

ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

**EFFECT OF FLY ASH TYPE ON DURABILITY OF CONCRETE**

**MIXED WITH FLY ASH**



บวร มณีรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# ผลกระทบของชนิดถั่วลอยต่อความคงทนของคอนกรีตผสมถั่วลอย

บวร มณีรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย  
Effects of Fly Ash Type on Durability of Concrete Mixed with Fly Ash  
ชื่อ - นามสกุล นายบวร มณีรัตน์  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.  
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
จตุพล ตั้งปภาศัพท์ ประธานกรรมการ  
(อาจารย์จตุพล ตั้งปภาศัพท์, ปร.ค.)

.....  
กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีชัย ส้าราญวานิช, ปร.ค.)

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

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

วันที่ 3 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย
ชื่อ – นามสกุล	นายบวร มณีรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2559

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาเถ้าลอย ซึ่งเป็นสารปอซโซลานมาใช้ในงานคอนกรีต โดยการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือใช้ เมื่อนำมาใช้ในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 3 ชนิด และจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง 1 ชนิด

ผลการศึกษาพบว่า การหาค่าแบบบอโตจีนีสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ในขณะที่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน โดยการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดดีกว่าของ OPC ล้วน โดยการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน สุดท้ายพบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ยกเว้นมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยที่มี แคลเซียมออกไซด์อิสระ สูง มีแนวโน้มให้ค่าการขยายตัวที่ใกล้เคียงกับของ OPC ล้วน สุดท้ายการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก และการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

**คำสำคัญ:** การหาค่าแบบบอโตจีนีส การหาค่าแบบแห้ง คาร์บอนเนชั่น ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ การต้านทานซัลเฟต

<b>Thesis Title</b>	Effect of Fly Ash Type On Durability of Concrete With Fly Ash
<b>Name – Surname</b>	Mr. Borwon Maneerat
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2016

## ABSTRACT

At present, Thailand has developed fly ash. The pozzolanic material used in concrete. By replacing some of the cement. As fly ash is a waste material. As a result, the concrete has different Properties when fly ash used in concrete.

This research aimed to investigate the effect of fly ash type on durability of concrete with fly ash Three types of fly ash from power plants in Mae Moh power plant Lampang province, and one types from BLCP Power Plant, Rayong proving were considered.

The results indicated that The autogenous and drying shrinkages of mortar with fly ashes were lower than that of the Type 1 Portland Cement (OPC) motar, especially when replaced in large quantities. While the carbonation of concrete with four fly ashes was higher than that of OPC concrete. The carbonation of concrete with each fly ash was no different. In addition, the chloride penetration resistance of concrete with four fly ashes was better than of OPC concrete. The chloride penetration resistance of concrete of each fly ash was no different. Moerover, the expansion in sodium sulfate solution of mortar with four fly ashes was less than that of the OPC mortar, except mortar with fly ash having high free lime content had the expansion close to that of OPC mortar. Finally, the weight loss of mortar with four fly ashes was greater than of OPC motar, especially when replaced in large quantities. The weight loss of mortar of each fly ash was no different.

**Keywords:** autogenous shrinkage, drying shrinkage, carbonation, chloride penetration resistance sulfate resistance

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือของคณาจารย์ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงสถานที่ในการดำเนินการจัดทำวิจัย งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติสานต์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาแนะนำและเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบพระคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หมีง จิ่ง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวิชัย สำราญวานิช คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ และประสบการณ์ทางวิชาการ ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนในการทำวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ผู้ทำวิจัยต้องกราบขออภัยเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดี อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา และขอขอบพระคุณเจ้าของเอกสารและงานวิจัยทุกท่าน ที่ผู้ศึกษาค้นคว้าได้นำมาอ้างอิงในการทำวิจัย จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



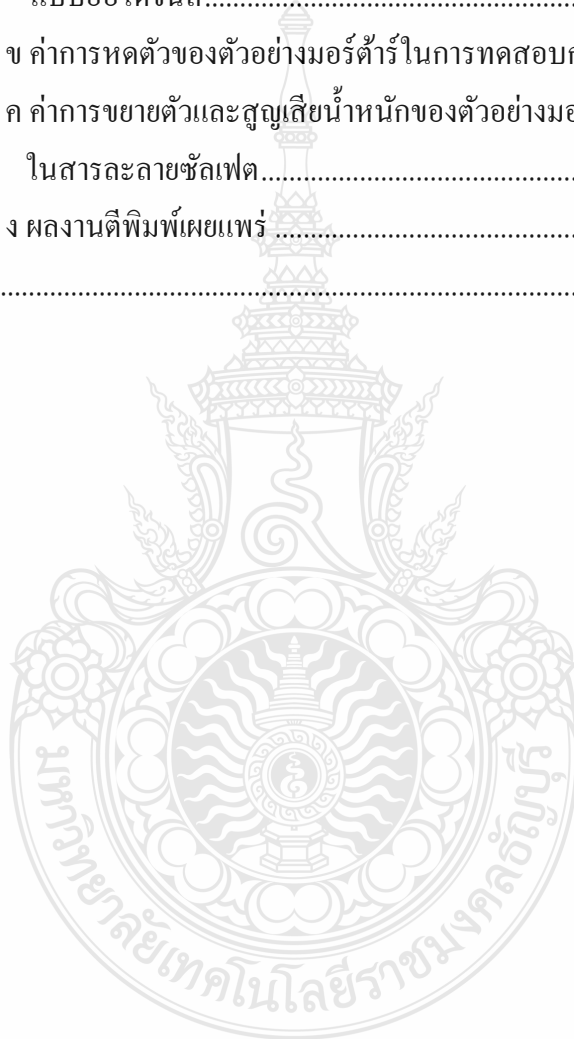
บวร มณีรัตน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	14
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	40
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	40
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	40
3.3 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา.....	53
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	55
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน.....	55
4.2 คุณสมบัติด้านความคงทน.....	58
4.3 เปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต.....	87
บทที่ 5 สรุป.....	88
บรรณานุกรม.....	89

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก .....	92
ภาคผนวก ก ค่าการหัดตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการหัดตัว แบบอโตจีนัส.....	93
ภาคผนวก ข ค่าการหัดตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการหัดตัวแบบแห้ง .....	95
ภาคผนวก ค ค่าการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ ในสารละลายซัลเฟต.....	97
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	100
ประวัติผู้เขียน .....	111





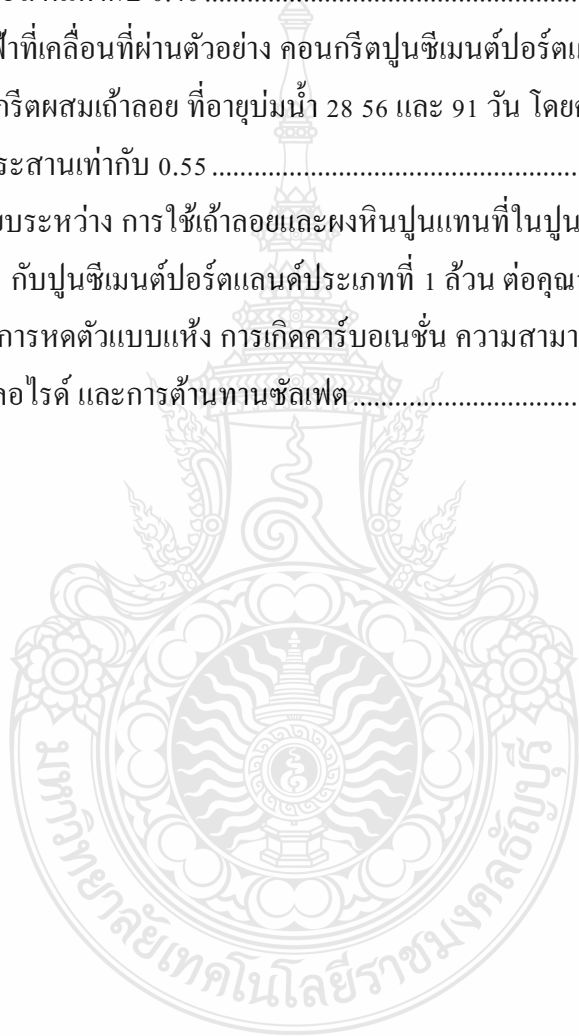
## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5.....	17
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	17
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	19
ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 .....	23
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ.....	24
ตารางที่ 2.6 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่อยู่ภายนอกอาคาร.....	30
ตารางที่ 2.7 แหล่งที่มาของคลอไรด์.....	31
ตารางที่ 2.8 เกณฑ์กำหนดสำหรับออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับซัลเฟต.....	36
ตารางที่ 3.1 การใช้จำนวนคลออมป์ ในการจำแนกคอนกรีตตามระดับความต้านทานการแทรกซึม คลอไรด์แบบเร่ง.....	46
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ของมอร์ตาร์ ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบ ออโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง และการต้านทานซัลเฟต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55.....	53
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบ การเกิด คาร์บอนเนชั่น และความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งโดยใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 .....	54
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ..	56
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา.....	57
ตารางที่ 4.3 ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ 28 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 .....	72
ตารางที่ 4.4 ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ 28 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 .....	74

## สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.5 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อายุบ่มน้ำ 28 56 และ 91 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 .....	77
ตารางที่ 4.6 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อายุบ่มน้ำ 28 56 และ 91 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 .....	79
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบระหว่าง การใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ต่อคุณสมบัติด้าน การหดตัวแบบ ออโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนชั่น ความสามารถในการต้านทานการ แทรกซึมคลอไรด์ และการต้านทานซัลเฟต .....	87



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นในคอนกรีต (Schuessl, 1988).....	29
รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย .....	32
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์.....	32
รูปที่ 3.1 เครื่องวัดความยาว (length comparator) .....	41
รูปที่ 3.2 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์.....	42
รูปที่ 3.3 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย $30 \pm 2$ °C .....	43
รูปที่ 3.4 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มม. ....	44
รูปที่ 3.5 ตู้อบคาร์บอนชั้น.....	44
รูปที่ 3.6 ความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต.....	45
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.....	46
รูปที่ 3.8 Cell.....	47
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างคอนกรีตที่ประกอบใน Cell.....	47
รูปที่ 3.10 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า .....	48
รูปที่ 3.11 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ ในสารละลายซัลเฟต.....	49
รูปที่ 3.12 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต .....	50
รูปที่ 3.13 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม .....	51
รูปที่ 3.14 แบบหล่อและตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ ในสารละลายซัลเฟต.....	51
รูปที่ 3.15 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต .....	52
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาควัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา .....	56
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย F(A), F(B), F(C) และ F(R) .....	59
รูปที่ 4.3 การหดตัวแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ผสม เถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40) ที่อายุ 91 วัน .....	60

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบอโตจินัสกับอายุของมอร์ตาร์ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 20 และมอร์ตาร์ดผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10.....	62
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบอโตจินัสกับอายุของมอร์ตาร์ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 40 และมอร์ตาร์ดผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10.....	63
รูปที่ 4.6 การหาค่าแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 20 และ 40 และมอร์ตาร์ดผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10 ที่อายุ 91 วัน.....	64
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอย F(A), F(B), F(C) และ F(R) .....	66
รูปที่ 4.8 การหาค่าแบบแห้งของมอร์ตาร์ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40) ที่อายุ 91 วัน .....	66
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 20 และมอร์ตาร์ดผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10.....	68
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 40 และมอร์ตาร์ดผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10.....	70
รูปที่ 4.11 การหาค่าแบบแห้งของมอร์ตาร์ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 20 และ 40 และมอร์ตาร์ดผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10 ที่อายุ 91 วัน.....	70

## สารบัญญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 .....	73
รูปที่ 4.13 ความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 .....	75
รูปที่ 4.14 ความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.55 .....	76
รูปที่ 4.15 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อายุบ่มน้ำ 28 56 และ 91 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 .....	78
รูปที่ 4.16 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อายุบ่มน้ำ 28 56 และ 91 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 .....	80
รูปที่ 4.17 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 .....	82
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย F(A), F(B), F(C) และ F(R).....	84
รูปที่ 4.19 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ที่อายุ 532 วัน .....	84
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตกับอายุของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย F(A), F(B), F(C) และ F(R).....	86
รูปที่ 4.21 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ที่อายุ 420 วัน .....	86

# บทที่ 1

## บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

หลักการออกแบบโครงสร้างที่ดี คือการออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โดยปกติอายุการใช้งานที่ต้องการของโครงสร้างแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้าง เช่น ขนาด สถานที่ที่โครงสร้างนั้นอยู่ และราคาของโครงสร้างนั้นๆ เป็นต้น โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบโดยใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ( $f_c'$ ) และค่าการยุบตัวของคอนกรีต (slump) แต่ถ้านำคอนกรีตไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันอายุของโครงสร้างจะไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง คอนกรีตจะมีคุณสมบัติทางกล โดยเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อมทั้งทางกายภาพและทางเคมี เช่น การเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากรังสีอินฟราเรด การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต และการเสื่อมสภาพจากคลอไรด์ เป็นต้น

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาเถ้าลอยจากถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นสารประกอบซิลิกา มาใช้ในงานคอนกรีตซึ่งเป็นผลผลิตที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมาใช้ในรูปแบบของการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนการนำเถ้าลอยมาใช้ในการคอนกรีต ทำให้ความสามารถในการเทของคอนกรีตดีขึ้นทำให้ลดอุณหภูมิของคอนกรีต ลดความสามารถในการซึมผ่าน อัตราการแพร่กระจายของความชื้นและสารละลายเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตมากขึ้น ลดการกัดกร่อนของซัลเฟต เพิ่มความทนทานและกำลังประลัยในระยะยาว [1, 2, 3 และ 4] อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ (by product) ที่นำมาใช้ จะมีสมบัติไม่ว่าทางกายภาพหรือทางเคมีที่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าการนำเถ้าลอยมาใช้งาน โดยเป็นสัดส่วนผสมในคอนกรีตนั้น ย่อมส่งผลให้สมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามจะเห็นว่ายังขาดงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบของชนิดเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ได้แก่ การหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของ

มอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต การต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ เมื่อใช้เถ้าลอยต่างชนิดกันเป็นส่วนผสม เพื่อนำผลการศึกษาไปพัฒนาเทคโนโลยีด้านวัสดุคอนกรีตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอย ต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์คือ เถ้าลอย
- 1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา
- 1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ประกอบด้วย
  - 1.3.3.1 การหาค่าแบบออตโตจินัสของมอร์ตาร์ ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม.
  - 1.3.3.2 การหาค่าแข็งของมอร์ตาร์ ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม.
  - 1.3.3.3 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มม.
  - 1.3.3.4 ทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.
  - 1.3.3.5 ทดสอบความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม. สำหรับวัดการขยายตัว (Expansion) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) และใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม. สำหรับวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ )

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่

1.4.1 ทราบถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.4.2 ทราบถึงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.4.3 ทราบถึงผลกระทบของถ้ำลอย ต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมถ้ำลอย

1.4.4 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่มีถ้ำลอยสำหรับนำไปใช้ในงานคอนกรีตประเภทต่างๆ ได้อย่างมีคุณภาพ





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีหัวข้อคือ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (portland cement) หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้จากการเผาส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยหินปูน (calcareous) ดินเหนียวประเภท Argillaceous ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก แล้วนำมาบดเป็นผงละเอียด

##### 2.1.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_{33}A$ ,  $C_4AF$ ,  $CaO$  และ  $MgO$  ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.1 และคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.2 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของ อเมริกา (ASTM C. 150) [5] และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 15 ของไทยได้แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Normal Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้กันมากในงานคอนกรีต เหมาะกับงานก่อสร้างคอนกรีตทั่วไป เช่น กานเสา พื้น ถนน ก.ส.ล. เป็นต้น

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

ค. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 (High-early Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่สามารถให้กำลังได้รวดเร็วในเวลาอันสั้น หลังจากเทแล้วสามารถใช้งานได้

ภายใน 3-7 วัน เหมาะกับงานที่เร่งด่วน เช่น คอนกรีตอัดแรง เสาเข็ม พื้นถนนที่จราจรคับคั่ง เป็นต้น

ง. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 4 (Low-heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดพิเศษที่มีอัตราความร้อนต่ำกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งส่งผลดีทำให้การขยายตัวน้อยช่วยลดการแตกร้าว เหมาะกับงานสร้างเขื่อนขนาดใหญ่

จ. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 5 (Sulfate-resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ทนต่อเกลือซัลเฟตได้สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะมีปริมาณของ  $C_3A$  ต่ำมาก โดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 5 เพราะ  $C_3A$  จะทำให้เกิดการรวมตัวกับซัลเฟตได้ง่ายดังนั้นเมื่อ  $C_3A$  มีปริมาณน้อยจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลย ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จึงเหมาะกับการก่อสร้างบริเวณดินเค็มหรือใกล้กับทะเล

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 [6]

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท				
	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
ความละเอียดของเบลน (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 กำลังอัดของคอนกรีตวัดจากลูกบาศก์มอร์ตารขนาด 50 มม.

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

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

### 2.1.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก และออกไซด์รอง ปริมาณประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

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

ข. 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

### 2.1.1.3 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

ออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณ

สารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

ก. ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{C}_3\text{S}$ ) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสี่เหลี่ยมผืนผ้า คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

ข. ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{C}_2\text{S}$ ) มีหลายรูปแบบ โดยที่อุณหภูมิปกติ  $\text{C}_2\text{S}$  จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\beta\text{C}_2\text{S}$ ) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างค่อนข้างช้าและช้ากว่า  $\text{C}_3\text{S}$  มาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ  $\text{C}_3\text{S}$  โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

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

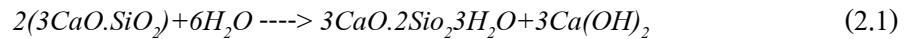
ง. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ  $\text{C}_4\text{AF}$ ) อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า  $\text{C}_3\text{A}$  โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ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

#### 2.1.1.4 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

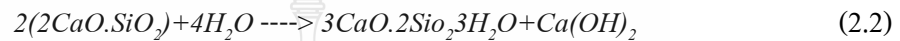
##### ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต (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



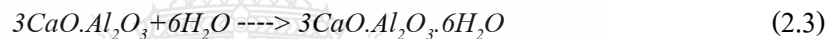
ข. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH แสดงดังสมการที่ 2.2



ค. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว แสดงดังสมการที่ 2.3

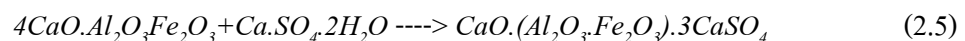


เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum :  $CaSO_4.2H_2O$ ) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดขึ้นบางๆ ของเอตริงไจท์ (Ettringite :  $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$ ) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต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



ง. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ  $C_3A$  แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม แสดงดังสมการที่ 2.5



### 2.1.2 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่า ปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

#### 2.1.2.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) ดังนี้

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

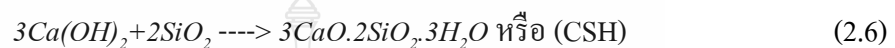
ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan) เกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

#### 2.1.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

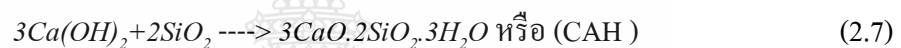
วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.7

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



### 2.1.3 เถ้าลอย

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

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้ โดยตามมาตรฐาน ASTM C618-80 [7] และ มอก. 2135 - 2545 ได้ให้คำนิยามของเถ้าลอยไว้ว่า เถ้าลอยคือ วัสดุเม็ดละเอียดที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหิน โดยส่วนมากจะได้อาจมาจากขบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน ถ่านหินที่ใช้ในการเผาผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด เช่น แอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub Bituminous) และลิกไนต์ (Lignite) โดยถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนสูงสุด และปริมาณความชื้นต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ตามลำดับ

### 2.1.3.1 ชนิดของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยเป็น 2 ชนิดคือ

ก. เถ้าลอยชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica,  $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา (Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 แสดงดังตารางที่ 2.4 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ต่ำ

ข. เถ้าลอยชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ตั้งแต่ร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70 และปริมาณ CaO สูง โดยมีคุณสมบัติตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 แสดงดังตารางที่ 2.4 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี  $\text{SiO}_2$  ต่ำแล้วยังมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [7]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70	50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) อย่างสูง, ร้อยละ	5	5
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3	3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6	6
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า $\text{Na}_2\text{O}$ , ร้อยละ	1.5	1.5

### 2.1.3.2 คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และมี MgO,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  เป็นองค์ประกอบรอง แสดงดังตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ยังประกอบด้วยความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) เถ้าลอยมี  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจาก



รวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ของถ้ำลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยจากแหล่งต่างๆ

ตัวอย่าง ถ้ำลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	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

### 2.1.3.3 ปฏิกริยาทางเคมีของถ้ำลอย

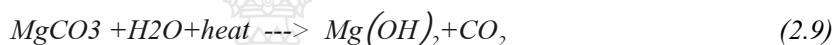
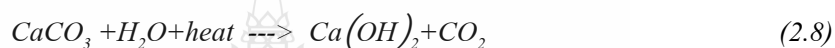
ปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีถ้ำลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกริยาไฮเดรชัน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือถ้ำลอย ซึ่งพบว่ามีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จะทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกริยาไฮเดรชัน

### 2.1.4 ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกริยาเคมี (inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกริยาทางเคมี (reactive material) มีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1.4.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเนื้อมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของ ปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีจึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจาก สาร ซัลเฟตอีกด้วย ในขณะที่เดียวกันก็อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบ ของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบ ที่ไม่่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีอย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็ สามารถที่จะทำปฏิกิริยา ทางเคมีได้ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือ ให้พลังงานความร้อนช่วย ในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9



#### 2.1.4.2 วัสดุที่่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อ ทดแทน ปูนซีเมนต์สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัว กับน้ำ ดัง สมการที่ 2.10



โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้สามารถใช้เป็นสาร ตั้งต้นใน การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของปูนซีเมนต์

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมี ความเป็นไป ได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่าง มีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรม ของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์มอร์ตาร์และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัด ก่อนการนำมาใช้ในเชิง พาณิชย์ต่อไป

#### 2.1.5 ความคงทนของคอนกรีต

ความคงทนของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากประการหนึ่งซึ่งหมายถึง ความสามารถของคอนกรีตในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงต่อสภาพแวดล้อม ทนต่อการทำลายจากสารเคมี ทนต่อแรงกระแทกหรือการกระทำอื่นๆ ตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตควรคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตด้วย

สาเหตุของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิด [8] ดังนี้

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

ข. สาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) ได้แก่ การเกิดคาร์บอนชั่น (Carbonation), การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack), การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack)

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

ง. สาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) ได้แก่ ตะไคร่รา หรือแบคทีเรีย

จ. สาเหตุรวม (Mixed Process) ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

#### 2.1.6 การหดตัวแบบออโตจินัสของคอนกรีต

การหดตัวแบบออโตจินัสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากการปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขึ้นสุดท้ายของคอนกรีต รวมทั้งอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียน้ำในช่องว่างกะปิลลารี (Capillary Pores) เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ ทำให้เกิด Capillary Suction ขึ้นในช่องว่างกะปิลลารี มีผลให้คอนกรีตหดตัวจากแรง Capillary Suction นี้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Self-desiccation” การหดตัวแบบออโตจินัส แตกต่างจากการหดตัวแบบแห้งตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียน้ำความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อมแต่เป็นการสูญเสียน้ำความชื้นภายในคอนกรีตเอง การหดตัวแบบออโตจินัสเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติ จะมีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลในทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยามวัดค่าการหดตัวแบบออโตจินัสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นในอดีตการหดตัวแบบนี้ไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้กันในอดีตมักเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างกะปิลลารีมากมีขนาดใหญ่และต่อเนื่อง ดังนั้นความชื้นในคอนกรีตจึงสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกจาก

บริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง และน้ำจากการบ่มก็สามารถเข้าถึงภายในคอนกรีตได้ ทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้มีค่าต่ำจนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบแต่ในทางตรงกันข้าม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตชนิดใหม่ๆขึ้นมาหลายชนิด ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและมีปริมาณเพสต์มาก เช่น คอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) และคอนกรีตที่ไม่ต้องใช้เครื่องเขย่า (Self-Compacting Concrete) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาแล้วคอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคัปิลลารีที่น้อยกว่า มีขนาดเล็กกว่า และมีความต่อเนื่องของช่องว่างคัปิลลารีน้อยกว่าหรืออีกนัยหนึ่ง มีค่าความชื้นน้ำต่ำมาก ดังนั้นเมื่อความชื้นในช่องว่างคัปิลลารีถูกใช้ไปในปฏิกิริยา จึงเป็นการยากที่ความชื้นจากส่วนอื่น หรือความชื้นจากการบ่มจะเข้ามาเสริมในบริเวณดังกล่าวได้ จึงทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้สูงจนไม่สามารถละเลยได้ในการออกแบบ [6]

#### 2.1.7 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

การหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีตเกิดจากสาเหตุการสูญเสียน้ำของคอนกรีตหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว โดยกลไกการหดตัวของคอนกรีตนั้นเกิดจากน้ำที่เต็มเต็มอยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Capillary Pore) เกิดการระเหยออกเนื่องจากสภาวะแวดล้อมซึ่งได้แก่ อุณหภูมิที่สูง หรือความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ทำให้เกิดแรงตึงผิวในช่องว่างคัปิลลารี (Capillary Surface Tension) และทำให้คอนกรีตที่อยู่โดยรอบช่องว่างคัปิลลารีนั้นเกิดการอัดตัวเข้ามา เนื่องจากการรักษาสมดุลของแรง ก่อให้เกิดการหดตัวของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเกิดขึ้น และจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายในภายหลังได้

การแก้ปัญหาการหดตัวแบบแห้ง อาจทำได้โดยการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสม เช่น ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตและลดปริมาณช่องว่างคัปิลลารี (Capillary) เพื่อลดการระเหยของน้ำ หรือใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดช่องว่างในคอนกรีต การใช้มวลรวมที่มีปริมาณและขนาดละเอียดที่เหมาะสม ก็จะช่วยลดโอกาสการเกิดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากมวลรวมไม่มีการหดตัวจึงทำหน้าที่ต้านทานการหดตัวของซีเมนต์เพสต์

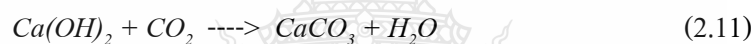
สารผสมเพิ่มเพื่อแก้ปัญหการเกิดการแตกร้าวเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้งมีหลายชนิด เช่น สารเพิ่มการขยายตัวของคอนกรีต (Expansive Agent) ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวในเบื้องต้นเพื่อชดเชยการหดตัวในภายหลัง (Shrinkage Compensation) โดยสารผสมเพิ่มชนิดนี้จะมีมากกว่าส่วนผสมคอนกรีตปกติทั่วไป ทำให้เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำแล้วจะเกิด Ettringite เพิ่มมากขึ้นและเกิดการขยายตัวของคอนกรีต ทั้งนี้ในการทำคอนกรีตมีการขยายตัวเนื่องจาก Expansive

จำเป็นต้องมีน้ำในการทำปฏิกิริยาที่พอเพียง ดังนั้นจึงต้องมีการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำหรือบ่มชื้นเป็นเวลาที่เหมาะสม

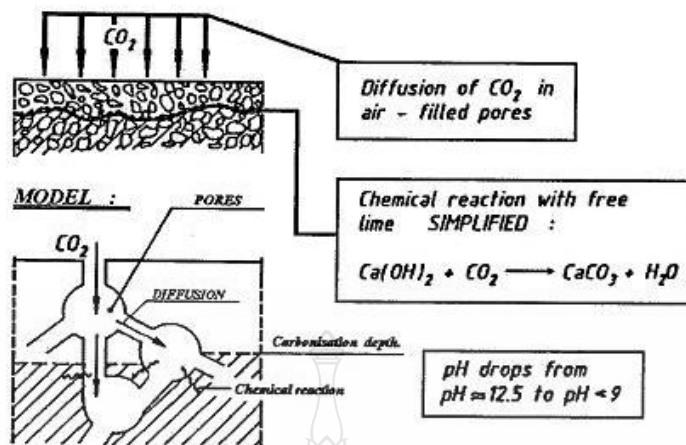
นอกจากนี้การใช้สารลดการหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage Reducing Admixture) จะทำหน้าที่ไปลดแรงดึงผิวในโพรงคาปิลารี อย่างไรก็ตามสารผสมเพิ่มเหล่านี้ไม่ช่วยควบคุมขนาดความกว้างของรอยร้าวภายหลังการแตกร้าว จำเป็นต้องมีการออกแบบเหล็กเสริมและรอยต่อ (Joint) ที่เหมาะสมเพื่อช่วยบรรเทาปัญหาการแตกร้าว

#### 2.1.8 การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต

คาร์บอนเนชัน (Carbonation) เป็นการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลักทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) แสดงดังสมการที่ 2.11



ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาพของสารละลายและคอนกรีตที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้แสดงดังรูปที่ 2.1 ดังนั้น คาร์บอนเนชันจะค่อยๆ กืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนเนตไปแล้วซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนेशनในคอนกรีต (Schiesl, 1988)

นอกจากนี้ยังอาจเกิดสารประกอบอื่นๆ เช่น ไฮดรอกไซด์ของซิลิกา ไฮดรอกไซด์ของอลูมินา เป็นต้น การเกิดคาร์บอนेशनโดยตัวของมันเองไม่ได้ทำให้คอนกรีตเสียหายแต่จะทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลง ปกติซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างสูงโดยมีค่า pH ระหว่าง 12.6 ถึง 13.5 และอาจลดลงเหลือเพียง 8 ถึง 9 ถ้าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ทำปฏิกิริยาคาร์บอนेशनจนหมด

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

คาร์บอนेशनเกิดจากผิวหน้าของคอนกรีตเข้าสู่เนื้อข้างใน ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนेशन ได้แก่ ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวคอนกรีต ความพรุนของเนื้อคอนกรีตซึ่งมีผลต่อการซึมเข้าสู่คอนกรีตของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือความแข็งแรงของคอนกรีต ตารางที่ 2.6 แสดงการเกิดคาร์บอนेशनของคอนกรีตที่เวลา 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 [9] นอกจากนี้ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่รอบคอนกรีตก็มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้น เพราะคาร์บอนชั้นเกิดได้ยากเมื่อคอนกรีตแห้งมากหรือชื้นมาก โดยอัตราการเกิดคาร์บอนชั้นสูงสุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 50 ถึง 70 [10]

### 2.1.8.1 ผลของคาร์บอนชั้นที่สำคัญมี 3 ประการ คือ

ก. ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนชั้นต่ำลง

ข. ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนชั้นต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนชั้นเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจน ใกล้เคียงหรือต่ำกว่าระดับวิกฤติ

ค. ทำให้เกิดการหดตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

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

### 2.1.8.2 หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจมีปัญหากการเกิดคาร์บอนชั้น

คอนกรีตที่ทนต่อการเกิดคาร์บอนชั้นจะเป็นคอนกรีตที่มีเนื้อแน่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปยาก ดังนั้นจึงควรเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ

และมีการบ่มที่ดี ปัจจุบันการทำคอนกรีตนิยมใส่วัสดุปอชโซลานซึ่งมีผลต่อการบ่มชั้นด้วยเพราะวัสดุปอชโซลานจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้การบ่มชั้นเพิ่มขึ้นได้ แต่การใส่วัสดุปอชโซลานเมื่อมีการบ่มที่ดีจะทำให้เนื้อซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้นจึงสามารถช่วยลดการบ่มชั้นได้ ดังนั้นการใช้สารปอชโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก แม้ว่าจะทำให้การบ่มชั้นเกิดในระดับที่ยอมรับได้ นอกจากนี้เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น ปฏิริยาปอชโซลานจะช่วยทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านต่างๆดีขึ้น 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

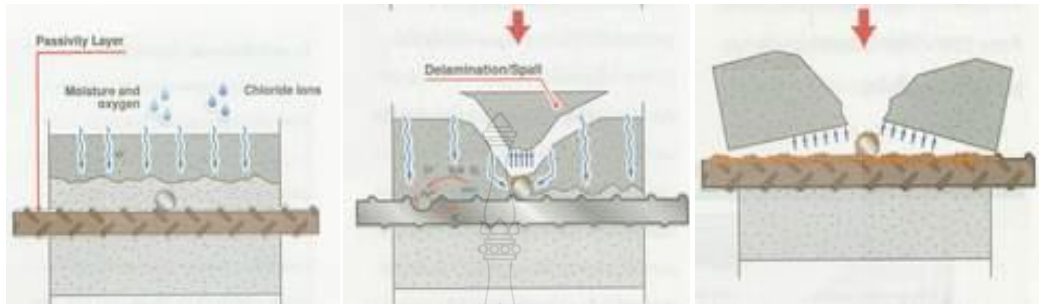
คลอไรด์ที่มาจากภายในคอนกรีต	คลอไรด์ที่มาจากภายนอกคอนกรีต
-น้ำที่ใช้ผสมในคอนกรีต	-จากน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย โดยเฉพาะ โครงสร้างที่อยู่ติดกับทะเล
-วัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต ได้แก่ หินและทราย	-มาจากช่วงเวลาที่ใช้งานเป็นจำนวนมาก เช่น จากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว
-น้ำขังที่ใช้เพิ่มผสมคอนกรีต เช่น น้ำยาเร่งหรือ	
หน่วงการก่อตัว น้ำยากันซึม เป็นต้น	

#### 2.1.9.1 กระบวนการของการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์

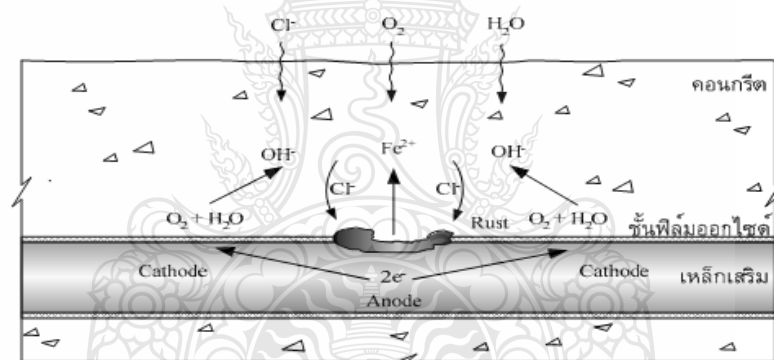
โดยปกติคอนกรีตจะมีสภาพความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ระหว่าง 12.5-13.5 ทำให้เกิดชั้นฟิล์มของออกไซด์ (Protective Passivity Layer) บางๆเคลือบอยู่ที่ผิวเหล็กเสริม เรียกว่า ฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  : Gamma ferric oxide) แต่เมื่อคลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงผิวของเหล็กเสริมได้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



ถูกทำลาย จนกระทั่งเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤติ เหล็กเสริมในบริเวณนั้นก็จะเกิดสนิมได้ ซึ่งเรียกว่า Depassivation และในขณะเดียวกันหากบริเวณดังกล่าวมีออกซิเจนและความชื้นในปริมาณที่พอเหมาะ กระบวนการทางไฟฟ้า-เคมีก็จะเกิดขึ้น [11]



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ในน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย



รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

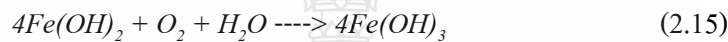
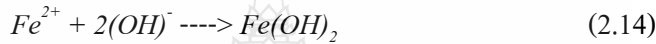
บริเวณที่ Passive film ถูกทำลายจะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ เรียกว่า “ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction)” สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.12)



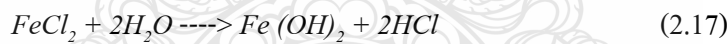
ส่วนบริเวณที่ Passive film ไม่ถูกทำลาย จะมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นขั้วบวก รับอิเล็กตรอนและทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน เรียกว่า “ปฏิกิริยาคาโทดิก (Cathodic Reaction)” สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.13)



และในขณะเดียวกัน  $Fe^{2+}$  ที่เกิดที่ขั้วลบส่วนหนึ่ง ทำปฏิกิริยากับน้ำออกซิเจน กลายเป็น “เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide)” แสดงดังสมการที่ (2.14) และ (2.15)



และเมื่อ  $Fe^{2+}$  ที่เกิดอีกส่วนหนึ่งที่ขั้วลบก็จะทำปฏิกิริยากับ  $Cl^-$  จะเกิดเป็น “เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_2$ )” และเมื่อสารประกอบดังกล่าวทำปฏิกิริยากับน้ำ ก็จะกลายเป็นสนิมเหล็ก แสดงดังสมการที่ (2.16) และ (2.17)



#### 2.1.9.2 ผลของการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์

ผลกระทบจากการกัดกร่อนด้วยคลอไรด์คือ กำลังรับแรงต่างๆของคอนกรีตลดลง ความสามารถความต้านทานความล้า (Fatigue Strength) และการแอ่นตัวของโครงสร้างเพิ่มขึ้น ผลข้างเคียงที่เกิดขึ้นคือ การเริ่มเกิดการแตกร้าวของคอนกรีต เป็นส่วนหนึ่งที่เร่งให้น้ำและออกซิเจน เข้าถึงเหล็กได้เร็วขึ้น ส่งผลให้มีการเกิดสนิมเหล็ก โดยการเกิดสนิมดังกล่าวจะมีผลเสียกับโครงสร้าง คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมบริเวณที่เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนจะลดลง ส่วนบริเวณที่เป็นขั้วบวก จะเป็นสนิมพอกพูนขึ้น แรงยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตในส่วนนี้จะลดลง จนในที่สุด โครงสร้างคอนกรีตจะแตกเพิ่มขึ้น ด้วยการเบ่งตัวของสนิมเหล็ก

#### 2.1.9.3 หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจมีปัญหการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

การเลือกคอนกรีตที่มีปัญหการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ จะคล้ายกับหลักการเลือกคอนกรีตในกรณีที่สร้างบริเวณทะเล การใช้เสาถ้ำหินหรือตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียด หรือ

ซิลิกาฟูมในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ที่เข้าสู่คอนกรีต วัสดุปอซโซลาน  
 จำเป็นมากยิ่งขึ้นในคอนกรีตที่ใช้งานในที่ที่มีอากาศร้อน และการใช้ระยะหุ้มคอนกรีตที่หนาขึ้นกว่า  
 ปกติทำให้คลอไรด์ที่ออกต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการแทรกซึมจนถึงผิวเหล็ก การใช้คอนกรีตที่มี  
 ความชื้นผ่านน้ำต่ำทำได้โดยกำหนด w/c ที่ต่ำกว่า 0.5 ซึ่งอาจต้องใช้สารลดน้ำเข้าช่วย แต่ถ้าคอนกรีต  
 เสริมเหล็กสัมผัสกับน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล หรือละอองของน้ำดังกล่าว w/c ควรมีค่าไม่เกิน 0.4

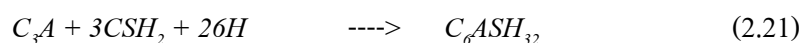
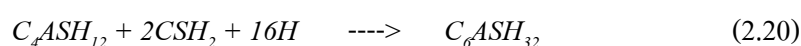
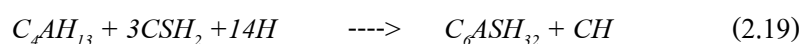
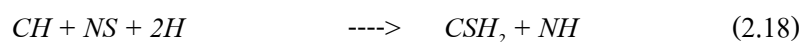
#### 2.1.10 การเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากซัลเฟต

สารประกอบทางเคมีที่มีผลต่อกระทบโดยตรงต่อความคงทนของคอนกรีต ที่สำคัญและ  
 พบมากในธรรมชาติ ประกอบด้วยเกลือของคลอไรด์ ซึ่งพบมากในน้ำทะเล เกลือของซัลเฟต ในดิน  
 หรือน้ำใต้ดิน (ในบางพื้นที่) ในน้ำเสียจากที่พักอาศัย ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และ  
 โรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท

เกลือของซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย มีผลค่อนข้างรุนแรงต่อการกัดกร่อน  
 คอนกรีตโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเกลือของซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) ที่พบมากคือ  
 โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ ) และแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) นอกจากนี้ก็ยังมีเกลือของโปรแตสเซียม  
 ซัลเฟตและแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ ) รวมอยู่ด้วย โดยกระบวนการกัดกร่อนของซัลเฟตที่มีต่อ  
 คอนกรีตนั้น

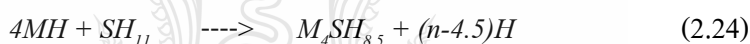
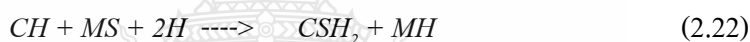
##### 2.1.10.1 กลไกการทำลายคอนกรีตโดยโซเดียมซัลเฟต [12]

กลไกการทำลายคอนกรีตโดยโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 2.18 ถึง 2.21 เริ่มต้น  
 เมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่าง โซเดียมซัลเฟต (NS) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นผลผลิตจาก  
 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ซึ่งทำให้ค่า pH ของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นเป็น  
 13.5 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า pH ของสารละลาย CH อิ่มตัวที่มีค่าเพียง 12.4 จึงเป็นการรักษาเสถียรภาพของ  
 C-S-H และ Ettringite ( $C_6ASH_{32}$ ) ไม่ให้ทำปฏิกิริยากลายเป็นผลผลิตอื่น สารยิปซั่ม ( $CSH_2$ ) จะทำ  
 ปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์บางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ( $C_4AH_{13}$ ), โมโนซัลเฟต ( $C_4ASH_{12}$ ) และ  
 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) ทำให้ได้ Secondary Ettringite ซึ่งจะมีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นผลที่  
 เกิดขึ้นจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต



### 2.1.10.2 กลไกการทำลายคอนกรีตโดยแมกนีเซียมซัลเฟต [12]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.22 ถึง 2.24 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 จะสะสมมากขึ้น โดย  $CSH_2$  จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับ ซิลิกาเจล ( $S_2H$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.21 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย ดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการแตกร้าวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม  $CSH_2$  โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต



### 2.1.10.3 หลักการเลือกคอนกรีตที่อาจมีปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ซิลิกาฟูม และเมทาลิน ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน สามารถช่วยทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ดีขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงสามารถลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตได้เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา คอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟตในสภาวะรุนแรงมากจะมีแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารผสมเพิ่มเพราะการใช้สารดังกล่าวทำให้การกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท) [13] 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 นัฏวิระ และทวิทัศน์ คงทรัพย์ [14] , 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 พัทธศานนท์ และคณะ [15] , ทำการศึกษาเรื่องผลของระยะเวลาในการบ่มเปียกต่อความลึกของคาร์บอนเนชั่นของ 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 จากนั้นนำตัวอย่างไปเก็บไว้ภายนอกห้องปฏิบัติการ ทำการ

ทดสอบหาความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อถึงกำหนดเวลาทดสอบ โดยกำหนดระยะเวลาทดสอบคาร์บอนชั้นของคอนกรีตสูงสุดอยู่ที่ 5 เดือน จากผลทดสอบพบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ผ่านการบ่มโดยการบ่มแห้งมีความลึกคาร์บอนชั้นสูงสุด และการบ่มเปียกทำให้ค่าความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยที่เมื่อระยะเวลาในการบ่มเปียกนานขึ้น จะทำให้คาร์บอนชั้นของคอนกรีตลดลง แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าระยะเวลาที่บ่มเปียกแทบจะไม่มีผลต่อความลึกคาร์บอนชั้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเมื่อบ่มอย่างน้อยเป็นระยะเวลา 14 วัน และยังพบอีกว่าการเพิ่มอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ของคอนกรีตหรือเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมจะทำให้ค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นในคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นทุกสูตรและทุกวิธีและอายุของการบ่ม

ตามยศ สมยาภักดี และคณะ [16] , ได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบเฉพาะที่ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเกิดสนิม มักพบปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตภายหลังการซ่อมแซมแบบเฉพาะที่ คือ การเกิดสนิมอีกครั้งในระยะเวลาอันสั้น โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตเก่ากับวัสดุซ่อมแซม จุดประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ก็เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตแบบเฉพาะที่ ตัวอย่างที่ทดสอบแบ่งเป็นสองฝั่งคือคอนกรีตเก่าและวัสดุซ่อมแซม โดยแปรผันปริมาณคลอไรด์อิออนในแง่ตัวอย่างคอนกรีตเก่า ร้อยละ 0, 2, 4 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของคอนกรีตเก่าและพื้นที่ผิวเหล็กเสริมของวัสดุซ่อมแซม ได้แก่ 3:17, 10:10 และ 17:3 วัสดุที่ใช้ซ่อมแซมได้แก่ ซีเมนต์มอร์ตาร์ มอร์ตาร์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวัสดุโพลีเมอร์ และมอร์ตาร์สำหรับงานซ่อมแซม โดยทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และวัดค่ากระแสไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณคลอไรด์อิออนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตเพิ่มขึ้น อัตราส่วนพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดและแคโทดมีผลต่อค่าการเกิดสนิมเมื่อปริมาณคลอไรด์อิออนเพิ่มขึ้น วัสดุซ่อมแซมที่มีความหิบน้ำมากมีผลทำให้กระแสที่เกิดขึ้นนั้นน้อยลง การเลือกใช้วัสดุสำหรับซ่อมแซมที่ถูกต้องเหมาะสมจะเป็นการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม อายุการใช้งานของโครงสร้างหลังซ่อมแซมจะนานขึ้น เป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับซ่อมบำรุง สุดท้ายเพื่อเป็นแนวทางในการเสนอวิธีซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความคงทน

Young-Shik Park et al. [17] ; ทำการวิจัยเรื่อง “Strength Determinate of high-strength concrete in sulfate environment” โดยออกแบบส่วนผสมของตัวอย่างมอร์ต้า 7 ส่วนผสม โดยนำตัวอย่างแต่ละส่วนผสมจำนวน 50 ตัวอย่างไปแช่ในน้ำสะอาด, สารละลาย  $MgSO_4$  10% ,  $NaSO_4$  10%

และสารละลายผสมระหว่าง  $MgSO_4$  10% และ  $NaSO_4$  10% ที่  $PH=7$  เป็นเวลา 270 วันแล้วนำไปทดสอบกำลังอัดได้ผลสรุปดังนี้

1)  $MgSO_4$  ,  $NaSO_4$  เป็นสาเหตุของความสึกกร่อน แต่อย่างไรก็ตาม  $MgSO_4$  ก็เป็นสาเหตุหลักในการทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำ

2) ในการกัดกร่อนจาก  $NaSO_4$  , ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีสาร Superplasticizer และ ซิลิกาฟุ่ม มีความทนซัลเฟตต่ำและมีแนวโน้มที่จะมีกำลังอัดต่ำลง เนื่องจากมีความพรุนสูงเพราะมี w/c สูง

3) ในการกัดกร่อนจาก  $MgSO_4$  , HSC ที่ผสมสาร Superplasticizer และ ซิลิกาฟุ่ม มีความสามารถที่แย่ และมีแนวโน้มที่จะให้กำลังอัดที่ต่ำลง ซึ่งหมายถึง HSC ที่ผสมเฉพาะซิลิกาฟุ่ม จะทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต และการกัดกร่อนจาก  $MgSO_4$  และการกัดกร่อนจะลดลงต่อเมื่อมีการเพิ่มซิลิกาฟุ่มในส่วนผสมไม่น้อยกว่า 10 %

4) ในส่วนผสมที่มีซิลิกาฟุ่มสูง จะมีการขยายตัวของตัวอย่างทดสอบต่ำในการกัดกร่อนจาก  $NaSO_4$  แต่จะมีการขยายตัวสูงในการกัดกร่อนจาก  $MgSO_4$

5) น้ำหนักของตัวอย่างที่ 90 วันที่กัดกร่อนโดย  $NaSO_4$  จะลดลงน้อยมาก แต่น้ำหนักที่ลดลงของจากการกัดกร่อนโดย  $MgSO_4$  มีนัยสำคัญโดยเฉพาะที่ส่วนผสมที่มีซิลิกาฟุ่ม 15%

E.E. Hekel, E et al. [18] , ทำการศึกษาเรื่อง “Magnesium sulfate attack on hardened 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 วันที่สภาพต่างกกัน ได้แก่ ที่อุณหภูมิห้อง , ที่  $60^{\circ}C$  และที่  $60^{\circ}C$  ภายใต้วัฏจักรแบบเปียกสลับแห้ง ได้ผลปรากฏว่า Slag และแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถปรับปรุงความต้านทานซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1 (OPC) ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม 10-15% ไม่ได้เป็นการปรับปรุงการทนซัลเฟตให้ดีขึ้นของ hardened cement pastes และที่  $60^{\circ}C$  ภายใต้วัฏจักรแบบเปียกสลับแห้ง จะเป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟตได้เร็วยิ่งขึ้น

นพคุณ ผลโพธิ์ [19] , ทำการศึกษาเรื่องผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ชนิดวัสดุประสานและปริมาณอย่างเหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต ในการทดลองการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ใช้วิธีวัดค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ใน

สารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็น โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ และพบว่าทั้งการแทนที่และการบดผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่วน ยกเว้นกรณีของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และการแทนที่เถ้าลอย (ที่มีค่า CaO สูงๆ) ในปริมาณน้อยๆ ร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงหรือมากกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์มากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต นอกจากนี้พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟตทั้งมอร์ต้าร์บดผสมและการแทนที่เถ้าลอยหรือผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าน้อยหรือไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์เถ้าลอยไม่ว่าบดผสม หรือแทนที่ (เถ้าลอยปริมาณสูง) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะที่มอร์ต้าร์ผงหินปูนไม่ว่าบดผสมหรือแทนที่ หรือแทนที่ร่วมกับเถ้าลอย (เถ้าลอยปริมาณต่ำ) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และสุดท้ายทราบสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต





## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

สำหรับในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการศึกษาโดยมีหัวข้อคือ วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

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

3.1.2 เถ้าลอย (Fly ash) ใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง 3 ชนิด ( F(A) , F(B) และ F(C) ) เถ้าลอยจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า (BLCP) จังหวัดระยอง 1 ชนิด ( F(R) )

3.1.3 ผงหินปูนขนาดความละเอียด 8 ไมโครเมตร

3.1.4 มวลรวมหยาบ ใช้หิน

3.1.5 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำที่มีขนาดร่อนผ่านตะแกรกร่อนมาตรฐานเบอร์ 4

3.1.7 น้ำ ใช้น้ำประปา

#### 3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดการศึกษาในครั้งนี้ประกอบไปด้วย คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน และคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต ซึ่งประกอบไปด้วย การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ได้ทำการศึกษาได้แก่

1) ความละเอียดของวัสดุประสาน โดยวิธีเบลน ตามมาตรฐาน ASTM C204 [20]

2) ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน ตามมาตรฐาน ASTM C188 [21]

3) ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน โดยวิธี Scanning Electronic

Microscope : (SEM)

4) องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry :  
(XRF)

### 3.2.2 การหาค่าการหดตัวของคอนกรีตของมอร์ตาร์

การทดสอบการหดตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C490 และ ASTM C157 ใช้เครื่องวัดความยาว (length comparator) แสดงดังรูปที่ 3.1 วัดความยาวที่เปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.1 เครื่องวัดความยาว (length comparator)

#### 3.2.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เตรียมขึ้น โดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. แต่ละสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ชิ้น

#### 3.2.2.2 การทดสอบการหดตัวของคอนกรีตของตัวอย่างมอร์ตาร์

หลังจากหล่อขึ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ตาร์ 24 ชั่วโมง ทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่าง โดยใช้เครื่องวัดความยาว แล้วนำชิ้นตัวอย่างห่อหุ้มด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชั้น ตามด้วยพลาสติกใส 5 ชั้นและเทปกาวใส 2 ชั้น วัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเสร็จแล้วนำตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิ  $28 \pm 1$  °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $50 \pm 5$  ตลอดการทดสอบ และเก็บก้อนตัวอย่างไว้บนชั้นวาง หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุต่างๆ คือ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 56 และ 91 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวของคอนกรีตที่อายุต่างๆกัน

#### 3.2.2.3 การหาค่าการหดตัวของคอนกรีตของตัวอย่างมอร์ตาร์

เมื่อครบที่อายุต่างๆ คือ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 56 และ 91 วัน นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 4 วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน โดยสามารถหาค่าการหดตัวของคอนกรีตของตัวอย่างมอร์ตาร์ได้จากสมการที่ (3.1)

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

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

### 3.2.3 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 596-96 โดยใช้เครื่องวัดความยาว (length comparator) แสดงดังรูปที่ 3.1 วัดความยาวที่เปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เตรียมขึ้น โดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. แสดงดังรูปที่ 3.2 แต่ละลัดส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ชิ้น



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

### รูปที่ 3.2 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

#### 3.2.3.2 การบ่มและการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ตาร์

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ตาร์ 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำ เป็นเวลา 7 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ  $30 \pm 2^\circ\text{C}$  หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำ นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิว

ให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ทวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวเสร็จแล้ว นำชิ้นตัวอย่างบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย  $30 \pm 2$  °C โดยวางชิ้นตัวอย่างบนโต๊ะ (แสดงดังรูปที่ 3.3) ให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 56 และ 91 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่อายุบ่มต่างๆกัน



รูปที่ 3.3 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ทที่บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย  $30 \pm 2$  °C

### 3.2.3.3 การหาค่าการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ตาร์ท

เมื่อครบที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 56 และ 91 วัน นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 4 วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน โดยสามารถหาค่าการหดตัวแห้งตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ทได้จากสมการที่ (3.2)

$$\Delta L = \frac{L_i - L_x}{L_g} \times 100 \quad (3.2)$$

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 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

#### 3.2.4.1 การเตรียมตัวอย่างและการบ่มตัวอย่างคอนกรีต

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตซึ่งเตรียมโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 100x100x100 มม. แสดงดังรูปที่ 3.4 เพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้นตามมาตรฐาน ASTM C109 หลังจากหล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตแล้วทำการถอดแบบคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 7 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$  หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20°C แล้ว นำขึ้นตัวอย่างคอนกรีตที่จะทำการทดสอบขึ้นจากน้ำ แล้วทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของชิ้นตัวอย่างออกแล้วเช็ดผิวชิ้นตัวอย่างด้วยผ้าสะอาด และทิ้งไว้จนแห้ง

นำตัวอย่างไปอบในตู้อบคาร์บอนชั้น แสดงดังรูปที่ 3.5 ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ 40,000 ppm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นร้อยละ 55 โดยใช้ระยะเวลาในการอบ 28 วัน รอจนครบอายุที่กำหนด จึงนำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้น



รูปที่ 3.4 แบบหล่อคอนกรีตขนาด 100 x 100 x 100 มม.



รูปที่ 3.5 ตู้อบคาร์บอนชั้น

### 3.2.4.2 การทดสอบค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น

- 1) เมื่อตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 100 x 100 x 100) อยู่ในตู้อบคาร์บอนเนชั่นครบอายุตามที่กำหนดแล้ว ให้นำออกมาจากตู้อบคาร์บอนเนชั่น
- 2) นำตัวอย่างคอนกรีตออกเป็น 2 ซีก (โดยเครื่องUTM)
- 3) นำก้อนตัวอย่างมาวางแล้วฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein) ที่ก้อนตัวอย่างซึ่งปรากฏเป็นสีม่วง
- 4) ปลดอxygenไจว้จนแห้งประมาณ 5 นาที แล้วทำการวัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง บริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่น แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยใช้เวอร์เนียรวัดทั้ง 4 ด้าน ด้านละ 6 ค่า
- 5) จดบันทึกค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น แล้วนำค่าที่ได้เฉลี่ยกัน



รูปที่ 3.6 ความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

### 3.2.5 ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต (Rapid Chloride Permeability Test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 [22] ในการประเมินความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. โดยมีหลักในการทดสอบ คือ ป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันคงที่ 60 VDC ระหว่างผิวหน้าทั้งสอง ทำการวัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างในการทดสอบในหน่วยของมิลลิแอมแปร์ ใ้วัดตลอดระยะเวลา 6 ชั่วโมง และอินทิเกรทเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นค่าแอมแปร์ – วินาที (Ampere – Second) ให้มีหน่วยเป็น คูลอมป์ (Coulomb) ซึ่งจำนวนคูลอมป์ที่วัดได้สามารถใช้อำเนกคอนกรีตตามระดับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง แสดงดังตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1** การใช้จำนวนคลอம்பี ในการจำแนกคอนกรีตตามระดับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง [22]

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

**3.2.5.1 การเตรียมแท่งตัวอย่างคอนกรีต**

หล่อแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. หลังจากแกะแบบแล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปป่นน้ำ 28, 56 และ 91 วันเมื่อครบกำหนดการบ่มให้นำออกมาแช่ดิวคอนกรีตแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วตัดด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. แสดงดังรูปที่ 3.7



**รูปที่ 3.7** ตัวอย่างแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม.

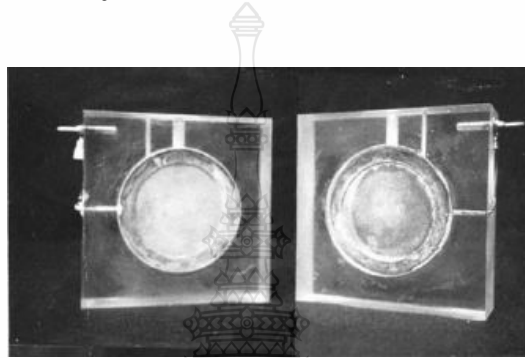
**3.2.5.2 การเตรียมสารละลาย**

สารละลายที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ สำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เตรียมโดยใช้

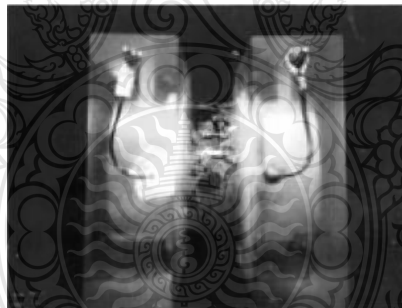
โซเดียมคลอไรด์ 30 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เตรียมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัมละลายในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 1000 กรัม เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.3 โมลาร์

### 3.2.5.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1) นำแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่แช่สะอาดมาประกอบเข้าไปใน Cell แสดงดังรูปที่ 3.8 ซึ่งตัวอย่างที่พร้อมทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 Cell



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างคอนกรีตที่ประกอบใน Cell

2) เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ( 3% NaCl ) กับเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 N ( 0.3 N NaOH ) เข้าไปในช่องเก็บกักสารละลายแต่ละข้างของ Cell

3) เชื่อมต่อโดยสายไฟระหว่าง Cell กับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.10 ที่มีอุปกรณ์ในการอ่านค่าและพร้อมทำการทดสอบ เปิด Power Supply ตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า



60±0.1 VDC ทำการจดบันทึกค่าเริ่มต้น ในระหว่างการทดสอบอุณหภูมิของห้องควรรอยู่ที่ 20 ถึง 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.10 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

4) อ่านและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่างที่มีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ ทุกๆ 30 นาที เมื่อครบเวลาทำการทดสอบ 6 ชั่วโมงให้ทำการปิดเครื่องทดสอบ

#### 3.2.5.4 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 อุณหภูมิสารละลายขณะแช่

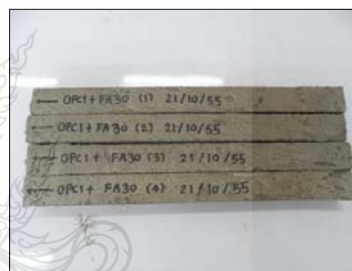
ตัวอย่างประมาณ  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$  และใช้ความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือปริมาณอิออนซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) เท่ากับ 33800 ppm กรณีใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเตรียมโดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร ได้ปริมาณอิออนซัลเฟตเท่ากับ 33800 ppm ส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร ได้ปริมาณอิออนซัลเฟตที่เท่ากันคือ 33800 ppm โดยสารละลายซัลเฟตที่ใช้แช่ตัวอย่างจะมีทำการเปลี่ยนทุกๆ 2 เดือน

### 3.2.6.1 วิธีทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1012 [23] โดยใช้เครื่องวัดความยาว length comparator วัดความยาวที่เปลี่ยนแปลง โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### ก. การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เตรียมขึ้น โดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. แสดงดังรูปที่ 3.11 ในแต่ละสัปดาห์ผสมมอร์ตาร์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ชิ้น



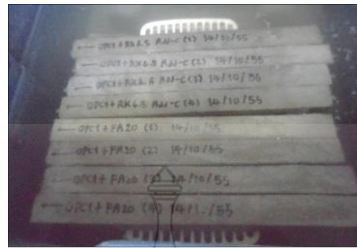
(ก) แบบหล่อขนาด 25x25x285 มม. (ข) ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม.

### รูปที่ 3.11 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต

#### ข. การบ่มและการทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ตาร์ 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$  หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวเสร็จแล้วให้นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เพื่อหาค่าเฉลี่ย

ภาพถ่ายตัวของมอร์ตาร์ดที่อายุแช่ในสารละลายครบ 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ 60 สัปดาห์ตามลำดับ รูปที่ 3.12 แสดงขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 3.12 ขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ค. การหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ด

เมื่อครบที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ 60 สัปดาห์ นำขึ้นตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นขึ้นจากสารละลายซัลเฟตเจ็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำขึ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นำไปหาค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ดได้จากสมการที่ (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	ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวเป็นเวลา 28 วัน (มิลลิเมตร)
	$L_g$	คือ	ค่าความยาวของ Gauge Length (มิลลิเมตร)

### 3.2.6.2 วิธีทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยการหาการสูญเสียน้ำหนักของชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม

#### ก. การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ ใช้ชั้นตัวอย่าง มอร์ตาร์ซึ่งเตรียมโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 50 x 50 x 50 มม. แสดงดังรูปที่ 3.14 ในแต่ละสัปดาห์ผสมมอร์ตาร์ใช้ชั้นตัวอย่างทั้งหมด 3 ชั้น



(ก). แบบหล่อขนาด 50x50x50 มม.



(ข). ชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม.

รูปที่ 3.14 แบบหล่อและตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต

#### ข. การบ่มและการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์

หลังจากหล่อชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์แล้วทำการถอดแบบมอร์ตาร์ที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ  $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$

หลังจากครบอายุการบ่มในน้ำที่อิมตัวด้วยปูนขาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำ แล้วล้างทำความสะอาดเอาปูนขาวและสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของชิ้นตัวอย่างออกแล้วเช็ดผิวชิ้นตัวอย่างด้วยผ้าสะอาด เมื่อชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง นำชิ้นตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ชั่งได้นี้จะใช้เป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างมอร์ตาร์ หลังจากชั่งน้ำหนักเสร็จแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อหาค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุแช่ในสารละลายครบ 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ 60 สัปดาห์ ตามลำดับ รูปที่ 3.15 แสดงชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ 3.15 ชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ค. การหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์

เมื่อครบที่อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ 60 สัปดาห์ นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ทั้ง 3 ชิ้นของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ขึ้นจากสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์มาเช็ดทำความสะอาดและซับผิวให้แห้งด้วยผ้า เมื่อชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์อยู่ในสภาวะอิมตัวผิวแห้ง นำชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ไปชั่งน้ำหนัก 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)

### 3.3 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ etail จากแม่เมาะจำนวน 3 ชนิด คือ F(A) F(B) และ F(C) และetail BLCP จำนวน 1 ชนิด F(R) โดยในกรณีสัดส่วนของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบ การหัดตัวแบบอโตจิ้นัส การหัดตัวแบบแห้ง และการด้านทานซัลเฟต ได้แสดงดังตารางที่ 3.2 ส่วนการเกิดคาร์บอนชั้น และความสามารถในการแทรกซึมคลอไรด์ ได้ใช้ตัวอย่างคอนกรีต โดยสัดส่วนแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม) ของมอร์ต้าร์ ที่ใช้ในการทดสอบการหัดตัวแบบอโตจิ้นัส การหัดตัวแบบแห้ง และการด้านทานซัลเฟต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	วัสดุประสาน			ทราย (Sand)	น้ำ (W/B)
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	etail			
			แม่เมาะ	ระยอง		
1	MC	1	-	-	2.75	0.55
2	M20F(A)	0.8	0.2	-	2.75	0.55
3	M40F(A)	0.6	0.4	-	2.75	0.55
4	M20F(B)	0.8	0.2	-	2.75	0.55
5	M40F(B)	0.6	0.4	-	2.75	0.55
6	M20F(C)	0.8	0.2	-	2.75	0.55
7	M40F(C)	0.6	0.4	-	2.75	0.55
8	M20F(R)	0.8	-	0.2	2.75	0.55
9	M40F(R)	0.6	-	0.4	2.75	0.55

ความหมายทางสัญลักษณ์

MC	หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
M20F(A)	หมายถึง มอร์ต้าร์ที่แทนที่etail F(A) ร้อยละ 20
M40F(A)	หมายถึง มอร์ต้าร์ที่แทนที่etail F(A) ร้อยละ 40

**ตารางที่ 3.3** สัดส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ใช้ในการทดสอบ การเกิดคาร์บอนेशन และความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งโดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)					
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC	393	-	-	727	1047	196
2	C20F(A)	314	79	-	727	1047	196
3	C40F(A)	236	157	-	727	1047	196
4	C20F(B)	314	79	-	727	1047	196
5	C40F(B)	236	157	-	727	1047	196
6	C20F(C)	314	79	-	727	1047	196
7	C40F(C)	236	157	-	727	1047	196
8	C20F(R)	314	79	-	727	1047	196
9	C40F(R)	236	157	-	727	1047	196
10	CLP10	353	40	-	727	1047	196
11	C30F(A)LP10	235	119	40	727	1047	196
12	C30F(B)LP10	235	119	40	727	1047	196
13	C30F(C)LP10	235	119	40	727	1047	196
14	C30F(R)LP10	235	119	40	727	1047	196

ความหมายทางสัญลักษณ์

- CC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- CLP10 หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่ผงหินปูน ร้อยละ 10
- C20F(A) หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่เถ้าลอย F(A) ร้อยละ 20
- C40F(A) หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่เถ้าลอย F(A) ร้อยละ 40
- C30F(A)LP10 หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่เถ้าลอย F(A) ร้อยละ 30 และผงหินปูน ร้อยละ 10

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิเคราะห์

สำหรับผลการศึกษาผลกระทบของชนิดของเถ้าลอยต่อความคงทนของคอนกรีตในที่นี่ ได้พิจารณาถึง คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน คุณสมบัติด้านความคงทน และเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยจากแม่เมาะจำนวน 3 ชนิด คือ F(A) F(B) และ F(C) และเถ้าลอย BLCP จำนวน 1 ชนิดคือ F(R) โดยคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

##### 4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

###### 4.1.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยจากแม่เมาะจำนวน 3 ชนิด คือ F(A) F(B) และ F(C) และเถ้าลอย BLCP จำนวน 1 ชนิดคือ F(R) พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.15 ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย F(A) F(B) และ F(C) และเถ้าลอย F(R) จะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.21 2.57 2.57 และ 2.17 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3,100 ซม.<sup>2</sup>/ก. ส่วนความละเอียดของเถ้าลอย F(A) F(B) และ F(C) และเถ้าลอย F(R) มีค่าเท่ากับ 2,867 ซม.<sup>2</sup>/ก. 2,820 ซม.<sup>2</sup>/ก. 2,722 ซม.<sup>2</sup>/ก. และ 2,723 ซม.<sup>2</sup>/ก. ตามลำดับ

###### 4.1.1.2 ภาพถ่ายขยายของอนุภาค

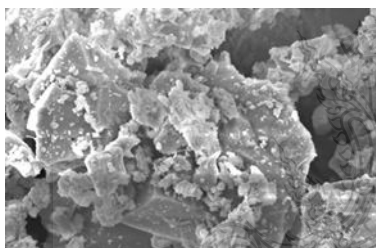
การถ่ายภาพขยายของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope : SEM ซึ่งขยาย 3,500 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างลักษณะของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 กับเถ้าลอย F(A) ซึ่งเป็นเถ้าลอยแม่เมาะ กล่าวคือ ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระ ไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆขนาดปนกันอยู่ในขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและผิวค่อนข้างเรียบแต่มีอนุภาคหลายๆขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน ส่วนอนุภาคของเถ้าลอย F(R)



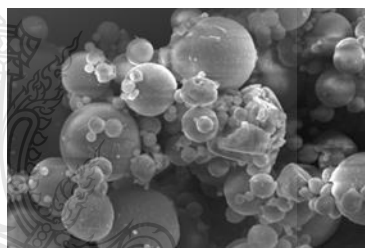
ซึ่งเป็นถั่วลอย BLCP มีลักษณะมีลักษณะเหลี่ยม ขรุขระ คล้ายๆกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ มีอนุภาคหลายๆขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ถั่วลอย			
		โรงไฟฟ้าแม่เมาะ			จังหวัดระยอง
		F(A)	F(B)	F(C)	F(R)
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.21	2.57	2.57	2.17
ความละเอียดโดยวิธีเบลน, ซม. <sup>2</sup> /ก.	3,100	2,867	2,820	2,722	2,723



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ข) ถั่วลอยแม่เมาะ ( F(A) )



ค) ถั่วลอย BLCP

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาควัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

