

ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีต

ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

EFFECT OF LIMESTONE POWDER ON PROPERTIES OF CONCRETE
WITH FLY ASH AND LIMESTONE POWDER



สุรสิทธิ์ เพาะบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีต

ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

สุรสิทธิ์ เพาะบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

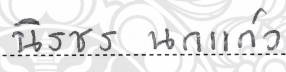
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตผสม
เถ้าลอยและผงหินปูน
Effect of Limestone Powder on Properties of Concrete with
Fly Ash and Limestone Powder

ชื่อ - นามสกุล นายสุรสิทธิ์ เพาะบุญ
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

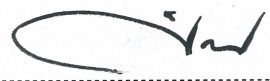

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว, วศ.ม.)


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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน
ชื่อ-นามสกุล	นายสุรสิทธิ์ เพาะบุญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ามาตร, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

ในวัสดุคอนกรีตนั้นการพัฒนาการใช้วัสดุร่วมสองชนิดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะต้องอยู่บนหลักของการพิจารณาค่าคุณภาพและหน้าที่ของแต่ละวัสดุ กรณีเถ้าลอยมีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีในช่วงหลังแต่ไม่ดีในช่วงต้น ส่วนผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยสามารถช่วยเติมช่องว่างได้ดีทำให้กำลังรับแรงในตอนต้นสามารถพัฒนาได้ดียิ่งขึ้น โดยกลไกของการเติมแทรกของผงหินปูนจึงอยู่ที่ขนาดของอนุภาคเป็นสำคัญ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยทำการศึกษาผงหินปูนที่มีความละเอียด 2 8 และ 15 ไมโครเมตร แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 และ 20 ร่วมกับเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 30 25 20 และ 10 โดยน้ำหนัก

ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดประลัยที่อายุช่วงต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่คอนกรีตผสมผงหินปูนและเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดประลัยที่ระยะยาวมีแนวโน้มสูงกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังอัดประลัย นอกจากนี้พบว่า ความต้านทานแทรกซึมของคลอไรด์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนดีกว่าค่อนข้างชัดเจนเมื่อเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สุดท้ายพบว่า ความละเอียดของผงหินปูนมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติของคอนกรีต โดยผงหินปูนที่มีความละเอียดสูงกว่ามีผลทำให้สมบัติของคอนกรีตที่ดีกว่าของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดต่ำกว่า

คำสำคัญ : สมบัติคอนกรีต เถ้าลอย ผงหินปูน ความละเอียด

Thesis Title	Effect of Limestone Powder on Properties of Concrete with Fly Ash and Limestone Powder
Name-Surname	Mr. Surasit Pohboon
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Academic Year	2019

ABSTRACT

In concrete material, using two materials with Portland cement relies on the potential and function of each material. In case of fly ash (FA), the potential for pozzolan reaction was good in the later stage but not good in the beginning. Limestone powder (LP), which is an inert material, can help fill the gaps well, so the initial strength can be improved. The mechanism of filling LP depends essentially on particle size.

This research aimed to study the effect of the fineness of LP on the properties of concrete mixed with FA and LP. LP with fineness of 2, 8, and 15 micrometers was replaced in ordinary Portland cement (OPC) of 0%, 5%, 10%, and 20% by weight mixed with the FA replacement ratios of 30%, 25%, 20%, and 10%.

Results showed that the early compressive strengths concrete mixed with LP had higher tendency than those of OPC concrete. In addition, long-term compressive strength of the concrete mixed with FA and LP was also higher than that of the OPC concrete. Further splitting tensile strength and the modulus of elasticity of concrete mixed with FA and concrete mixed FA-LP had a similar tendency to their compressive strength. Likewise, the chloride penetration resistance of concrete mixed with FA and LP was better; quite clear when compared to OPC concrete. The expansion in sodium sulfate solution of mortar mixed with FA and the LP-FA mortar was less, while the expansion in sodium sulfate solution of mortar with LP was not different when compared with those of OPC mortar. In summary, the fineness of LP directly affected the concrete properties. The finer LP is, the better concrete properties are.

Keywords: concrete properties, fly ash, limestone powder, fineness

กิตติกรรมประกาศ

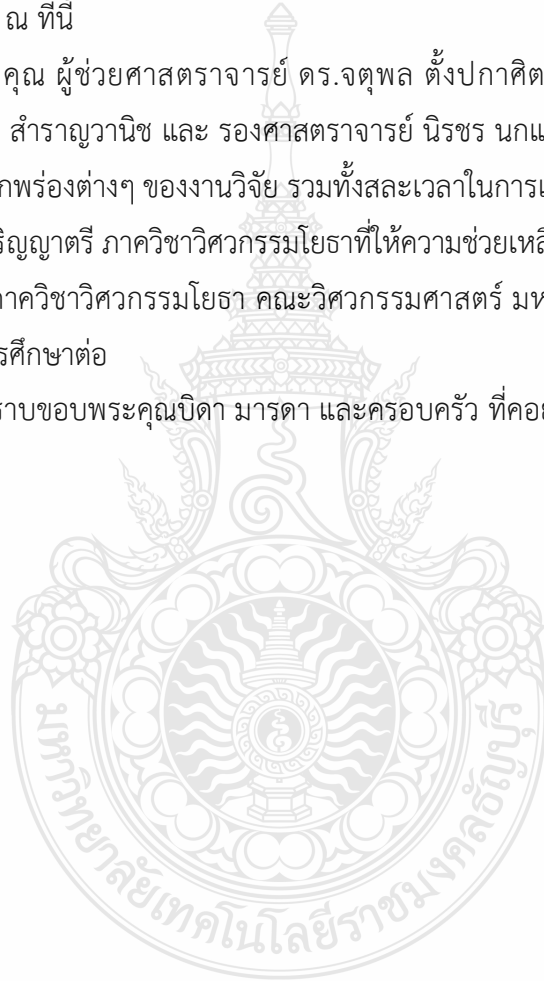
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช และ รองศาสตราจารย์ นิรชร นกแก้ว กรรมการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย รวมทั้งสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบคุณน้องระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยส่งเสริมและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สุรสิทธิ์ เพาะบุญ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	15
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	44
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	44
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	46
3.3 สัดส่วนของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	54
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	60
4.1 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของวัสดุประสาน.....	60
4.2 สมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน.....	64
4.3 สมบัติความคงทนของคอนกรีต.....	87
บทที่ 5 สรุป.....	102
บรรณานุกรม.....	104

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	107
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบ.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	130



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ.....	20
ตารางที่ 2.2	ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์.....	21
ตารางที่ 2.3	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	27
ตารางที่ 2.4	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545.....	28
ตารางที่ 2.5	องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ.....	28
ตารางที่ 2.6	ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้.....	33
ตารางที่ 2.7	ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของ ประจุ ASTM C 1202.....	37
ตารางที่ 2.8	สถานะของซัลเฟต.....	38
ตารางที่ 2.9	ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสถานะแวดล้อมซัลเฟต.....	40
ตารางที่ 3.1	สัดส่วนผสมของวัสดุประสานโดยน้ำหนัก ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณน้ำที่ เหมาะสม และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์.....	55
ตารางที่ 3.2	สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก ที่ใช้ในการศึกษาทดสอบการหดตัว แบบอโตจีเนียสและการหดตัวแบบแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.55.....	56
ตารางที่ 3.3	สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก ที่ใช้ในการศึกษาทดสอบการ ขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานเท่ากับ 0.55.....	57
ตารางที่ 3.4	สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาค่าการยุบตัว การสูญเสียค่า การยุบตัว กำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของตัวอย่างคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55	58
ตารางที่ 3.5	สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึม คลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55	59
ตารางที่ 4.1	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน.....	61
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบเคมีของวัสดุประสานที่ใช้.....	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 4.3	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์และเวลาก่อตัวของเพสต์ที่ศึกษา.....	66
ตารางที่ 4.4	ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่ใช้ในการศึกษา.....	71
ตารางที่ 4.5	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 91 วัน.....	78
ตารางที่ 4.6	กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 91 วัน.....	83
ตารางผนวกที่ ข1	การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต.....	118
ตารางผนวกที่ ข2	กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต.....	119
ตารางผนวกที่ ข3	กำลังดึงแบบผ่าซีกเฉลี่ยของคอนกรีต.....	120
ตารางผนวกที่ ข4	โมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน.....	121
ตารางผนวกที่ ข5	การหดตัวแบบออโตจีนิสเฉลี่ยของมอร์ตาร์.....	122
ตารางผนวกที่ ข6	การหดตัวแบบแห้งเฉลี่ยของมอร์ตาร์.....	126



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลาน.....	26
รูปที่ 2.2 การสูญเสียความชื้นผ่านทางโพลกคาพิวลารีและเจล.....	32
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	45
รูปที่ 3.2 ผงหินปูนความละเอียด 2 8 และ 15 ไมโครเมตร.....	45
รูปที่ 3.3 แก้วลอยจากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ.....	45
รูปที่ 3.4 ทราฮายาบ.....	46
รูปที่ 3.5 หินย่อย เบอร์ 3/4” และ 3/8”.....	46
รูปที่ 3.6 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอริเยร์ (Le Chatelier Flask).....	47
รูปที่ 3.7 เครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน (Air Permeability Apparatus).....	47
รูปที่ 3.8 เครื่องมือไวแคท (Vicat Apparatus).....	48
รูปที่ 3.9 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต.....	48
รูปที่ 3.10 การติดตั้งเครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39.....	49
รูปที่ 3.11 การติดตั้งเครื่องทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496.....	49
รูปที่ 3.12 การติดตั้งเครื่องทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 469.....	50
รูปที่ 3.13 แบบหล่อสำหรับตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ ขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร ³	51
รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความยาว (Length comparator) สำหรับวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป.....	51
รูปที่ 3.15 ชิ้นตัวอย่างขนาด 2.5×2.5×28.5 ซม.....	53
รูปที่ 3.16 การวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยเครื่องวัดความยาว.....	53
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอย และผงหินปูน.....	61
รูปที่ 4.2 ขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก้วลอยและผงหินปูน.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.3	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมผงหินปูน.....	67
รูปที่ 4.4	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอย และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน.....	67
รูปที่ 4.5	ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมผงหินปูน.....	69
รูปที่ 4.6	ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอย และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน.....	69
รูปที่ 4.7	ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55.....	72
รูปที่ 4.8	ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55.....	72
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน.....	75
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน.....	76
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	80
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	82
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงแบบผ่าซีกกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงแบบผ่าซีกกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	85
รูปที่ 4.15	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุการบ่มน้ำที่ 28 วันของตัวอย่างคอนกรีต.....	86
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	88
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอย และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	90
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	92
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอย และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55.....	94
รูปที่ 4.20	ประจูสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่าง (คูลอมป์) ของคอนกรีต.....	96
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ 2 วัสดุประสาน.....	98
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ 3 วัสดุประสาน.....	99

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ เพื่อเปรียบเทียบผลของความละเอียดของผงหินปูน.....	100
รูปที่ 4.24 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 336 วัน ของมอร์ตาร์.....	101



บทที่ 1

บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนทำให้มีเถ้าเหลือทิ้ง (By product) ทั้งชนิดเถ้าลอย (Fly Ash) และเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) เกิดขึ้นในปริมาณสูงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเถ้าลอยมีประมาณปีละ 3 ล้านตัน [1] ทางเลือกที่สำคัญทางหนึ่งของการกำจัดเถ้าดังกล่าวซึ่งหากปล่อยทิ้งไว้จะมีส่วนในการสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือ การนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตและวัสดุซีเมนต์ในหลากหลายประเภท โดยจากงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศซึ่งได้ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 20 ปี ระบุตรงกันของข้อสรุปในเชิงบวกของเถ้าลอยไว้คือ การใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในซีเมนต์เพสต์ลดลงและยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เถ้าลอยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตได้ดีขึ้น [2] แต่อย่างไรก็ตามข้อด้อยประการหนึ่งของเถ้าลอยที่มีต่อคอนกรีตคือ อัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช้าในช่วงต้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นและทำให้อัตราการพัฒนากำลังรับแรงลดลงตามไปด้วย ดังนั้นในงานคอนกรีตที่ต้องการการพัฒนากำลังในช่วงต้นที่สูงหรือคอนกรีตกำลังสูงจึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นส่วนประกอบ ทางแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรมีการเพิ่มศักยภาพในช่วงต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยอาศัยหลักการทางเลือกสองประการได้แก่ ประการแรกคือ ใช้เถ้าลอยร่วมกับวัสดุที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานระดับสูง อาทิ เช่น การใช้เถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟูม แต่เนื่องจากข้อด้อยในเรื่องของราคาที่สูงจึงยังไม่เป็นนิยมใช้กับงานคอนกรีตปกติในประเทศไทย ประการที่สอง คือการคิดสรรวัสดุทางเลือกใหม่ที่ผลิตได้ในประเทศและมีความสามารถในการเติมแทรก (Filler) เข้าไปสู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ดีซึ่งจะมีผงหินปูน (Limestone Powder) ที่เกิดจากกระบวนการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์

และมวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตที่คุณสมบัติดังกล่าว ด้วยสาเหตุที่ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดีทำให้กำลังรับแรงในตอมตันสามารถพัฒนาได้ดียิ่งขึ้น [3,4,5,6] อย่างไรก็ตามการใช้ผงหินปูนยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักถึงแม้ว่าจะมีราคาต่ำกว่าปูนซีเมนต์อยู่ก็ตาม เนื่องจากยังขาดองค์ความรู้ทั้งในตัววัสดุและการประยุกต์ใช้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดเป้าหมายที่การพัฒนาการใช้ผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง

จากที่กล่าวมาข้างต้น ในการพัฒนาการใช้วัสดุร่วมทั้งสองชนิดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะต้องอยู่บนหลักของการพิจารณาค่าคุณภาพและหน้าที่ของแต่ละวัสดุ โดยจากงานวิจัยจะพบว่าเถ้าลอยมีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีในช่วงหลังแต่ไม่ดีในช่วงต้น ในขณะที่ผงหินปูนมีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาได้ดีต่ำหรือถึงกับไม่ทำปฏิกิริยา ดังนั้นปัจจัยที่สำคัญของการประยุกต์ใช้ผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์ตามกลไกของการเติมแทรก (Filler Effect) จึงอยู่ที่ขนาดของอนุภาคเป็นสำคัญ ซึ่งโดยปกติแล้วผงหินปูนเหล่านี้จะมีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดวัตถุประสงค์เฉพาะที่ต้องการศึกษาผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตเถ้าลอย โดยเน้นผงหินปูนที่ขนาด 2 8 และ 15 ไมโครเมตร ซึ่งมีการผลิตและใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ ของในประเทศไทยอยู่ในปัจจุบัน และสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วย ทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและผงหินปูน และสมบัติทางด้านซีเมนต์และความคงทนของคอนกรีต รวมทั้งการประเมินอัตราส่วนการใช้งานตามความละเอียดของอนุภาคผงหินปูนที่เหมาะสมในการผสมร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อผลิตเป็นคอนกรีต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.2.5 เพื่อศึกษาผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน ทั้งในส่วนขององค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ รวมทั้งการศึกษาถึงสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและเวลาการก่อตัวของเพสต์ กำลังอัด ประลัย กำลังดึง และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ในส่วนของความคงทนประกอบด้วย การหดตัวแบบออโตจีนัสและหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ลักษณะอนุภาคโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง การกระจายตัวของอนุภาค และความละเอียดโดยวิธีเบลน

1.3.2 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน

1.3.3 สมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม และเวลาการก่อตัวของเพสต์ ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนทั้งชนิดที่ไม่มีแทนที่และแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน และทั้งแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย กำลังดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตดังกล่าว

1.3.4 สมบัติทางด้านการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ชนิดที่ไม่มีแทนที่และแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน และทั้งแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์

