Ad	111.1
5	MC1 6.5Ad	110.2
6	MC1 7.5Ad	109.3
7	MC1 5.5Re	110.5
8	MC1 6.5Re	110
9	MC1 7.5Re	109.1



รูปที่ 4.3 การไหลผ่านของตัวอย่างมอร์ตาร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

#### 4.2.3 กำลังอัดประลัย

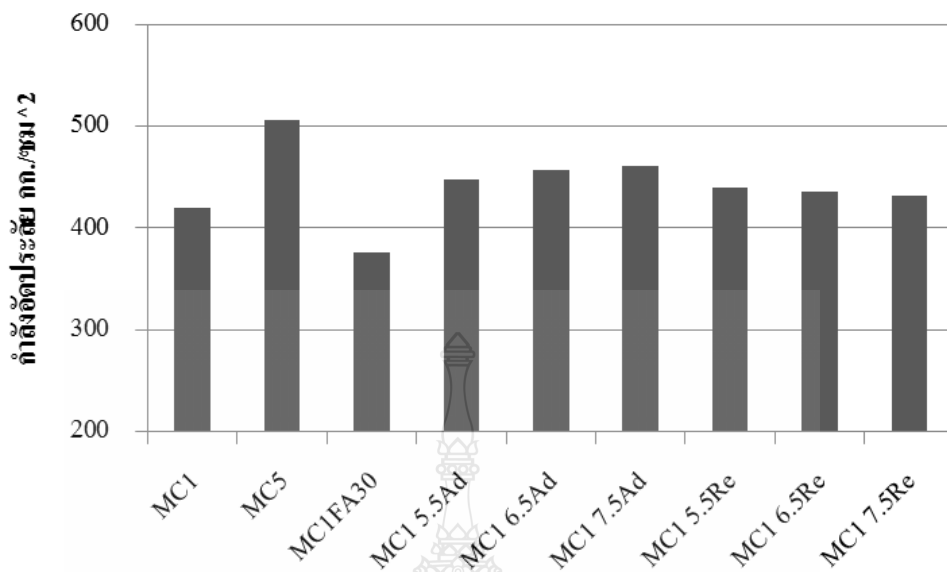
##### 4.2.3.1 กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม. ทั้งสิ้น 9 สัดส่วนผสม โดยมอร์ตาร์ใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 อายุบ่มน้ำ 28 วัน

จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มีค่าน้อยกว่าของประเภทที่ 5 ส่วน ส่วนกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดช่วยให้เกิดการประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่นมากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยสูงขึ้น ส่วนมอร์ตาร์ Replacement เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยต่ำลง นอกจากนี้พบว่ามอร์ตาร์ทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกันได้ให้กำลังอัดประลัยที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์โดยใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 วัน

ลำดับ	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (กก./ซม. <sup>2</sup> )
1	MC1	420
2	MC5	506
3	MC1FA30	376
4	MC1 5.5Ad	448
5	MC1 6.5Ad	457
6	MC1 7.5Ad	461
7	MC1 5.5Re	440
8	MC1 6.5Re	436
9	MC1 7.5Re	431



รูปที่ 4.4 กําลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 วัน

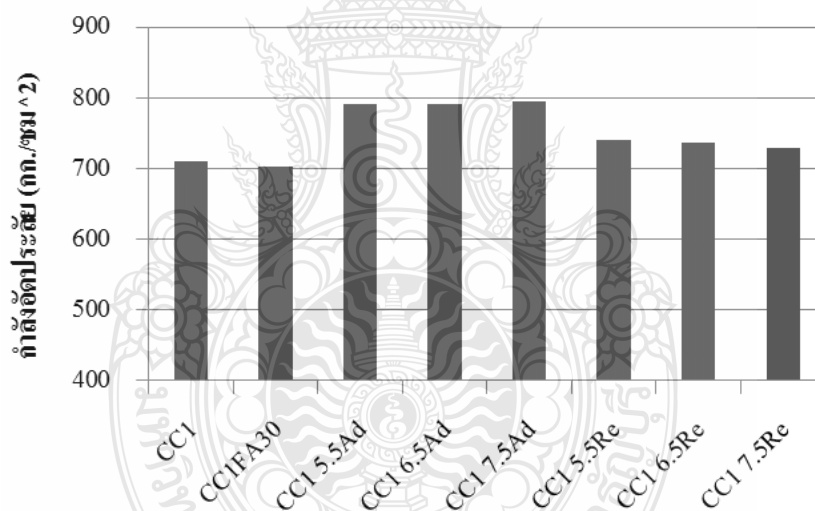
#### 4.2.3.2 กําลังอัดประลัยของคอนกรีต

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 แสดงค่ากําลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มม. ทั้งสิ้น 8 สัดส่วนผสม โดยคอนกรีตใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน

จากการศึกษาพบว่ากําลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนกําลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตผสมสารเพิ่มกําลังอัดทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกําลังอัดช่วยให้เกิดการประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่นมากขึ้น จึงส่งผลให้กําลังอัดประลัยสูงขึ้น ส่วนคอนกรีต Replacement เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง จึงส่งผลให้กําลังอัดประลัยต่ำลง นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกําลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน ให้กําลังอัดประลัยที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ที่อายุ 28 วัน

ลำดับ	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (กก./ซม. <sup>2</sup> )
1	CC1	710
2	CC1FA30	703
3	CC1 5.5Ad	791
4	CC1 6.5Ad	792
5	CC1 7.5Ad	795
6	CC1 5.5Re	740
7	CC1 6.5Re	737
8	CC1 7.5Re	730



รูปที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 ที่อายุ 28 วัน

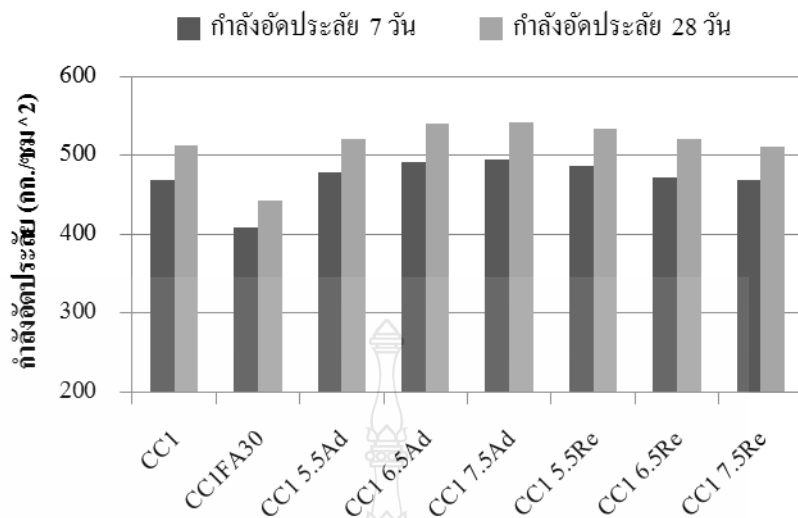
ตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.6 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มม. ทั้งสิ้น 8 สัดส่วนผสม โดยคอนกรีตใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ที่อายุบ่มน้ำ 7 และ 28 วัน

จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสาร ปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนกำลังอัดประลัยของตัวอย่าง คอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่ามากกว่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดช่วยให้เกิดการ ประสานของเพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่นมากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยสูงขึ้น ส่วน คอนกรีต Replacement เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยต่ำลง นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน ให้กำลังอัดประลัยที่ไม่แตกต่างกัน

สำหรับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน จะมีค่ามากกว่าที่อายุ 7 วัน ทั้งนี้เพราะกำลังอัดจะมาก ขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ที่อายุ 7 และ 28 วัน

ลำดับ	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (กก./ซม. <sup>2</sup> )	
		กำลังอัดประลัย 7 วัน	กำลังอัดประลัย 28 วัน
1	CC1	468	512
2	CC1FA30	409	443
3	CC1 5.5Ad	479	520
4	CC1 6.5Ad	491	540
5	CC1 7.5Ad	495	542
6	CC1 5.5Re	486	534
7	CC1 6.5Re	472	521
8	CC1 7.5Re	469	511



รูปที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ที่อายุ 7 และ 28 วัน

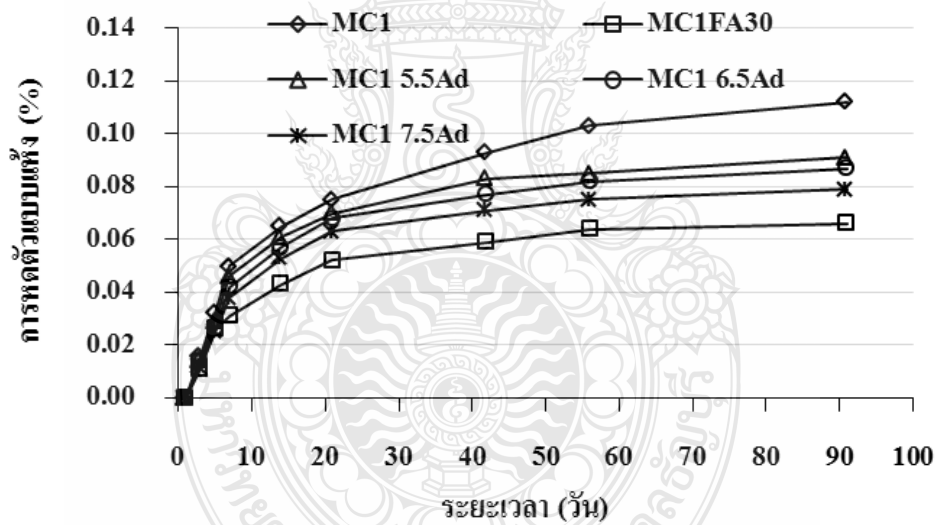
### 4.3 การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาการหัดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของมอร์ต้าร์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และสารเพิ่มกำลังอัด โดยการศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสาน ต่อการหัดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยวัดค่าการหัดตัวแบบแห้งที่อายุ 1 3 5 7 14 28 56 และ 91 วัน