#### 4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry : XRF ของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้าวางจากแม่เมาะจำนวน 3 ชนิด คือ F(A) F(B) และ F(C) และ ถ้าวาง BLCP จำนวน 1 ชนิดคือ F(R) แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า SiO<sub>2</sub> ของถ้าวาง F(A) F(B) F(C) และ F(R) มีค่าค่อนข้างสูงเท่ากับร้อยละ 35.71 ,26.61 ,25.22 และ 61.46 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 18.93 ในกรณีของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก็เช่นกัน โดยที่ ถ้าวาง F(A) F(B) F(C) และ F(R) เท่ากับร้อยละ 20.44 ,13.60 ,13.88 และ 20.27 ตามลำดับ ในขณะที่ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 5.51 และกรณีของ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก็ทำนองเดียวกันคือ ถ้าวาง F(A) F(B) F(C) และ F(R) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 15.51 18.34 ,17.39 ,5.56 และ 3.31 ตามลำดับ ส่วนในกรณี CaO นั้นพบว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 65.53) มีค่ามากกว่าของถ้าวาง F(A) F(B) F(C) และ F(R) โดยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 16.52 ,24.97 ,26.25 และ 1.73 ตามลำดับ ในส่วนออกไซด์รองอื่นๆ ได้แก่ MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O SO<sub>3</sub> และ LOI จากออกไซด์ที่กล่าวมาแล้วพบว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถ้าวาง F(A) F(B) F(C) และ F(R) มีค่าไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ถ้าวาง			จังหวัด ระยอง
		โรงไฟฟ้าแม่เมาะ			
		F(A)	F(B)	F(C)	
SiO <sub>2</sub> , %	18.93	35.71	26.61	25.22	61.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	5.51	20.44	13.6	13.88	20.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	3.31	15.54	18.34	17.39	5.56
CaO, %	65.53	16.52	24.97	26.25	1.73
MgO, %	1.24	2	2.33	2.38	0.96
Na <sub>2</sub> O, %	0.15	1.15	1.75	1.4	0.73
K <sub>2</sub> O, %	0.31	2.41	1.77	1.92	1.36
SO <sub>3</sub> , %	2.88	4.26	8.53	9.44	0.38
LOI, %	-	0.49	0.53	0.56	5.38
Free Lime, %	-	1.71	3.93	3.06	0.03

## 4.2 คุณสมบัติด้านความคงทน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้ำลอกจากแม่เมาะจำนวน 3 ชนิด คือ F(A) F(B) และ F(C) และถ้ำลอม BLCP จำนวน 1 ชนิดคือ F(R) และผงหินปูน โดยคุณสมบัติด้านความคงทนที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ การหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์ การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต มีรายละเอียดดังนี้

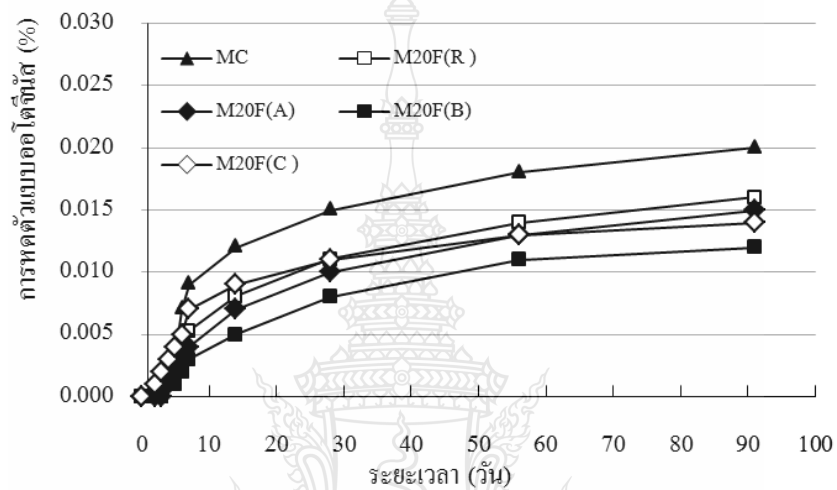
### 4.2.1 การหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์

การศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของถ้ำลอม ต่อการหดตัวแบบบอโตจีนัส มีรายละเอียดดังนี้

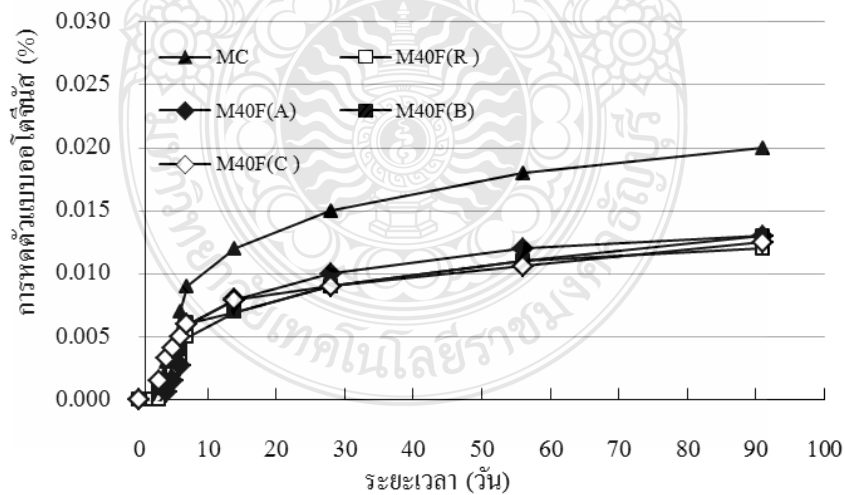
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอม จากการศึกษาพบว่า การหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอมทั้ง 4 ชนิด (ร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะการใช้ถ้ำลอมทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง การดึงน้ำในช่องว่างคาปิลลารีไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงลดลงตามไปด้วย รวมทั้งการใช้ถ้ำลอมทำให้ปริมาณน้ำอิสระในมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้น ซึ่งการหดตัวแบบบอโตจีนัสเกิดจากการสูญเสียน้ำจากการนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันออกจากช่องว่างคาปิลลารี ดังนั้นเมื่อน้ำอิสระเพิ่มขึ้นส่งผลให้มอร์ต้าร์มีน้ำมากพอการหดตัวจึงลดลง โดยการหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอม (ทั้ง 4 ชนิด) ร้อยละ 40 มีแนวโน้มน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอมร้อยละ 20 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการลดปูนซีเมนต์มากกว่ารวมทั้งสามารถเหลือน้ำในช่องว่างคาปิลลารีได้มากขึ้น ส่วนเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดของถ้ำลอมต่อการหดตัวแบบบอโตจีนัส เมื่อแทนที่ถ้ำลอมร้อยละ 20 พบว่า การหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอม F(R) มีค่ามากที่สุดตามไปด้วยของถ้ำลอม F(A), F(C) และ F(B) ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถ้ำลอม F(R) มีองค์ประกอบของ LOI (ร้อยละ 5.38) ทำให้มีความต้องการน้ำมาก ส่งผลให้การดึงน้ำจากช่องว่างคาปิลลารีที่มากขึ้น จึงทำให้การหดตัวแบบบอโตจีนัสมีค่ามาก ส่วนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนัสของถ้ำลอมแม่เมาะทั้ง 3 พบว่า การหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์ถ้ำลอม F(B) มีค่าน้อยกว่าทั้งของมอร์ต้าร์ผสมถ้ำลอม F(A) และ F(C) (โดยของถ้ำลอม F(A) และ F(C) มีค่าไม่แตกต่างกัน) ทั้งนี้ อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณ Free Lime ของถ้ำลอม F(B) มีค่ามาก (ร้อยละ 3.93) ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้มากกว่า ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงขึ้น จึงสามารถต้านทานการหดตัวได้ดีกว่าของมอร์ต้าร์ F(A) และ F(C) ในขณะที่การหดตัวแบบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์ถ้ำลอมทั้ง 4 ที่แทนที่ร้อยละ

40 นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลกระทบต่อค่าการหดตัวของมอร์ตาร์

ส่วนรูปที่ 4.3 แสดงการหดตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40) ที่อายุ 91 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการหดตัวของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

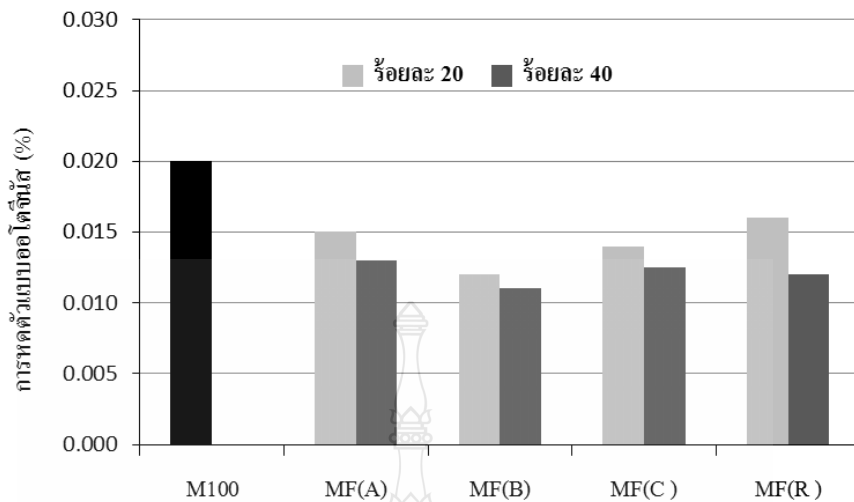


ก) ร้อยละ 20



ข) ร้อยละ 40

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์กับอายุของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย F(A), F(B), F(C) และ F(R)

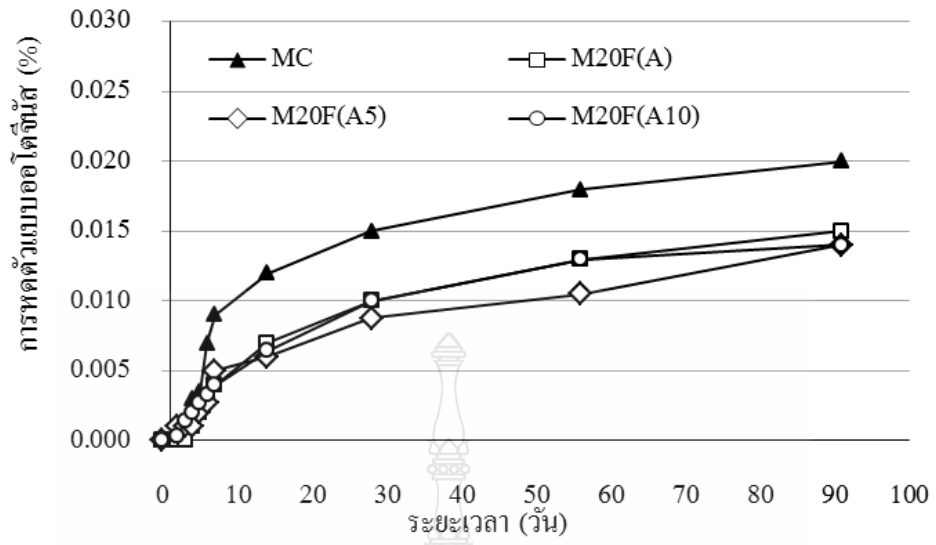


รูปที่ 4.3 การหาค่าแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ผสม  
 etailoy (ร้อยละ 20 และ 40) ที่อายุ 91 วัน

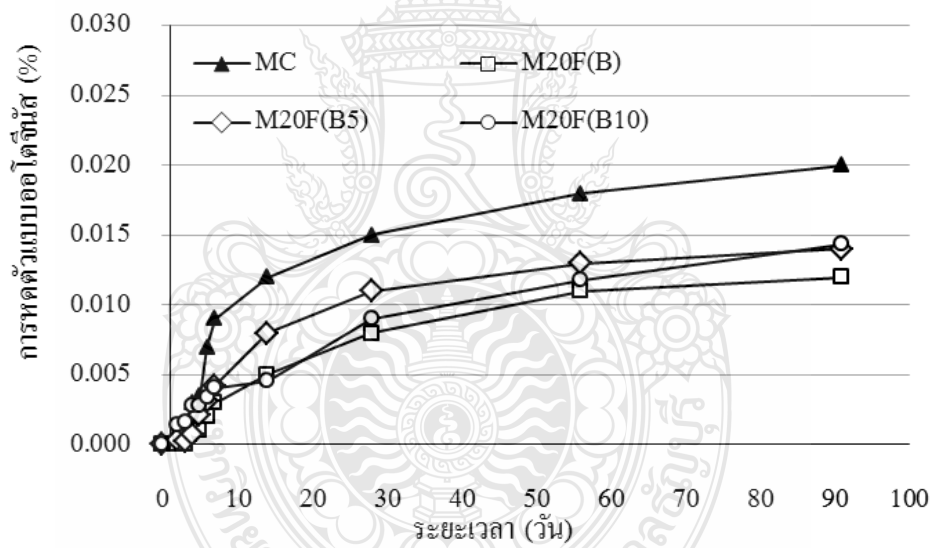
อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลของปริมาณ Free Lime ในetailoyที่มีผลต่อการหาค่าแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์ โดยใช้etailoyจากแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด ( F(A) ,F(B) และ F(C) ) ให้เป็นetailoyตั้งต้น ซึ่งมีปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 1.71, 3.93 และ 3.06 ตามลำดับ จากนั้นมีการเติมปริมาณ Free Lime ในetailoyจนได้เท่ากับร้อยละ 5 และ 10

โดยรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหาค่าแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมetailoy ทั้ง F(A) ,F(B) และ F(C) แทนที่ร้อยละ 20 และ 40 ที่เติมปริมาณ Free lime ลงไปในetailoyตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดเป็นร้อยละ 5 และ 10ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการหาค่าแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์มีค่าไม่แตกต่างหรือมีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อยกับของมอร์ตาร์etailoyตั้งต้น นั่นแสดงว่าการเติมปริมาณ Free lime ในetailoyที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการหาค่าแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์

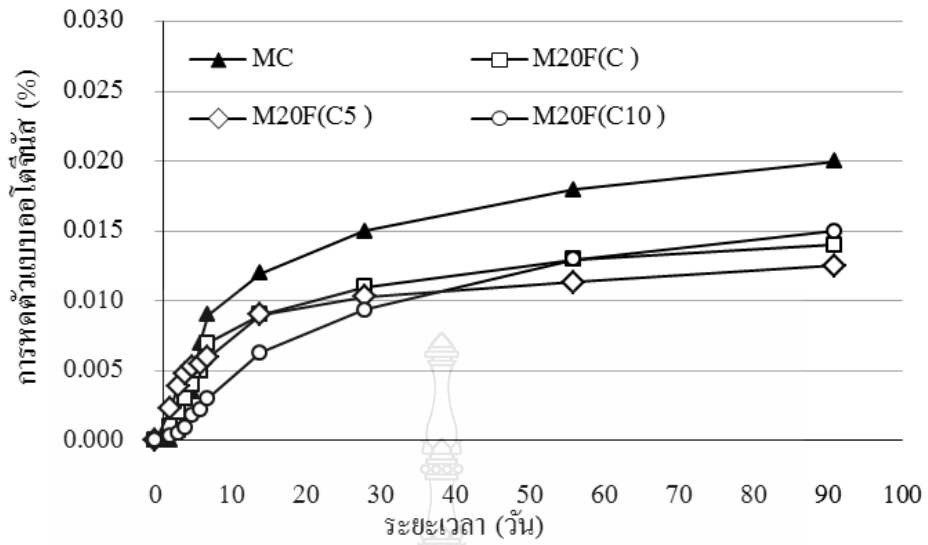
ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงการหาค่าแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ผสมetailoyดังกล่าว (ที่เติมปริมาณ Free lime ร้อยละ 5 และ 10) ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 ที่อายุ 91 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการหาค่าแบบอโตจินัสของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ก) แก้วลอย F(A)

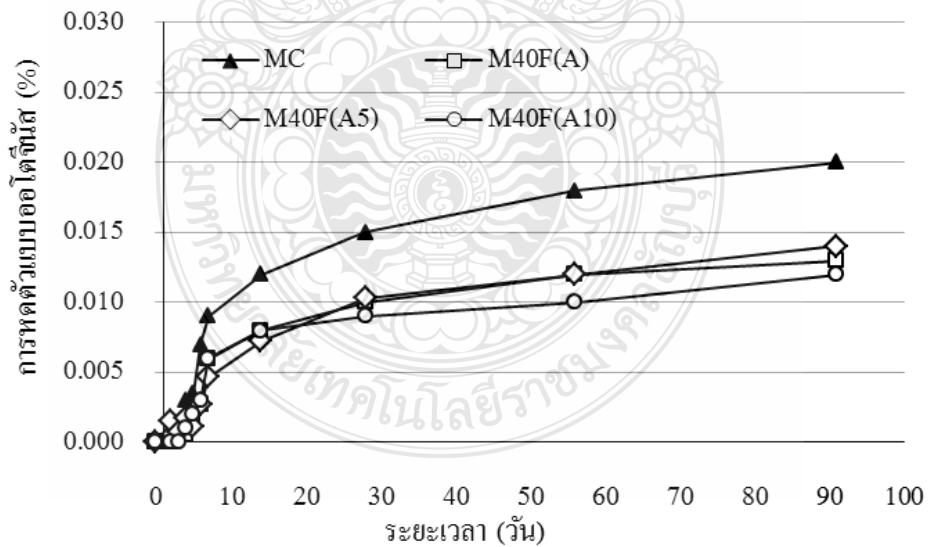


ข) แก้วลอย F(B)

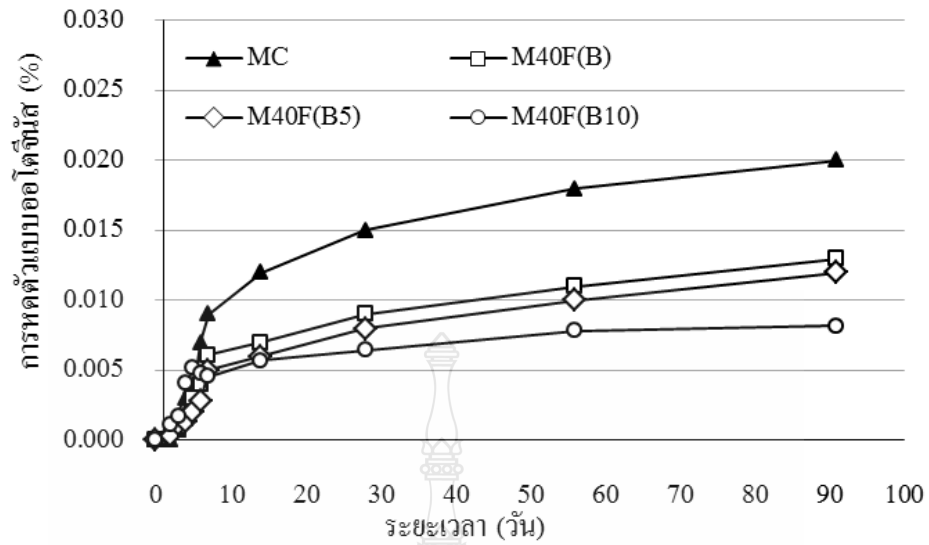


ค) เถ้าลอย F(C)

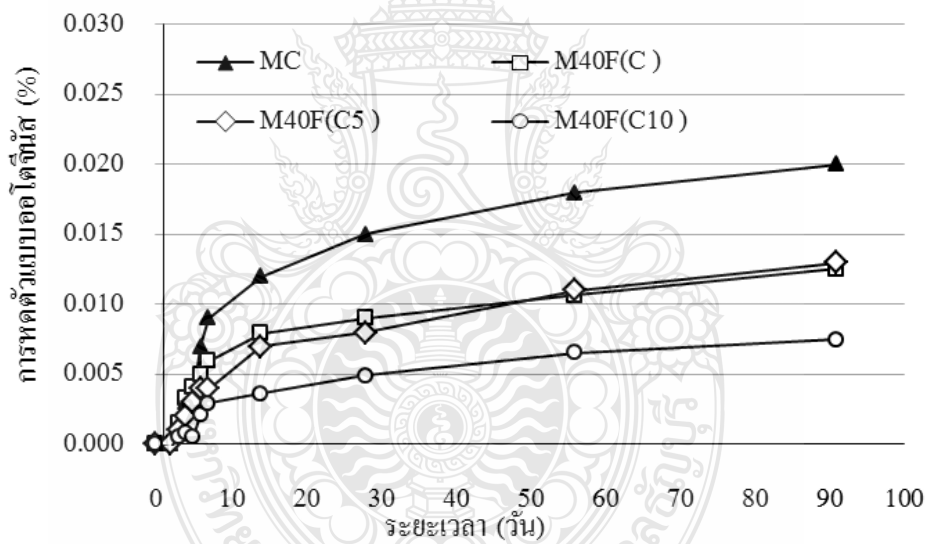
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 20 และมอร์ตาร์ผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10



ด) เถ้าลอย F(A)



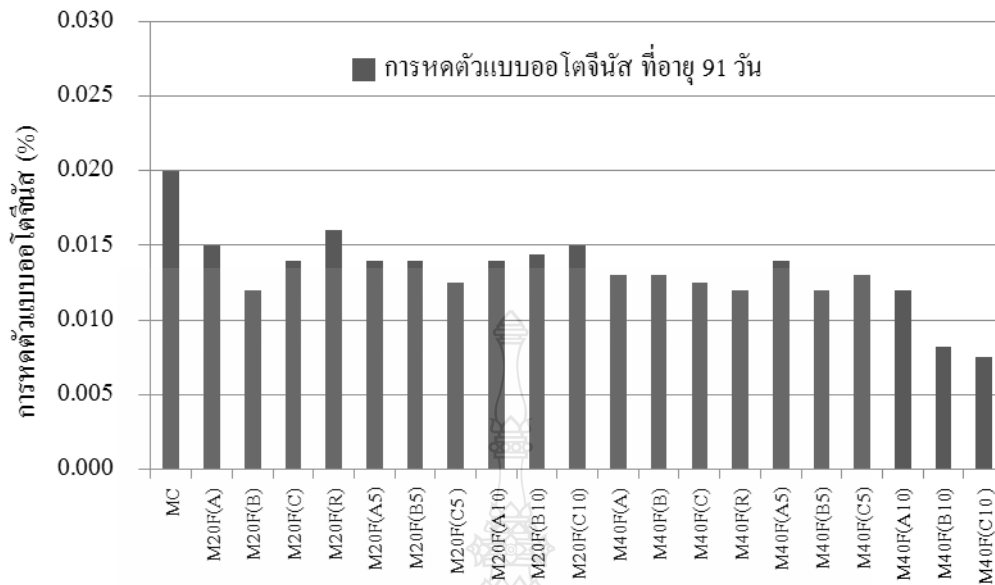
ข) แก้วลอย F(B)



ค) แก้วลอย F(C)

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคตัวแบบออกโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมแก้วลอยตั้งต้นร้อยละ 40 และมอร์ต้าร์ผสมโดยแก้วลอยร้อยละ 40 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10





รูปที่ 4.6 การหดตัวของแบบอโตจีนัสของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสม  
 เถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 20 และ 40 และมอร์ต้าร์ผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ที่เติม  
 ปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10 ที่อายุ 91 วัน