1.3.5 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตต่อการแทรกซึมของไอออนของคลอไรด์

1.3.6 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ เมื่อใช้วัสดุประสานผงหินปูนที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สำหรับประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่

1.4.1 ทราบถึงองค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน

1.4.2 ทราบถึงสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.4.3 ทราบถึงสมบัติความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.4.4 ทราบถึงผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสม
เถ้าลอยและผงหินปูน

1.4.5 ทราบถึงผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อสมบัติด้านความคงทนของ
คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.4.6 นำข้อมูลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการคัดเลือกขนาดของผงหินปูน สำหรับนำไปใช้ในงาน
คอนกรีตผสมเถ้าลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตเถ้าลอยและผงหินปูน รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผงที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน รวมถึงความทนทานของคอนกรีต การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ชนิดหนึ่ง เมื่อผสมกับน้ำสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวได้ ได้จากการเผาส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยหินปูน (Calcareous) ดินเหนียวประเภท Argillaceous ออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก แล้วนำมาบดเป็นผงละเอียดร่วมกับแคลเซียมซัลเฟต ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$)

1) ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีสมบัติแตกต่างกัน องค์ประกอบเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.1 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 15 ของไทยได้แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่า

ธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก และให้ความร้อนปานกลาง

ข. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง

ค. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมี C_3S และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก ใช้ในการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานหรือถอดแบบเร็ว

ง. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำมากเพราะมีปริมาณ C_3S ต่ำ แต่มีปริมาณ C_2S ที่ค่อนข้างสูง ใช้ในงานคอนกรีตหนา เนื่องจากมีสมบัติให้อุณหภูมิต่ำ

จ. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resisting Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ C_3A ต่ำมาก ดังนั้นจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลง ใช้ในงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต และบริเวณที่มีดินเค็ม

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ [1]

ชนิดของปูนซีเมนต์ตาม มาตรฐาน ASTM	ส่วนประกอบเคมี (ร้อยละ)						
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	CaO	MgO
Type I (Normal)	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
Type II (Modified)	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
Type III (High Early Strength)	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
Type IV (Low Heat)	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
Type V (Sulfate Resistant)	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

2) องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก และออกไซด์รอง ปริมาณประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

ก. ออกไซด์หลัก (Major oxides)

ออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันได้กว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข. ออกไซด์รอง (Minor oxides)

ออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล ((Na₂O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O)) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃)

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue)

ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [1]

สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ชื่อย่อ
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)	60.0 - 67.0	CaO
ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide)	17.0 - 25.0	SiO ₂
อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide)	3.0 - 8.0	Al ₂ O ₃
ไอออนออกไซด์ (Ferric Oxide)	0.5 - 6.0	Fe ₂ O ₃
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfer Trioxide)	1.0 - 3.0	SO ₃
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)	0.1 - 0.4	MgO
อัลคาไลท์ (Alkalies)	0.2 - 1.3	Na ₂ O
ไททาเนียมออกไซด์ (Titanium Oxide)	0.2 - 1.3	K ₂ O

3) สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

ออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณองค์ประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

ก. ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ หรือ C_3S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสี่เหลี่ยมผืนผ้า สมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังก่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

ข. ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ หรือ C_2S)

ไดแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูปแบบ โดยที่อุณหภูมิปกติ C_2S จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต ($\beta\text{-C}_2\text{S}$) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

ค. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ หรือ C_3A)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ก่อตัวทันที (Flash Set) การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังค่อนข้างต่ำ ปริมาณเมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15

ง. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ หรือ C_4AF)

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เฟสแตกตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

การคำนวณปริมาณสารประกอบทั้ง 4 ชนิด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถหาได้จากสูตรการคำนวณ Bogue's Equation โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 0.64$

$$\text{C}_3\text{S} = 4.071\text{CaO} - 7.600\text{SiO}_2 - 6.718\text{Al}_2\text{O}_3 - 1.430\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2.852\text{SO}_3 \quad (2.1)$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2.867\text{SiO}_2 - 0.7544\text{C}_3\text{S} \quad (2.2)$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2.650\text{Al}_2\text{O}_3 - 1.692\text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (2.3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3.043\text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (2.4)$$

กรณีที่ 2: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.64$

$$\text{C}_3\text{S} = 4.071\text{CaO} - 7.600\text{SiO}_2 - 4.479\text{Al}_2\text{O}_3 - 2.859\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2.852\text{SO}_3 \quad (2.5)$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2.867\text{SiO}_2 - 0.7544\text{C}_3\text{S} \quad (2.6)$$

$$\text{C}_3\text{A} = 0 \quad (2.7)$$

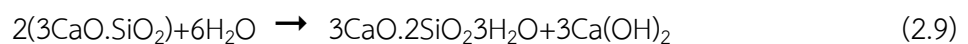
$$\text{C}_4\text{AF} = 2.100\text{Al}_2\text{O}_3 + 1.702\text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (2.8)$$

4) ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเฟส ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเฟสทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

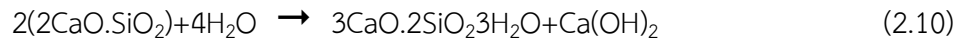
ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.9



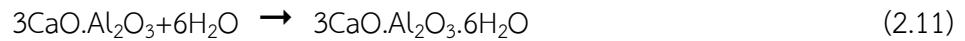
ข. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ C-S-H และ CH ดังสมการที่ 2.10



ค. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.11



เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum: $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของแอทริงไจท์ (Ettringite: $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 3.1\text{H}_2\text{O}$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ดังสมการที่ 2.12



ง. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.13



เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของไอออนแคลเซียม และไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด C-S-H เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และซัลโฟเฟอร์ไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.2 วัสดุพอซโซลาน

วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan Materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิโคนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำ

ปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่า ปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

1) ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

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

ก. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

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

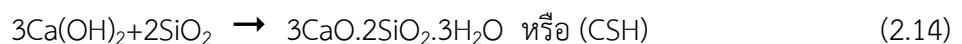
ข. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

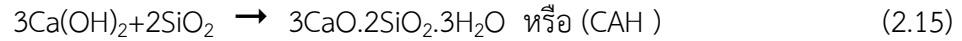
2) ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลานเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) สรุปเป็นสมการเคมีได้ ดังสมการที่ 2.14 ถึง 2.15

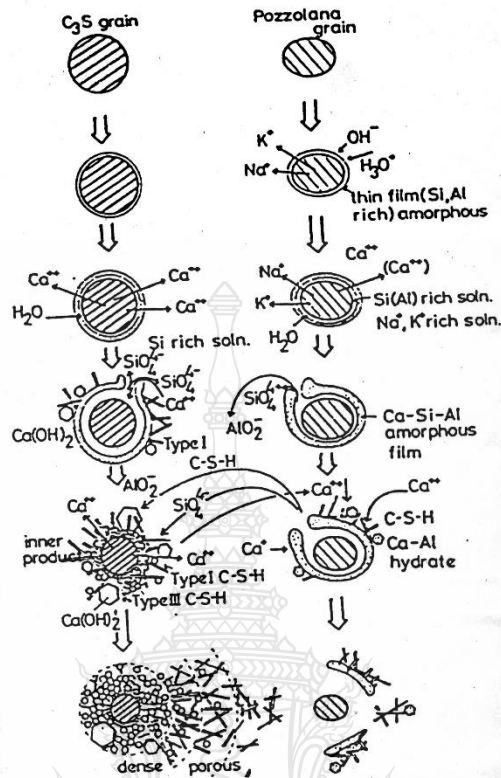
ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่ว่าวัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



จากรูปที่ 2.1 สามารถอธิบายได้ว่า กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และสารปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จะละลายออกจากสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) อย่างอิสระลงไปในช่วงของเหลว แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากสารปอซโซลานโดยอาศัยการชนกันและถูกดูดซับที่ไว้ที่ผิวของอนุภาคปอซโซลาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิโคนไดออกไซด์ (CaO/SiO_2) สูง ในขณะที่บนผิวของสารปอซโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันแต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิโคนไดออกไซด์ต่ำและมีความพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอซโซลานสัมผัสกับน้ำผิวของสารปอซโซลานมีคุณสมบัติเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้และจะทำให้มีการแตกตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) และไอออนอื่นๆ ที่ละลายตามมา เป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิโคนและ/หรืออะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ การละลายของโซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนจะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำให้มีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) และอะลูมิเนียมไอออน (AlO_2^-) ด้วยและเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออนจึงทำให้ความหนาของชั้นบนอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.1.3 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Pulverized Fly Ash) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน ถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

1) ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

ก. เถ้าลอย ชนิด F (class F)

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica: SiO_2) และอลูมินา (Alumina: Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide: Fe_2O_3)

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมี ได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545 [8]

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

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ตามก็มีความเสี่ยงที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบเคมีโดย ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [9]

ตัวอย่างเถ้าลอย	องค์ประกอบเคมี								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ 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) องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไป องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O , K_2O) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา (Loss On Ignition : LOI) SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมี ปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนด ผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ของเถ้าลอยไว้้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

3) ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.10 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2 หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.14 และ 2.15 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน

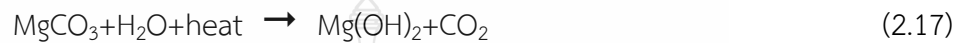
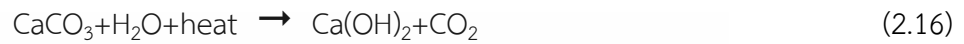
2.1.4 ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้ (By Product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบเคมี ส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

1) วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสาร

ซัลเฟตอีกด้วย ในขณะที่เดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17



2) วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.18



ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูนและวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสานซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

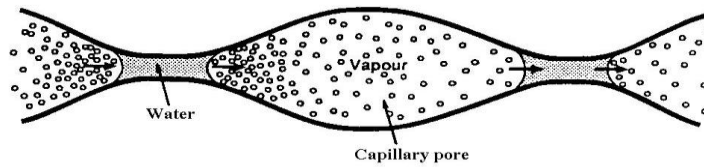
2.1.5 การหดตัวแบบออโตจิ้นัส (Autogenous Shrinkage)

การหดตัวแบบออโตจิ้นัสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีต รวมกับอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสีย ความชื้นในช่องว่างคัพิลลารี (Capillary Pores) เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยา ระหว่างวัสดุประสานกับน้ำทำให้เกิด Capillary Suction ขึ้นในช่องว่างคัพิลลารี มีผลให้คอนกรีต หดตัวจากแรง Capillary Suction นี้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Self-desiccation” การหดตัวแบบ ออโตจิ้นัส แตกต่างจากการหดตัวแบบแห้งตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่เป็นการ

สูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเอง การหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสม คอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติ จะมีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัว ในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลในทางโครงสร้าง หลังจากเทคอนกรีต ก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วย แรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยามวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น ในอดีตการหดตัว แบบนี้ไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้กันในอดีต มักเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสานสูง คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคະປິລລາຣີมาก มีขนาดใหญ่และต่อเนื่อง ดังนั้น ความชื้นในคอนกรีตจึงสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกจากบริเวณหนึ่งไปยัง อีกบริเวณหนึ่ง และน้ำจากการ บ่มก็สามารถเข้าถึงภายในคอนกรีตได้ ทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัส ในคอนกรีตเหล่านี้มีค่าต่ำจนไม่ จำเป็นต้องนำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบ แต่ในทางตรงกันข้าม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนา คอนกรีตชนิดใหม่ๆขึ้นมาหลายชนิด ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ และมีปริมาณเพสต์มาก เช่น คอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) และคอนกรีตที่ไม่ต้องใช้ เครื่องเขย่า (Self-Compacting Concrete) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาแล้ว คอนกรีตเหล่านี้จะมี ปริมาณช่องว่างคະປິລລາຣີที่น้อยกว่า มีขนาดเล็กกว่า และมีความต่อเนื่องของ ช่องว่างคະປິລລາຣີน้อย กว่าหรืออีกนัยหนึ่ง มีค่าความชื้นน้ำต่ำมาก ดังนั้นเมื่อความชื้นในช่องว่าง คະປິລລາຣີถูกใช้ไปใน ปฏิกริยา จึงเป็นการยากที่ความชื้นจากส่วนอื่น หรือความชื้นจากการบ่มจะเข้ามา เสริมในบริเวณ ดังกล่าวได้ จึงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้สูงจนไม่สามารถละเลย ได้ในการ ออกแบบ

2.1.6 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งเป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียน้ำของซีเมนต์เพสต์ไปสู่บรรยากาศที่มี สภาวะความชื้นต่ำ ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำทั้งจากโพรงคະປິລລາຣີ (Capillary Pore) และโพรงเจล (Gel Pore) ในซีเมนต์เพสต์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ให้กับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากความแตกต่างกันของ ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างคอนกรีตและสิ่งแวดล้อมเพื่อทำให้ระบบอยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งความชื้นที่สูญเสีย ไปไม่สามารถกลับคืนมาได้ (Irreversible Process) โดยที่ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ที่หดตัวมีค่าไม่ เท่ากับปริมาตรของน้ำที่สูญเสียน้ำ อันเนื่องจากการยึดรั้งของโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต



รูปที่ 2.2 การสูญเสียความชื้นผ่านทางโพลคาพิลลารีและเจล

เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งเกิดจากการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีตไปสู่บรรยากาศแวดล้อม ดังนั้นปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีตจึงมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งมีดังต่อไปนี้

- ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต
คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตมาก จะมีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) มาก น้ำอิสระเป็นน้ำที่สามารถจะระเหยออกจากคอนกรีตไปได้
- อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง จะทำให้มีช่องว่างคาพิลลารี (Capillary Pores) มาก ปริมาณน้ำอิสระก็จะมากด้วย การที่คอนกรีตมีช่องว่างคาพิลลารีมากจะทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก
- ปริมาณมวลรวม โดยปกติแล้วการหดตัวจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยหรืออีกนัยหนึ่งมีปริมาณมวลรวมมาก ก็จะทำให้เกิดการหดตัวน้อยลงด้วย
- ชนิดและคุณภาพของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมมักจะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของปริมาตร ดังนั้นมวลรวมจึงมีคุณสมบัติที่จะช่วยต่อต้านการหดตัวในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามวลรวมมีโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง การแตะกันของมวลรวมเป็นกลไกที่สำคัญอันหนึ่งของการต้านทานการหดตัวซึ่งเกิดจากซีเมนต์เพสต์ได้ มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก ก็มักจะก่อให้เกิดการหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตมากด้วย มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมากยกตัวอย่างเช่น มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) เป็นต้น ซึ่งปกติแล้วมวลรวมที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงก็มักจะมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำด้วย ทำให้แรงต้านทานการหดตัวต่ำตามไปด้วย
- ขนาดคละของมวลรวมที่ดี ก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้ การหดตัวของคอนกรีตลดลง เนื่องจากจะทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลง
- ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้สารปอซโซลานหรือวัสดุผงบางชนิดก็มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น เถ้าลอย สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต และเถ้าลอยบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อย ทำให้ชดเชยการหดตัวได้บางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้เช่นกันเนื่องจาก

ช่วยเพิ่มความแน่นให้กับคอนกรีต การใช้ผงฟูหินก็อาจช่วยลดการหดตัวแบบแห้งด้วยเช่นกัน ถ้าการใช้มันไม่เป็นการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต เป็นต้น

- อุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น

- มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็ว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ง่าย

2.1.7 การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้วถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

1) แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่มีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์รวม ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อม) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้ (10)