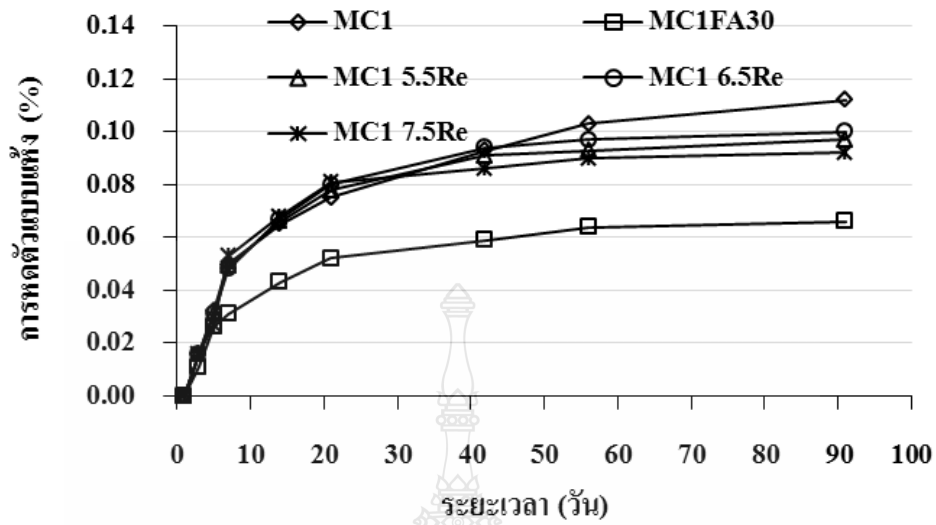
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด โดยในส่วนมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดมีการผสมใน 2 ลักษณะคือ ผสมโดยการใส่เพิ่มสารเพิ่มกำลังอัด (Addition) และผสมโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัด (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก พบว่าการหัดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์เถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดเล็ก การแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะทำให้ช่องว่างของมอร์ต้าร์ (Capillary Pore) เล็กลง และมีความแน่นมากขึ้น ทำให้การสูญเสียความชื้นจึงเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้การหัดตัวมีค่าลดลง ส่วนการหัดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้ง Addition และ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตัวประสานทำให้เพสต์มีความแน่นมากขึ้น และช่วยให้โครงสร้างของเพสต์มีความ

แข็งแรงมากขึ้น ทำให้การสูญเสียความชื้นยากขึ้น และโครงสร้างเพสต์ด้านการหดตัวได้มากขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าน้อยลง โดยเฉพาะเมื่อผสม (ทั้ง Addition และ Replacement) ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การหดตัวเกิดน้อยลง ทั้งนี้เพราะปริมาณที่มากขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัด ช่วยทำให้โครงสร้างของเพสต์มีความแน่นและแข็งแรงมากขึ้น และถ้าเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ Addition และ Replacement จะสังเกตว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ Addition มีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของ Replacement ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการ Addition ไม่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้การประสานของเพสต์ได้ดีกว่าของการ Replacement ซึ่งเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง

ส่วนรูปที่ 4.8 แสดงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเกลือลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด (ทั้ง Addition และ Replacement) ที่อายุ 91 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

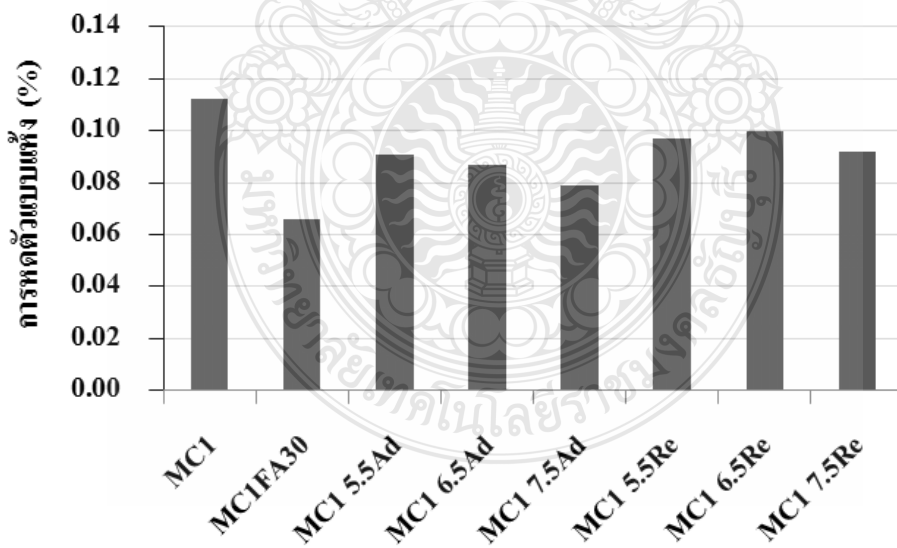


ก) Addition



จ) Replacement

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด



รูปที่ 4.8 การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 91 วัน

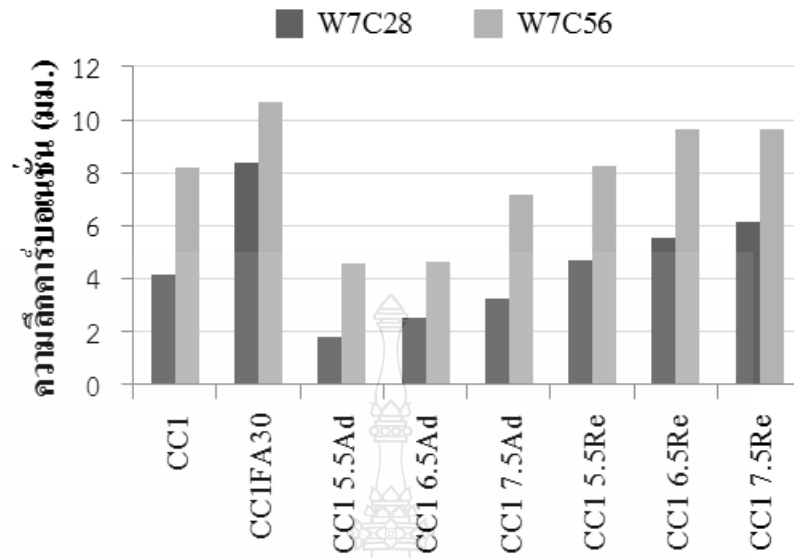


#### 4.4 การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต

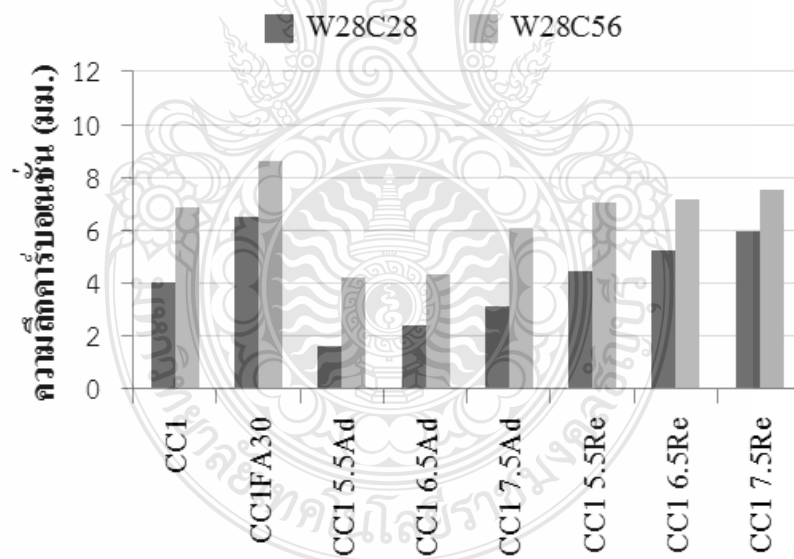
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และสารเพิ่มกำลังอัด โดยการศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสาน ต่อการเกิดคาร์บอนเนชันของตัวอย่างคอนกรีต ที่อายุบ่มน้ำ 7 และ 28 วัน ซึ่งแต่ละอายุการบ่มจะอบคาร์บอนเนชันที่อายุ 28 และ 56 วัน โดยค่าความลึกการเกิดคาร์บอนเนชัน พิจารณาได้ดังนี้

รูปที่ 4.9 แสดงความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด เมื่อตัวอย่างสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 56 วัน โดยรูปที่ 4ก) กรณีตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 7 วัน ส่วนรูปที่ 4ข) กรณีตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 28 วัน พบว่าทั้งกรณีบ่มน้ำ 7 และ 28 วัน และทั้งตัวอย่างสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 และ 56 วัน ค่าความลึกคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลาน ไปลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ส่งผลให้คาร์บอนเนชันเกิดเร็วขึ้น ส่วนความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด Addition มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดจะช่วยให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่นมากขึ้น รวมทั้งสารเพิ่มกำลังอัดมี  $\text{CaO}$  ที่มาก จึงเป็นการเพิ่ม  $\text{Ca(OH)}_2$  จึงทำให้เกิดคาร์บอนเนชันน้อยลง ในขณะที่การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด Replacement มีแนวโน้มว่าจะมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง จึงไปลด  $\text{Ca(OH)}_2$  ส่งผลให้คาร์บอนเนชันเกิดมากขึ้น

ส่วนรูปที่ 4.10 แสดงความลึกการเกิดคาร์บอนเนชันของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด โดยบ่มน้ำ 7 และ 28 วัน พบว่าการเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีตที่สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 และ 56 วัน ที่บ่มน้ำ 7 วัน ก่อนสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีมากกว่าของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน ทั้งนี้เพราะการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่นานกว่า (28 วัน) ทำให้คอนกรีตมีความทึบมากกว่าตัวอย่างที่บ่มน้อยกว่า (7 วัน) ส่งผลให้การเกิดคาร์บอนเนชันที่น้อยกว่า