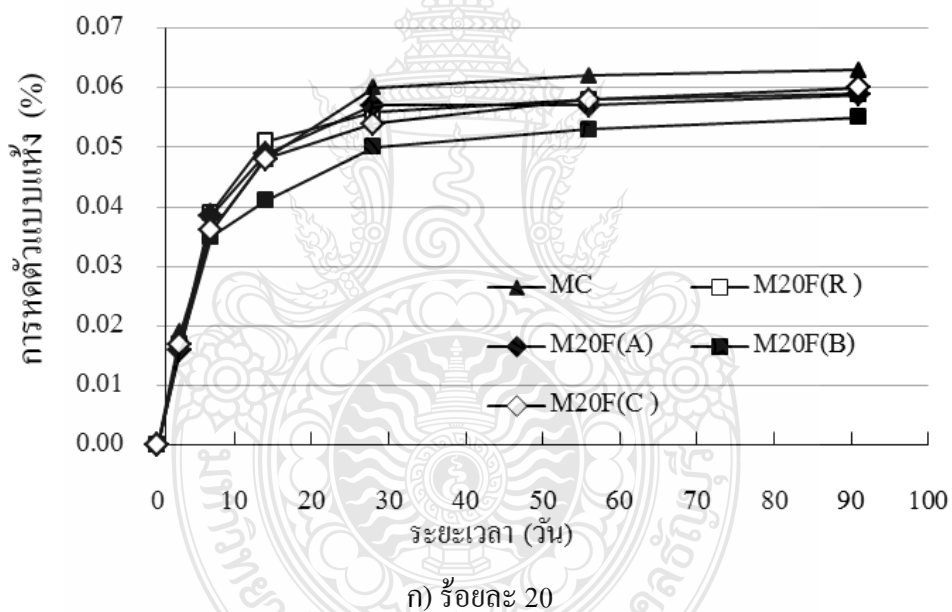
#### 4.2.2 การหดตัวของแบบแห้งของมอร์ต้าร์

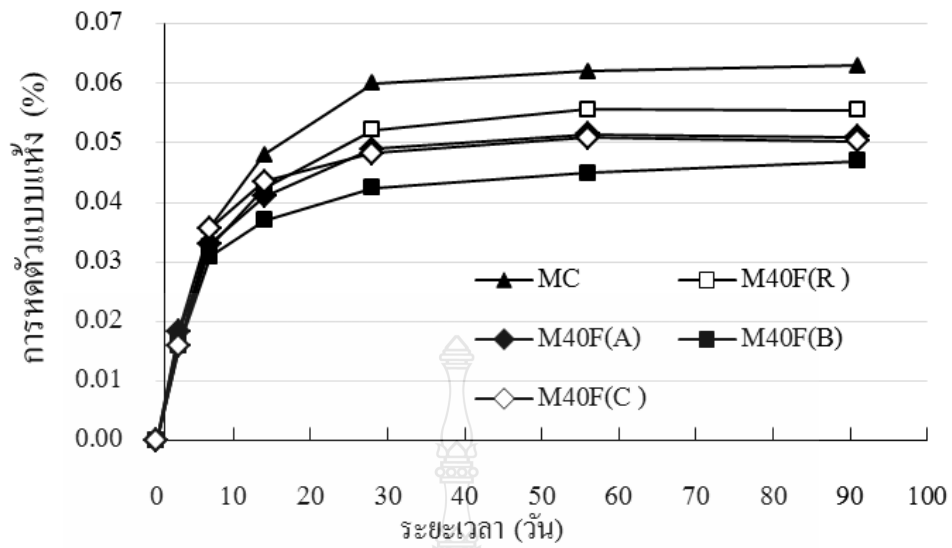
การศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของเถ้าลอย ต่อการหดตัวของแบบแห้ง มีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย จากการศึกษาพบว่า การหดตัวของแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยจะมีส่วนทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยา โดยเถ้าลอยที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ซึ่ง CSH ช่วยอุดช่องว่างซีเมนต์เพสต์ ให้มีความหนาแน่นขึ้น ส่วนเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่เหมือน Micro Aggregates ในการช่วยลดช่องว่างของมอร์ต้าร์ ทำให้มอร์ต้าร์มีความหนาแน่นขึ้นทำให้น้ำในช่องว่างคาปิลลารีระเหยได้ยากขึ้น และความแข็งแรงของเพสต์มากขึ้น สามารถต้านทานการหดตัวได้ โดยที่การหดตัวของแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดเล็ก การแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะทำให้ช่องว่างของคาปิลลารีเล็กลง และมีความแน่นมากขึ้น ทำให้การสูญเสียความชื้นจึงเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวมีค่าลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยใน

ปริมาณมากขึ้น ส่วนเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอยต่อการหดตัวแบบแห้งพบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย F(B) มีค่าน้อยสุด (ในกรณีการหดตัวแบบแห้งทั้ง F(A) , F(C) และ F(R) มีค่าไม่แตกต่างกัน) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอย F(B) องค์ประกอบของ Free Lime (ร้อยละ 3.93) ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น ทำให้มอร์ต้าร์มีความแน่นขึ้น จึงทำให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าน้อยลง ในขณะที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40 พบว่า การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย F(R) มีค่ามากที่สุดตามไปด้วยของเถ้าลอย F(A) , F(C) และ F(B) ตามลำดับ

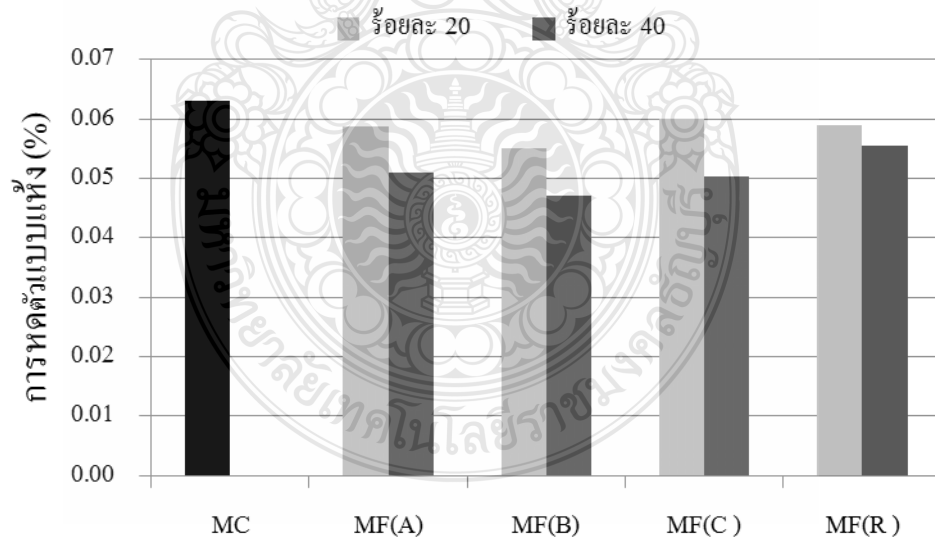
ส่วนรูปที่ 4.8 แสดงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40) ที่อายุ 91 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว





ข) ร้อยละ 40

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอย F(A), F(B), F(C) และ F(R)

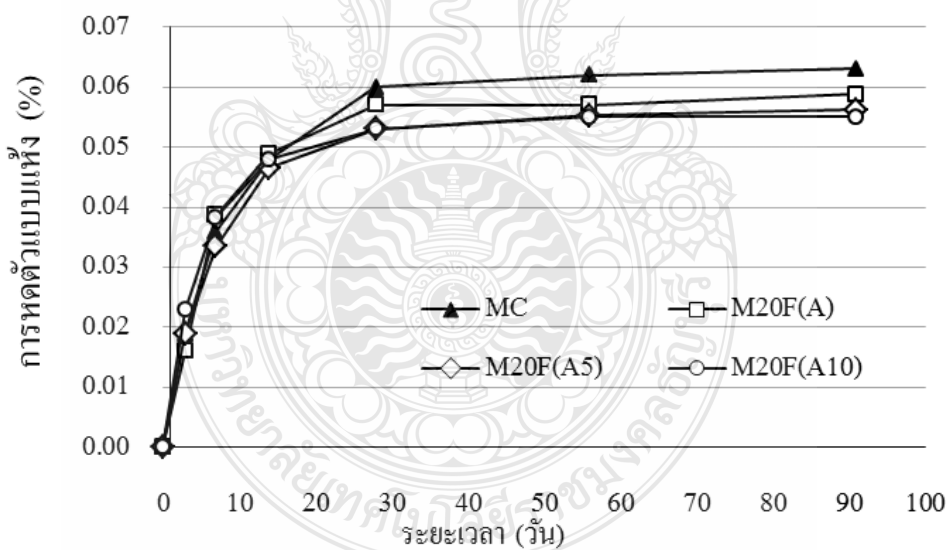


รูปที่ 4.8 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ดผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40) ที่อายุ 91 วัน

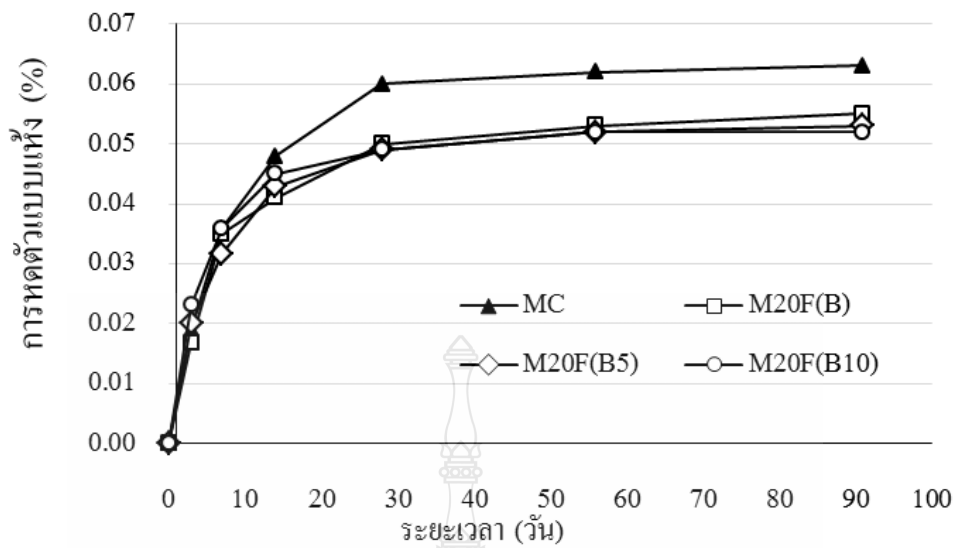
อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลของปริมาณ Free Lime ในเถ้าลอยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ โดยใช้เถ้าลอยจากแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด ( F(A) ,F(B) และ F(C) ) ให้เป็นเถ้าลอยตั้งต้น ซึ่งมีปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 1.71, 3.93 และ 3.06 ตามลำดับ จากนั้นมีการเติมปริมาณ Free Lime ในแต่ละเถ้าลอยจนได้เท่ากับร้อยละ 5 และ 10

โดยรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ทั้ง F(A) ,F(B) และ F(C) แทนที่ร้อยละ 20 และ 40 ที่เติมปริมาณ Free lime ลงไปในเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดเป็นร้อยละ 5 และ 10 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์มีค่าไม่แตกต่างหรือมีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อยกับของมอร์ตาร์เถ้าลอยตั้งต้น นั่นแสดงว่าการเติมปริมาณ Free lime ในเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

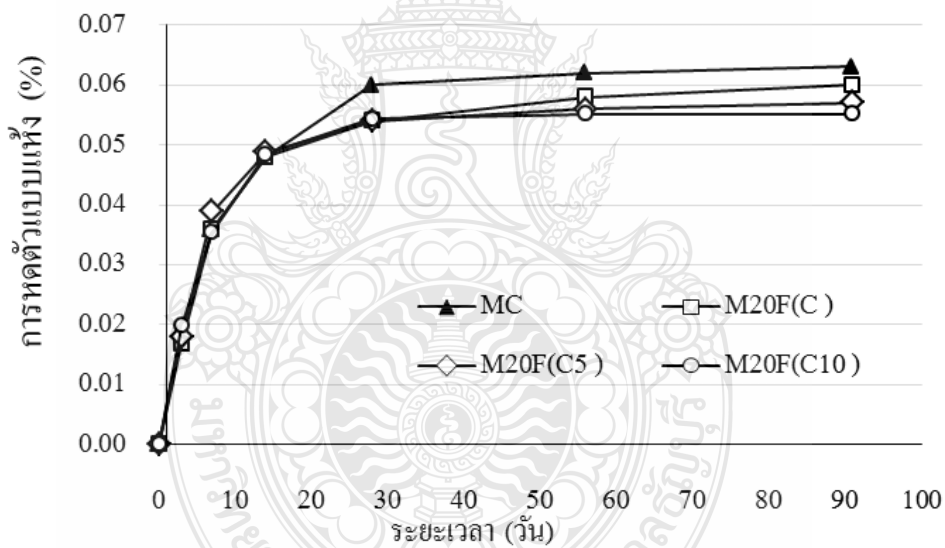
ส่วนรูปที่ 4.11 แสดงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยดังกล่าว (ที่เติมปริมาณ Free lime ร้อยละ 5 และ 10) ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 ที่อายุ 91 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ก) เถ้าลอย F(A)

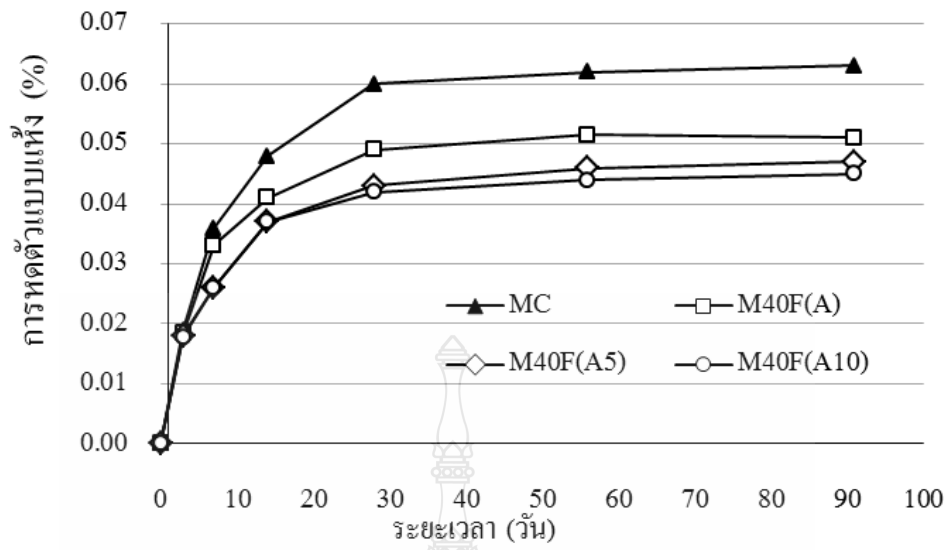


ข) แก้วลอย F(B)

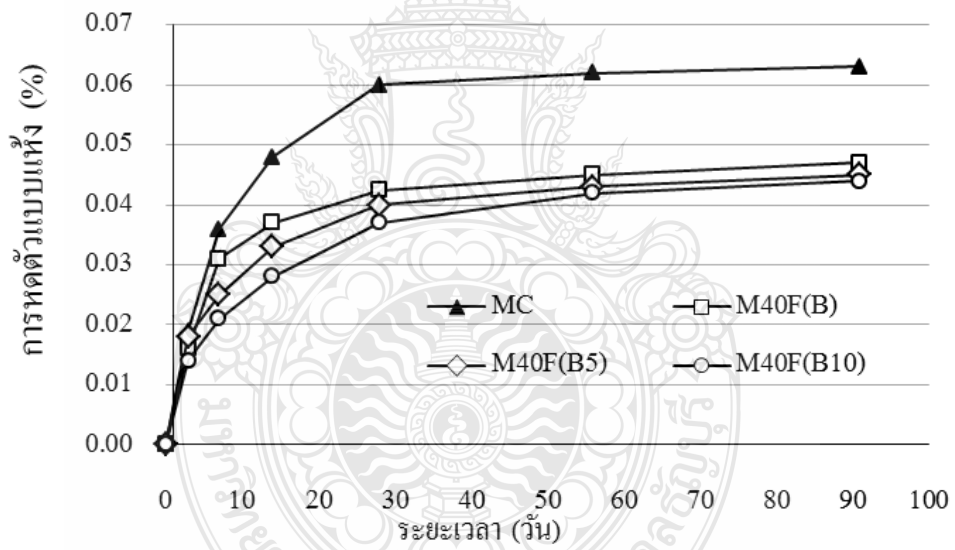


ค) แก้วลอย F(C)

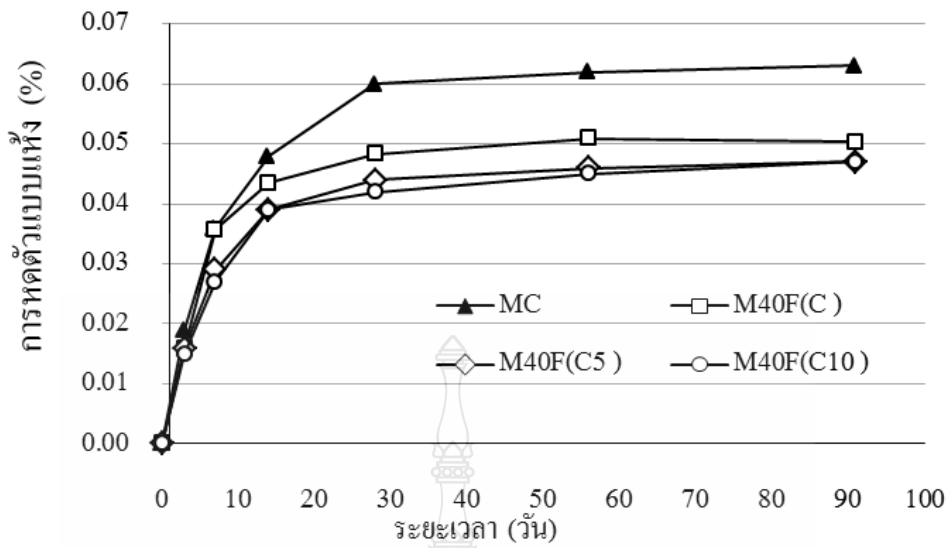
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และมอร์ต้าร์ผสมแก้วลอยตั้งต้นร้อยละ 20 และมอร์ต้าร์ผสมโดยแก้วลอยร้อยละ 20 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10



ก) ถั่วลอ่ย F(A)

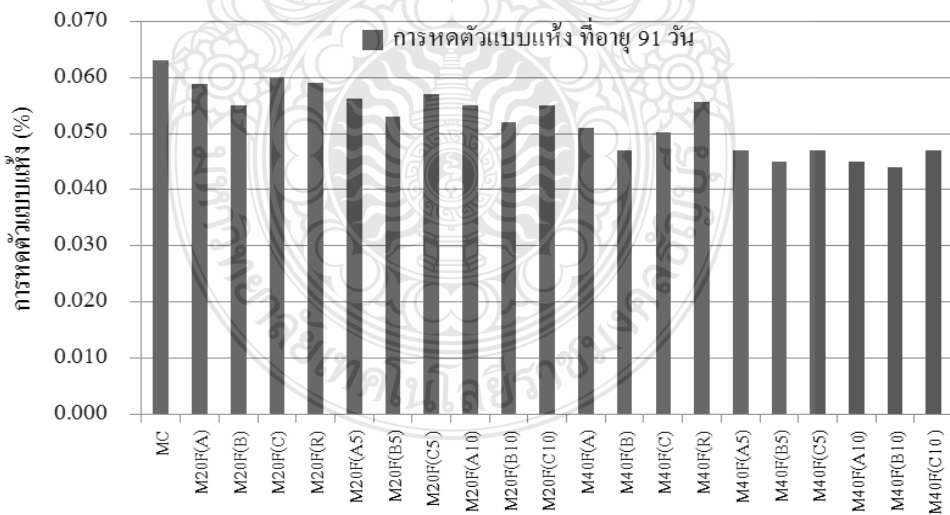


ข) ถั่วลอ่ย F(B)



ค) เถ้าลอย F(C)

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 40 และมอร์ตาร์ผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 40 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10



รูปที่ 4.11 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตั้งต้นร้อยละ 20 และ 40 และมอร์ตาร์ผสมโดยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ที่เติมปริมาณ Free Lime เท่ากับร้อยละ 5 และ 10 ที่อายุ 91 วัน

#### 4.2.3 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

การศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของเถ้าลอย และผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต มีรายละเอียดดังนี้

##### 4.2.3.1 ผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของเถ้าลอยต่อการเกิดคาร์บอนชั้น

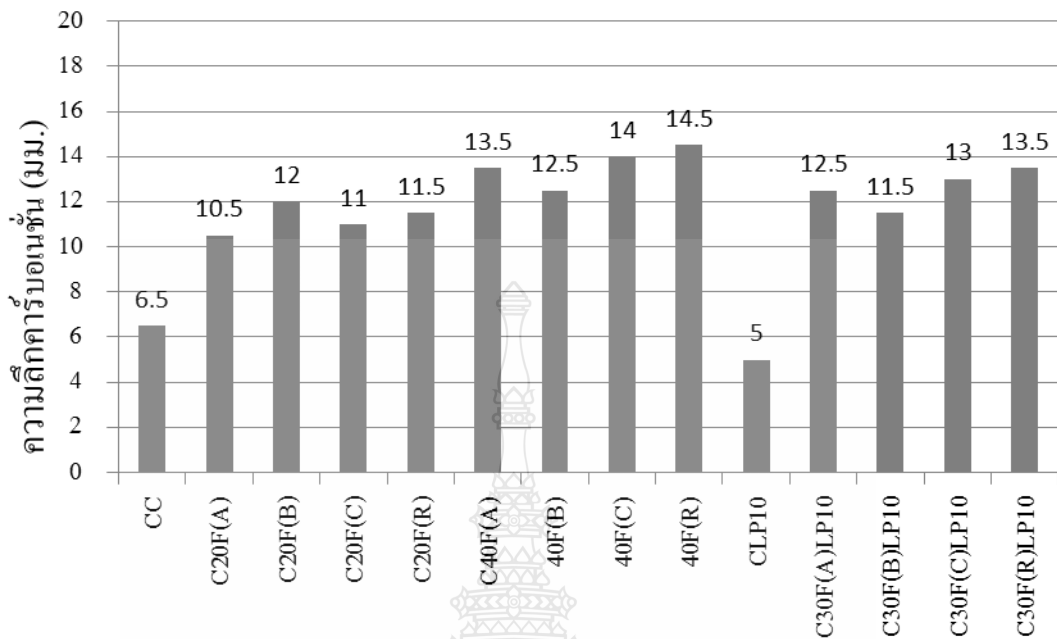
ตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.12 แสดงความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อตัวอย่างบ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 จากการศึกษา พบว่า ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ร้อยละ 20 และ 40) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเป็นการลดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  จึงเป็นการเร่งการเกิดคาร์บอนชั้น ส่วนความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 ทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกันเช่นกัน นั้นแสดงว่าชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนชั้น อย่างไรก็ตามการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีแนวโน้มมากกว่าร้อยละ 20 ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากกว่าจะสามารถลดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้มากกว่า ส่งผลให้การเกิดคาร์บอนชั้นที่มากกว่า

ส่วนความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 นั้นมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนซึ่งไม่ใช่วัสดุปอซโซลาน(ไม่ลด  $\text{Ca(OH)}_2$ ) และตัวของผงหินปูนเองเป็นสารเติมเต็มจึงเป็นการช่วยให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้นจึงส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้ยากขึ้น ส่วนความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้ง 4 ชนิด) และผงหินปูน โดยแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 และผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเป็นการลดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  จึงเป็นการเร่งการเกิดคาร์บอนชั้น ถึงแม้จะมีการผสมผงหินปูนซึ่งเป็นสารเติมเต็ม แต่ปริมาณของเถ้าลอยมีมากกว่า จึงส่งผลให้มีความลึกมากกว่า