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้สูงสุดในคอนกรีต (ร้อยละของน้ำวัสดุประสาน)
(ก) คอนกรีตอัดแรง	0.06
(ข) คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัสกับคลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น (Sea-Retaining Walls)	0.15
(ค) คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะใช้งานมีการป้องกันความชื้น	1.00
(ง) การก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	0.30

หมายเหตุ: โดยการทำสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 1218/C 1218M : Standard Test Method For Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete

อย่างไรก็ตาม ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้นส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (de-icing salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

ก. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (capillary suction)
ข. การแพร่ของไอออนของคลอไรด์ (chloride ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต

ค. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานักความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (submerged zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กน้อยมาก ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีต เป็นช่องว่างอิมมัตด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณออกซิเจนมาก ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมที่ถูกจำกัด โดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจน ผ่านช่องว่างที่อิมมัตด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิมมัต (saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไป ทิ้งไว้แค่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ (chloride ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียก (saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายใน

คอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่า การเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่แต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้น คอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหากัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณไอออนของคลอไรด์ (chloride ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (threshold content of chloride ions) ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

2) สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจัดยึด (Fixed chloride) โดยกลไกดังต่อไปนี้

ก. Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Fridel's Salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (calcium chloroferrite) หรือแม้แต่ว่าอยู่ในโครงข่ายของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ข. Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น มวลรวม หรือ ผงหินปูนได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

3) การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณที่ใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเล เป็น

เวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ ในสิ่งแวดล้อมได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

ก. ในกรณีของสภาวะเปียกสลับกับแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ที่เกลือไวับริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียกน้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆรอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

ข. ในกรณีสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้าเนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามก็ดีในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดิน ซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมี มากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้

การแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีต โดยธรรมชาติเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นค่อนข้างช้า จึงมีความพยายามหาวิธีทดสอบที่ใช้ระยะเวลาในการทดสอบน้อย วิธีทดสอบที่นิยมใช้วิธีหนึ่ง คือการเร่งให้เกิดการแทรกซึมเร็วขึ้นด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเรียกว่า Migration Test ซึ่งการทดสอบหลายมาตรฐานใช้วิธีการทดสอบลักษณะดังกล่าว ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการทดสอบการต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน (ASTM C1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ตาร์

การทดสอบการต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน เป็นวิธีการทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนได้เร็วขึ้น โดยให้ชิ้นตัวอย่างอยู่ภายในสภาพไฟฟ้าด้วยการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงให้พัฒนาโดย Whiting ในปี ค.ศ.1981 มักเรียกวิธีการทดสอบนี้ในอีกชื่อ คือ Rapid Chloride Permeability Test ใช้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านชิ้นตัวอย่าง เพื่อนำไปประเมินระดับการซึมผ่านได้ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ระดับการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ ASTM C 1202 [11]

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

2.1.8 การกัดกร่อนโดยซัลเฟต

ปัจจุบันการศึกษาความเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อคอนกรีตนั้นพบว่ามีความจำเป็นยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือที่ใกล้กับทะเล เช่น ตอม่อ ท่าเรือ ประภาคาร เขื่อน ฯลฯ เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล ซัลเฟตอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด อันอาจการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น การทำลายของซัลเฟตไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้นและรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน เช่น ในท่อระบายน้ำโสโครก ในอาคารส่งน้ำเพื่อการชลประทาน ฐานรากและพื้นอาคาร ในดินที่มีซัลเฟต

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตในทะเลเกิดขึ้นโดยการกัดกร่อนทางเคมีและการกัดเซาะทางกายภาพ เช่น การกระแทกของคลื่นและการที่คอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน สำหรับการกัดกร่อนทางเคมีพบว่าเกลือในรูปของสารละลายจะสามารถทำลายคอนกรีตได้เพราะ จะซึมเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ได้ สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่ กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรง คือแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ส่วนเกลือแกง ($NaCl$) กับโปตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งพบมากในน้ำทะเลเช่นกันจะทำให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมได้ง่าย ในน้ำใต้ดินบริเวณที่มีแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) มักมีซัลเฟตปนอยู่เสมอ โดยทั่วไปดินมีซัลเฟตอยู่เล็กน้อยคือประมาณร้อยละ 0.01 ถึง 0.05 ของน้ำหนัก แต่จะเพิ่มสูงมากขึ้นเนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยธรรมชาติ

การศึกษาการกัดกร่อนของซัลเฟตต่อคอนกรีตเป็นสิ่งที่น่าสนใจและจำเป็นอย่างมากเพราะถ้าไม่ป้องกันผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในตอนเริ่มแรกของการก่อสร้างแล้วคอนกรีตอาจ

เสียหายได้ในอนาคตอันใกล้ ทำให้ต้องซ่อมแซมคอนกรีตและการซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟตจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ โดยธรรมชาติของซัลเฟตแต่ละชนิดมีความสามารถละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน (คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, 2536) กล่าวคือ แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ละลายน้ำเพียง 1.2 กรัม/ลิตร ส่วนโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ละลายน้ำ 240 กรัม/ลิตร และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ละลายน้ำ 300 กรัม/ลิตร เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาความทนทานต่อสารซัลเฟตจึงใช้สารโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) กลไกการกัดกร่อนของซัลเฟตอิออนทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการขยายตัวในคอนกรีตที่แข็งตัวจนกระทั่งเกิดการแตกร้าว โดยสภาวะของซัลเฟตสามารถแบ่งตามสภาพแวดล้อมซัลเฟตดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สภาวะของซัลเฟต [10]

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (SO_4^{2-} , ร้อยละ)	ซัลเฟตในน้ำ (ppm.)
เบาบาง	0.00 – 0.10	0 – 150
ปานกลาง	0.10 – 0.20	150 – 1,500
รุนแรง	0.20 – 2.00	150 – 10,000
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000

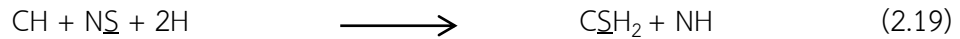
1) แหล่งของเกลือซัลเฟต

เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเล หรือในดินทั่วไป เกลือซัลเฟตชนิดที่พบบมากที่สุดมักจะเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือแมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังมีจะอยู่ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติ

2) กลไกการกัดกร่อนโดยโซเดียมซัลเฟต [10]

กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 2.19 ถึง 2.22 เริ่มต้นเมื่อโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจากไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการที่ 1 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีความเป็นด่างสูงมาก (pH=13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ Ettringite ($\text{C}_6\text{ASH}_{32}$) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลอื่น โดยที่สารยิปซัม (CSH_2) ที่ได้จากสมการที่ 1 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($\text{C}_4\text{ASH}_{12}$) และไตร

แคลเซียมอลูมิเนต (C₃A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังแสดงในสมการที่ 2.20 ถึง 2.22 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำละลายโซเดียมซัลเฟต จึงเป็นการขยายตัวและแตกตัวของคอนกรีต



โดยที่ C = CaO , N = Na₂O , M = MgO , S = SiO₂ , S = SO₃ และ H = H₂O

3) กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต [10]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.23 ถึง 2.25 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่ไม่สูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.24 จากสมการที่ 2.23 และ 2.24 ทั้ง CSH₂ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย CSH₂ จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล (S₂H) ดังแสดงในสมการที่ 2.25 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลยดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม CSH₂ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต



4) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต [10]

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต มีดังนี้

ก. สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต

ข. ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยาก ลดการทำลายชั้นรุนแรง

ค. ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูงและปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_2S และ C_3S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

ง. ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีต ถ้าลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

5) วิธีการป้องกันการทำลายของซัลเฟต

ก. ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และอัตราส่วน C_2S และ C_3S ต่ำ นั่นคือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือเรียกว่าปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต (Sulfate resisting cement)

ข. การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งช่วยลดปริมาณบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย

ค. ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

ง. ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เฟสตีไม่มากเกินไป

ในบางกรณีการป้องกันความเสียหายจากการทำลายของซัลเฟตที่รุนแรงโดยการใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่พอในสภาวะที่มีซัลเฟตเข้มข้นอยู่ในระดับรุนแรงมาก หากใช้ปอซโซลานร่วมด้วยจะเป็นการช่วยทำให้คอนกรีตให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตได้ดียิ่งขึ้น ตารางที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงข้อกำหนดของสมาคมคอนกรีตในสหรัฐอเมริกา สำหรับการเลือกใช้วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต ในสภาวะที่มีซัลเฟตอยู่ในระดับรุนแรงต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 2.9 ข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต [10]

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (SO_4^{2-} ร้อยละ)	ซัลเฟตในน้ำ (PPM)	ประเภทของวัสดุประสาน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
เบาบาง	0.00 - 0.10	0 - 15	-	-
ปานกลาง	0.10 - 0.20	150 - 1,500	Type 2, Type 1 + สารปอซโซลาน	ไม่สูงเกิน 0.50
รุนแรง	0.20 - 2.00	1,500 - 10,000	Type 5	ไม่สูงกว่า 0.45
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000	Type 5 + สารปอซโซลาน	ไม่สูงกว่า 0.45

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษางานวิจัยที่ผ่านซึ่งศึกษาถึงอิทธิพลของความละเอียดของ ผง หินปูนต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตมีดังนี้

2.2.1 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับศักยภาพของผงหินปูนมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้า ลอย

วสุรัชย์ อำนวยพรเลิศ (2547) ได้ทำการศึกษาผลของผงหินปูนและเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติทาง กลของคอนกรีต โดยทำการกำหนดปริมาณการแทนที่ผงหินปูนและ/หรือเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ร้อยละ 18 ถึง 36 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบพบว่า หน่วยน้ำหนักของ คอนกรีตผสมผงหินปูนและเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติ และอัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนที่ เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้น (28 วันแรก) สูงกว่าคอนกรีตปกติ

ศักดิ์ประยูทธ สินธุภิญโญ และสุรัชย์ วังรัตนชัย (2552) ได้ทำการตรวจสอบสมบัติของ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูน โดยจากการศึกษาพบว่า ผลิตภัณฑ์ ของปฏิกิริยาไฮเดรชันและกลไกการเกิดปฏิกิริยามีความแตกต่างกัน โดยปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนทำให้เกิด Monocarboaluminate ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และยังเกิดการเติมเต็มช่องว่าง (Filling Effect) ซึ่งจะมีผลให้มอร์ตาร์มีการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นที่สูงขึ้น และยังส่งผลมากขึ้นเมื่อผง หินปูนมีความละเอียดที่เพิ่มขึ้น

ธีรติ ศรีจันทร์ และคณะ (2554) ศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ ล้วนและคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วม ปูนซีเมนต์ - เถ้าลอย, ปูนซีเมนต์ - ผงฝุ่นหินปูน และ ปูนซีเมนต์ - เถ้าลอย - ผงฝุ่นหินปูน เพื่อศึกษาผลของชนิดของเถ้าลอย ผงฝุ่นหินปูนที่ใช้ในการทดสอบ มีความละเอียด 5 ไมครอน สภาพการบ่มที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ การบ่มด้วยน้ำ และบ่มในอากาศ กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนัก (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ในการศึกษาพบว่า การบ่มมีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต คอนกรีตที่ได้รับการบ่มน้ำมีกำลังอัดสูง กว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ การใช้ผงฝุ่นหินปูนในคอนกรีตสามารถลดดัชนีวัดผลต่อการบ่มของ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยได้

2.2.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของความละเอียดของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

วิศิษ เตชพันธ์ (2542) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงฝุ่นหินปูนพบว่า เมื่อทำการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้น ด้วยเหตุผลของการเร่งทางกายภาพ โดยในกรณีผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ส่งผลให้อนุภาคปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดี

ธีรวัฒน์ สีนศิริ และคณะ (2548) นำเสนอผลกระทบของความละเอียดของเถ้าถ่านหินต่อการพัฒนากำลังอัด ปริมาตรและขนาดของโพรงในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยนำเถ้าถ่านหินมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 19.1 และ 6.41 ไมโครเมตร แทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 ได้ข้อสรุปว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดของโพรงคาบิลลารีลดลง เมื่อทำการแทนที่เถ้าถ่านหินที่ละเอียดในเพสต์ทุกระดับการแทนที่

LIU Shuhua, YAN Peiyu (2009) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของผงหินปูนต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีต โดยการใช้เทคนิค Mercury intrusion porosimetry (MIP), Backscattering scanning electron (BSE), Scanning electron microscopy (SEM) และ X-ray diffraction (XRD) โดยจากการทดลองพบว่ากำลังของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนในปริมาณ 100 กก./ม.³ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยผงหินปูนจะไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วง 28 วันแรก แต่จะมีเพียงผลเนื่องจากการเติมเต็ม (Filling Effect) เท่านั้นที่ช่วยทำให้เนื้อเพสต์และช่วงรอยต่อระหว่างมวลรวม (Interfacial Transition Zone) มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยคอนกรีตมีสมบัติที่ดีขึ้น

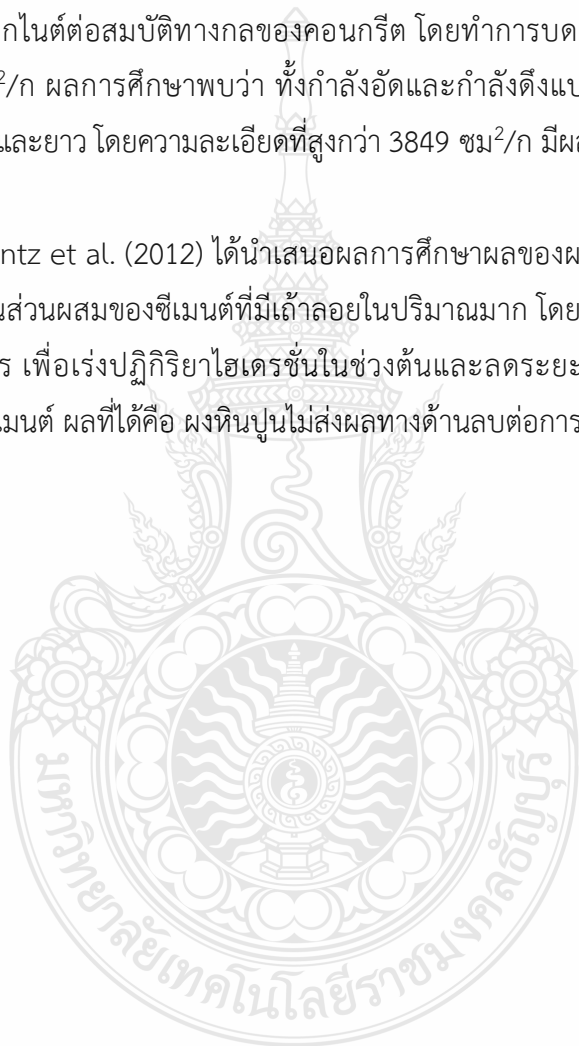
XIAO Jia et al. (2010) ได้ทำการศึกษาผลของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ต่อคุณลักษณะเฉพาะของการทำปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3A) ด้วยเทคนิค XRD, DSC, FTIR และ SEM ผลการศึกษาระบุชัดเจนถึงการเกิดเฟสใหม่ของ $\text{C}_3\text{A}\cdot 0.5\text{CaCO}_3\cdot 0.5\text{Ca}(\text{OH})_2\cdot 11.5\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{C}_3\text{A}\cdot \text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$ อันเนื่องมาจากแคลเซียมคาร์บอเนตยับยั้งการก่อตัวของ C_4AH_3 and C_2AH_8 ในช่วงต้นของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Weerdt K. De et al. (2010) ได้ทำการศึกษากลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซีเมนต์ผสมผงหินปูนและเถ้าลอยด้วยเทคนิค isothermal calorimetry, thermogravimetry (TGA), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) ร่วมกับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายในโพรงภายในโครงสร้าง ข้อสรุปจากการค้นพบคือ ผงหินปูนช่วยทำให้เกิดการก่อตัวของโมโนคาร์บอเนตละช่วยให้เอ็ททริงใจท์มีเสถียรภาพเชิงโครงสร้างที่ดีขึ้น ในที่นี้การใส่ผงหินปูนร้อยละ 5 ช่วยเพิ่มปริมาตรของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Weerdt K. De et al. (2010) ได้นำเสนอผลของเสริมผลซึ่งกันและกันของผงหินปูนและเถ้าลอยในซีเมนต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 มีผลทำให้กำลังอัดและกำลังดัดลดลงได้ ในขณะที่การแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 5 ร่วมกับเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 30 ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัด นอกจากนี้จากผลการทดสอบทางด้านความร้อนและการวิเคราะห์ผลึกที่เกิดขึ้นยืนยันถึงการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา