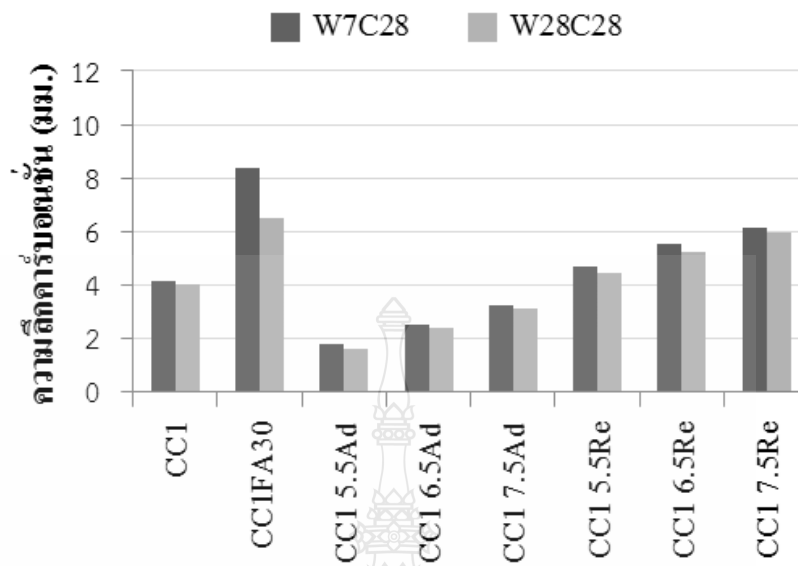


ก) ปมน้ำ 7 วัน

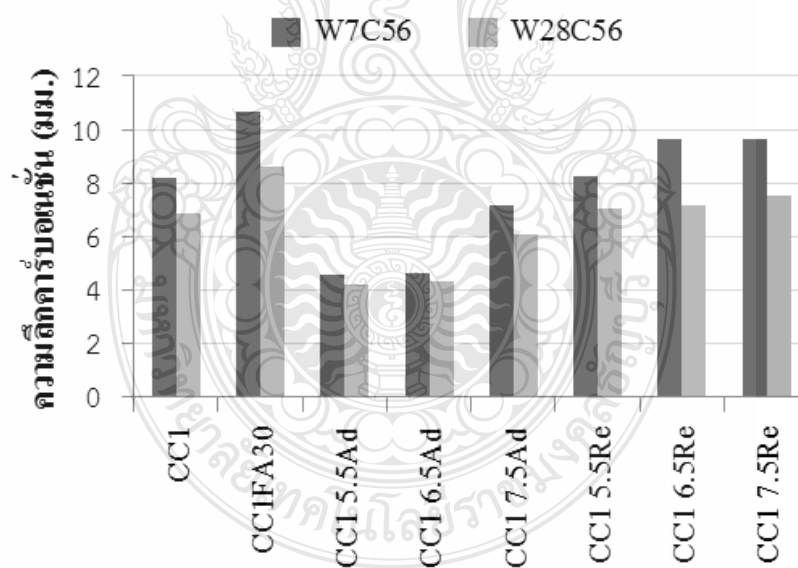


ข) ปมน้ำ 28 วัน

รูปที่ 4.9 ความถี่การเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 28 และ 56 วัน



ก) สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



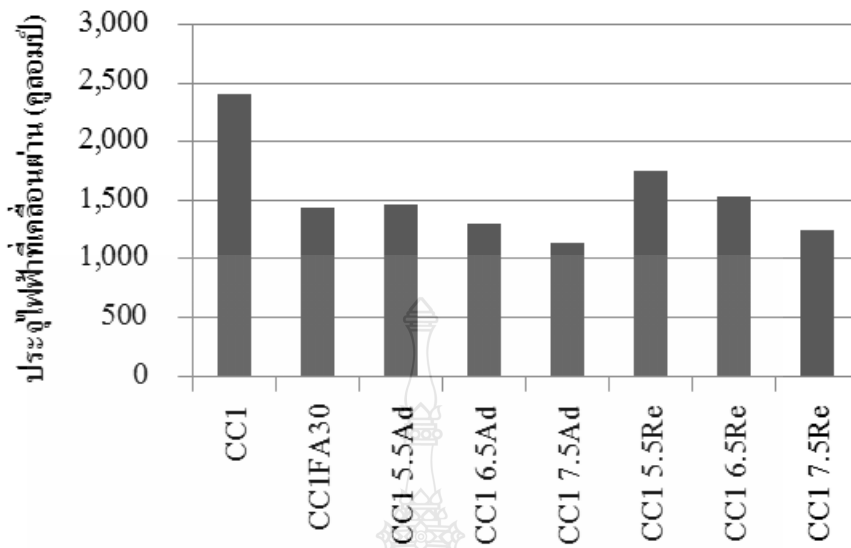
ข) สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 56 วัน

รูปที่ 4.10 ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด โดยบ่มในน้ำที่ 7 และ 28 วัน

#### 4.5 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และสารเพิ่มกำลังอัด โดยการศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสาน ต่อความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต โดยประจุไฟฟ้า (คูอมป์) ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตตลอด 6 ชั่วโมง พิจารณาได้ดังนี้

รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด พบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานและความละเอียดของเถ้าลอย จะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเพสต์จึงทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น ส่วนปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะสารเพิ่มกำลังอัดเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตัวประสานทำให้เพสต์มีความแน่นมากขึ้น และช่วยให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านยากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านน้อยลง ทั้งนี้เพราะปริมาณที่มากขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัดจะช่วยทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความแน่นและแข็งแรงมากขึ้น ทำให้สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้สูงขึ้น และถ้าเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีต Addition และ Replacement จะสังเกตว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีต Addition มีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของ Replacement ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการ Addition ไม่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้การประสานของเพสต์ได้ดีกว่าของ Replacement ซึ่งเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง



รูปที่ 4.11 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน  
คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

#### 4.6 การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

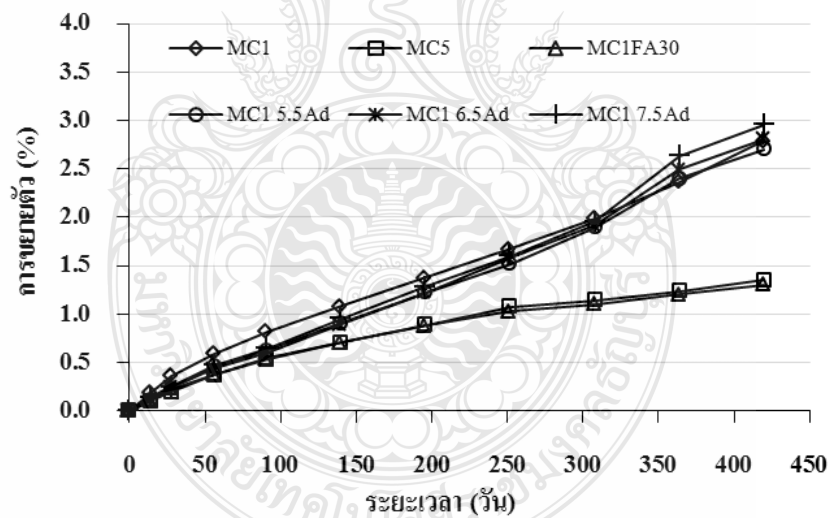
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และสารเพิ่มกำลังอัด โดยการศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสาน ต่อผลกระทบจากชนิดของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อการขยายตัว และผลกระทบสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยวัดค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 2 3 4 8 13 และ 16 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นให้ทำการวัดตัวอย่างทุกๆอายุ 2 เดือน

##### 4.6.1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

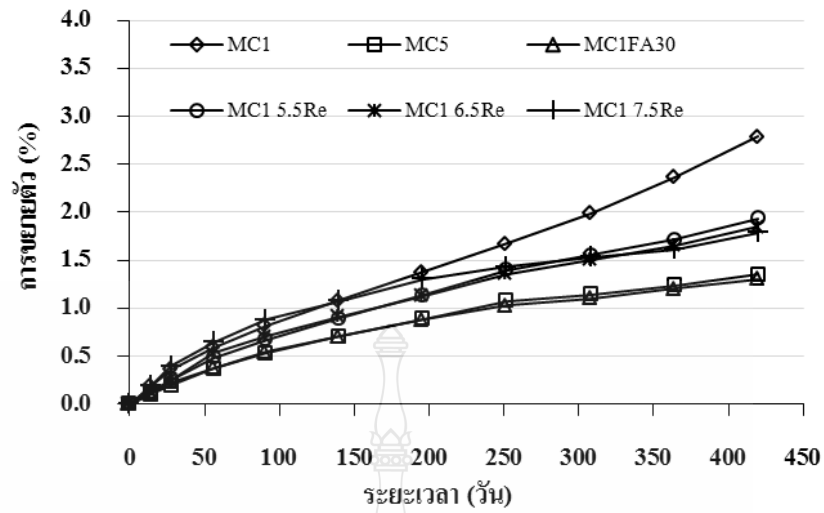
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ทั้งนี้เพราะปริมาณ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite น้อยกว่า ส่วนค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่า

ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  รวมทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจึงเป็นการลดปริมาณ  $\text{C}_3\text{A}$  ลง ส่วนการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด Addition ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน (รูปที่ 4.12ก) ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน (รูปที่ 4.12ข) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดเป็นการลดปริมาณ  $\text{C}_3\text{A}$  ลง จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวน้อยลง และการผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ไม่แตกต่างกัน

ส่วนรูปที่ 4.13 แสดงค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ต้าร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด (ทั้งแบบ Addition และ Replacement) ที่อายุ 420 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ศึกษา ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