ตารางที่ 4.3 ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอน  
 ไดออกไซด์ 28 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

สัดส่วนผสม	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)	
	บ่มน้ำ 7 วัน	
	สัมผัสคาร์บอนชั้น 28 วัน	
CC	6.5	
C20F(A)	10.5	
C20F(B)	12	
C20F(C)	11	
C20F(R)	11.5	
C40F(A)	13.5	
C40F(B)	12	
C40F(C)	14	
C40F(R)	16	
CLP10	5	
C30F(A)LP10	12.5	
C30F(B)LP10	11.5	
C30F(C)LP10	13	
C30F(R)LP10	14	

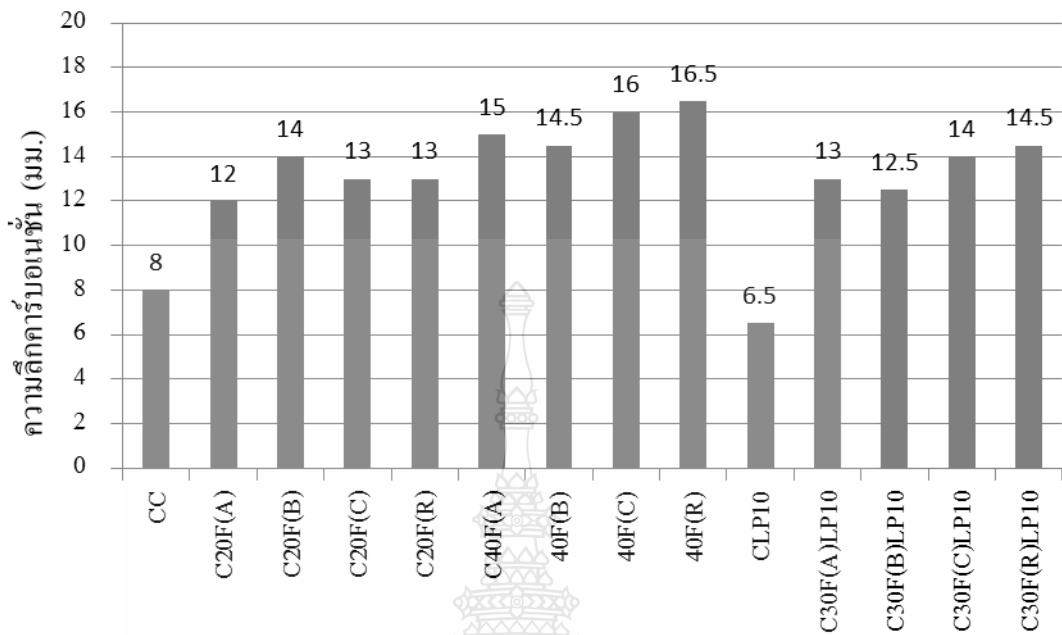


รูปที่ 4.12 ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

ตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.13 แสดงความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน เมื่อตัวอย่างบ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน เมื่อคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.4 ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1  
 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอน  
 ไดออกไซด์ 28 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

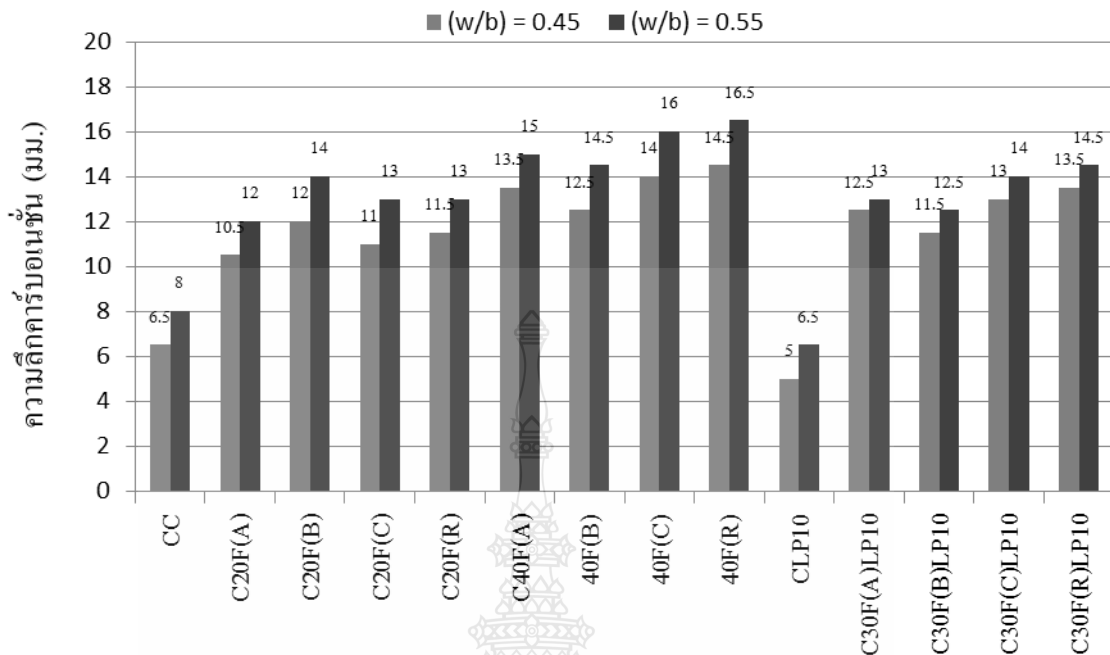
สัดส่วนผสม	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)	
	บ่มน้ำ 7 วัน	
	สัมผัสคาร์บอนชั้น 28 วัน	
CC	8	
C20F(A)	12	
C20F(B)	14	
C20F(C)	13	
C20F(R)	13	
C40F(A)	15	
C40F(B)	14.5	
C40F(C)	16	
C40F(R)	18	
CLP10	6.5	
C30F(A)LP10	13	
C30F(B)LP10	14	
C30F(C)LP10	14	
C30F(R)LP10	16	



รูปที่ 4.13 ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

#### 4.2.3.2 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการเกิดคาร์บอนชั้น

รูปที่ 4.14 แสดงความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน เมื่อตัวอย่างบ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน เมื่อคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.55 พบว่า ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก (0.55) ทั้งนี้เพราะ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อย จะมีช่องว่างของเพสต์น้อยกว่าของที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก ทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความทึบแน่นมากกว่า ส่งผลให้เกิดคาร์บอนชั้นน้อยกว่า



รูปที่ 4.14 ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่บ่มน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.55

#### 4.2.4 ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต

การศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของเถ้าลอย และผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต โดยประจุไฟฟ้า (คูลอมป์) ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต มีรายละเอียดดังนี้

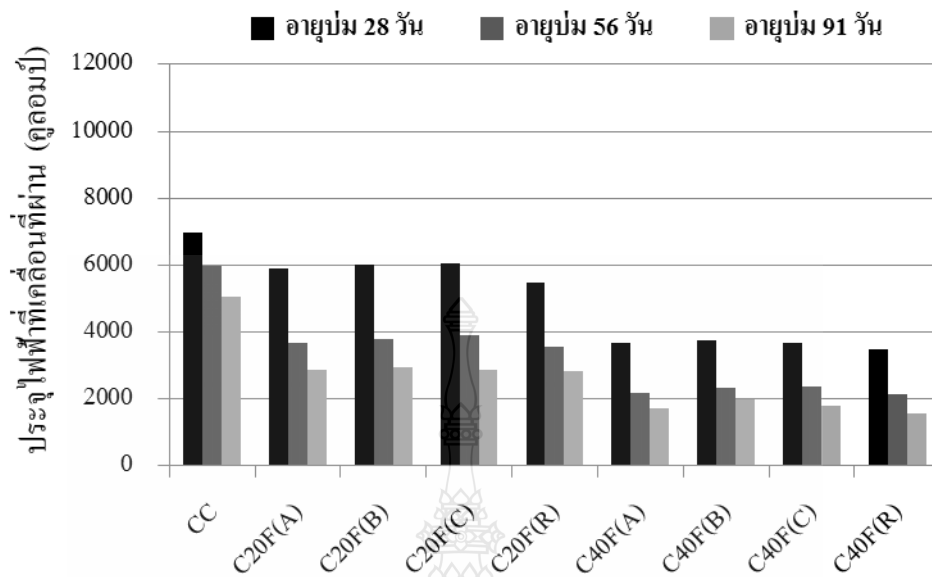
##### 4.2.4.1 ผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของเถ้าลอย ต่อความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.15 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต เมื่อตัวอย่างบ่มในน้ำ 28, 56 และ 91 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 จากการศึกษาพบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ร้อยละ 20 และ 40) และทั้งอายุในการบ่มในน้ำ 28, 56 และ 91 วัน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานและความละเอียดของเถ้าลอย จะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น ส่งผลประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านมีค่าน้อย ส่วนปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) ทั้งอายุของการบ่ม

ในน้ำ 28 56 และ 91 วัน ทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลกระทบต่อ การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต

**ตารางที่ 4.5** ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อายุบ่มน้ำ 28 56 และ 91 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

สัดส่วนผสม	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน		
	ตัวอย่างคอนกรีต (ลูกอมบ์)		
	อายุบ่ม 28 วัน	อายุบ่ม 56 วัน	อายุบ่ม 91 วัน
CC	6990	5956	5037
C20F(A)	5895	3677	2857
C20F(B)	6005	3793	2948
C20F(C)	6032	3914	2869
C20F(R)	5470	3569	2837
C40F(A)	3685	2177	1707
C40F(B)	3762	2322	1968
C40F(C)	3669	2352	1804
C40F(R)	3485	2129	1567

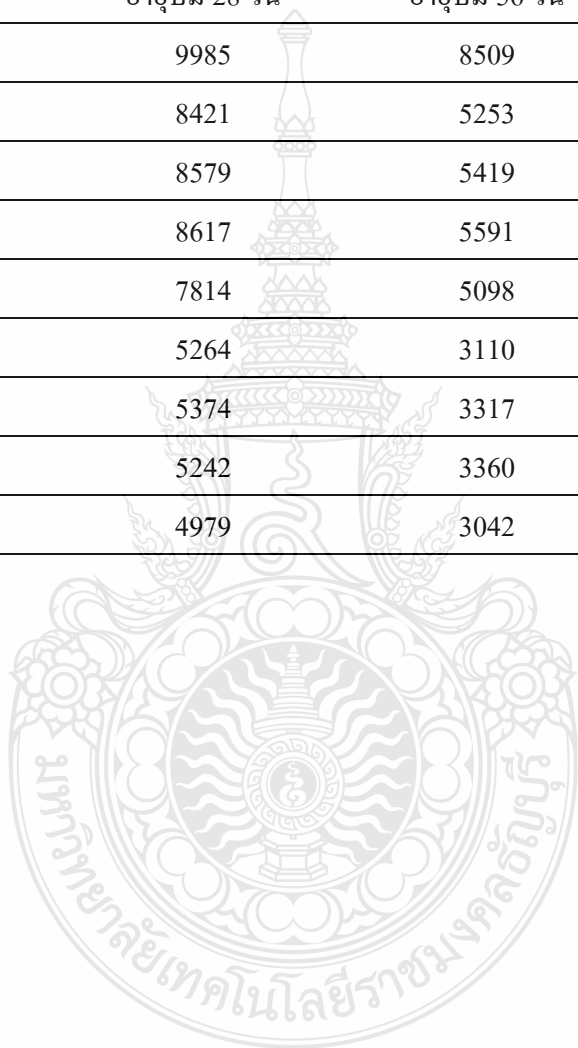


รูปที่ 4.15 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อายุบ่มน้ำ 28 56 และ 91 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40

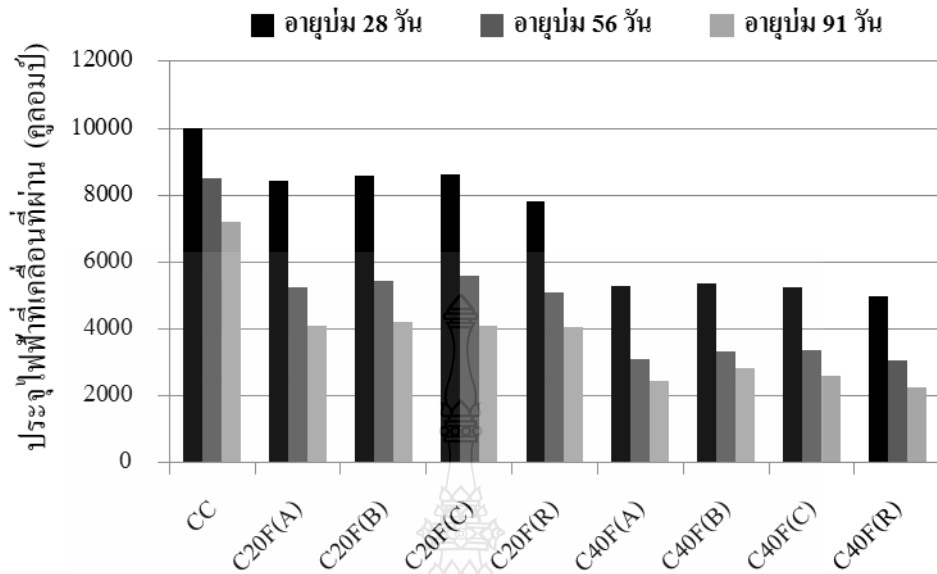
ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.16 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตเมื่อตัวอย่างบ่มในน้ำ 28 56 และ 91 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 จากการศึกษาพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านมีค่าไปในทิศทางเดียวกันกับของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.6 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อายุบ่มน้ำ 28 56 และ 91 วัน โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

สัดส่วนผสม	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่าน		
	ตัวอย่างคอนกรีต (कुलอมบ)		
	อายุบ่ม 28 วัน	อายุบ่ม 56 วัน	อายุบ่ม 91 วัน
CC	9985	8509	7196
C20F(A)	8421	5253	4081
C20F(B)	8579	5419	4212
C20F(C)	8617	5591	4098
C20F(R)	7814	5098	4053
C40F(A)	5264	3110	2439
C40F(B)	5374	3317	2811
C40F(C)	5242	3360	2577
C40F(R)	4979	3042	2239



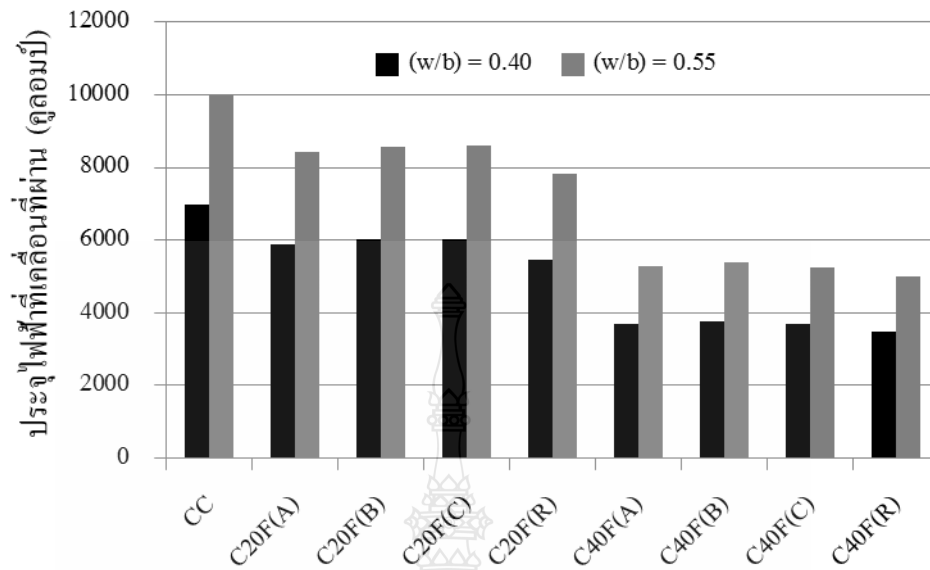




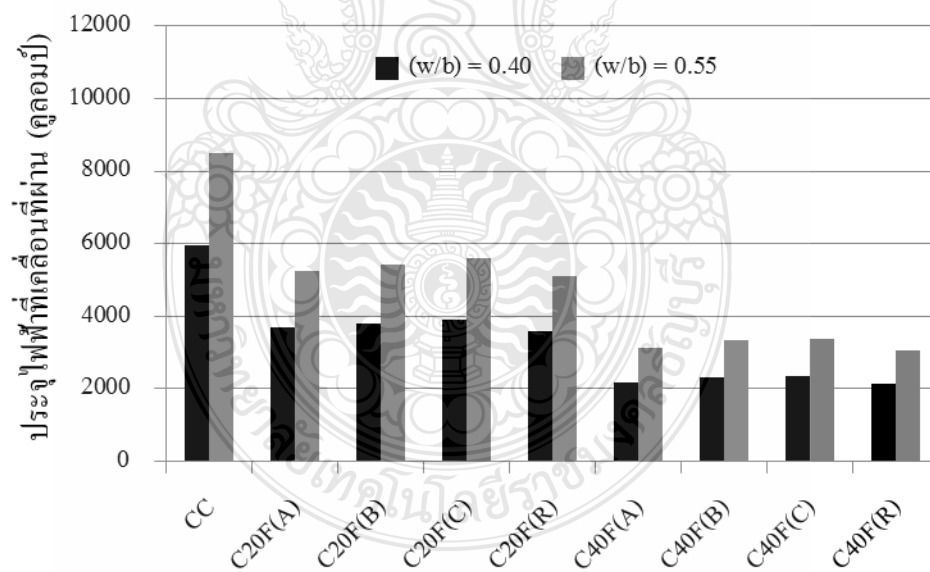
รูปที่ 4.16 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่อายุบ่มน้ำ 28 56 และ 91 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

#### 4.2.4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์

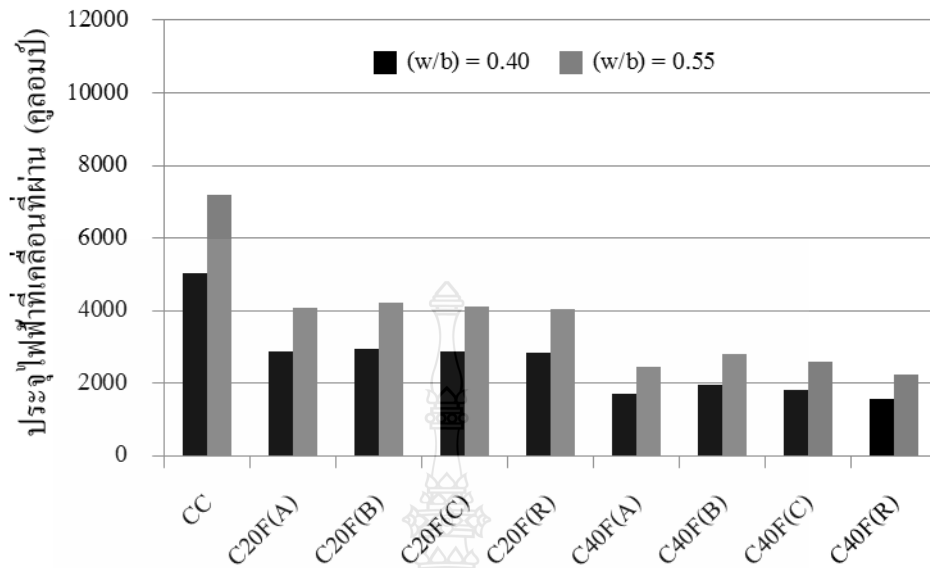
รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 โดยตัวอย่างบ่มในน้ำ 28 56 และ 91 วัน พบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีค่าน้อยกว่าของ 0.55 ทั้งนี้เพราะ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อย (0.40) จะมีช่องว่างของเพสต์น้อยกว่าของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก (0.55) ทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความแข็งแรงกว่า จึงทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านน้อยกว่า



ก) ป่มน้ำ 28 วัน



ข) ป่มน้ำ 56 วัน



ค) บ่มน้ำ 91 วัน

รูปที่ 4.17 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55

#### 4.2.5 การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

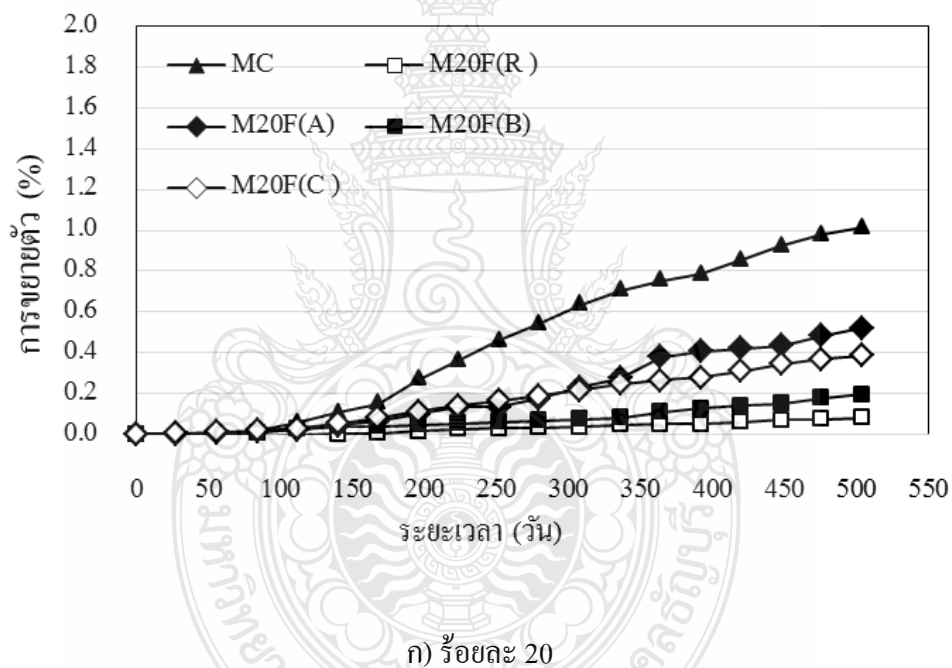
การศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของชนิดและการแทนที่ของเถ้าลอย ต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยวัดค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นให้ทำการวัดตัวอย่างทุกๆอายุ 2 เดือน มีรายละเอียดดังนี้

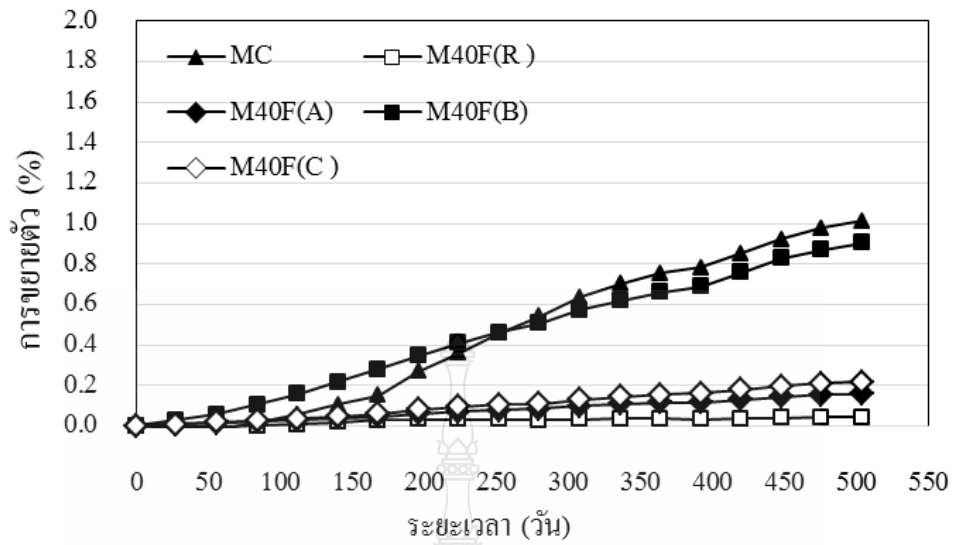
##### 4.2.5.1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ จากการศึกษาพบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  รวมทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ทำให้ลดปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C3A) ลง การเกิด Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวน้อยลง ยกเว้นการขยายตัวของมอร์ตาร์เถ้าลอย F(B) แทนที่ร้อยละ 40 มีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้า