SEMSI YAZICI และ HASAN SAHAN AREL (2012) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความละเอียดของเถ้าลอยลิกไนต์ต่อสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยทำการบดเถ้าลอยจนมีความละเอียด 3849 และ 5239 ซม²/ก ผลการศึกษาพบว่า ทั้งกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกได้รับผลของความละเอียดทั้งในระยะสั้นและยาว โดยความละเอียดที่สูงกว่า 3849 ซม²/ก มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ

Dale P. Bentz et al. (2012) ได้นำเสนอผลการศึกษาผลของผงหินปูนที่มีความละเอียดที่เพิ่มขึ้นต่อการก่อตัวในส่วนผสมของซีเมนต์ที่มีเถ้าลอยในปริมาณมาก โดยการผงหินปูนที่มีขนาด 4.4 และ 16.4 ไมโครเมตร เพื่อเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นและลดระยะเวลาการก่อตัวในเถ้าลอยประเภท C ที่ผสมในซีเมนต์ ผลที่ได้คือ ผงหินปูนไม่ส่งผลทางด้านลบต่อการพัฒนากำลังอัด



บทที่ 3

วิธีการศึกษา

สำหรับวิธีการศึกษานี้ประกอบด้วย วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แก้วลอย ผงหินปูน ทราาย แม่น้ำ และหิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 (รูปที่ 3.1)

1.3.2 ผงหินปูนที่มีขนาดอนุภาค (d_{50}) ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิต มีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท โดยมีความละเอียด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร (รูปที่ 3.2)

1.3.3 แก้วลอย ใช้แก้วลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (รูปที่ 3.3)

1.3.4 ทราาย ใช้ทราายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนออกจนสะอาด นำไปทำการอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) และปรับทราายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated-surface Dry) (รูปที่ 3.4)

1.3.5 หินเบอร์ 2 นำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปทำการอบ และปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (รูปที่ 3.5)

1.3.6 น้ำ ใช้น้ำประปามีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ในช่วง 7 ถึง 8

1.3.7 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

1.3.8 สารโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 3.2 ผงหินปูนความละเอียด 2 8 และ 15 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.3 ถ้ำลอยจากโรงผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ



รูปที่ 3.4 ทรายหยาบ



รูปที่ 3.5 หินย่อย เบอร์ 3/4" และ 3/8"

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาในครั้งนี้ ได้ทำการศึกษา สมบัติทางกายภาพและทางเคมี สมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต การหาค่าแบบออตโตจีนัสและการหาค่าแบบแห้งของมอร์ตาร์ การแทรกซึม คลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ ผสมเถ้าลอย และผงหินปูน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุประสาน

การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุประสาน ซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

1) ความถ่วงจำเพาะ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188 โดยขูดมาตรฐานเลอชาเตอริเยร์ (Le Chatelier Flask) (รูปที่ 3.6)

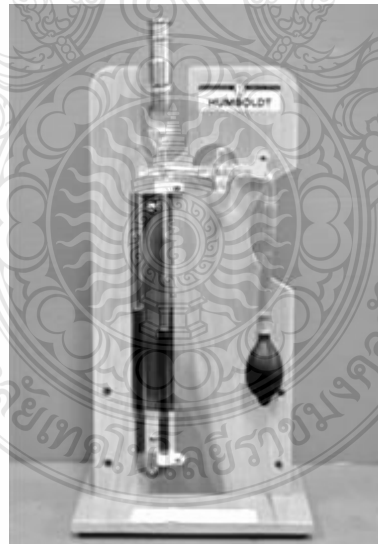


รูปที่ 3.6 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (Le Chatelier Flask)

2) ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน โดยวิธี Scanning Electric Microscope: SEM

3) การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคแขวนลอยโดยใช้เรเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer: LPSA)

4) ความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีเอบิลิตีของเบลน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 204 ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีเอบิลิตีของเบลน (Air Permeability Apparatus) (รูปที่ 3.7)



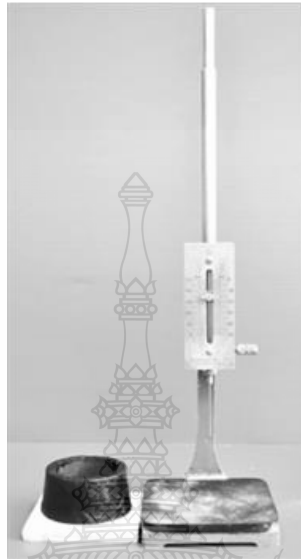
รูปที่ 3.7 เครื่องมือแอร์เพอร์มีเอบิลิตีของเบลน (Air Permeability Apparatus)

3.2.2 สมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

สำหรับสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน ที่ศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย

1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ (Normal Consistency) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 187 ด้วยเครื่องมือไวแคท (Vicat Apparatus) (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 เครื่องมือไวแคท (Vicat Apparatus)

2) ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ ซึ่งทำการทดสอบหาเวลาการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) และเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time) ตามมาตรฐาน ASTM C 191 ด้วยเครื่องมือไวแคท

3) ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143 ด้วยกรวยทดสอบการยุบตัว (Slump Cone) (รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

4) กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยทำการหล่อ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัปดาห์หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปทำการบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่ 3 7 14 28 56 และ 91 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดและแรงดึงใช้วิธีทดสอบแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM C 39 และ ASTM C 496 ตามลำดับ โดยที่ลักษณะของการติดตั้งเครื่องมือทดสอบแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 การติดตั้งเครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 39



รูปที่ 3.11 การติดตั้งเครื่องทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 496

5) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ในการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 469 ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การติดตั้งเครื่องทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 469

3.2.3 สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

สำหรับสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ ประกอบด้วย

1) การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์

การทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ของมอร์ตาร์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 490 โดยใช้เครื่องมือวัดการยืดหดตัวของตัวอย่างด้วยเครื่อง Digital Length Comparator ทำการวัดการหดตัวระหว่างหมุด (Demec) 2 ตัวของแท่งตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร³ ถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง วัดค่าหลังจากถอดแบบเป็นค่าเริ่มต้น บ่มด้วยการห่อพลาสติก นำแท่งตัวอย่างออกมาวัดความยาวทุกๆ สัปดาห์ จนกระทั่งความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปมีแนวโน้มค่าคงที่ สุดท้ายนำผลการหดตัวที่ได้มาคำนวณหาความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการที่ (3.1)

2) การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของมอร์ตาร์ขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร³ ตามมาตรฐาน ASTM C 490 และ C 596 (รูปที่ 3.13) ถอดแบบออกหลังจากผสม 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนด 7 วัน ทำการวัดด้วยเครื่อง Digital Length Comparator (รูปที่ 3.14) โดยความยาวเริ่มต้น L_i และความยาวของแท่งตัวอย่าง ณ วันที่ทำการวัดต่อไปเป็น L_x แล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม ดังสมการที่ (3.2) ทำการวัดไปจนกระทั่งความยาวที่เปลี่ยนไปมีแนวโน้มค่าคงที่

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

โดย L คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวที่อายุวันที่ x (ร้อยละ)

L_x คือ ค่าที่อ่านได้จาก Comparator ที่อายุวันที่ x ลบด้วยค่าที่อ่านได้จาก Comparator ของแท่งอ้างอิง (Reference Bar) ที่อายุวันที่ x ในหน่วยมิลลิเมตร

L_i คือ ค่าเริ่มต้นที่อ่านได้จาก Comparator ที่อายุวันที่ x ลบด้วยค่าที่อ่านได้จาก Comparator ของแท่งอ้างอิง (Reference Bar) ที่อายุวันที่ x ในหน่วยมิลลิเมตร

G คือ ความสูงของเกจ (Nominal Gauge Length) เท่ากับ 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.13 แบบหล่อสำหรับตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ ขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร³



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความยาว (Length comparator) สำหรับวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป

3) ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์แบบเร่งต่อการแทรกซึมของอิออนของคอนกรีต

การทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์แบบเร่งของอิออนของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202 ใช้ชิ้นตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ทำการทดสอบที่อายุ 91 วัน ก่อนทำการทดสอบ 2 วัน นำชิ้นส่วนตัวอย่างไปตัดด้วยเครื่องตัดที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำตลอดการตัดให้ได้ขนาดหนา 50 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีต 2 ชิ้นที่เตรียมไว้ทดสอบที่อายุบ่มดังกล่าวขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมาใส่ในถังดูดสุญญากาศ (Vacuum Pump) แล้วจึงเปิดเครื่องดูดอากาศเพื่อให้เกิดสภาพสุญญากาศในถัง Desiccator ต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงเปิดวาล์วปิดเครื่องดูด ใช้ท่อ Stopcock อย่างช้าๆให้

น้ำกลั่นไหลเข้าสู่ในถังจนท่วมตัวอย่างทั้งหมด โดยขั้นตอนนี้จะไม่ยอมให้อากาศไหลเข้าไปได้ปิด Stopcock ก่อนที่จะเริ่มเปิดเครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum Pump) แล้วเปิดวาล์วใต้ Vacuum Gauge โดยต้องเปิดเครื่อง Vacuum Pump ต่อเนื่องเป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมงหลังจากนั้นทำการปิดเครื่อง Vacuum Pump และทำการต่อท่อกับภาชนะบรรจุน้ำกลั่น แล้วจึงเปิด Stopcock อย่างช้าๆ เพื่อให้ น้ำ ค่อยๆ ไหลเข้าสู่ถึง Desiccator จนกระทั่งน้ำเริ่มไหลย้อนกลับผ่าน Stopcock จึงเปิด Stopcock ปลอยให้ตัวอย่างคอนกรีตแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลาอีก 18 ชั่วโมง แล้วจึงเปิดฝาดัง Desiccator นำตัวอย่าง แท่งคอนกรีตมาเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสะอาด จากนั้นนำแท่งตัวอย่างคอนกรีตเช็ดสะอาดมาประกอบเข้าไป ในเซลล์ (Cell) แล้วเติมสารละลาย NaCl ลงใน Cell ด้านซ้าย และเติมสารละลาย NaOH ลงใน Cell ด้านขวามือ เมื่อเติมสารละลายเสร็จนำประกอบเข้ากับชุดทดสอบ ซึ่งการจัดชุดทดสอบมีรายละเอียดดัง รูปที่ 3.14 หลังจากนั้นปล่อยแรงดันไฟฟ้าขนาด 60 ± 0.1 โวลต์ ผ่านขึ้นตัวอย่างคอนกรีต เครื่อง Data Logger จะทำการอ่านค่ากระแสไฟที่ผ่านตัวอย่างทดสอบของแต่ละ Cell ซึ่งจะทำให้การบันทึกค่าโดย อัตโนมัติทุกๆ 30 นาที ใช้เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง โดยแสดงผลการทดสอบเป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่ เคลื่อนผ่านตัวอย่างทดสอบ (total charge passed) มีหน่วยเป็น Coulomb โดยสมการ (3.3)

$$Q_x = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (3.3)$$

เมื่อ Q_x คือ ประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านขึ้นตัวอย่างทดสอบเส้นผ่าศูนย์กลาง x มิลลิเมตร (coulombs)

I_0 คือ ค่ากระแสเริ่มแรก, (amperes)

I_t คือ ค่ากระแสที่เวลา t นาที, (amperes)

4) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

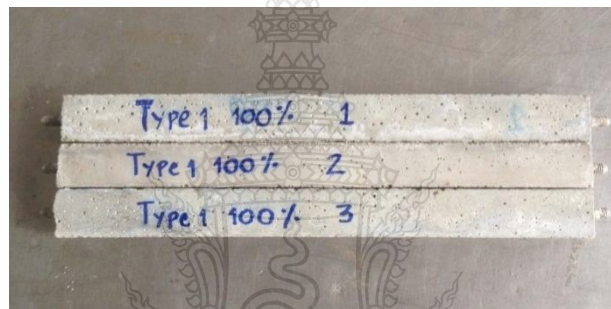
ในการวัดการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์นั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จะวัดการขยายตัวของตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ เซนติเมตร ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต หลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง (Mold) แล้วหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง จะทำการถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูน เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่เตรียมไว้ แล้ววัดการขยายตัวของตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่อายุต่างๆ สำหรับสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีการเปลี่ยนที่อายุทุกๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง ในส่วนวิธีการวัดการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ (รูปที่ 3.15) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012 ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว

(length comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 ต่อจากนั้นนำตัวอย่าง ทำการวัดความยาวของตัวอย่าง (รูปที่ 3.16) ที่อายุ 1 2 3 5 และ 8 สัปดาห์ และทุกๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สำหรับการขยายตัวของตัวอย่างเป็นการเฉลี่ยการขยายตัวจำนวน 3 แห่งตัวอย่างการขยายตัวจากสมการ (3.4)

$$\text{การขยายตัว (\%)} = [(L_t - L_i)/L_i] \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.15 ชิ้นตัวอย่างขนาด 2.5x2.5x28.5 ซม.