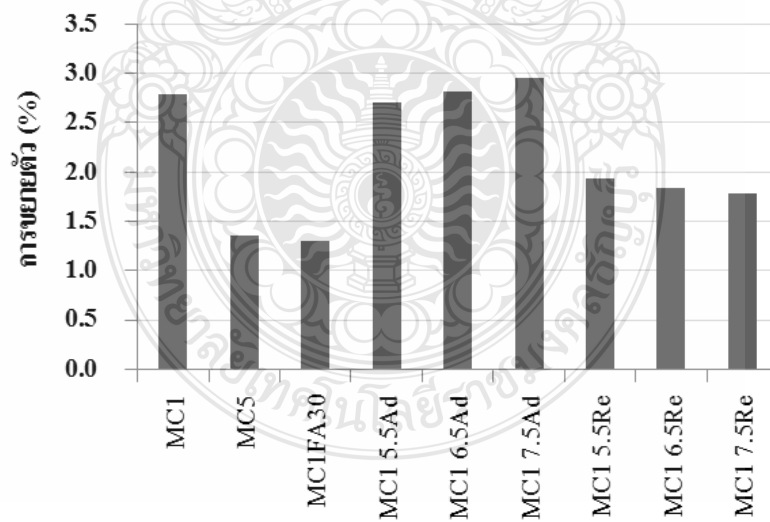


ก) Addition



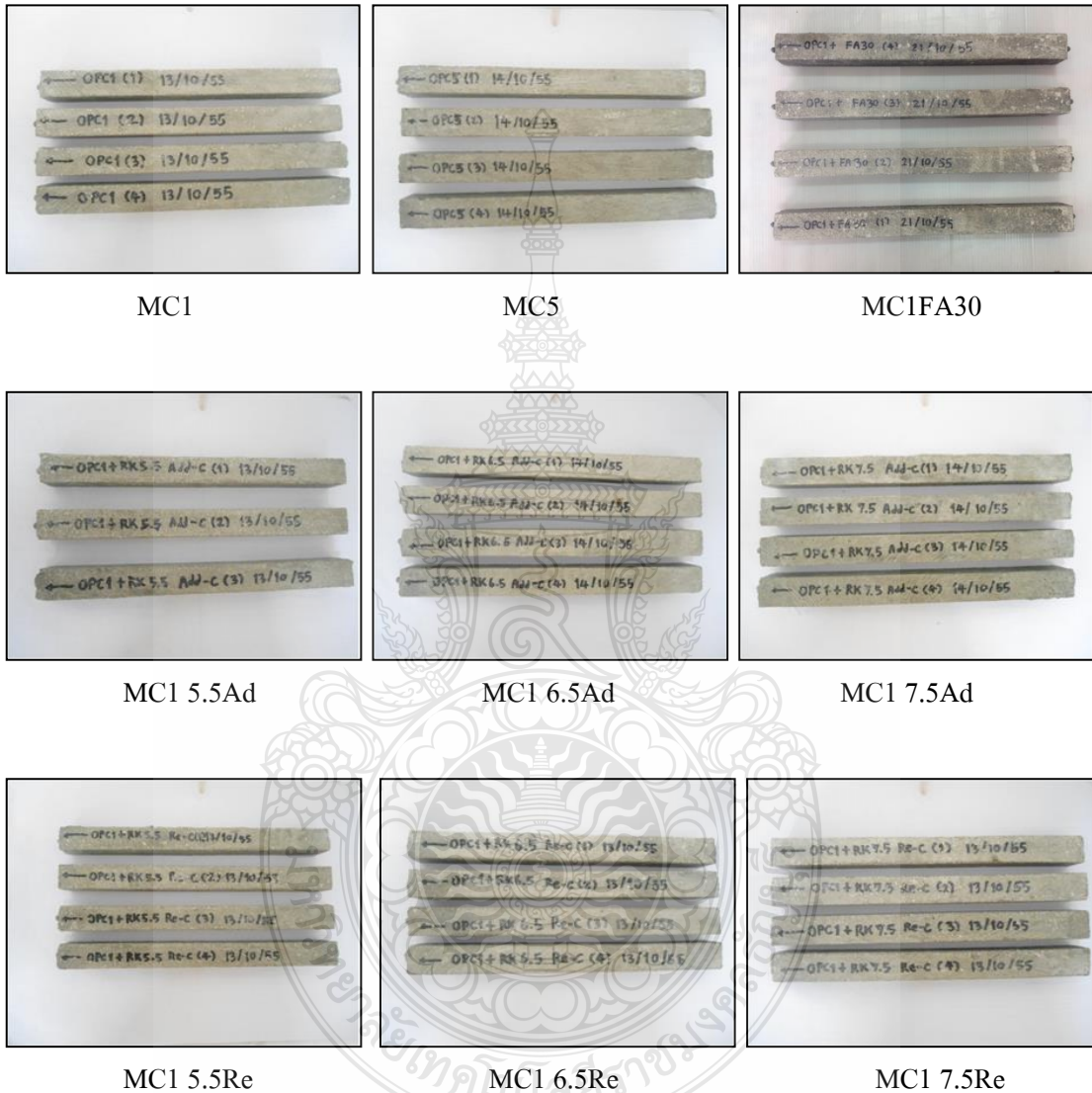
จ) Replacement

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด



รูปที่ 4.13 การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 420 วัน

รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ตาร์ ที่อายุ 420 วันที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งลักษณะของภาพสังเกตได้ว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกับการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ได้กล่าวมาแล้ว



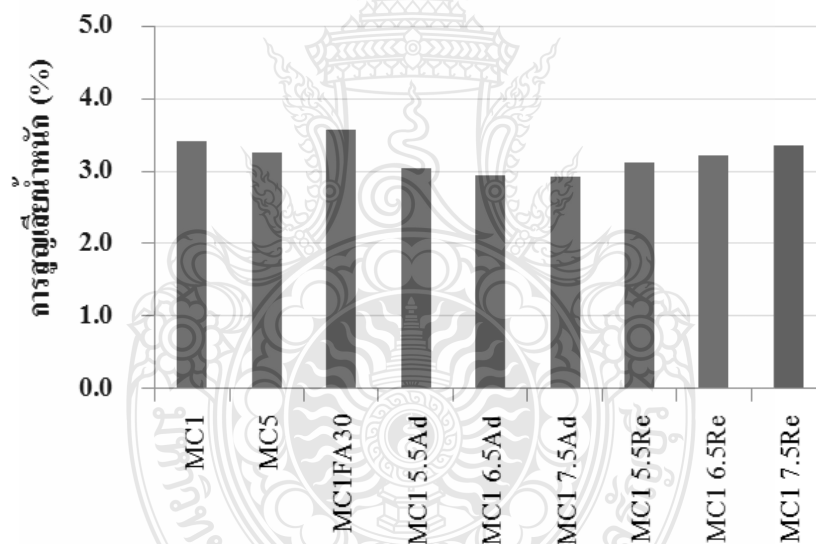
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 420 วัน

#### 4.6.2 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 4.15 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 420 วัน ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และ

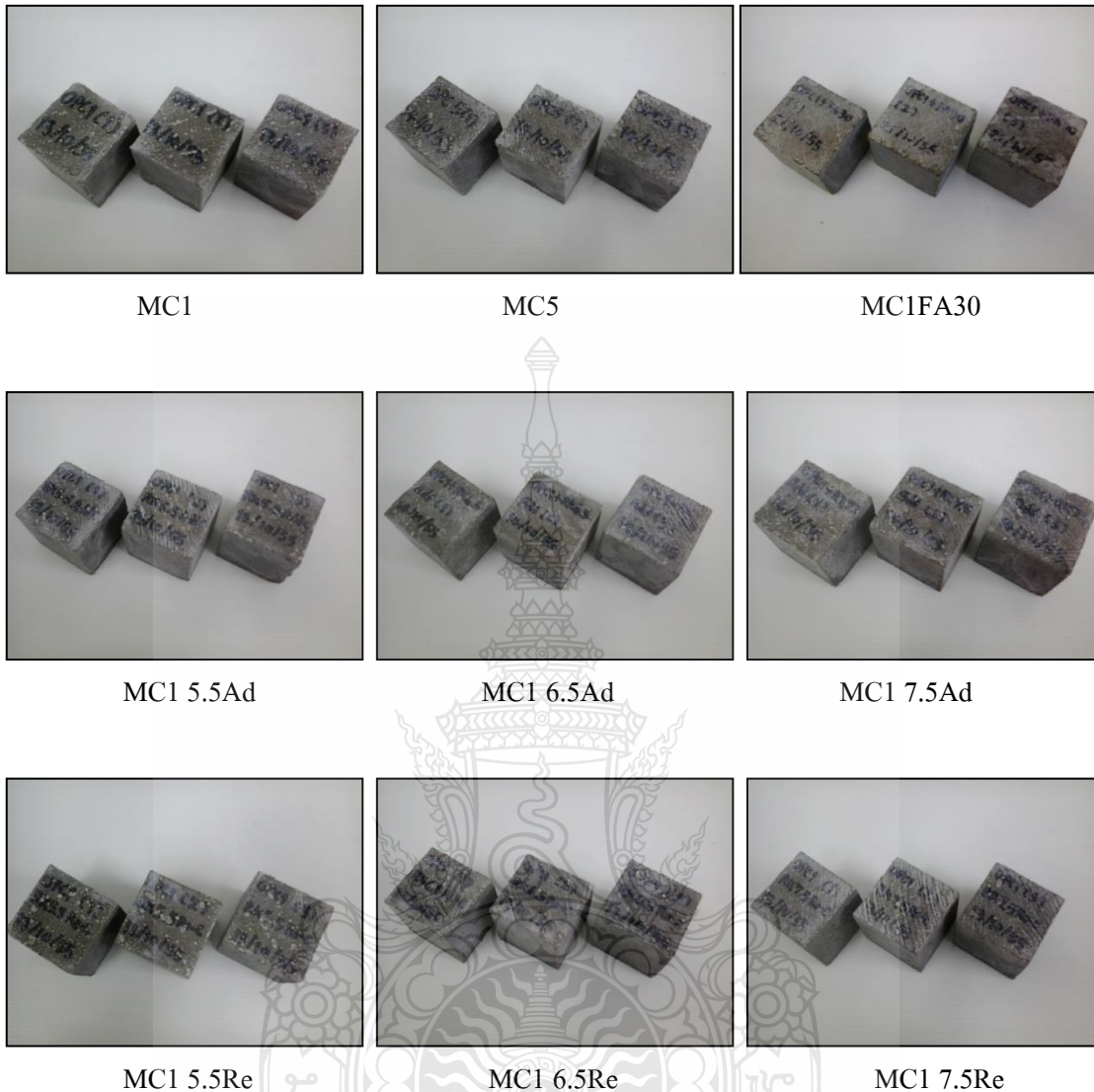


มอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ทั้งนี้เพราะปริมาณ  $C_3A$  ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในมอร์ตาร์ลดลง (ลด  $Ca(OH)_2$ ) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้น จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [23] ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัด เพิ่มความสามารถในการประสานในเฟสดี จึงทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.15 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด ที่อายุ 420 วัน

รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ตาร์ ที่อายุ 420 วันที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งลักษณะของภาพสังเกตเห็นได้ว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกับการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 420 วัน

#### 4.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน และคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดต่อ คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานและคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตดังตารางที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

รายการ	การก่อตัว	ค่าการไหลแผ่	กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ (w/c=0.55)	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (w/c=0.55)	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (w/c=0.30)	
		มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	Addition	ใกล้เคียง	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า
	Replacement	ใกล้เคียง	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

รายการ	การหดตัว	ความถี่การเกิดคาร์บอนชั่น	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน	การต้านทานซัลเฟต	
				โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	Addition	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
	Replacement	น้อยกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า

## บทที่ 5

### สรุป

จากผลการศึกษาคณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การหาค่าความแข็งแรงของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการหาค่าความแข็งแรงของมอร์ตาร์ทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่ผงเคมีผสมเพิ่มในปริมาณมากขึ้น จะให้ค่าการหาค่าความแข็งแรงที่น้อยลง

2) การเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Addition มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของ Replacement มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3) ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่มดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อผสมผงเคมีผสมเพิ่มในปริมาณที่มากจะมีค่าความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ได้มากขึ้น

4) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Addition มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนของ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมอร์ตาร์เมื่อใส่ผงเคมีผสมเพิ่มในปริมาณมากขึ้น จะให้ค่าการขยายตัวที่น้อยลง

5) การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

## บรรณานุกรม

- [1] American Society for Testing and Materials , ASTM C150-00 , Standard Specification for Portland Cement , Annual Book of ASTM Standards , 2001 , Vol. 04.01 , 149-155.
- [2] US Bureau of Reclamation , Concrete Manual 5<sup>th</sup> Edn. , Denver , Colorado , 1975.
- [3] American Society for Testing and Materials , ASTM C618-00 , Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete , Annual Book of ASTM Standards , 2001 , Vol. 04.02 , Philadelphia , 310-313.
- [4] มอก. 733-2530 , “สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต” , คณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม , มาตรา 15 แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511.
- [5] คณะอนุกรรมการคอนกรีตวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ , “ความคงทนของคอนกรีต” , บริษัท จุฑทอง จำกัด, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2543 , หน้า 77
- [6] Parrott , L.T., A Review of Carbonation in Reinforced Concrete , Cement and Concrete Association , United Kingdom , 1987
- [7] American Concrete Institute , ACI 201.2R-92 , Guide to Durable Concrete , ACI Manual of Concrete Practice , Part , Michigan , 2000
- [8] Soloka. "Concrete in hot environments", Great Britain Alden Press, 1993
- [9] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา , มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง , มาตรฐาน ว.ศ.ท. 1008-38 , วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ พิมพ์ครั้งที่ 1 , พ.ศ. 2538.
- [10] American Concrete Institute , ACI 201.2R-92 , Guide to Durable Concrete , ACI Manual of Concrete Practice , Part 1 , Michigan , 2000.
- [11] บุรฉัตร ฉัตรวีระ , ทวีสิทธิ์ คงทรัพย์ , 2545 , “ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบค้ำจากโรงสีข้าว” , วรสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2545.
- [12] วิวัฒน์ พัทธศานนท์ , ธนกร ทวีวุฒิ , เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย , สถาพร โภคา , 2554 , “อิทธิพลของส่วนผสม วิธีการบ่มและระยะเวลาบ่ม ต่อความสึกกร่อนชั้นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ” , การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16 , มหาวิทยาลัยมหิดล 18-20 พฤษภาคม 2554.

- [13] S.T.Lee , H.Y.Moon , R.N.Swamy , “Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss” , Cement and Concrete Composites , 2004
- [14] E.E.Hekel , E.Kishar , H.Mostafa , “Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances” , Cement and Concrete Research 32 :1421-1427 , 2002
- [15] Nanayakkara O. , and Kato , Y. , “Maco-cell Corrosion considering Chloride Contents along the Reinforced Bar” , New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia , November , 2006 , Phuket , Thailand.
- [16] Nanayakkara O. , and Kato , Y. , “The Dependency of Maco-cell Corrosion in Reinforce Concrete Member due to Material and Environmental Nonhomogeneity” , New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia , November , 2006 , Phuket , Thailand.
- [17] Young-Shik Park, Jin-Kook Suh, Jae-Hoon Lee, Young-Shik Shin , “Strength Determinate of high-strength concrete in sulfate environment” , Cement and Concrete Composites 29 :1397-1402 , 1999
- [18] Kazuyaki Torii and Mitsunori Kawamura , “Effects of Fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack” , Cement and Concrete Research , Vol.24 No.2, 1994
- [19] ตามยศ สมยาถักดี , ภัควัฒน์ แสงเจริญ , ปิติสานต์ กร้ามาตร , สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล , 2553 “ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตแบบเฉพาะที่” การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 , 12-14 พฤษภาคม 2553
- [20] Nanayakkara O. , and Kato , Y. , “Maco-cell Corrosion of Partially Repaired Concrete Member” , Seisan-Kenkyu , 2007 , pp.263-266.
- [21] นพคุณ พลโพธิ์ , 2554 “ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ , ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [22] American Society of Testing Materials ASTM C 33: “Specification for Concrete Aggregates” , Annual Book of ASTM Standard.
- [23] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, ความคงทนของคอนกรีต, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, พ.ศ. 2554.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

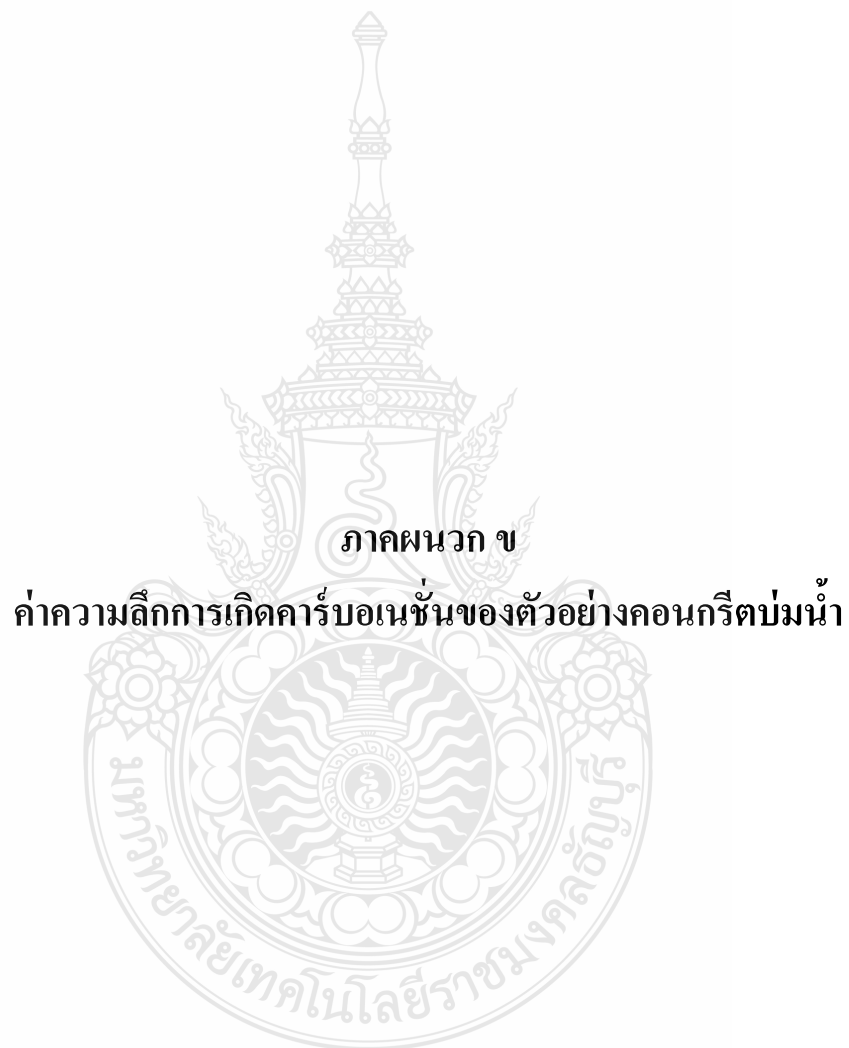
ค่าการหดตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง





ตารางที่ 1 การหดตัว (%) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ท้าร์ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

สัดส่วนผสม	อายุที่บ่มอากาศ (วัน)								
	0	3	5	7	14	21	42	56	91
MC1	0.000	0.016	0.032	0.05	0.065	0.075	0.093	0.103	0.112
MC1FA30	0.000	0.011	0.026	0.031	0.043	0.052	0.059	0.064	0.066
MC1 5.5Ad	0.000	0.014	0.029	0.046	0.061	0.07	0.083	0.085	0.091
MC1 6.5Ad	0.000	0.014	0.026	0.042	0.057	0.068	0.077	0.082	0.087
MC1 7.5Ad	0.000	0.012	0.025	0.038	0.053	0.063	0.071	0.075	0.079
MC1 5.5Re	0.000	0.016	0.031	0.049	0.066	0.078	0.091	0.093	0.097
MC1 6.5Re	0.000	0.016	0.031	0.048	0.067	0.08	0.094	0.097	0.1
MC1 7.5Re	0.000	0.016	0.027	0.053	0.068	0.081	0.086	0.09	0.092