ลอย F(B) มีปริมาณ free lime (ร้อยละ 3.93) มาก ทำให้เกิด  $\text{Ca(OH)}_2$  มาก ส่งผลให้เกิด Ettingite มาก ส่วนเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอยต่อการขยายตัว พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 นั้น การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย F(R) มีค่าน้อยสุด ตามด้วยของเถ้าลอย F(B) F(C) และ F(A) ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด (F(A) F(B) และ F(C)) มีปริมาณ CaO ที่มาก การแทนที่ในปริมาณที่น้อยจะส่งผลให้การขยายตัวเกิดมาก [24] ส่วนเมื่อแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40 นั้น ชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

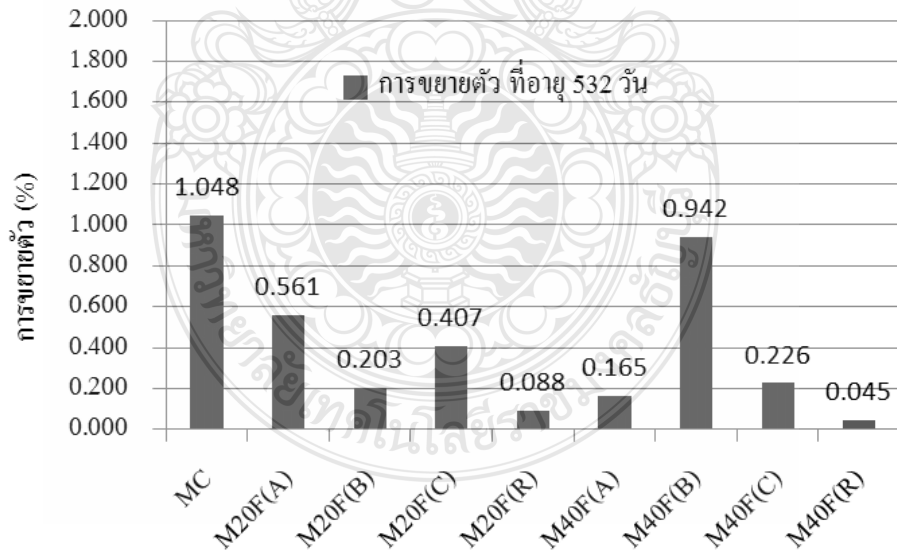
ส่วนรูปที่ 4.19 แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ที่อายุ 532 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว





ข) ร้อยละ 40

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของมอร์ต้าร์ผสม  
 etailoy F(A), F(B), F(C) และ F(R)

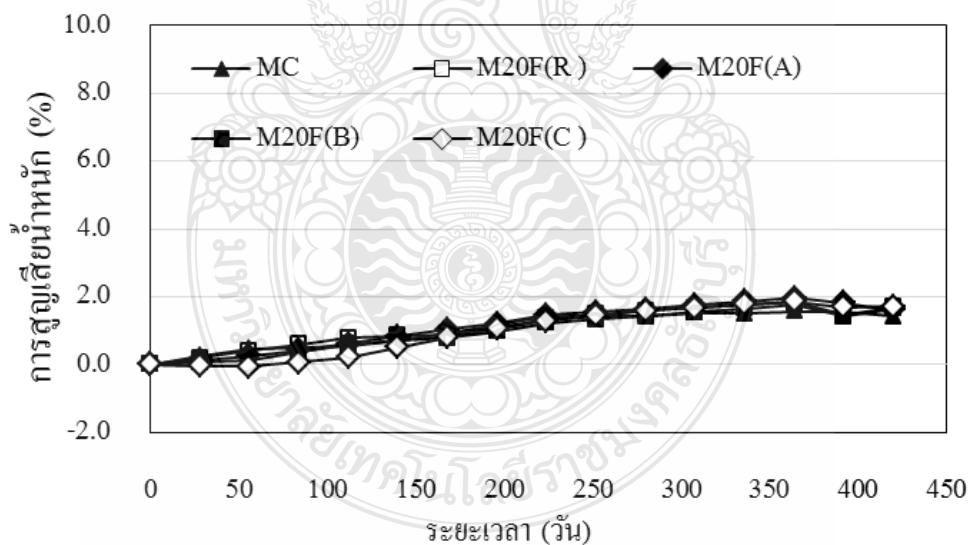


รูปที่ 4.19 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
 ประเภทที่ 1 ส่วน และมอร์ต้าร์ผสมetailoy ที่อายุ 532 วัน

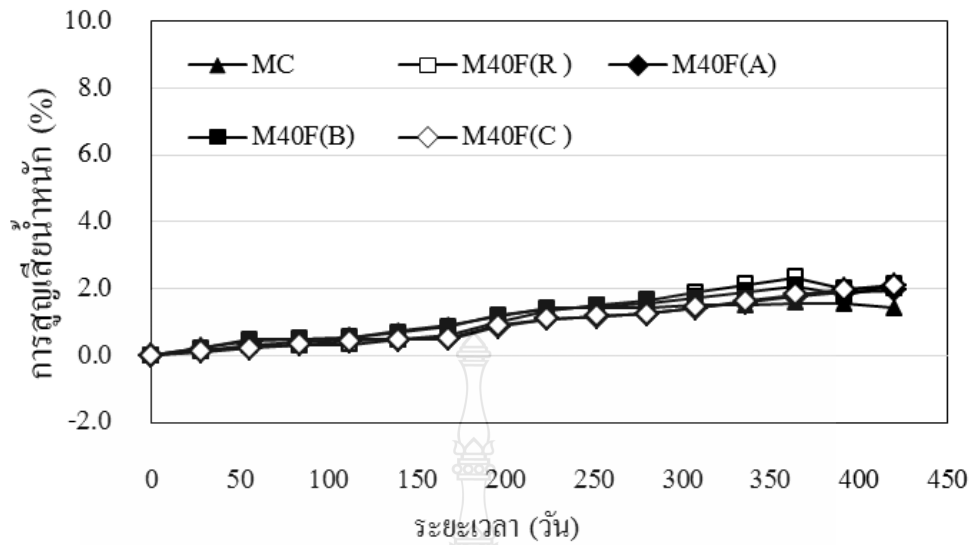
#### 4.2.5.2 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 4.20 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ตาร์ จากการศึกษพบว่า การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในมอร์ตาร์ลดลง (ลด  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้น ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [12] โดยเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 40) จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักที่มากกว่าเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 20) นอกจากนี้พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อแทนที่ในปริมาณที่เท่ากัน นั้นแสดงว่าชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลกระทบต่อการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ส่วนรูปที่ 4.21 แสดงการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ที่อายุ 532 วันซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

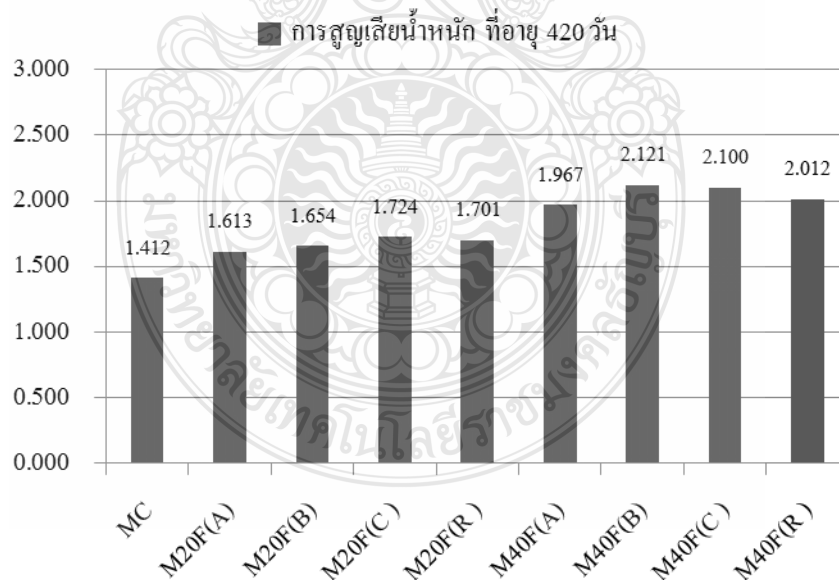


ก) ร้อยละ 20



ข) ร้อยละ 40

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตกับอายุของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย F(A), F(B), F(C) และ F(R)



รูปที่ 4.21 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ที่อายุ 420 วัน

### 4.3 เปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปเปรียบเทียบผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อคุณสมบัติด้าน การหดตัวแบบอโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนเนชั่น ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การต้านทานซัลเฟต เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่าง ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบระหว่าง การใช้เถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ต่อคุณสมบัติด้าน การหดตัวแบบอโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนเนชั่น ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และการต้านทานซัลเฟต

รายการ	การหดตัว	การหดตัว	ความสึก	ปริมาณ	การต้านทานซัลเฟต	
	แบบ	แบบ	การเกิด	ประจุไฟฟ้า	โซเดียม	แมกนีเซียม
	อโตจีนัส	แห้ง	คาร์บอนเนชั่น	ที่เคลื่อนที่ผ่าน	ซัลเฟต	ซัลเฟต
F(A)	✓	✓	X	✓	✓	X
F(B)	✓	✓	X	✓	O	X
F(C)	✓	✓	X	✓	✓	X
F(R)	✓	✓	X	✓	✓	X
F(A)LP	-	-	X	-	-	-
F(B)LP	-	-	X	-	-	-
F(C)LP	-	-	X	-	-	-
F(R)LP	-	-	X	-	-	-

ความหมายทางสัญลักษณ์

✓ หมายถึง ดีกว่า , O หมายถึง เท่าเทียบ , X หมายถึง แย่กว่า



## บทที่ 5

### สรุป

จากผลการศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความคงทนของคอนกรีตผสมผสมเถ้าลอยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การหาคัดัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยที่การหาคัดัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20

2) ความลึกการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก และการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน

3) การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ได้ดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก และการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน

4) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มี free lime สูง มีค่าการขยายตัวที่ใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5) การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก และการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าที่ใกล้เคียง

## บรรณานุกรม

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.
- [2] Taweechai Sumranwanich, Chloride Binding Capacity of Cement – Fly Ash Past and Simulation of Chloride Profile in Concrete, Ph. D. Thesis, Civil Engineering, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University, 2004.
- [3] Songpiriyakij S. and Jaturapitakkul C., A Study of Ground Mae Moh Fly Ash as a Pozzolan for Increasing Concrete Strength, *KMITT Research and Development Journal*, Vol. 18, No. 2. pp. 52-64, 1995.
- [4] นุรฉัตร ฉัตรวีระ, “คุณสมบัติด้านความต้านทานและกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 23, ฉบับที่ 2, 2543. หน้า 17.
- [5] 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.
- [6] US Bureau of Reclamation , Concrete Manual 5<sup>th</sup> Edn. , Denver , Colorado , 1975.
- [7] 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.
- [8] คณะอนุกรรมการคอนกรีตวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ , “ความคงทนของคอนกรีต” , บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2543 , หน้า 77
- [9] Parrott , L.T., A Review of Carbonation in Reinforced Concrete , Cement and Concrete Association , United Kingdom , 1987
- [10] American Concrete Institute , ACI 201.2R-92 , Guide to Durable Concrete , ACI Manual of Concrete Practice , Part , Michigan , 2000
- [11] Soloka. "Concrete in hot environments", Great Britain Alden Press, 1993
- [12] Al-Amoudi, O. S. B., Mechanisms of Sulfate Attack in Plain and Blended Cement: a Review, *Proceeding of the International Seminar*, September 1999, University of Dundee, Scotland, UK, pp. 247-260.

- [13] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา , มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง , มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 , วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ พิมพ์ครั้งที่ 1 , พ.ศ. 2538.
- [14] บุรฉัตร ฉัตรวีระ , ทวีทัศน์ คงทรัพย์ , 2545 , “ความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว” , วรสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2545.
- [15] วิวัฒน์ พัทธนานนท์ , ธนกร ทวีวุฒิ , เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย , สถาพร โภคา , 2554 , “อิทธิพลของส่วนผสม วิธีการบ่มและระยะเวลาบ่ม ต่อความถี่คาร์บอนชั้นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ” , การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16 , มหาวิทยาลัยมหิดล 18-20 พฤษภาคม 2554.
- [16] ตามยศ สมยาถักดี , ภัทวิวัฒน์ แสงเจริญ , ปิติศานต์ กร้ามาตร , สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล , 2553 “ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดสนิมของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตแบบเฉพาะที่” การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15 , 12-14 พฤษภาคม 2553
- [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] 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
- [19] นพคุณ ผลโพธิ์ , 2554 “ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ , ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [20] American Society for Testing and Materials, ASTM C 204 - 07: Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, Annual Book of ASTM Standards, 2007.
- [21] American Society for Testing and Materials, ASTM C 188 - 95: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [22] American Society for Testing and Materials, ASTM C 1202 - 12: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Annual Book of ASTM Standards, 2012.

- [23] American Society for Testing and Materials, ASTM C 1012 - 04: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, Annual Book of ASTM Standards, 2004.
- [24] Nopakun P., Pitisan K., Ittiporn S., and Somnuk T. "Expansion of Mortar with Fly Ash and Limestone Powder in Sodium Sulfate Solution," *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Annual Concrete Conference, Petchaburi, Thailand*, 20-23 September, 2010, pp. 395-405.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าการหดตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนิส



ตารางที่ 1 การหดตัว (%) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัส

สัดส่วนผสม	อายุ (วัน)										
	0	2	3	4	5	6	7	14	28	56	91
MC	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0070	0.0090	0.0120	0.0150	0.0180	0.0200
M20F(R)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0020	0.0030	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
M20F(A)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0030	0.0040	0.0070	0.0000	0.0000	0.0150
M20F(B)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0010	0.0020	0.0030	0.0050	0.0080	0.0000	0.0000
M20F(C)	0.0000	0.0010	0.0000	0.0030	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0110	0.0000	0.0000
M40F(R)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0030	0.0050	0.0070	0.0090	0.0110	0.0120
M40F(A)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0080	0.0100	0.0120	0.0130
M40F(B)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0030	0.0000	0.0000	0.0070	0.0090	0.0110	0.0130
M40F(C)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0050	0.0000	0.0000	0.0090	0.0000	0.0000
M20F(A5)	0.0000	0.0011	0.0011	0.0011	0.0020	0.0027	0.0050	0.0060	0.0088	0.0105	0.0140
M20F(B5)	0.0000	0.0004	0.0002	0.0007	0.0021	0.0032	0.0042	0.0080	0.0110	0.0130	0.0140
M20F(C5)	0.0000	0.0023	0.0039	0.0048	0.0053	0.0055	0.0060	0.0090	0.0103	0.0113	0.0125
M20F(A10)	0.0000	0.0004	0.0014	0.0020	0.0027	0.0033	0.0040	0.0064	0.0100	0.0130	0.0140
M20F(B10)	0.0000	0.0014	0.0016	0.0028	0.0028	0.0034	0.0041	0.0046	0.0090	0.0118	0.0144
M20F(C10)	0.0000	0.0004	0.0006	0.0009	0.0019	0.0022	0.0030	0.0063	0.0094	0.0130	0.0150
M40F(A5)	0.0000	0.0015	0.0007	0.0018	0.0012	0.0027	0.0047	0.0073	0.0103	0.0120	0.0140
M40F(B5)	0.0000	0.0004	0.0012	0.0013	0.0020	0.0028	0.0050	0.0060	0.0080	0.0100	0.0120
M40F(C5)	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0030	0.0040	0.0040	0.0070	0.0080	0.0110	0.0130
M40F(A10)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0020	0.0030	0.0060	0.0080	0.0090	0.0100	0.0120
M40F(B10)	0.0000	0.0012	0.0018	0.0041	0.0051	0.0048	0.0046	0.0057	0.0064	0.0078	0.0082
M40F(C10)	0.0000	-0.0002	0.0006	0.0008	0.0006	0.0021	0.0029	0.0036	0.0049	0.0065	0.0075

ภาคผนวก ข

ค่าการหดตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง





ตารางที่ 1 การหดตัว (%) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

สัดส่วนผสม	อายุที่บ่มอากาศ (วัน)						
	0	3	7	14	28	56	91
M100	0.0000	0.0190	0.0360	0.0480	0.0600	0.0620	0.0630
M20F(R )	0.0000	0.0170	0.0390	0.0510	0.0560	0.0580	0.0590
M20F(A)	0.0000	0.0160	0.0386	0.0489	0.0571	0.0571	0.0588
M20F(B)	0.0000	0.0168	0.0350	0.0410	0.0500	0.0530	0.0550
M20F(C )	0.0000	0.0168	0.0360	0.0480	0.0540	0.0580	0.0600
M40F(R )	0.0000	0.0166	0.0326	0.0423	0.0522	0.0557	0.0556
M40F(A)	0.0000	0.0184	0.0331	0.0411	0.0490	0.0515	0.0510
M40F(B)	0.0000	0.0160	0.0310	0.0370	0.0425	0.0450	0.0470
M40F(C )	0.0000	0.0159	0.0357	0.0435	0.0483	0.0509	0.0503
20F(A5)	0.0000	0.0190	0.0335	0.0465	0.0530	0.0552	0.0563
20F(B5)	0.0000	0.0200	0.0317	0.0429	0.0490	0.0520	0.0530
20F(C5 )	0.0000	0.0180	0.0388	0.0488	0.0540	0.0560	0.0570
20F(A10)	0.0000	0.0229	0.0382	0.0480	0.0530	0.0550	0.0550
20F(B10)	0.0000	0.0232	0.0360	0.0450	0.0490	0.0520	0.0520
20F(C10 )	0.0000	0.0198	0.0354	0.0484	0.0543	0.0551	0.0551
40F(A5)	0.0000	0.0180	0.0260	0.0370	0.0430	0.0460	0.0470
40F(B5)	0.0000	0.0180	0.0250	0.0330	0.0400	0.0430	0.0450
40F(C5 )	0.0000	0.0159	0.0290	0.0390	0.0440	0.0460	0.0470
40F(A10)	0.0000	0.0178	0.0260	0.0370	0.0420	0.0440	0.0450
40F(B10)	0.0000	0.0140	0.0210	0.0280	0.0370	0.0420	0.0440
40F(C10 )	0.0000	0.0150	0.0270	0.0390	0.0420	0.0450	0.0470

ภาคผนวก ก  
ค่าการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ใน  
สารละลายซัลเฟต



**ตารางที่ 1** การขยายตัว (%) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ทในการทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ตัวอย่าง มอร์ตาร์ท	อายุในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)																			
	0	28	56	84	112	140	168	196	224	252	280	308	336	364	392	420	448	476	504	532
MC	0.000	-0.009	-0.018	0.019	0.057	0.104	0.151	0.268	0.361	0.459	0.542	0.636	0.704	0.754	0.783	0.852	0.922	0.976	1.012	1.048
M20F(R)	0.000	-0.006	-0.013	-0.008	-0.003	0.001	0.006	0.016	0.025	0.028	0.032	0.036	0.048	0.049	0.051	0.061	0.071	0.074	0.081	0.088
M20F(A)	0.000	0.002	0.004	0.013	0.021	0.043	0.065	0.099	0.134	0.135	0.175	0.229	0.274	0.378	0.406	0.421	0.435	0.484	0.522	0.561
M20F(B)	0.000	-0.004	-0.009	0.008	0.025	0.028	0.031	0.038	0.044	0.049	0.055	0.058	0.066	0.069	0.069	0.077	0.086	0.094	0.098	0.103
M20F(C)	0.000	0.006	0.013	0.020	0.027	0.055	0.082	0.111	0.139	0.164	0.187	0.218	0.247	0.266	0.277	0.310	0.343	0.367	0.387	0.407
M40F(R)	0.000	-0.002	-0.004	0.002	0.008	0.019	0.030	0.031	0.033	0.034	0.029	0.033	0.035	0.036	0.034	0.036	0.038	0.043	0.044	0.045
M40F(A)	0.000	0.008	0.016	0.023	0.030	0.038	0.045	0.061	0.071	0.076	0.084	0.098	0.108	0.115	0.117	0.130	0.143	0.153	0.159	0.165
M40F(B)	0.000	0.028	0.055	0.106	0.158	0.219	0.280	0.347	0.409	0.460	0.507	0.573	0.619	0.661	0.687	0.757	0.828	0.870	0.906	0.942
M40F(C)	0.000	0.009	0.019	0.026	0.034	0.048	0.061	0.080	0.095	0.105	0.111	0.131	0.143	0.153	0.161	0.179	0.196	0.210	0.218	0.226

ตารางที่ 2 การสูญเสียน้ำหนัก (%) ของตัวอย่างมอร์ตาร์ในการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตัวอย่าง มอร์ตาร์	อายุในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)														
	0	28	56	84	112	140	168	196	224	252	280	308	336	364	392
MC	0.000	0.237	0.473	0.509	0.544	0.730	0.917	1.179	1.429	1.430	1.431	1.532	1.498	1.562	1.542
M20F(R)	0.000	0.207	0.414	0.606	0.798	0.849	0.901	1.092	1.361	1.478	1.595	1.678	1.761	1.843	1.492
M20F(A)	0.000	0.126	0.252	0.439	0.626	0.832	1.039	1.216	1.464	1.553	1.642	1.752	1.862	1.972	1.831
M20F(B)	0.000	0.064	0.128	0.366	0.604	0.695	0.785	0.977	1.237	1.339	1.441	1.550	1.660	1.769	1.431
M20F(C)	0.000	-0.026	-0.052	0.080	0.212	0.507	0.802	1.068	1.292	1.436	1.580	1.676	1.773	1.870	1.697
M40F(R)	0.000	0.149	0.298	0.311	0.325	0.480	0.636	0.999	1.348	1.506	1.665	1.891	2.117	2.343	2.008
M40F(A)	0.000	0.166	0.332	0.402	0.473	0.484	0.495	0.855	1.091	1.175	1.259	1.428	1.596	1.765	1.898
M40F(B)	0.000	0.231	0.462	0.503	0.545	0.701	0.856	1.215	1.406	1.484	1.561	1.737	1.912	2.087	1.801
M40F(C)	0.000	0.109	0.219	0.329	0.439	0.483	0.527	0.900	1.109	1.180	1.251	1.445	1.640	1.834	1.987



ภาคผนวก ง

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 12  
**ANNUAL CONCRETE  
CONFERENCE 12**

INNOVATIVE CONCRETE FOR  
CONSTRUCTION MATERIALS  
IN THE FUTURE  
นวัตกรรมคอนกรีต  
สำหรับวัสดุก่อสร้างในอนาคต

15-17 FEBRUARY 2017  
ณ โรงแรม เดอะริเจนท์ ชะอำ บีช รีสอร์ท  
อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี



จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย  
ร่วมกับ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