รูปที่ 3.16 การวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยเครื่องวัดความยาว

3.3 สัตว์ส่วนของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัตว์ส่วนของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แยกตามคุณสมบัติต่างๆที่ได้ศึกษา โดยมีรายละเอียดของสัตว์ส่วนของผสมต่างๆ ดังนี้

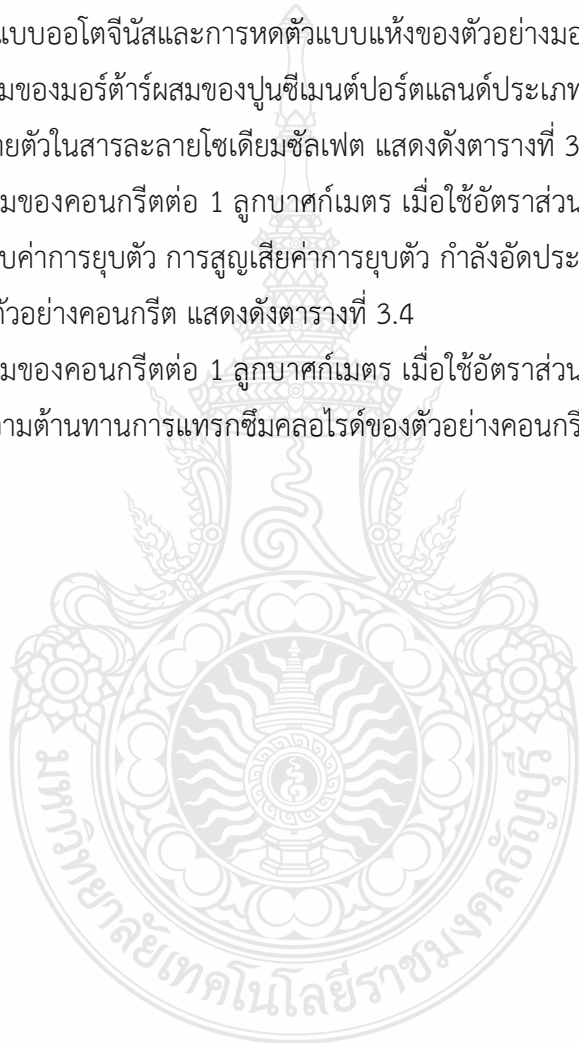
- สัตว์ส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ แสดงดังตารางที่ 3.1

- สัตว์ส่วนของมอร์ตาร์ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ตาร์ แสดงดังตารางที่ 3.2

- สัตว์ส่วนของมอร์ตาร์ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต แสดงดังตารางที่ 3.3

- สัตว์ส่วนของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 ที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 3.4

- สัตว์ส่วนของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 ที่ใช้สำหรับหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 3.5



ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานโดยน้ำหนัก ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสม และ
ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของวัสดุ (กรัม)					น้ำ
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน (ไมครอน)			
				2	8	15	
1	PC	1.00	-	-	-	-	NC
2	PC-5LP2	0.95	-	0.05	-	-	NC
3	PC-5LP8	0.95	-	-	0.05	-	NC
4	PC-5LP15	0.95	-	-	-	0.05	NC
5	PC-10LP2	0.90	-	0.10	-	-	NC
6	PC-10LP8	0.90	-	-	0.10	-	NC
7	PC-10LP15	0.90	-	-	-	0.10	NC
8	PC-20LP2	0.80	-	0.20	-	-	NC
9	PC-20LP8	0.80	-	-	0.20	-	NC
10	PC-20LP15	0.80	-	-	-	0.20	NC
11	PC-30FA	0.70	0.30	-	-	-	NC
12	PC-5LP2-25FA	0.70	0.25	0.05	-	-	NC
13	PC-5LP8-25FA	0.70	0.25	-	0.05	-	NC
14	PC-5LP15-25FA	0.70	0.25	-	-	0.05	NC
15	PC-10LP2-20FA	0.70	0.20	0.10	-	-	NC
16	PC-10LP8-20FA	0.70	0.20	-	0.10	-	NC
17	PC-10LP15-20FA	0.70	0.20	-	-	0.10	NC
18	PC-20LP2-10FA	0.70	0.10	0.20	-	-	NC
19	PC-20LP8-10FA	0.70	0.10	-	0.20	-	NC
20	PC-20LP15-10FA	0.70	0.10	-	-	0.20	NC

หมายเหตุ NC คือ Normal Consistency

PC คือ เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

PC-5LP2 เพสต์ผสมผงหินปูนความละเอียด 2 ไมโครเมตร ร้อยละ 5

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก ที่ใช้ในการศึกษาทดสอบการหดตัวของคอนกรีต
และการหดตัวแบบแห้ง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของวัสดุ (กรัม)					ทราย	น้ำ
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้า ลอย	ผงหินปูน (ไมโครเมตร)				
				2	8	15		
1	MC	1.00	-	-	-	-	2.75	0.55
2	MC-5LP2	0.95	-	0.05	-	-	2.75	0.55
3	MC-5LP8	0.95	-	-	0.05	-	2.75	0.55
4	MC-5LP15	0.95	-	-	-	0.05	2.75	0.55
5	MC-10LP2	0.90	-	0.10	-	-	2.75	0.55
6	MC-10LP8	0.90	-	-	0.10	-	2.75	0.55
7	MC-10LP15	0.90	-	-	-	0.10	2.75	0.55
8	MC-20LP2	0.80	-	0.20	-	-	2.75	0.55
9	MC-20LP8	0.80	-	-	0.20	-	2.75	0.55
10	MC-20LP15	0.80	-	-	-	0.20	2.75	0.55
11	MC-30FA	0.70	0.30	-	-	-	2.75	0.55
12	MC-5LP2-25FA	0.70	0.25	0.05	-	-	2.75	0.55
13	MC-5LP8-25FA	0.70	0.25	-	0.05	-	2.75	0.55
14	MC-5LP15-25FA	0.70	0.25	-	-	0.05	2.75	0.55
15	MC-10LP2-20FA	0.70	0.20	0.10	-	-	2.75	0.55
16	MC-10LP8-20FA	0.70	0.20	-	0.10	-	2.75	0.55
17	MC-10LP15-20FA	0.70	0.20	-	-	0.10	2.75	0.55
18	MC-20LP2-10FA	0.70	0.10	0.20	-	-	2.75	0.55
19	MC-20LP8-10FA	0.70	0.10	-	0.20	-	2.75	0.55
20	MC-20LP15-10FA	0.70	0.10	-	-	0.20	2.75	0.55

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก ที่ใช้ในการศึกษาทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของวัสดุ (กรัม)						ทราย	น้ำ
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้า ลอย	ผงหินปูน (ไมโครเมตร)					
				2	8	15			
1	MC	1.00	-	-	-	-	2.75	0.55	
2	MC-5LP2	0.95	-	0.05	-	-	2.75	0.55	
3	MC-10LP2	0.90	-	0.10	-	-	2.75	0.55	
4	MC-5LP8	0.95	-	-	0.05	-	2.75	0.55	
5	MC-10LP8	0.90	-	-	0.10	-	2.75	0.55	
6	MC-5LP15	0.95	-	-	-	0.05	2.75	0.55	
7	MC-10LP15	0.90	-	-	-	0.10	2.75	0.55	
8	MC-40FA	0.60	0.40	-	-	-	2.75	0.55	
9	MC-35FA-5LP2	0.60	0.35	0.05	-	-	2.75	0.55	
10	MC-30FA-10LP2	0.60	0.30	0.10	-	-	2.75	0.55	
11	MC-35FA-5LP8	0.60	0.35	-	0.05	-	2.75	0.55	
12	MC-30FA-10LP8	0.60	0.30	-	0.10	-	2.75	0.55	
13	MC-35FA-5LP15	0.60	0.35	-	-	0.05	2.75	0.55	
14	MC-30FA-10LP15	0.60	0.30	-	-	0.10	2.75	0.55	

หมายเหตุ MC คือ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

MC-10LP15 คือ มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนความละเอียด 15 ไมโครเมตร ร้อยละ 10 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัด
 ประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วน
 น้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ลำดับ ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของวัสดุ (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้า ลอย	ผงหินปูน (ไมโครเมตร)			ทราย	หิน	น้ำ
				2	8	15			
1	CC	332	-	-	-	-	790	1080	183
2	CC-5LP2	315	-	17	-	-	790	1080	183
3	CC-5LP8	315	-	-	17	-	790	1080	183
4	CC-5LP15	315	-	-	-	17	790	1080	183
5	CC-10LP2	299	-	33	-	-	790	1080	183
6	CC-10LP8	299	-	-	33	-	790	1080	183
7	CC-10LP15	299	-	-	-	33	790	1080	183
8	CC-20LP2	265	-	67	-	-	790	1080	183
9	CC-20LP8	265	-	-	67	-	790	1080	183
10	CC-20LP15	265	-	-	-	67	790	1080	183
11	CC-30FA	232	-	-	-	100	790	1080	183
12	CC-5LP2-25FA	232	83	17	-	-	790	1080	183
13	CC-5LP8-25FA	232	83	-	17	-	790	1080	183
14	CC-5LP15-25FA	232	83	-	-	17	790	1080	183
15	CC-10LP2-20FA	232	67	33	-	-	790	1080	183
16	CC-10LP8-20FA	232	67	-	33	-	790	1080	183
17	CC-10LP15-20FA	232	67	-	-	33	790	1080	183
18	CC-20LP2-10FA	232	33	67	-	-	790	1080	183
19	CC-20LP8-10FA	232	33	-	67	-	790	1080	183
20	CC-20LP15-10FA	232	33	-	-	67	790	1080	183

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของวัสดุ (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน (ไมโครเมตร)			ทราย	หิน	น้ำ
				2	8	15			
1	CC	332	-	-	-	-	970	1080	182
2	CC-5LP2	315	-	17	-	-	970	1080	182
3	CC-5LP8	315	-	-	17	-	970	1080	182
4	CC-5LP15	315	-	-	-	17	970	1080	182
5	CC-10LP2	299	-	33	-	-	970	1080	182
6	CC-10LP8	299	-	-	33	-	970	1080	182
7	CC-10LP15	299	-	-	-	33	970	1080	182
8	CC-30FA	232	100	-	-	-	970	1080	182
9	CC-25FA-5LP2	232	83	17	-	-	970	1080	182
10	CC-25FA-5LP8	232	83	-	17	-	970	1080	182
11	CC-25FA-5LP15	232	83	-	-	17	970	1080	182
12	CC-20FA-10LP2	232	67	33	-	-	970	1080	182
13	CC-20FA-10LP8	232	67	-	33	-	970	1080	182
14	CC-20FA-10LP15	232	67	-	-	33	970	1080	182

หมายเหตุ CC คือ คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

CC-25FA-5LP8 คือ คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนความละเอียด 8 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

การศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ สมบัติทางกล และความทนทานของวัสดุประสาน อันประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูนในครั้งนี้ ได้พิจารณาผลการศึกษา และวิเคราะห์ผล ในหัวข้อดังต่อไปนี้คือ องค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา สมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาซึ่งได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต กำลังอัดประลัย กำลังดึงแบบผ่าซีก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และในส่วนของความคงทนของคอนกรีต ประกอบไปด้วยการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ ความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีในครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนที่มีขนาดอนุภาค (d_{50}) เท่ากับ 2.8 และ 15 ไมโครเมตร (μm) และเถ้าลอย โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน

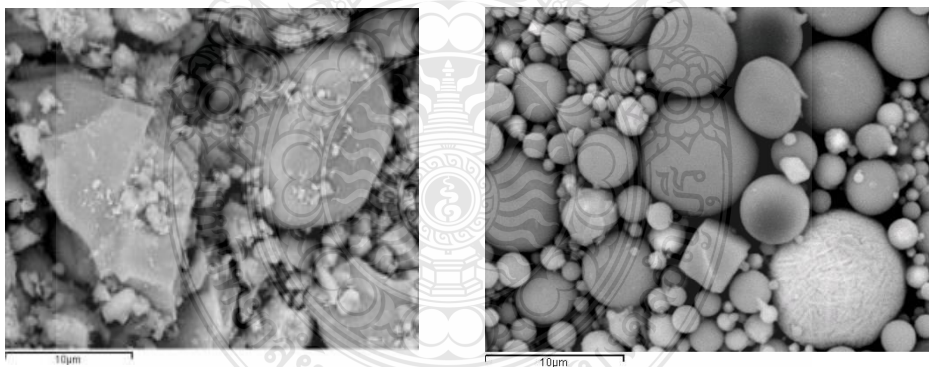
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูนที่มีขนาดอนุภาค (d_{50}) เท่ากับ 2.8 และ 15 ไมโครเมตร พบว่า ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.15 ในขณะที่ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 2.10 ส่วนผงหินปูนที่มีขนาด 2.8 และ 15 ไมโครเมตร (μm) มีค่าความถ่วงจำเพาะที่ใกล้เคียงกัน คือเท่ากับ 2.70 2.69 และ 2.68 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (3250 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม) ส่วนความละเอียดของเถ้าลอยนั้นมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3550 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ในขณะที่ผงหินปูนขนาด 2.8 และ 15 ไมโครเมตร มีค่าความละเอียดคือ 11180 10450 และ 9350 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน

รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูนขนาด (ไมครอน)		
			2	8	15
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.10	2.70	2.69	2.68
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3250	3550	11180	10450	9350

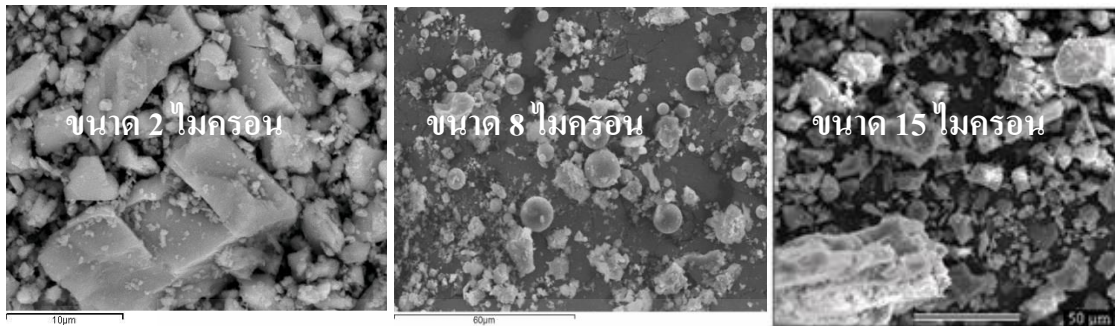
4.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาควัสดุประสาน

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ โดยวิธี SEM (Scanning Electronic Microscope) ซึ่งขยาย 3500 เท่า พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว (รูปที่ 4.1 (ก)) ส่วนกรณีของอนุภาคของเถ้าลอย (รูปที่ 4.1 (ข)) พบว่ามีลักษณะที่แตกต่างจากกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีลักษณะที่กลม ผิวเรียบ ในขณะที่กรณีของผงหินปูน (รูปที่ 4.3 (ค)) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่ขนาดของอนุภาคมีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับกัน



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

(ข) เถ้าลอย



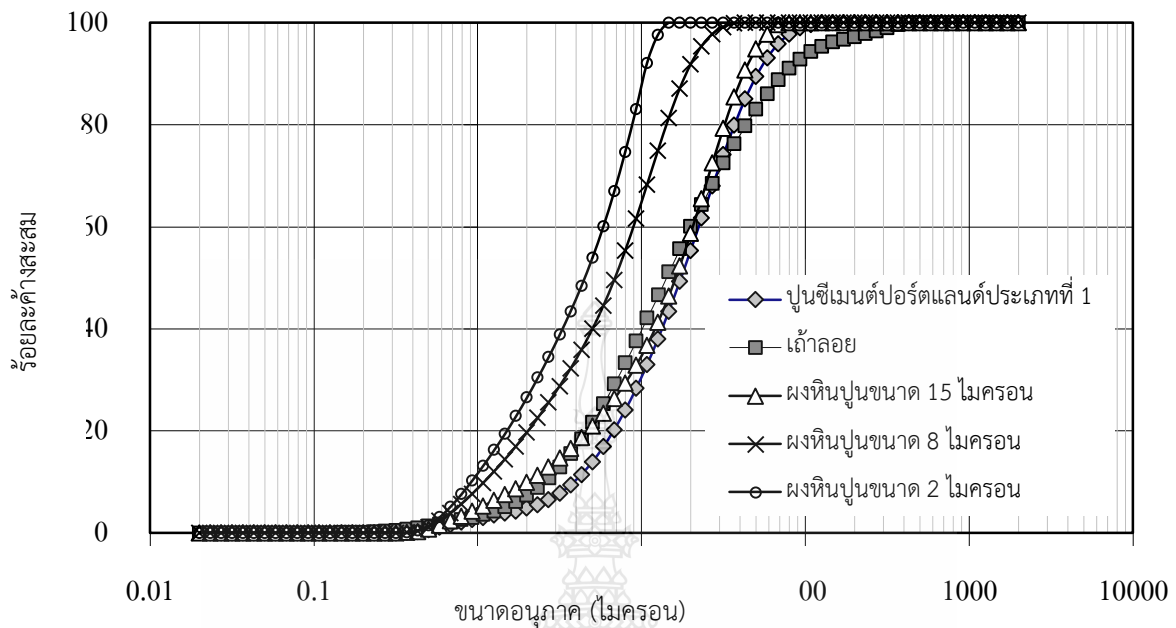
(ค) ผงหินปูน

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
 ใ้ล้ลลลล และผงหินปูน

4.1.3 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาควัสดุประสาน

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และร้อยละสะสมของขนาดอนุภาคเพื่อบอกถึงลักษณะการกระจายและขนาดเฉลี่ย (d_{50}) ของอนุภาคของวัสดุ ซึ่งพบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใ้ล้ลลลล เท่ากับ 17.48 และ 23.65 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ผงหินปูนที่มีขนาดเฉลี่ย 16.20 6.91 และ 2.04 ไมโครเมตร ซึ่งจะเห็นว่าผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร มีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ส่วนลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ พบว่าการกระจายของอนุภาคของผงหินปูนค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งขนาดส่วนที่ละเอียด และส่วนที่หยาบ ส่วนกรณีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะเห็นว่าค่อนข้างจับกลุ่มที่เหมือนกัน คือส่วนอนุภาคส่วนที่ละเอียดมีแนวโน้มว่ามีมากกว่าส่วนที่หยาบ ยกเว้นกรณีของใ้ล้ลลลลลลมีแนวโน้มว่าการกระจายตัวของอนุภาคส่วนที่หยาบมีมากกว่าส่วนละเอียด