ภาคผนวก ข

ค่าความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ

ตารางที่ 1 ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ

สัดส่วนผสม	บ่มน้ำ 7 วัน		บ่มน้ำ 28 วัน	
	อายุอบคาร์บอนชั้น		อายุอบคาร์บอนชั้น	
	28 วัน	56 วัน	28 วัน	56 วัน
	ความลึก(มม.)	ความลึก(มม.)	ความลึก(มม.)	ความลึก(มม.)
CC1	4.1	8.2	4	6.9
CC1FA30	8.4	10.7	6.5	8.6
CC1 5.5Ad	1.8	4.6	1.6	4.2
CC1 6.5Ad	2.5	4.6	2.4	4.3
CC1 7.5Ad	3.2	7.2	3.1	6.1
CC1 5.5Re	4.7	8.2	4.4	7
CC1 6.5Re	5.6	9.6	5.2	7.2
CC1 7.5Re	6.2	9.6	6	7.5

ภาคผนวก ค  
ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีต



ตารางที่ 1 ปริมาณกระแสไฟฟ้า (ถูกล้อมปี) ที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างคอนกรีตตลอด 6 ชั่วโมง

สัดส่วนผสม	กระแสไฟฟ้า (ถูกล้อมปี)	ระดับการแทรกซึมคลอไรด์
CC1	2,401	ปานกลาง
CC1FA30	1,430	ต่ำ
CC1 5.5Ad	1,462	ต่ำ
CC1 6.5Ad	1,300	ต่ำ
CC1 7.5Ad	1,137	ต่ำ
CC1 5.5Re	1,747	ต่ำ
CC1 6.5Re	1,530	ต่ำ
CC1 7.5Re	1,246	ต่ำ



ภาคผนวก ง  
ค่าการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ทาร์ใน  
สารละลายซัลเฟต

**ตารางที่ 1** การขยายตัว (%) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ตัวอย่างมอร์ตาร์	อายุที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (วัน)										
	0	14	28	56	91	140	196	252	308	364	420
MC1	0.00	0.19	0.36	0.59	0.82	1.08	1.37	1.67	1.99	2.37	2.79
MC5	0.00	0.10	0.19	0.36	0.53	0.70	0.89	1.08	1.14	1.23	1.35
MC1FA30	0.00	0.11	0.22	0.37	0.54	0.70	0.88	1.02	1.10	1.20	1.30
MC1 5.5Ad	0.00	0.11	0.23	0.45	0.62	0.91	1.22	1.51	1.89	2.40	2.70
MC1 6.5Ad	0.00	0.11	0.24	0.43	0.60	0.89	1.22	1.58	1.91	2.49	2.81
MC1 7.5Ad	0.00	0.14	0.25	0.47	0.64	0.95	1.28	1.60	1.96	2.63	2.96
MC1 5.5Re	0.00	0.12	0.25	0.48	0.67	0.89	1.13	1.40	1.55	1.71	1.93
MC1 6.5Re	0.00	0.13	0.25	0.53	0.70	0.91	1.13	1.36	1.50	1.65	1.84
MC1 7.5Re	0.00	0.19	0.39	0.64	0.88	1.07	1.30	1.43	1.53	1.61	1.79

ตารางที่ 2 การสูญเสียน้ำหนัก (%) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตัวอย่างมอร์ตาร์	อายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)										
	0	14	28	56	91	140	196	252	308	364	420
MC1	0.000	0.442	0.653	0.934	1.356	1.908	2.506	2.715	2.998	3.211	3.412
MC5	0.000	0.325	0.574	0.837	1.185	1.515	1.853	2.315	2.781	2.913	3.211
MC1FA30	0.000	0.491	0.693	0.802	1.188	1.495	1.832	2.483	2.985	3.345	3.586
MC1 5.5Ad	0.000	0.474	0.704	0.967	1.296	1.853	2.451	2.697	2.845	2.916	3.048
MC1 6.5Ad	0.000	0.443	0.674	0.861	1.195	1.863	2.538	2.742	2.869	2.898	2.956
MC1 7.5Ad	0.000	0.462	0.694	0.901	1.298	1.907	2.593	2.763	2.878	2.909	2.967
MC1 5.5Re	0.000	0.476	0.709	0.932	1.300	1.704	2.134	2.453	2.754	2.923	3.112
MC1 6.5Re	0.000	0.456	0.680	0.864	1.288	1.686	2.099	2.352	2.677	3.003	3.209
MC1 7.5Re	0.000	0.703	0.941	1.149	1.477	1.866	2.282	2.432	2.764	3.101	3.302





ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



# การประชุมวิชาการ **21** ครั้งที่ **21** **วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ**

*The 21<sup>st</sup> National Convention on Civil Engineering*

“วิศวกรรมโยธาสู่พรมแดนใหม่และความท้าทายในอนาคต”  
“Civil Engineering for Future Challenges and New Frontiers”

[www.ncce21.org](http://www.ncce21.org)



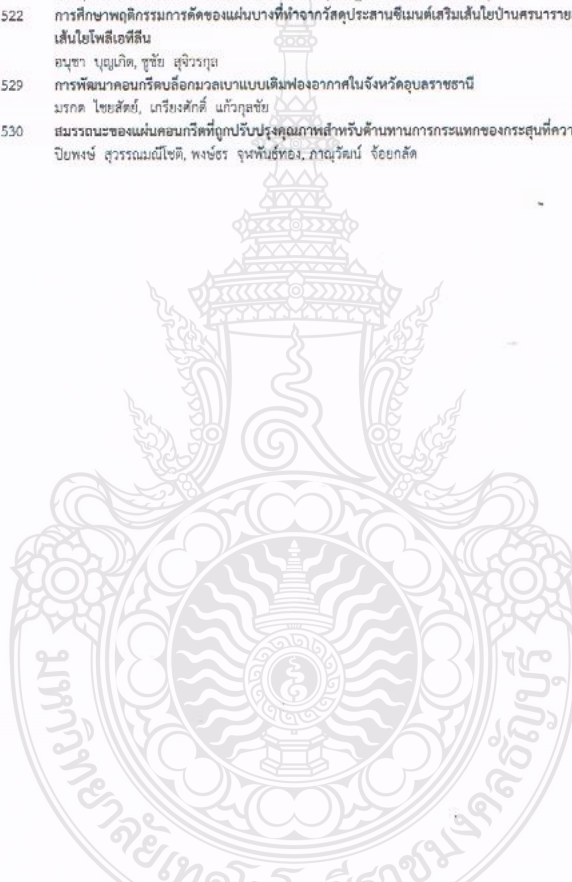
28-30 มิถุนายน 2559

โรงแรม บีพี สมิหลา บีช สงขลา

28 - 30 June 2016

BP Samila Beach Hotel, Songkhla

สาขาวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง (MAT)		หน้า
MAT 506	กำลังอัด และปฏิกิริยาอัดคานไฮดรอลิกของคอนกรีตที่มีเส้นใยชานอ้อยผสมเข้าปาล์มน้ำมัน วชิรกรณ์ เสนาวัง, สุวัฒน์ งามจันทร์, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรติทักษ์กุล	772
MAT 507	การศึกษาสภาวะระดับการยึดรั้งการหลุดตัวของคอนกรีตในโครงสร้างผนัง วิศวินทร์ อัครปัญญากร, วัคคิพงษ์ สหมิตรมงคล	777
MAT 514	คุณสมบัติด้านวัสดุประสานของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม อภิศานต์ ชิงค์คำ, ปิติศานต์ กรำมาตร, ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์, สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล	783
MAT 516	การหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนเนชัน และการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ชนกฤต มณีวัฒน์, ปิติศานต์ กรำมาตร, ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์, สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล	788
MAT 522	การศึกษาพฤติกรรมการคืบของแผ่นบางที่ทาจากวัสดุประสานซีเมนต์เสริมเส้นใยป่านครนารายณ์และ เส้นใยโพลีเอทีลีน อนุชา บุญเกิด, ชูชัย สุจิรวรกุล	794
MAT 529	การพัฒนาคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศในจังหวัดอุบลราชธานี มรกต ไชยสสัย, เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย	800
MAT 530	สมรรถนะของแผ่นคอนกรีตที่ถูกปรับปรุงคุณภาพสำหรับด้านทานการแทรกของกระสุนที่ความเร็วสูง ปิยพงษ์ สุวรรณวัฒน์, พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง, ภาณุวัฒน์ ชัยยกุล	806





เลขที่ ๖๒๐/๒๕๕๘

แบบ ช.๓

### หนังสือสำคัญแสดงการเปลี่ยนชื่อตัว

นายวิศ มณีรัตน์

เลขประจำตัวประชาชน ๑-๖๑๙๙-๐๐๐๘๓-๑๔-๑

อยู่บ้านเลขที่ ๑๙๗/๓๔ หมู่ ๑

ตำบลบางแก้ว อำเภอเมืองสมุทรสงคราม จังหวัดสมุทรสงคราม

บิดาชื่อ บวร มารดาชื่อ นวลนิตย์

ได้ขอเปลี่ยนชื่อตัว เป็น "ธนกฤต"

นายทะเบียนได้อนุญาตตามคำขอที่ ๑๑๒๐/๒๕๕๘ ลงวันที่ ๗ กันยายน ๒๕๕๘

จึงออกหนังสือสำคัญนี้ให้ไว้เป็นหลักฐาน

ที่ว่าการอำเภอเมืองสมุทรสงคราม จังหวัดสมุทรสงคราม

ออก ณ วันที่ ๗ กันยายน พ.ศ. ๒๕๕๘

(นางสาวประไพ ไชยรินทร์)

ปลัดอำเภอ(เจ้าพนักงานปกครองปฏิบัติการ) ปฏิบัติราชการแทน

นายอำเภอเมืองสมุทรสงคราม

นายทะเบียนท้องถิ่น

ประทับตราประจำตำแหน่งเป็นสำคัญ

การหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนขึ้น และการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม  
Drying Shrinkage, Carbonation and Sulfate Resistance of Concrete Containing  
Chemical Compound