MAT-021	กำลังอัดและการแทรกซึมของคลอไรด์ในซีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าอี้กันหิน หลังแช่สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี	MAT-115
MAT-022	การประยุกต์ใช้อิฐมอดูตันเพื่อเป็นผนังรับน้ำหนัก	MAT-123
MAT-023	Prediction Model of the Electrical Resistivity of Concrete based on Mix Proportion.	MAT-130
MAT-024	ผลกระทบของความละเอียดของวัสดุประสานและโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัด และการเกิดความร้อนของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเก้าอี้กันหิน เป็นวัสดุประสาน	MAT-137
MAT-027	Effect of Surfactant Type Viscosity Modifying Agent with Superplasticizers on Performances of Concrete and Dewatering of Mortar Under High Pressure.	MAT-144
MAT-028	ความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกำลังต่ำ	MAT-150
MAT-030	Comparative Assessment of Thermal Properties and Thermal Cracking of Concrete Containing Fly Ash and Slag.	MAT-156
MAT-032	คอนกรีตกำลังสูงมากสำหรับงานอาคารสูงในประเทศไทย	MAT-164
MAT-033	Effect of Synthetic Lightweight Aggregate on Early Age Shrinkage of Mortar.	MAT-172
MAT-034	ผลกระทบของวิธีการผสมต่อการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว และกำลังอัดของ มอร์ตาร์ที่ใช้เก้าอี้กันเดา	MAT-179
MAT-035	ประสิทธิภาพของวัสดุเคลือบผิวในการยับยั้งคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต	MAT-186
MAT-036	การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน	MAT-192
MAT-037	ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น การต้านทานการแทรกซึม คลอไรด์ และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอย	MAT-200
MAT-038	การพัฒนากำลังของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่ใช้ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล เป็นมวลรวมละเอียด	MAT-208
MAT-039	ผลของการแทนที่มวลรวมด้วยวัสดุรีไซเคิลจากขยะผิวทางต่อกำลังอัดของซีเมนต์ มอร์ตาร์	MAT-217

ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์  
และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอย

EFFECT OF FLY ASH TYPE ON CARBONATION, CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE AND SULFATE RESISTANCE OF  
MORTAR AND CONCRETE WITH FLY ASH

บวร มณีรัตน์<sup>1</sup> (Borwon Mancerat)<sup>1</sup>  
พิติสาคดิ์ กร้ามาตร์<sup>2\*</sup> (Pitisan Krammart)<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
(ninja\_borwon@hotmail.com)

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
(pitisan.k@en.rmutt.ac.th)

บทคัดย่อ: การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยที่มีต่อเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจำนวน 3 ชนิด และอีก 1 ชนิดจากโรงไฟฟ้า BCLP ผลการศึกษาพบว่าเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ส่วนโดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก และการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดนั้น ได้ดีกว่าของ OPC ส่วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก โดยการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันนอกจากนี้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าน้อยกว่าของ OPC ส่วน ยกเว้นมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มี free lime สูง (ร้อยละ 3.93) ที่แทนที่ในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 40) มีค่าการขยายตัวที่ใกล้เคียงกับของ OPC ส่วน ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มี CaO สูง ที่แทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 20) มีแนวโน้มให้ค่าขยายตัวที่มากกว่าของเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ สุดท้ายการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่ามากกว่าของ OPC ส่วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก โดยการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

**ABSTRACT:** This study aims to study the effect of fly ash type on carbonation of concrete, chloride penetration resistance of concrete and sulfate resistance of mortar. In this study used four types of fly ash, three types from Mae Moh power plant and one type from BCLP power plant. The results indicated that the carbonation of concrete with four fly ashes was greater than that of OPC concrete, especially when replaced in large quantities. The carbonation of concrete of each fly ash was no different. In addition, the chloride penetration resistance of concrete with four fly ashes was better than of OPC concrete, especially when they were replaced in large quantities. The chloride penetration resistance of concrete of each fly ash was no different. Moreover, the expansion in sodium sulfate solution of mortar with four fly ashes was less than that of the OPC mortar, except mortar with fly ash having high free lime content (3.93 %) to replace in large amount (40%) had the expansion close to that of OPC mortar. Besides, the mortar with high CaO fly ash had tend more than the expansion of mortar with low CaO fly ash when replaced in small amounts (20%). Finally, the weight loss of mortar with four fly ashes was greater than that of OPC mortar, especially when replaced in large quantities. The weight loss of mortar of each fly ash was no different.

**KEYWORDS:** Fly ash, Carbonation, Chloride penetration resistance, Sulfate resistance



### 1. บทนำ

หลักการออกแบบโครงสร้างที่ดี คือการออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้โดยปกติอายุการใช้งานที่ต้องการของโครงสร้างแต่ละชนิดไม่เท่ากันโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้าง เช่น ขนาด สถานที่ที่โครงสร้างนั้นอยู่ และราคาของโครงสร้างนั้นๆ เป็นต้น โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบโดยใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ( $f_c'$ ) และค่าการยุบตัวของคอนกรีต (slump) แต่ถ้านำคอนกรีตไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันอายุของโครงสร้างจะไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง คอนกรีตจะมีคุณสมบัติทางกลโดยเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงดัดลงไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อมทั้งทางกายภาพและทางเคมี เช่น การเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากคาร์บอนชั่น การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต และการเสื่อมสภาพจากคลอไรด์ เป็นต้น

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาเถ้าลอยจากถ่านหิน (Fly ash) ซึ่งเป็นสารพิษโซลันมาใช้ในงานคอนกรีตซึ่งเป็นผลผลิตที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนการนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีต ทำให้ความสามารถในการเทของคอนกรีตดีขึ้นทำให้ลดอุณหภูมิของคอนกรีต ลดความสามารถในการซึมผ่าน อัตราการแพร่กระจายของความชื้นและสารละลายเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตยากขึ้น ลดการกัดกร่อนของซัลเฟต เพิ่มความหนาแน่นและกำลังประลัยในระยะยาว [1, 2, 3 และ 4] อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ (by product) ที่นำมาใช้จะมีสมบัติไม่ว่าทางกายภาพหรือทางเคมีที่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าการนำเถ้าลอยมาใช้งาน โดยเป็นส่วนผสมในคอนกรีตนั้น ย่อมส่งผลให้สมบัติของคอนกรีตที่แตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามจะเห็นว่ายังขาดงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบของชนิดเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้านี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอย ได้แก่ การเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีต การต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ เมื่อใช้เถ้าลอยต่างชนิดกันเป็นส่วนผสม เพื่อนำผลการศึกษาไปพัฒนาเทคโนโลยีด้านวัสดุคอนกรีตต่อไป

### 2. ระเบียบวิธีการศึกษา

#### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15[5] เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางจำนวน 3 ชนิด (F(A) , F(B) และ F(C)) และเถ้าลอยจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า BLCPC จังหวัดระยอง จำนวน 1 ชนิด (F(R)) สำหรับมวลรวมใช้หิน และทรายแม่น้ำ ส่วนน้ำใช้น้ำประปา

#### 2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับในการศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อการเกิดคาร์บอนชั่น การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และการต้านทานซัลเฟต ของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอยในครั้งนี้ประกอบด้วย 1) สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ความถ่วงจำเพาะ ภาพถ่ายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ 2) การเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีต 3) การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และ 4) การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 2.2.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย 4 ชนิด โดยองค์ประกอบทางเคมี ใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ความละเอียดโดยวิธีเบลนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204[6] และความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน

ASTM C 188(7) ส่วนภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคใช้วิธี scanning electronic microscope (SEM)

2.2.2 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาการเกิดคาร์บอนชั้นในครั้งนี้ ได้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มม. โดยหลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างคอนกรีตบ่มในน้ำ 7 วัน เมื่อครบอายุการบ่มแล้วนำตัวอย่างเข้าอบในตู้คาร์บอนชั้น ที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 40,000 ppm อุณหภูมิ 40 °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ถึง 55 โดยระยะเวลาในการเผชิญของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน เมื่ออายุครบกำหนดนำตัวอย่างไปกดให้แตกออกเป็น 2 ซีก แล้วฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลิน (Phenolphthalein) ที่ก้อนตัวอย่างถ้าปรากฏเป็นสีม่วงแสดงว่าไม่เกิดคาร์บอนชั้น ส่วนที่ไม่ปรากฏสีแสดงว่าเกิดคาร์บอนชั้น ทำการวัดความลึกทั้ง 4 ด้าน เพื่อหาค่าเฉลี่ยการเกิดคาร์บอนชั้น

2.2.3 การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 50 มม. ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 [8] โดยหลังจากถอดแบบตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างคอนกรีตบ่มในน้ำ 28, 56 และ 91 วัน เมื่อครบอายุของการบ่ม ทำการทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต ในรูปของปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (coulomb) โดย ASTM C 1202 ได้กำหนดระดับการซึมผ่านของคลอไรด์จากผลการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่พิจารณาจากผลประจุไฟฟ้าการเคลื่อนผ่าน (ASTM C 1202)

จำนวนประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์)	ระดับการซึมผ่าน
มากกว่า 4,000	สูง
2,000 ถึง 4,000	ปานกลาง
1,000 ถึง 2,000	ต่ำ
100 ถึง 1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่มีผล

2.2.4 การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

ในการศึกษาการต้านทานซัลเฟตในครั้งนี้ ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยการประเมินใช้วิธีการขยายตัวของตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ก) การขยายตัว

ในการทดสอบขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1012 [9] โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มม. หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำปูนขาวอมตัวเป็นเวลา 28 วันเมื่อครบกำหนดแล้ว จากนั้นวัดความยาวเริ่มแรกด้วยเครื่องวัดความยาว แล้วนำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร ซึ่งมีปริมาณ SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> เท่ากับ 33,800 ppm) โดยวัดการขยายตัวของตัวอย่างที่อายุ 2 4 8 และ 13 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ข) การสูญเสียน้ำหนัก

โดยการใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม. ในการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตหลังจากถอดแบบตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำปูนขาวอมตัวเป็นเวลา 28 วัน เมื่ออายุครบทำการวัดน้ำหนักเริ่มแรกของตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีปริมาณ SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> เท่ากับ 33,800 ppm (โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร) แล้ววัดค่าการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างที่อายุ 2 4 8 และ 13 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

2.3 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้จะใช้วัสดุประสานคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยจำนวน 4 ชนิด เพื่อใช้ในการศึกษาการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนของมอร์ตาร์ และตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานซัลเฟต ใช้อัตราส่วนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)

สัดส่วน	ปูนซีเมนต์		ทราย	น้ำ
	ประเภทที่ 1	แม่เมาะ BLCP		
M100	1.00	-	2.75	0.55
M20F(A)	0.80	0.20	2.75	0.55
M40F(A)	0.60	0.40	2.75	0.55
M20F(B)	0.80	0.20	2.75	0.55
M40F(B)	0.60	0.40	2.75	0.55
M20F(C)	0.80	0.20	2.75	0.55
M40F(C)	0.60	0.40	2.75	0.55
M20F(R)	0.80	-	2.75	0.55
M40F(R)	0.60	-	2.75	0.55

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของคอนกรีต (1 ลูกบาศก์เมตร) ที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้นและการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ใช้อัตราส่วนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

สัดส่วน	ปูนซีเมนต์		ทราย	หิน	น้ำ
	ประเภทที่ 1	แม่เมาะ BLCP			
C100	393	-	727	1047	196
C20F(A)	314	79	727	1047	196
C40F(A)	236	157	727	1047	196
C20F(B)	314	79	727	1047	196
C40F(B)	236	157	727	1047	196
C20F(C)	314	79	727	1047	196
C40F(C)	236	157	727	1047	196
C20F(R)	314	-	727	1047	196
C40F(R)	236	-	727	1047	196

หมายเหตุ หมายถึง มอร์ตาร์ หมายถึง คอนกรีต F(A) F(B) F(C) และ F(R) หมายถึง เถ้าลอยแม่เมาะชนิดที่ 1 2 และ 3 และเถ้าลอย BLCP ตามลำดับ, M100 หมายถึง ตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน, M40F(B) หมายถึง ตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย F(B) ร้อยละ 40 และ C20F(R) หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย F(R) ร้อยละ 20 เป็นต้น

3.ผลการทดสอบและวิเคราะห์

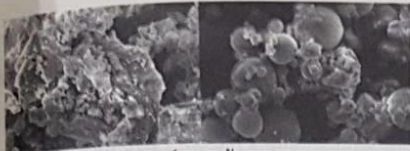
3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ที่ใช้ในการศึกษา ได้ผล

การศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลนและความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค โดยวิธี SEM ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างลักษณะของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าลอย F(A) ซึ่งเป็นเถ้าลอยแม่เมาะ กล่าวคือลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเม็ดกลมผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายขนาดปะปนอยู่ ในขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและค่อนข้างเรียบแต่มีอนุภาคหลายขนาดปะปนอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน ส่วนอนุภาคของเถ้าลอย F(R) ซึ่งเป็นเถ้าลอย BLCP มีลักษณะมีลักษณะเหลี่ยมขรุขระ คล้ายๆกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือลักษณะเป็นเหลี่ยมผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบมีอนุภาคหลายขนาดปะปนอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้

รายการ	ปูนซีเมนต์		เถ้าลอย			
	ประเภทที่ 1	F(A)	F(B)	F(C)	F(R)	
SiO <sub>2</sub> , %	18.93	35.71	26.61	25.22	61.40	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	5.51	20.44	13.6	13.88	20.20	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	3.31	15.54	18.34	17.39	5.58	
CaO, %	65.53	16.52	24.97	26.25	1.73	
MgO, %	1.24	2	2.33	2.38	0.96	
Na <sub>2</sub> O, %	0.15	1.15	1.75	1.4	0.13	
K <sub>2</sub> O, %	0.31	2.41	1.77	1.92	1.38	
SO <sub>3</sub> , %	2.88	4.26	8.53	9.44	0.58	
LOI, %	-	0.49	0.53	0.56	5.88	
Free Lime, %	-	1.71	3.93	3.06	0.03	
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.21	2.57	2.57	1.17	
ความละเอียดโดยวิธีเบลน, ซม. <sup>2</sup> /ก.	3100	2867	2820	2722	1703	



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ข) เถ้าลอย F(A) ประเภทที่ 1

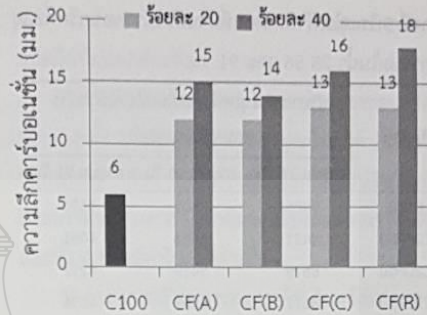


ค) เถ้าลอย F(R)

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยาย 3,500 เท่าของอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

3.2 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

ภาพที่ 2 แสดงความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต โดยตัวอย่างบ่มในน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน จากการศึกษาพบว่า ความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ร้อยละ 20 และ 40) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) จึงเป็นการเร่งการเกิดคาร์บอนเนชั่นโดยที่ความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งที่แทนที่ร้อยละ 20 และ 40) ทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีแนวโน้มมากกว่าร้อยละ 20 ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากกว่าสามารถลดปริมาณ  $Ca(OH)_2$  ได้มากกว่า ส่งผลให้การเกิดคาร์บอนเนชั่นที่มากกว่า



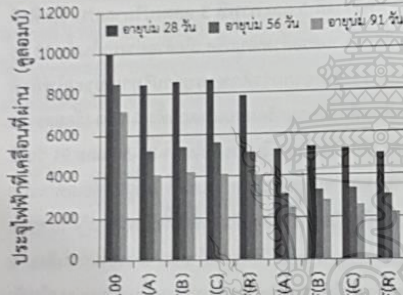
ภาพที่ 2 ความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต เมื่อบ่มในน้ำ 7 วัน แล้วสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน

3.3 การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ตารางที่ 5 และภาพที่ 3 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต เมื่อตัวอย่างบ่มในน้ำ 28 56 และ 91 วัน จากการศึกษาพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ร้อยละ 20 และ 40) และทั้งอายุในการบ่มในน้ำ 28 56 และ 91 วัน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานและความละเอียดของเถ้าลอย จะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น ส่งผลประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านมีค่าน้อย ส่วนปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตผสมเถ้าลอยแต่ละชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) ทั้งอายุของการบ่มในน้ำ 28 56 และ 91 วัน ทั้ง 4 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน นั่นแสดงว่าชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลกระทบต่อต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต

ตารางที่ 5 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่อายุของการบ่มในน้ำ 28 56 และ 91 วัน

สัดส่วน	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต (คูลอมบ์)		
	อายุบ่ม 28 วัน	อายุบ่ม 56 วัน	อายุบ่ม 91 วัน
C100	9985	8509	7196
C20F(A)	8421	5253	4081
C20F(B)	8579	5419	4212
C20F(C)	8617	5591	4098
C20F(R)	7814	5098	4053
C40F(A)	5264	3110	2439
C40F(B)	5374	3317	2811
C40F(C)	5242	3360	2577
C40F(R)	4979	3042	2239



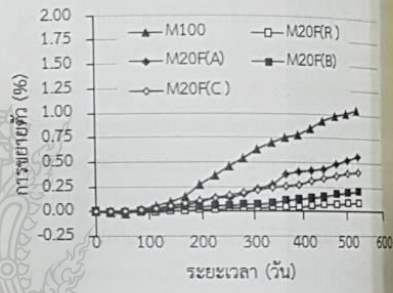
ภาพที่ 3 ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่อายุการบ่มในน้ำ 28 56 และ 91 วัน

3.4 การคายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟต

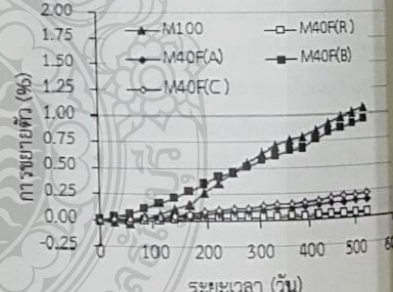
3.4.1 การคายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟต

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการคายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ จากการศึกษาพบว่า การคายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดปริมาณ  $Ca(OH)_2$  รวมทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ทำให้ลดปริมาณไตร

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $C_3A$ ) ลง การเกิด Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวน้อยลง ยกเว้นการขยายตัวของมอร์ตาร์เถ้าลอย F(B) แทนที่ร้อยละ 40 มีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอย F(B) มีปริมาณ free lime (ร้อยละ 3.93) มากทำให้เกิด  $Ca(OH)_2$  มาก ส่งผลให้เกิด Ettringite มาก ส่วนผลพิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดของเถ้าลอยต่อการขยายตัวพบว่า เมื่อแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 นั้น การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย F(R) มีค่าน้อยสุดตามด้วยของเถ้าลอย F(B) F(C) และ F(A) ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยแม่เมาะทั้ง 3 ชนิด (F(A) F(B) และ F(C)) มีปริมาณ  $CaO$  ที่มากกว่าแทนที่ในปริมาณที่น้อยจะส่งผลให้การขยายตัวเกิดมาก [10]



ก) เถ้าลอยร้อยละ 20



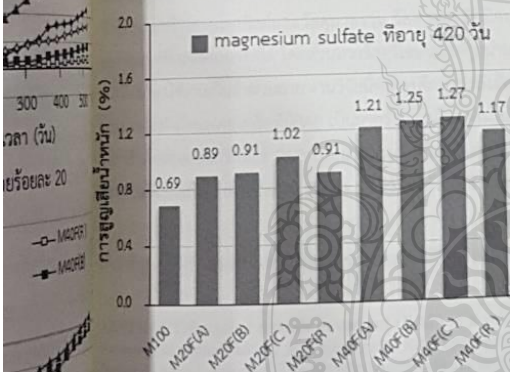
ข) เถ้าลอยร้อยละ 40

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการคายตัวกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายไฮเดียมซัลเฟต

3.4. การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียม

ซัลเฟต

ภาพที่ 5 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 420 วัน ของตัวอย่างมอร์ตาร์จากการศึกษาพบว่า การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในมอร์ตาร์ลดลง (ลด  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้น ทำให้แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [11] โดยเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 40) จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักที่มากกว่าเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 20) นอกจากนี้พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อแทนที่ในปริมาณที่เท่ากัน นั่นแสดงว่าชนิดของเถ้าลอยไม่มีผลกระทบต่อ การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ภาพที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 420 วัน

4. สรุป

จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้  
 1) ความถี่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก

และการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน

2) การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดได้ดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก และการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน

3) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มี free lime สูง (ร้อยละ 3.93) ที่แทนที่ในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 40) มีค่าการขยายตัวที่ใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มี CaO สูง ที่แทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 20) มีแนวโน้มให้ค่าขยายตัวที่มากกว่าของเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ

4) การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก และการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าที่ใกล้เคียง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.  
 [2] Tawechai Sumranwanich, 2004. Chloride Binding Capacity of Cement - Fly Ash Past and Simulation of Chloride Profile in Concrete, Ph. D. Thesis, Civil Engineering, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University.

- [3] Songpiriyakij S. and Jaturapitakkul C., 1995. A Study of Ground Mae Moh Fly Ash as a Pozzolan for Increasing Concrete Strength, *KMITT Research and Development Journal*, Vol. 18, No. 2. pp. 52-64.
- [4] บุรฉัตร ฉัตรวิริยะ, 2543. "คุณสมบัติด้านความต้านทานและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ," *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 23, ฉบับที่ 2, หน้า 17.
- [5] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2521: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 2, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร, พ.ศ. 2521.
- [6] American Society for Testing and Materials, ASTM C 204 - 07: Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, *Annual Book of ASTM Standards*, 2007.
- [7] American Society for Testing and Materials, ASTM C 188 - 95: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, *Annual Book of ASTM Standards*, 1995.
- [8] American Society for Testing and Materials, ASTM C 1202 - 12: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, *Annual Book of ASTM Standards*, 2012.
- [10] American Society for Testing and Materials, ASTM C 1012 - 04: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, *Annual Book of ASTM Standards*, 2004.
- [10] Nopakun P., Pitisan K., Ittiporn S., and Somnuk T., 2010. "Expansion of Mortar with Fly Ash and Limestone Powder in Sodium Sulfate Solution," *Proceedings of the 4th Annual Concrete Conference, Petchaburi, Thailand*, 20-23 September, pp. 395-405.
- [11] Al-Amoudi, O. S. B., 1995. Mechanisms of Sulfate Attack in Plain and Blended Cement a Review, *Proceeding of the International Seminar*, September, University of Dundee, Scotland, UK, pp. 247-260.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายบวร มณีรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	30 มิถุนายน 2503
ที่อยู่	77 หมู่ 5 ต. หนองอ้อ อ. บ้านโป่ง จ. ราชบุรี 70110
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี สาขา คุรุศาสตร์อุตสาหกรรม (วิศวกรรมโยธา) วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา
ประสบการณ์ทำงาน	วิศวกรโยธา 3 - 6 เทศบาลเมือง ตั้งแต่ พ.ศ.2529 - 2543 หัวหน้ากองช่างเทศบาลตำบล ตั้งแต่ พ.ศ.2543 - 2548 ผู้อำนวยการกองช่าง เทศบาลเมืองกระบี่ อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี ตั้งแต่ พ.ศ.2553 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	0871791811
Email	ninja_borwon@hotmail.com