รูปที่ 4.2 ขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและผงหินปูน

4.1.4 องค์ประกอบเคมีของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.2 แสดงถึงองค์ประกอบเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ วัสดุประสานดังกล่าวได้แก่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของเถ้าลอยมีค่าสูงเท่ากับร้อยละ 40.93 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.50 ในขณะที่ของผงหินปูนมี SiO_2 น้อยมาก (ร้อยละ 0.46) ในกรณีของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 22.42 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนเท่ากับร้อยละ 4.97 และ 0.06 ตามลำดับ ส่วนในกรณีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) นั้นพบว่า เถ้าลอย (ร้อยละ 13.63) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 65.38) และของผงหินปูนมีค่า CaO ประมาณร้อยละ 55.25

ในส่วนออกไซด์รองอื่นๆ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , TiO_2 , P_2O_5 , Free Lime และ สารที่ไม่ละลายในกรด (Insoluble Residue) นอกเหนือจากออกไซด์หลักที่กล่าวมาแล้ว พบว่าของปูนซีเมนต์แต่ละชนิด รวมทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกันนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ยกเว้นกรณีของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเผา (Loss on Ignition; LOI) ของผงหินปูนค่อนข้างสูงคือ ร้อยละ 43.79 43.12 และ 43.01 สำหรับผงหินปูนที่มีขนาดอนุภาค (d_{50}) เท่ากับ 2 8 และ 15 ไมโครเมตร (μm)

ตามลำดับ ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย เท่ากับร้อยละ 2.27 และ 0.46 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบเคมีของวัสดุประสานที่ใช้

ออกไซด์ (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน ขนาด (ไมโครเมตร)		
			2	8	15
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	19.50	40.93	0.46	0.45	0.44
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	4.97	22.42	0.06	0.05	0.06
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.78	13.64	0.03	0.03	0.02
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.38	13.63	55.25	55.20	55.23
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.08	2.93	0.37	0.34	0.36
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.16	1.92	< 0.01	< 0.01	< 0.01
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	< 0.01	0.89	< 0.01	< 0.01	< 0.01
โปตัสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.47	2.39	0.01	0.01	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจาก การเผา (LOI)	2.27	0.46	43.79	43.12	43.01
แคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO)	1.00	0.22	-	-	-
Insoluble Residue	0.28	-	-	-	-

4.2 สมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

สมบัติทางด้านซีเมนต์ (Cementitious Properties) ของวัสดุประสาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวที่พิจารณาได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ เวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump and Slump Loss) ของคอนกรีต กำลังอัดประลัย (Compressive Strength) กำลังดึงประลัยแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Strength) และโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีต รวมทั้งความคงทนของคอนกรีต ในด้านการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) และการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของมอร์ตาร์ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride Penetration Resistance) ของคอนกรีต และการขยายตัว (Expansion) ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

4.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 ถึง 4.4 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ที่ศึกษาในครั้งนี้ มีจำนวนทั้งสิ้น 20 สัดส่วนผสม โดยเปรียบเทียบระหว่างเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพสต์ผสมผงหินปูนที่มีขนาด 2 8 และ 15 ไมโครเมตร เพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ ร้อยละ 24.60 ส่วนเพสต์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ 23.30) ซึ่งน้อยกว่ากรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ 4.4) ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคกลมมนขึ้นจึงทำให้มีความต้องการน้ำลดลง เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน กับเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 10 และ 20 พบว่า เพสต์ผสมผงหินปูนทุกๆ อัตราส่วนผสมมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมสูงกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะอนุภาคผงหินปูนมีความเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น และโดยแนวโน้มที่ปรากฏยิ่งทำการเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนจะยิ่งทำให้เพิ่มปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกัน ผงหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่ามีผลทำให้เพสต์มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมสูงกว่าเพสต์ที่มีผงหินปูนที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคที่เล็กกว่าทำให้ต้องการน้ำที่ใช้เคลือบอนุภาคและสามารถเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเพื่อให้เพสต์เกิดการเข้ากันด้วยความชื้นเหลว (Consistency) ที่เหมาะสมได้ ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกันของปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

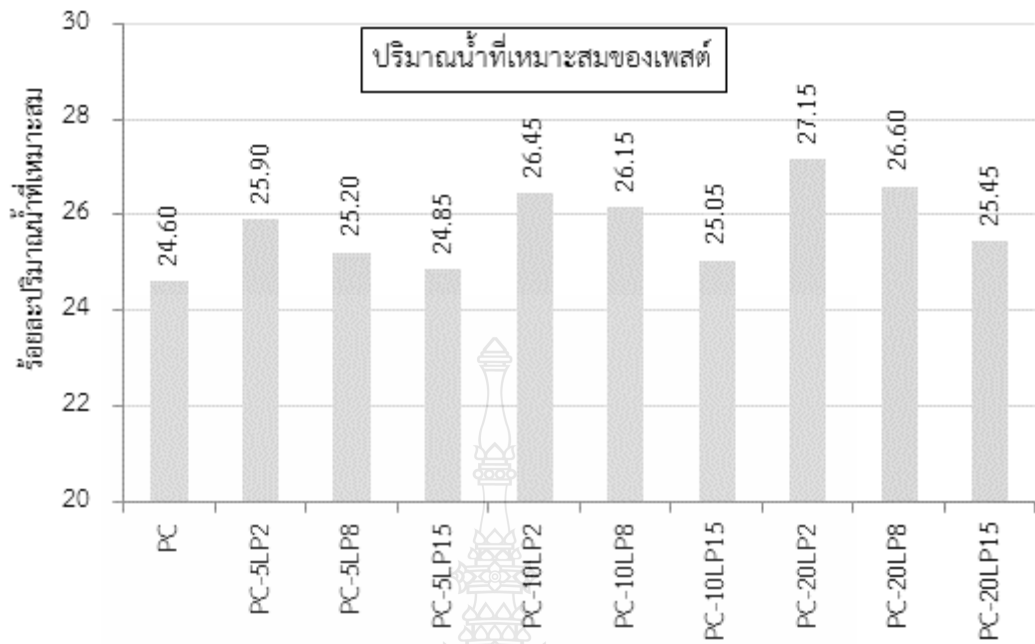
ส่วนกรณีของเพสต์ซึ่งทำการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ 4.4) พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 30 มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อปริมาณเถ้าลอยที่ลดลงจากร้อยละ 30 เป็น 25 20 และ 10 ตามลำดับ มีผลทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอยที่กลมดั่งที่กล่าวมาแล้ว ประกอบกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 10 และ 20 มีผลให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมไม่แตกต่างกัน ส่วนการแทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่ด้วยผงหินปูนดังกล่าวมาแล้ว

จากรูปที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่า ขนาดของผงหินปูนมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของเพสต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน กล่าวคือ เมื่อทำการเปรียบเทียบเพสต์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่ามีปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ที่สูงกว่าเพสต์ผสมผงหินปูนที่มีขนาดใหญ่กว่าด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในขณะเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบเพสต์ที่มีผงหินปูนขนาด

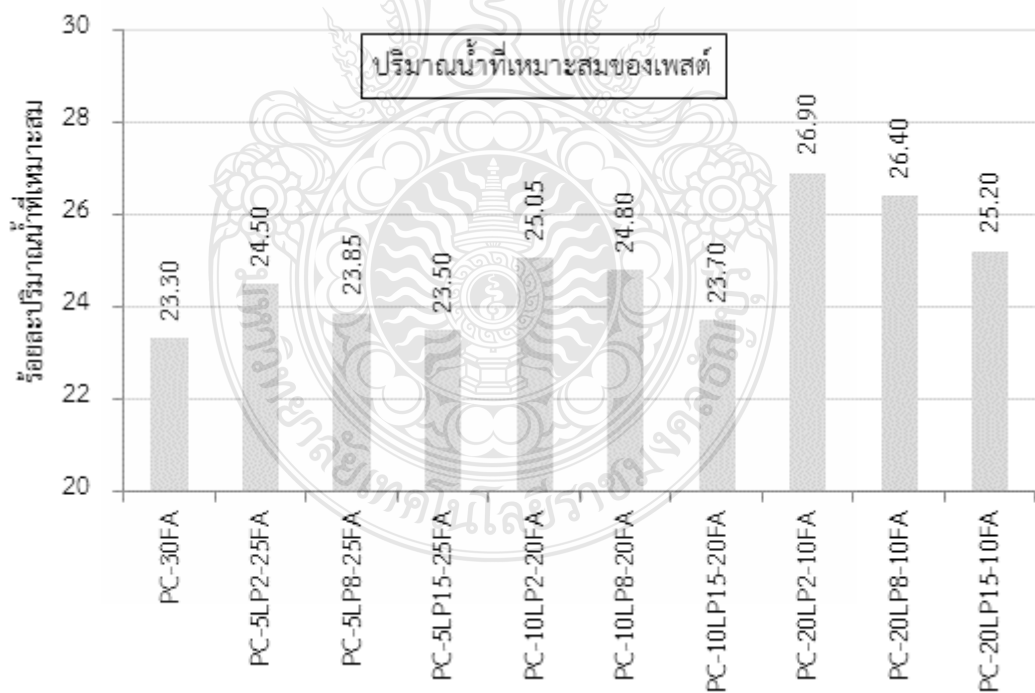
เดียวกัน การลดลงของปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยจากร้อยละ 30 เป็น 25, 20 และ 10 มีผลต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์และเวลาก่อตัวของเพสต์ที่ศึกษา

ลำดับ ที่	เพสต์	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก วัสดุประสาน)	ระยะเวลาการก่อตัว (นาที)	
			เริ่มต้น	สุดท้าย
1	PC	24.60	85.00	105.00
2	PC-5LP2	25.90	82.50	94.50
3	PC-5LP8	25.20	83.00	96.50
4	PC-5LP15	24.85	83.50	99.00
5	PC-10LP2	26.45	77.50	92.50
6	PC-10LP8	26.15	79.00	93.50
7	PC-10LP15	25.05	81.00	96.00
8	PC-20LP2	27.15	73.50	89.50
9	PC-20LP8	26.60	81.50	91.50
10	PC-20LP15	25.45	86.50	93.50
11	PC-30FA	23.30	107.00	133.00
12	PC-5LP2-25FA	24.50	103.50	116.50
13	PC-5LP8-25FA	23.85	104.50	118.50
14	PC-5LP15-25FA	23.50	105.00	121.50
15	PC-10LP2-20FA	25.05	97.50	113.50
16	PC-10LP8-20FA	24.80	99.50	115.00
17	PC-10LP15-20FA	23.70	101.00	117.00
18	PC-20LP2-10FA	26.90	92.50	109.50
19	PC-20LP8-10FA	26.40	99.50	111.00
20	PC-20LP15-10FA	25.20	108.50	114.50



รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้วน และเพสต์ผสมผงหินปูน



รูปที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้วน เพสต์ผสมเถ้าลอยและเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

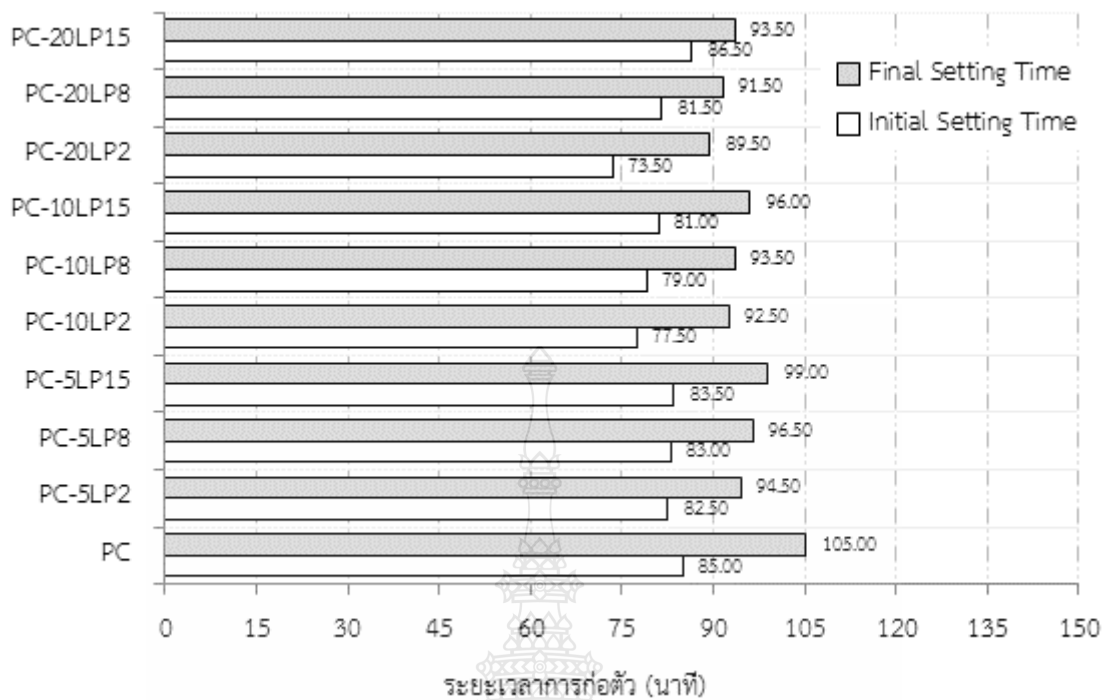
4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมผงหินปูน เพสต์ผสมเถ้าลอย และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีทั้งหมด 20 สัดส่วนผสม โดยศึกษาทั้งระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)