ชนกฤต นนวิรัตน์<sup>1</sup> ปิติสาค์ กร้ามาคร<sup>2\*</sup> ปานเทพ จุลพิพิธวงษ์<sup>3</sup> และ สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล<sup>4</sup>

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>2</sup> ภัทริย์ย ศุนย์วิทย์เทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้ารัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

<sup>3</sup> ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้ารัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนขึ้น และการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมโดยใส่เพิ่มผงเคมีผสมเพิ่ม (Addition) และผสมโดยการแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่ม (Replacement) ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลการศึกษาพบว่า การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน การเกิดคาร์บอนขึ้นของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Addition มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่คอนกรีต Replacement มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน นอกจากนี้ พบว่าการขยายตัวในสารละลายไฮเดรียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Addition มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ส่วนมอร์ตาร์ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน สุดท้ายพบว่า การสูญเสีย น้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน

**คำสำคัญ:** ผงเคมีผสมเพิ่ม, การหดตัวแบบแห้ง, คาร์บอนขึ้น, การต้านทานซัลเฟต

**Abstract**

This research was aimed to study drying shrinkage, carbonation and sulfate resistance of concrete containing chemical compound. The chemical compound was used to add and partial replacement of 5.5, 6.5 and 7.5% by weight in Portland cement type 1 (OPC). The study found that drying shrinkage of mortar containing chemical compound was lesser than that of OPC mortar. The carbonation of concrete contained chemical compound addition was lesser than that

of OPC concrete whereas concrete with partial replaced was higher. Furthermore, the expansion in sodium sulfate solution of mortar contained chemical compound addition was no different to that of OPC mortar, while mortar with partial replacement was lesser. Finally, the weight loss in magnesium sulfate solution of mortar containing chemical compound was lesser than that of OPC mortar.

**Keywords:** chemical compound, drying shrinkage, carbonation, sulfate resistance.

**1. คำนำ**

โดยทั่วไปในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นลักษณะเดียวกันแม้ว่าสภาพแวดล้อมของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานสั้นลง การนำคอนกรีตไปใช้ในงานก่อสร้างควรคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตและสภาพแวดล้อมที่คอนกรีตจะต้องเผชิญ

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอนกรีตในปัจจุบันช่วยให้ นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรมีความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีต ปัจจุบันนักวิจัยสามารถสังเคราะห์และคิดค้นผงเคมีผสมเพิ่มพิเศษเพื่อที่จะปรับปรุงปฏิกิริยาในบางส่วนของปูนซีเมนต์ตามความต้องการ ส่วนผสมสังเคราะห์นี้จะเกี่ยวข้องในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) จากปูนซีเมนต์โดยตรง โดยผงเคมีผสมเพิ่มมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับบางส่วนขององค์ประกอบซีเมนต์ที่เพิ่มปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเริ่มต้น [1] ซึ่งผงเคมีผสมเพิ่มในคอนกรีตที่มีอยู่อาจถือเป็นความเปลี่ยนแปลงของปูนซีเมนต์ทั้งในแง่ของคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

\* ผู้เขียนผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding author)

E-mail address: pitisan.k@en.rmutt.ac.th

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของผงเคมีผสมเพิ่ม รวมทั้งหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงเคมีผสมเพิ่มอย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ศึกษาการหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนขึ้น และความต้านทานซัลเฟต ของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม เพื่อนำผลวิจัยไปพัฒนาเทคโนโลยีด้านวัสดุก่อสร้างต่อไป

## 2. รายละเอียดวิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามมาตรฐาน มอก. 15-2547 เถ้าลอยจาก อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง และผงเคมีผสมเพิ่ม ตามมาตรฐาน ASTM C465 และ TIS 15 โดยตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลน ส่วนรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูง 3,500 เท่า ของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้โดยที่อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เถ้าลอย และผงเคมีผสมเพิ่ม มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอน แตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว ในขณะที่อนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะกลมและผิวเรียบ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ประเภท		เถ้าลอย	ผงเคมีผสมเพิ่ม
	ที่ 1	ที่ 5		
SiO <sub>2</sub>	18.93	21.69	37.61	1.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.51	3.91	20.21	1.39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.31	4.26	11.51	0.61
CaO	65.53	64.57	17.28	42.97
MgO	1.24	1.16	7.24	0.1
Na <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	0.78	-
K <sub>2</sub> O	0.31	0.21	2.46	-
SO <sub>3</sub>	2.88	2.03	2.28	49.5
LOI	2.24	1.62	0.48	2.63
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.15	2.38	2.95
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ชม./ก.)	3,300	3,340	2,373	2,800



ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



ข) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5



ค) เถ้าลอย



ง) เถ้าลอย

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

### 2.2 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

สำหรับการศึกษาการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตในครั้งนี้ ได้ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม. กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 596-96 โดยหลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างมอร์ตาร์บ่มน้ำ 7 วัน แล้วนำไปในอากาศ เพื่อทดสอบการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 1 3 5 7 14 21 28 42 56 และ 91 วัน

### 2.3 การเกิดคาร์บอนขึ้นของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาการเกิดคาร์บอนขึ้นของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่มนี้ ได้ใช้ตัวอย่างขนาด 100x100x100 มม. โดยหลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำ 7 และ 28 วัน แล้วนำตัวอย่างเข้าอบในตู้อบคาร์บอนขึ้น ที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 40,000 ppm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 โดยระยะเวลาในการสัมผัสของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 56 วัน เมื่ออายุครบกำหนด นำตัวอย่างไปกดให้แตกออกเป็น 2 ซีก แล้วฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลิน (Phenolphthalein) ที่ก้อนตัวอย่างซึ่งถ้าปรากฏเป็นสีม่วงแสดงว่าไม่เกิดคาร์บอนขึ้น วัดความลึกของการเกิดคาร์บอนขึ้นที่ก้อนตัวอย่างที่ไม่ปรากฏสี

### 2.4 การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

ในการศึกษาด้านความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่มในครั้งนี้ ได้ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยใช้การประเมินวัดการขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต

2.4.1 การขยายตัว โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม. หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำจืดบ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน แล้ววัดการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยนำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> เท่ากับ 33,800 ppm) แล้ววัดการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 2 4 8 13 20 28 36 44 52 และ 60 สัปดาห์

2.4.2 การสูญเสียน้ำหนัก โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม. หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำจืดบ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน แล้ววัดค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยนำตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> เท่ากับ 33,800 ppm) แล้ววัดค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 2 4 8 13 20 28 36 44 52 และ 60 สัปดาห์

2.5 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้จะใช้วัสดุประสานคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แฉะลอย และผงเคมีผสมเพิ่ม เพื่อใช้ในการศึกษาการหดตัวแบบแห้ง และการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่าง mortars ซึ่งสัดส่วนผสมของ mortars ที่ใช้ แสดงดังตารางที่ 2 ส่วนสัดส่วนผสมที่ใช้สำหรับศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชันของตัวอย่างคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของ mortars ที่ใช้ในการทดสอบหดตัวแบบแห้งและการต้านทานซัลเฟต โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)					
		ปูนซีเมนต์ประเภท		แฉะลอย	ผงเคมีผสมเพิ่ม	ทราย	น้ำ
		ที่ 1	ที่ 5				
1	MC1	1.00	-	-	-	2.75	0.55
2	MC5	-	1.00	-	-	2.75	0.55
3	MC1FA30	0.70	-	0.30	-	2.75	0.55
4	MC1 5.5Ad	1.00	-	-	0.055	2.75	0.55
5	MC1 6.5Ad	1.00	-	-	0.065	2.75	0.55
6	MC1 7.5Ad	1.00	-	-	0.075	2.75	0.55
7	MC1 5.5Re	0.95	-	-	0.055	2.75	0.55
8	MC1 6.5Re	0.94	-	-	0.065	2.75	0.55
9	MC1 7.5Re	0.93	-	-	0.075	2.75	0.55

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของคอนกรีต (1 ลูกบาศก์เมตร) ที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (ลูกบาศก์เมตร)					
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ผงเคมีผสมเพิ่ม		ทราย	หิน	น้ำ
			แฉะ	ผสมเพิ่ม			
1	CC1	393	-	-	727	1047	196
2	CC1FA30	275	118	-	727	1047	196
3	CC1 5.5Ad	393	-	25	727	1047	196
4	CC1 6.5Ad	393	-	26	727	1047	196
5	CC1 7.5Ad	393	-	30	727	1047	196
6	CC1 5.5Re	372	-	22	727	1047	196
7	CC1 6.5Re	368	-	24	727	1047	196
8	CC1 7.5Re	364	-	30	727	1047	196

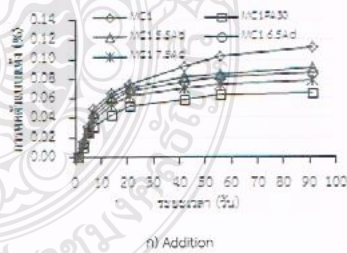
หมายเหตุ MC1 หมายถึง mortars ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, MC5 หมายถึง mortars ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน, MC1FA30 หมายถึง mortars ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่แฉะลอยร้อยละ 30, MC1 6.5Re หมายถึง mortars ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมโดยการแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่ม (Replacement) ร้อยละ 6.5, CC1 หมายถึงคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, และ CC1 5.5Ad หมายถึงคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมโดยใส่ผงเคมีผสมเพิ่ม (Addition) ร้อยละ 5.5

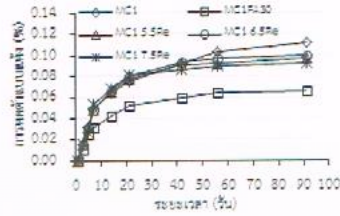
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การหดตัวแบบแห้ง