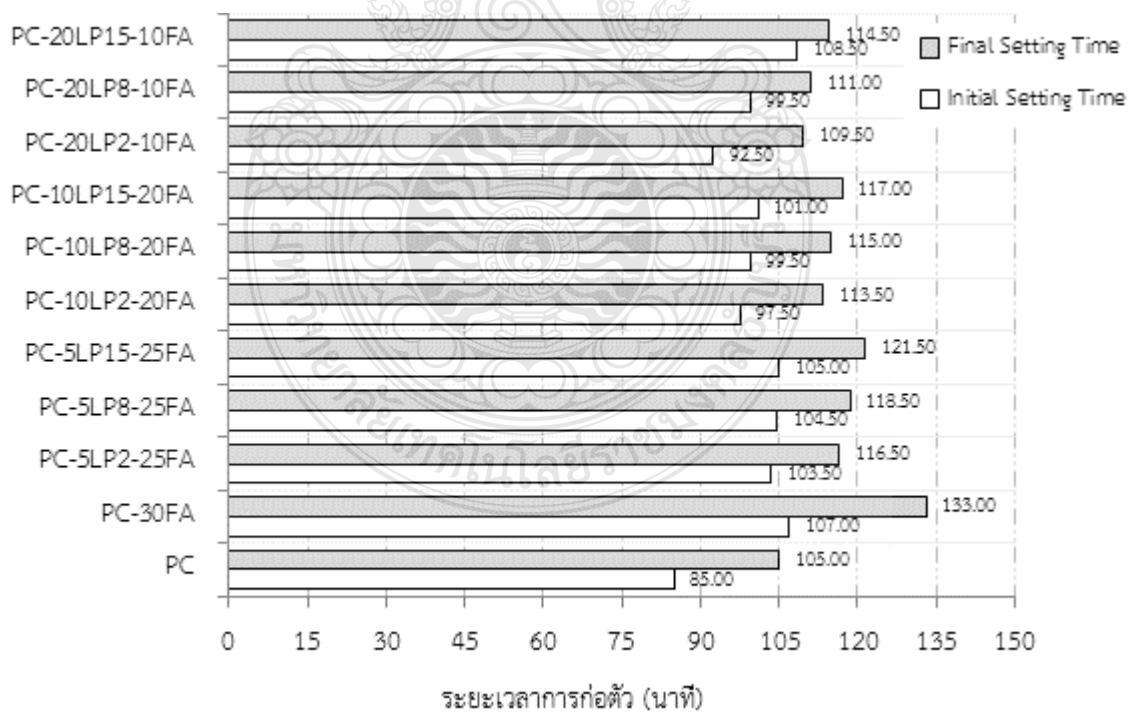
จากรูปที่ 4.5 พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าเท่ากับ 85 นาที ส่วนเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 (รูปที่ 4.6) มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (107 นาที) ซึ่งมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยมีสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับเพสต์ปูนผสมผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร ร้อยละ 5 10 และ 20 มีค่าน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน กล่าวคือเท่ากับ 82.50 77.50 และ 73.50 นาที ตามลำดับ แสดงว่าผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์มีผลช่วยเร่งการก่อตัวของเพสต์ได้เป็นอย่างดี โดยยิ่งแทนในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นและขนาดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่เล็กลงเวลาในการก่อตัวของเพสต์ก็จะยิ่งลดลง ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าส่วนของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในผงหินปูนละลายออกมารวมและตกผลึกเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเร็วขึ้นในสถานะที่มีไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) อยู่ในระบบปริมาณมากแล้ว

ส่วนกรณีของเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 4.6) พบว่า เพสต์ซึ่งมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้นมีผลทำให้เพสต์มีระยะเวลาของการก่อตัวเริ่มต้นยิ่งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน การแทนที่ทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ผลไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อพิจารณาผลของขนาดของผงหินปูน พบว่าผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่ามีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมผงหินปูนที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากความสามารถในการละลายของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ามีความเป็นไปได้มากกว่า

สำหรับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายในการศึกษาครั้งนี้ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นแต่มีค่าระยะเวลาในการก่อตัวที่มากกว่า



รูปที่ 4.5 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมผงหินปูน



รูปที่ 4.6 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอย และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

4.2.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

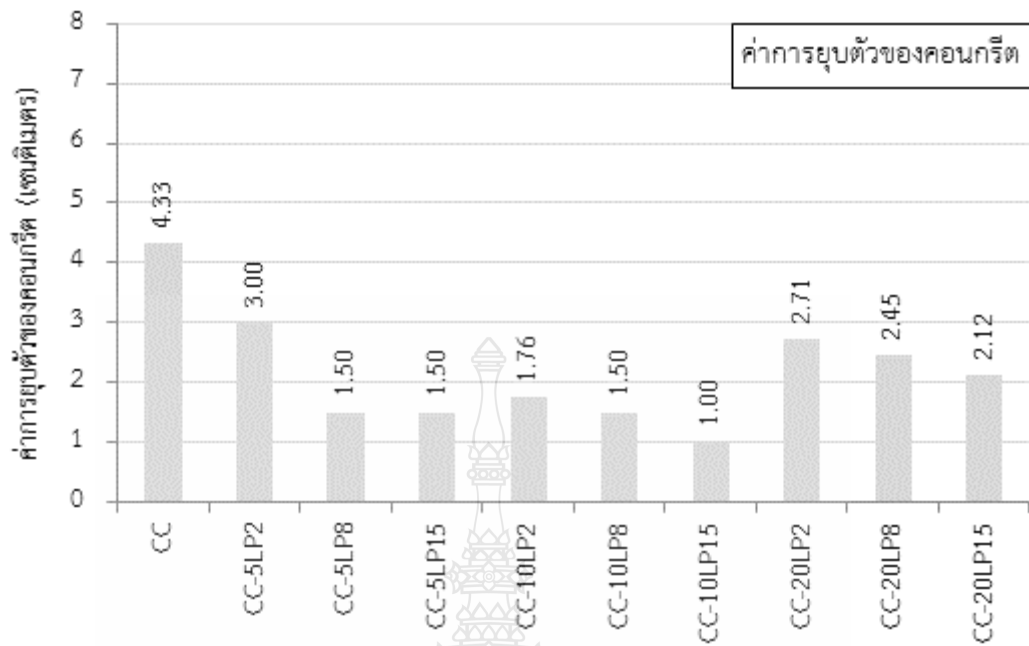
สำหรับค่าการยุบตัวเริ่มต้น (Initial Slump) ของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 จำนวนทั้งสิ้น 20 สัดส่วนผสม แสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตเปรียบเทียบกันระหว่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนกับคอนกรีตผสมผงหินปูน และรูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน กับค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

จากรูปที่ 4.7 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าเท่ากับ 4.33 เซนติเมตร สำหรับคอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 10 และ 20 มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน กล่าวคือในช่วง 1.00 และ 3.00 เซนติเมตร แสดงว่าการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยปริมาณที่มากขึ้นมีผลทำให้คอนกรีตมีความกระด้างเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำอิสระในคอนกรีตต้องใช้เพื่อเคลือบอนุภาคผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ส่วนกรณีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยใน (รูปที่ 4.8) พบว่า คอนกรีตมีค่าการยุบตัวที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น มีผลทำให้ค่าการยุบตัวยิ่งเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อแทนที่ร้อยละ 30 เท่ากับ 4.50 เซนติเมตร ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนมีค่าอยู่ในช่วง 2.40–5.33 เซนติเมตร ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะกลมมนดังที่กล่าวมาแล้ว ในขณะที่การแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 10 และ 20 ทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้อยกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 (C-30FA)

เมื่อพิจารณาผลกระทบของขนาดของผงหินปูนที่มีต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตผสมผงหินปูน (รูปที่ 4.7) ซึ่งเห็นถึงขนาดที่เล็กกว่าของผงหินปูนมีผลทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมากกว่าของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดที่เล็กย่อมดูดซับน้ำและทำให้โพสตีในคอนกรีตมีความหนืดสูงหรือก็คือมีการเปลี่ยนสภาพในสภาวะเหลวได้ดีกว่า จึงมีผลทำให้คอนกรีตมีค่าความยุบได้เป็นมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกันกับกรณีคอนกรีตมีส่วนผสมของเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 4.8)

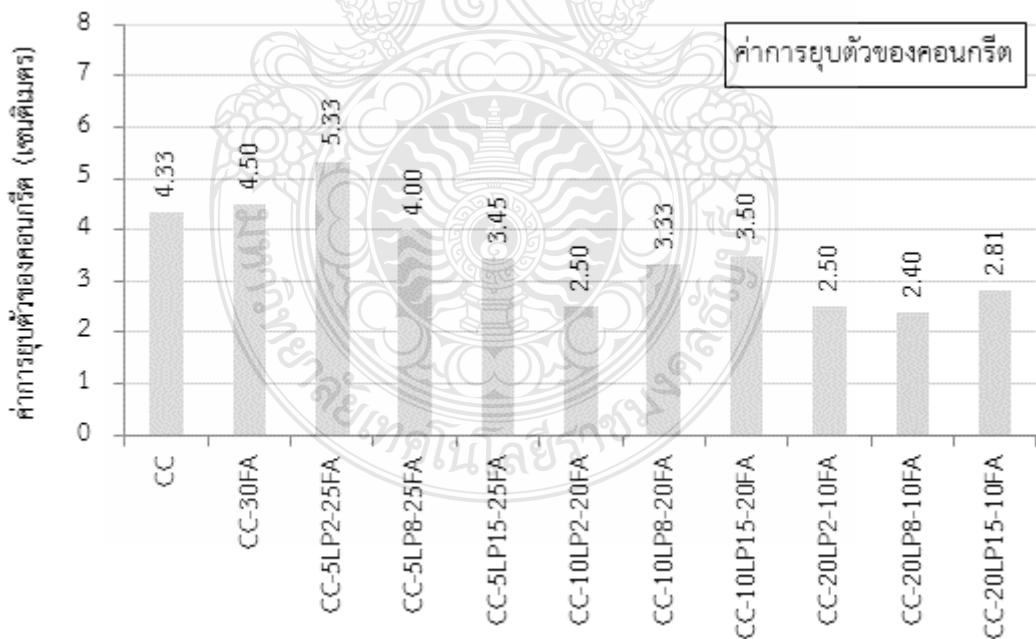
ตารางที่ 4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 ที่ใช้ใน
การศึกษา

ลำดับที่	คอนกรีต	ค่าการยุบตัว (ซม.)
1	CC	4.33
2	C-5LP2	3.00
3	C-5LP8	1.50
4	C-5LP15	1.50
5	C-10LP2	1.76
6	C-10LP8	1.50
7	C-10LP15	1.00
8	C-20LP2	2.71
9	C-20LP8	2.45
10	C-20LP15	2.12
11	C-30FA	4.50
12	C-5LP2-25FA	5.33
13	C-5LP8-25FA	4.00
14	C-5LP15-25FA	3.45
15	C-10LP2-20FA	2.50
16	C-10LP8-20FA	3.33
17	C-10LP15-20FA	3.50
18	C-20LP2-10FA	2.50
19	C-20LP8-10FA	2.40
20	C-20LP15-10FA	2.81



รูปที่ 4.7 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน

เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55



รูปที่ 4.8 ค่าการยวบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

4.2.4 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

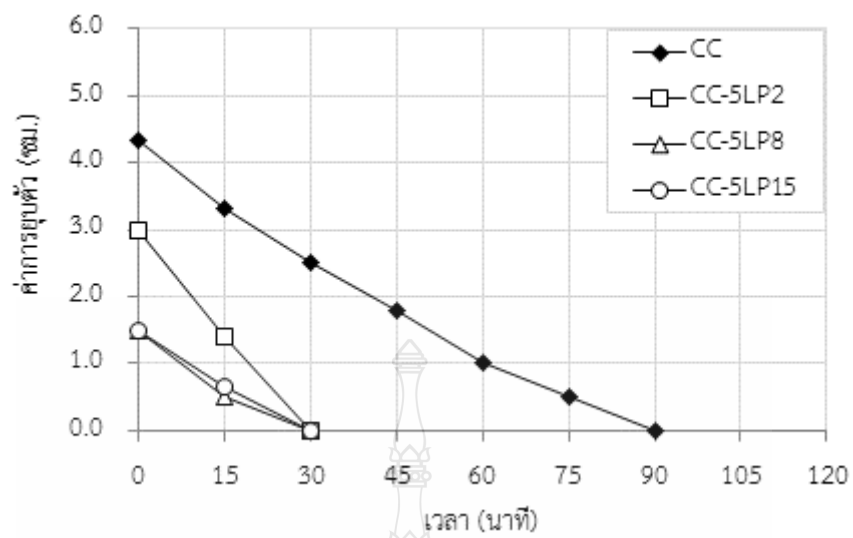
การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีต คือการที่คอนกรีตสูญเสียความเหลวหรือความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ (Fluidity) เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นปกติของคอนกรีตเมื่อน้ำอิสระถูกใช้เข้าไปในกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการดูดซับที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดขึ้นจากระเหยของน้ำอิสระ

รูปที่ 4.9 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน และรูปที่ 4.10 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่าแนวโน้มภาพรวมที่สำคัญ คือคอนกรีตผสมหินปูนมีแนวโน้มของการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตเร็วกว่าของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นได้ว่า การที่อนุภาคผงหินปูนมีความละเอียดมากกว่าของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงสามารถดูดซับน้ำอิสระได้มากกว่า ส่งผลให้คอนกรีตมีความกระด้าง (Stiff) ได้เร็วมากขึ้นตามไปด้วย

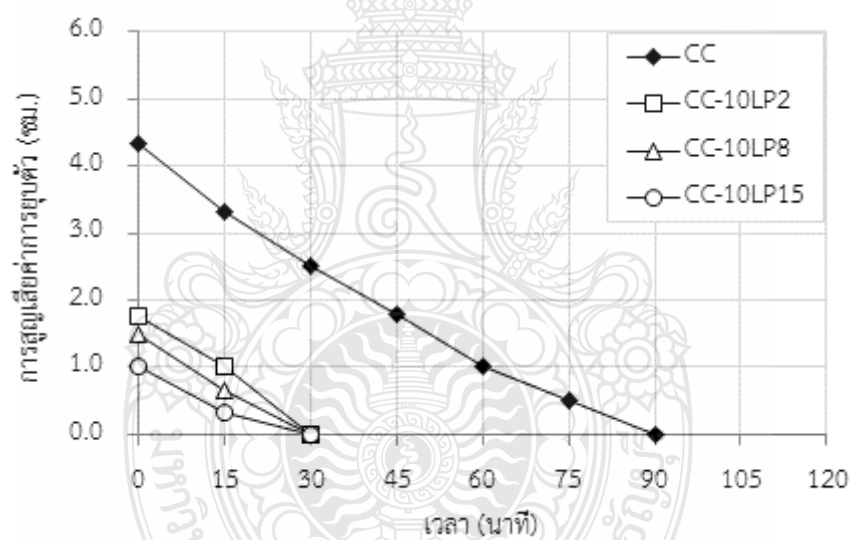
จากรูปที่ 4.9 โดยการแบ่งกลุ่มของการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตตามอัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนร้อยละ 5 (รูปที่ 4.9 (ก)) ร้อยละ 10 (รูปที่ 4.9 (ข)) และร้อยละ 20 (รูปที่ 4.9 (ค)) เปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน พบว่าในช่วงต้น (30 นาที แรก หลังทำการผสมคอนกรีตเสร็จ) คอนกรีตที่ผสมทั้งปูนซีเมนต์และผงหินปูนมีอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวสูงกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งจะสังเกตได้จากความชันของกราฟค่าการยุบตัวที่ค่อนข้างสูงประกอบกับการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตดังกล่าวมีต่ำกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน จนกระทั่งที่เวลาผ่านไป 30 นาที แรก คอนกรีตผสมผงหินปูนที่ร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ไม่มีค่าการยุบตัว ส่วนคอนกรีตผสมผงหินปูนที่ร้อยละ 20 เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที แรก คอนกรีตไม่มีค่าการยุบตัว

สำหรับกรณีที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 (C-30FA) ซึ่งดูได้จากความชันที่ค่อนข้างน้อยกว่า โดยในช่วง 30 นาที แรก มีค่าความชันหรืออัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวสูง ต่อมาจะลดลงในช่วง 30 ถึง 75 นาที และเพิ่มขึ้นหลังจากนั้นเล็กน้อย

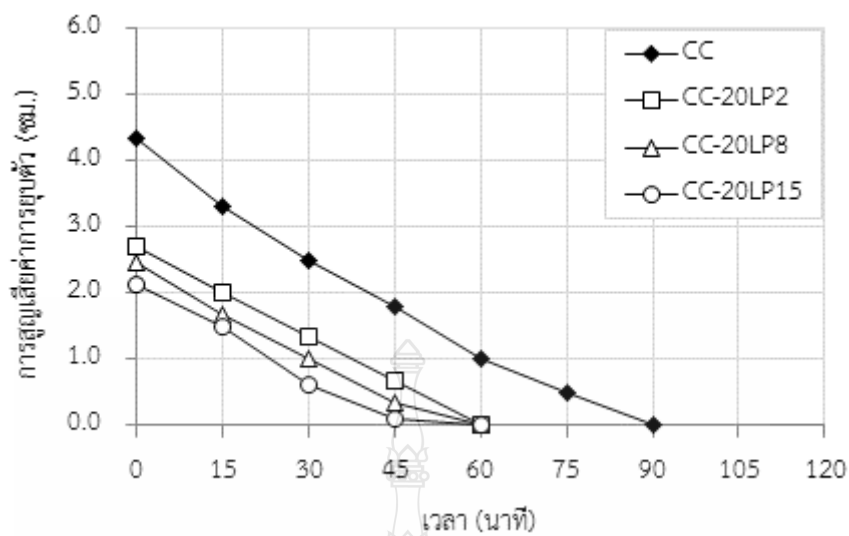
สำหรับผลกระทบของขนาดอนุภาคของผงหินปูนที่มีต่อการสูญเสียค่าการยุบตัว พบว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีอัตราการสูญเสียค่าการยุบตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวมีแนวโน้มไม่แน่นอน โดยที่เวลา 120 นาที ค่าการยุบตัวของทั้งอัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนทุกขนาดมีค่าเป็นศูนย์