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่าง mortars ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน mortars ผสมแฉะลอย และ mortars ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม โดยในส่วน mortars ผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีการผสมใน 2 ลักษณะคือ ผสมโดยการใส่ผงเคมีผสมเพิ่ม (Addition) และผสมโดยการแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่ม (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยที่นักพบว่า การหดตัวแบบแห้งของ mortars แฉะลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เพราะอนุภาคของแฉะลอยมีขนาดเล็ก การแทนที่ด้วยแฉะลอยจะทำให้ช่องว่างของ mortars (Capillary Pore) เล็กลง และมีความแน่นมากขึ้น ทำให้การสูญเสียความชื้นจึงเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวมีค่าลดลง ส่วนการหดตัวแบบแห้งของ mortars ผสมผงเคมีผสมเพิ่มทั้ง Addition และ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงเคมีผสมเพิ่มเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตัวประสานทำให้ผลที่มีความแน่นมากขึ้น และช่วยให้โครงสร้างของผลที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้การสูญเสียความชื้นยากขึ้น และโครงสร้างผลที่ต้านการหดตัวได้มากขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าน้อยลง โดยเฉพาะเมื่อผสม (ทั้ง Addition และ Replacement) ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การหดตัวเกิดน้อยลง ทั้งนี้เพราะปริมาณที่มากขึ้นของผงเคมีผสมเพิ่ม ช่วยทำให้โครงสร้างของผลที่มีความแน่นและแข็งแรงมากขึ้น และถ้าเปรียบเทียบกับ mortars Addition และ Replacement จะสังเกตว่าการหดตัวแบบแห้งของ mortars Addition มีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของ Replacement ทั้งนี้อาจเป็นไปได้อาจ Addition ไม่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้การประสานของผลที่ได้ดีกว่าของการ Replacement ซึ่งเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์

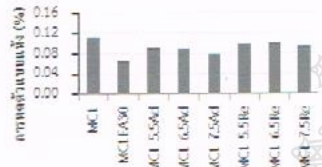
ส่วนรูปที่ 3 แสดงการหดตัวแบบแห้งของ mortars ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน mortars ผสมแฉะลอย และ mortars ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม (ทั้ง Addition และ Replacement) ที่อายุ 91 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงการหดตัวแบบแห้งของ mortars ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว





ข) Replacement

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเชิงปริมาณของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม



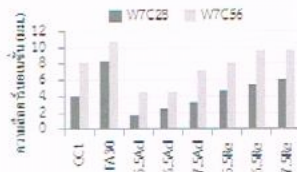
รูปที่ 3 การทดสอบแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ที่อายุ 91 วัน

3.2 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

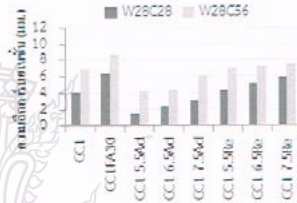
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์การเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และ คอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม เมื่อตัวอย่างสัมผัอากาศคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 56 วัน โดยรูปที่ 4ก) กรณีตัวอย่างคอนกรีตป่นน้ำ 7 วัน ส่วนรูปที่ 4ข) กรณีตัวอย่างคอนกรีตป่นน้ำ 28 วัน พบว่าทั้งกรณีป่นน้ำ 7 และ 28 วัน และทั้งตัวอย่างสัมผัอากาศคาร์บอนไดออกไซด์ 28 และ 56 วัน ค่าความสัมพันธ์การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลาน ไปลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ส่งผลให้คาร์บอนเนชั่นเกิดเร็วขึ้น ส่วนความสัมพันธ์การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Addition มีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงเคมีผสมเพิ่มจะช่วยให้โครงสร้างผลึกมีความแน่นมากขึ้น รวมทั้งผงเคมีผสมเพิ่มมี CaO ที่มาก จึงเป็นการเติม Ca(OH)<sub>2</sub> จึงทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นน้อยลง ในขณะที่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Replacement มีแนวโน้มว่าจะมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องเป็นเพราะการแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่มเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง จึงไปลด Ca(OH)<sub>2</sub> ส่งผลให้คาร์บอนเนชั่นเกิดมากขึ้น

ส่วนรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์การเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และ

คอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม โดยป่นน้ำ 7 และ 28 วัน พบว่าการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่สัมผัอากาศคาร์บอนไดออกไซด์ 28 และ 56 วัน ที่ป่นน้ำ 7 วัน ก่อนสัมผัอากาศคาร์บอนไดออกไซด์ มีมากกว่าของคอนกรีตที่ป่นน้ำ 28 วัน ทั้งนี้เพราะการป่นตัวอย่างคอนกรีตที่นานกว่า (28 วัน) ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นกว่าตัวอย่างที่ป่นน้อยกว่า (7 วัน) ส่งผลให้การเกิดคาร์บอนเนชั่นที่น้อยกว่า

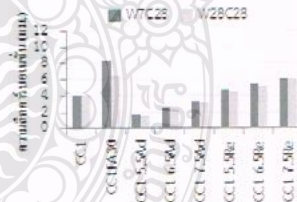


ก) ป่นน้ำ 7 วัน



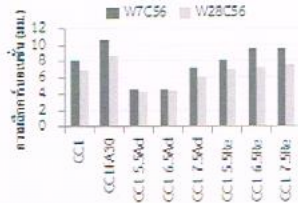
ข) ป่นน้ำ 28 วัน

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์การเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม เมื่อสัมผัอากาศคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 56 วัน



ก) สัมผัอากาศคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน





ข) สัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 56 วัน

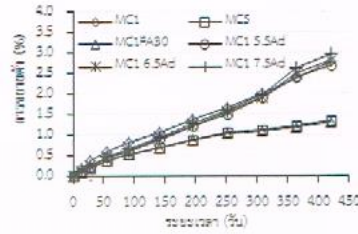
รูปที่ 5 ความลึกการเกิดคาร์บอนขึ้นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม โดยไม่ในน้ำที่ 7 และ 28 วัน

3.3 การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

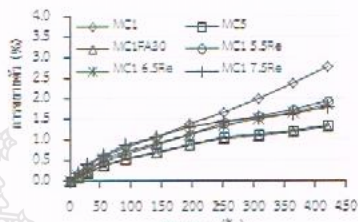
3.3.1 การขยายตัว

โดยรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม พบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ทั้งนี้เพราะปริมาณ  $C_3A$  ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซั่มและ Ettringite น้อยกว่า ส่วนค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอลิไซเทชันช่วยควบคุมปริมาณ  $Ca(OH)_2$  รวมทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์จึงเป็นกลลดปริมาณ  $C_3A$  ลง [2] ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Addition ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่วน (รูปที่ 6ก) ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ส่วน (รูปที่ 6ข) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่มเป็นการลดปริมาณ  $C_3A$  ลง จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตที่ไม่แตกต่างกัน

ส่วนรูปที่ 7 แสดงค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม (ทั้งแบบ Addition และ Replacement) ที่อายุ 420 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ศึกษา ดังที่เห็นแล้ว

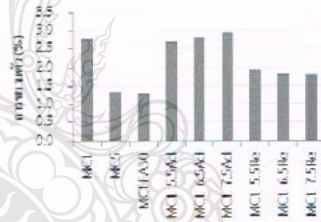


น) Addition



ข) Replacement

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม

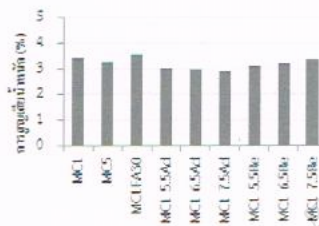


รูปที่ 7 การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ที่อายุ 420 วัน

3.3.2 การสูญเสียน้ำหนัก

โดยรูปที่ 8 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 420 วัน ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ทั้งนี้เพราะปริมาณ  $C_3A$  ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเข้มข้นในมอร์ตาร์ลดลง ( $\text{ลดCa(OH)}_2$ ) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้น จึงทำให้แคลเซียมซิงเกิลไฮดรอกไซด์เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิงเกิลไฮดรอกไซด์ ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [3] ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่มทั้ง Addition และ Replacement ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงเคมีผสมเพิ่ม เพิ่มความสามารถในการประสานในเฟสดี จึงทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าไปทำลายได้อากขึ้น



รูปที่ 8 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซิงเกิลไฮดรอกไซด์ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม ที่อายุ 420 วัน

#### 4. สรุป

จากผลการศึกษาการหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนขึ้น และหารด้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่มมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ทั้ง Addition และ Replacement เมื่อใส่ผงเคมีผสมเพิ่มในปริมาณมากขึ้น จะให้ค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยลง
- 2) การเกิดคาร์บอนขึ้นของคอนกรีตผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Addition มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของ Replacement มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน
- 3) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิงเกิลไฮดรอกไซด์ของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม Addition มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ส่วนของ Replacement มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยการขยายตัวของมอร์ตาร์โดย Replacement เมื่อใส่ผงเคมีผสมเพิ่มในปริมาณมากขึ้น ให้ค่าการขยายตัวน้อยลง

4) การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซิงเกิลไฮดรอกไซด์ของมอร์ตาร์ผสมผงเคมีผสมเพิ่ม มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าจตุร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Panthep Julniphitawong and Somnuk Tangtermsirikul, Investigation on Performance of Concrete and Mortar Using Active Chemical Compound Rockfill-HSM, Final Report Submission to BKG Group Corporation, 2013
- [2] .นพคุณ ผลโพธิ์, การขยายตัวของมอร์ตาร์เถ้าลอย และผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซิงเกิลไฮดรอกไซด์, Annual Concrete Conference 6, พ.ศ. 2554.
- [3] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, ความคงทนของคอนกรีต, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, พ.ศ. 2554.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายวิศ มณีรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	9 พฤษภาคม 2531
ที่อยู่	177/34 ม.1 ต.บางแก้ว อ.เมือง จ.สมุทรสงคราม 75000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหิดล ปี พ.ศ.2552
ประสบการณ์ทำงาน	ธุรกิจส่วนตัว พ.ศ.2559 – ปัจจุบัน