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5

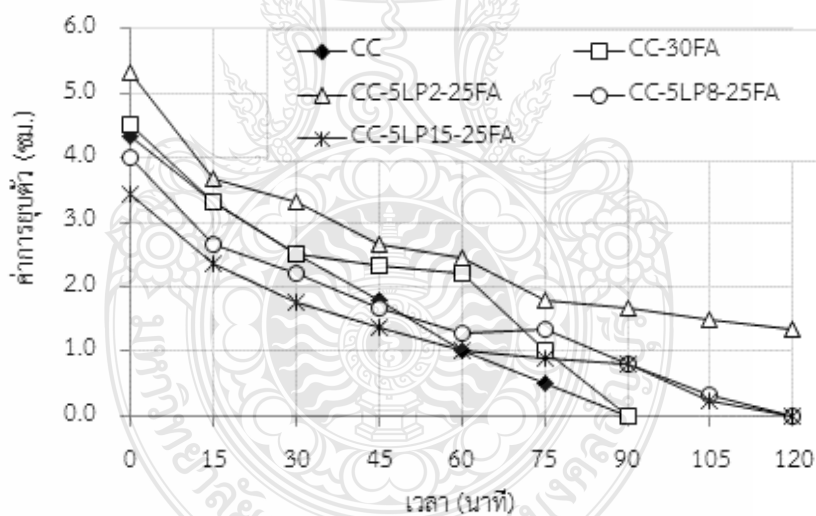


(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10

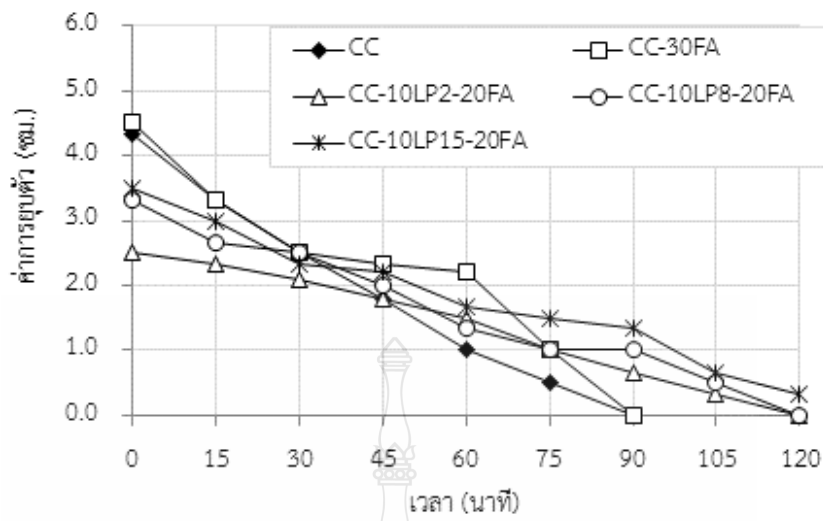


(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

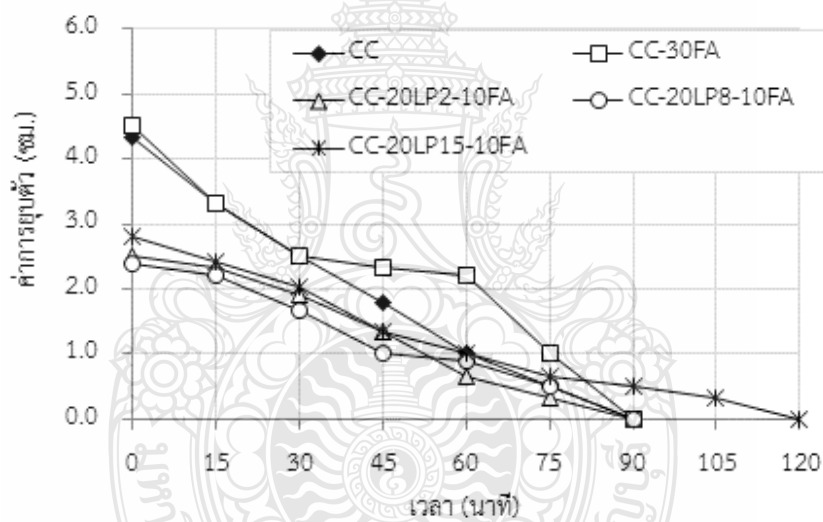
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยวบตัวกับระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวกับระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

4.2.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

รูปที่ 4.11 และ 4.12 และตารางที่ 4.5 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยเป็นกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร) โดยวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมผงหินปูน ผสมเถ้าลอย และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนและผงหินปูน

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 91 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าเท่ากับ 351.78 และ 373.22 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูน สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วนที่สำคัญ ตามปริมาณการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนที่ร้อยละ 5 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในส่วนที่ 1 ที่อัตราส่วนการที่ร้อยละ 5 มีประเด็นในการเปรียบเทียบ 3 ส่วนด้วยเช่นกัน กล่าวคือในกรณีของผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร (รูปที่ 4.11 (ก)) คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดในช่วง 7 วัน แรก ใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เล็กน้อย ยกตัวอย่างเช่น ที่อายุ 7 วัน คอนกรีตผสมผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร แทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 มีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 295.62 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สูงกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนร้อยละ 3.51 ในขณะที่อายุ 91 วัน ที่ค่าสูงกว่าร้อยละ 4.37 ส่วนคอนกรีตผสมผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร แทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่อายุ 7 วัน (รูปที่ 4.11 (ข)) มีกำลังอัดประลัยต่ำกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ร้อยละ 3.78 ที่อายุดังกล่าว นอกจากนั้นคอนกรีตผสมผงหินปูนขนาด 15 ไมโครเมตร (รูปที่ 4.11 (ค)) มีกำลังอัดประลัยคิดเป็นร้อยละ 7.82 ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ข้อสันนิษฐานที่ได้จากผลดังกล่าวคือ โดยรูปแบบของพฤติกรรมผงหินปูนในปูนซีเมนต์จะไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือต่อเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่เป็นกลไกทางด้านขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เข้าไปเติมแทรก (Filling Effect) ดังนั้นแนวโน้มที่สำคัญ คือยิ่งอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าของปูนซีเมนต์จะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีตได้ดีขึ้น ซึ่งหมายถึงเนื้อภายในคอนกรีตมีความอัดแน่นหรือหนาแน่นเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อเนื่องกำลังอัดประลัยที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาในส่วนของการแทนที่ด้วยผงหินปูนในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น พบว่า แนวโน้มของการเพิ่มขึ้นมีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร มีผลทำให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตสูงกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนผงหินปูนขนาด 8 และ 15 ไมโครเมตร มีผลต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใกล้เคียงและต่ำกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ตามลำดับ

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดประลัยที่อายุช่วงต้น (28 วันแรก) พบว่า ที่อัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนเท่ากับร้อยละ 5 ให้ค่าอัตราการพัฒนากำลังอัดประลัยของคอนกรีตสูงที่สุด ตามมาด้วยร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ ทั้งนี้ด้วยเหตุที่ว่า การแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชันได้

ปริมาณผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ลดลง ผลที่ได้คือ กำลังอัดประลัยมีอัตราการพัฒนาที่ลดลงตามไปด้วย

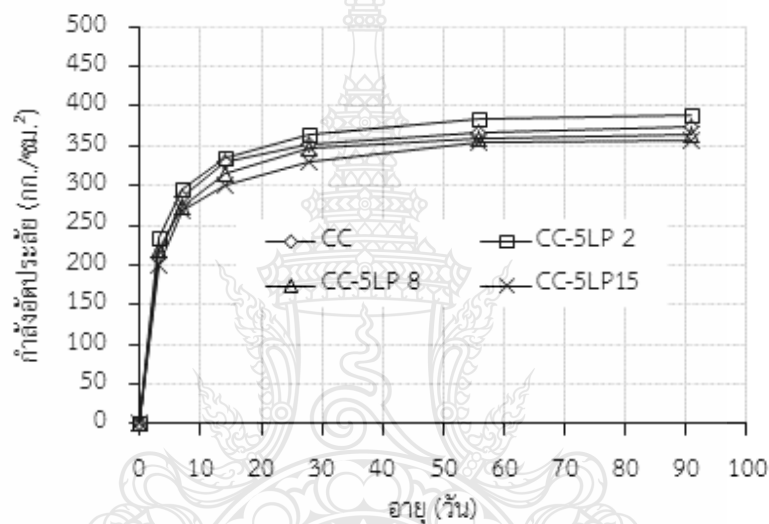
ในส่วนของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ระยะยาว ผงหินปูนไม่ส่งผลกระทบมาก ดังจะเห็นตัวอย่างได้จากคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยทำการแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.11 (ค)) กำลังอัดประลัยที่อายุ 91 วัน ไม่มีความแตกต่างไปจากที่อายุ 56 วันมาก ทั้งนี้ด้วยผลของผงหินปูนไม่ได้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องร่วมกับปูนซีเมนต์ จึงเป็นเพียงการเติมแทรกช่องว่างทางกายภาพเท่านั้น

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 91 วัน

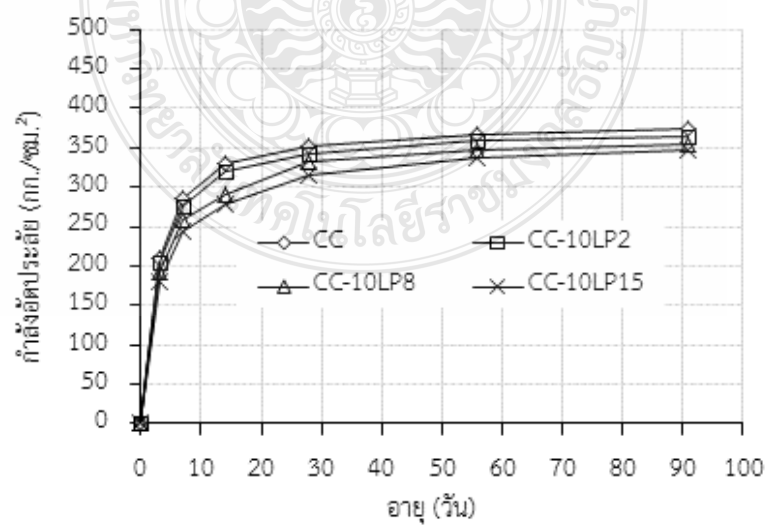
ลำดับที่	คอนกรีต	กำลังอัดประลัย (กก./ซม. ²)	
		บ่มน้ำ 28 วัน	บ่มน้ำ 91 วัน
1	CC	351.78	373.22
2	CC-5LP2	365.24	389.54
3	CC-5LP8	346.19	364.66
4	CC-5LP15	329.04	357.01
5	CC-10LP2	343.24	364.49
6	CC-10LP8	332.11	354.87
7	CC-10LP15	314.99	346.56
8	CC-20LP2	330.56	350.53
9	CC-20LP8	312.29	343.56
10	CC-20LP15	304.26	334.85
11	CC-30FA	296.71	363.35
12	CC-5LP2-25FA	286.75	340.02
13	CC-5LP8-25FA	263.51	330.98
14	CC-5LP15-25FA	259.00	306.06
15	CC-10LP2-20FA	272.07	320.25
16	CC-10LP8-20FA	256.71	305.38
17	CC-10LP15-20FA	230.52	280.64

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 91 วัน (ต่อ)

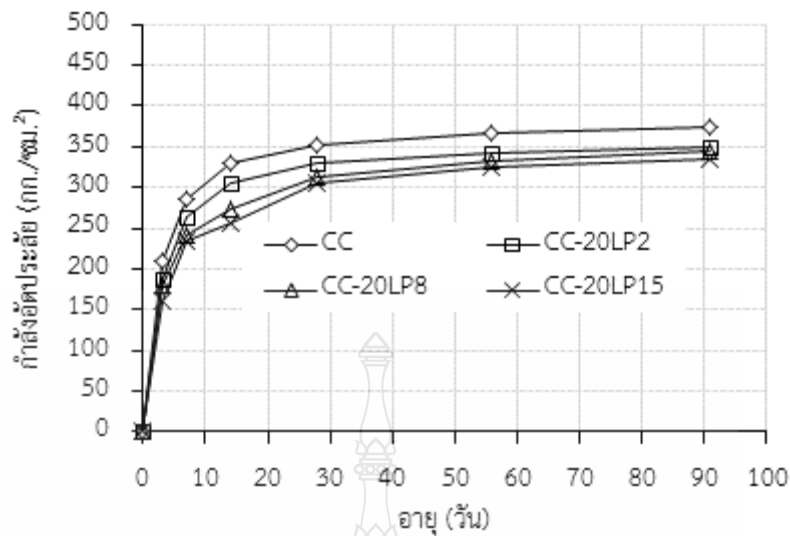
ลำดับที่	คอนกรีต	กำลังอัดประลัย (กก./ซม. ²)	
		บ่มน้ำ 28 วัน	บ่มน้ำ 91 วัน
18	CC-20LP2-10FA	258.08	310.52
19	CC-20LP8-10FA	235.89	284.73
20	CC-20LP15-10FA	221.41	264.87



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

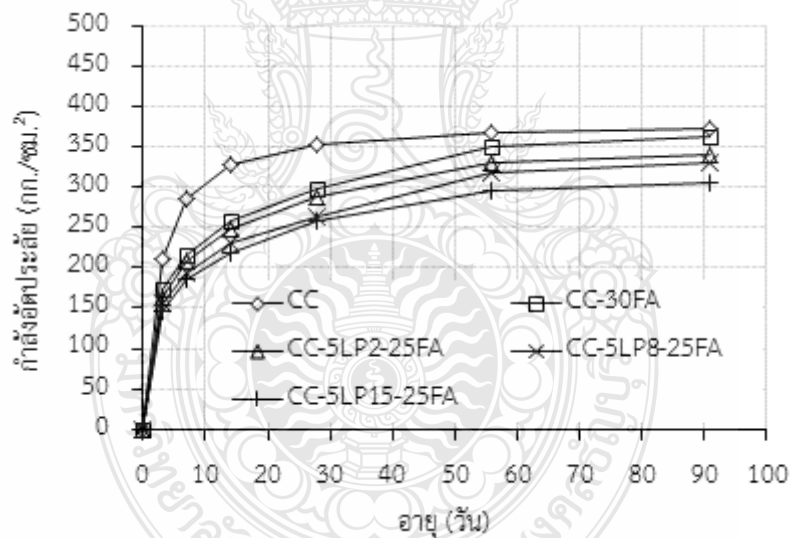
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยในกรณีนี้จะพิจารณาผลกระทบของปฏิกิริยาปอซโซลานร่วมกับการเติมแทรกด้วยซึ่งจะกำหนดขอบเขตของวัสดุแทนที่ทั้งสอง (ผงหินปูนและเถ้าลอย) เท่ากับร้อยละ 30 ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงหินปูนต่อเถ้าลอยเท่ากับ 5:25 (รูปที่ 4.12 (ก)) 10:20 (รูปที่ 4.12 (ข)) และ 20:10 (รูปที่ 4.12 (ค)) ตามลำดับ และทำการเปรียบเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30

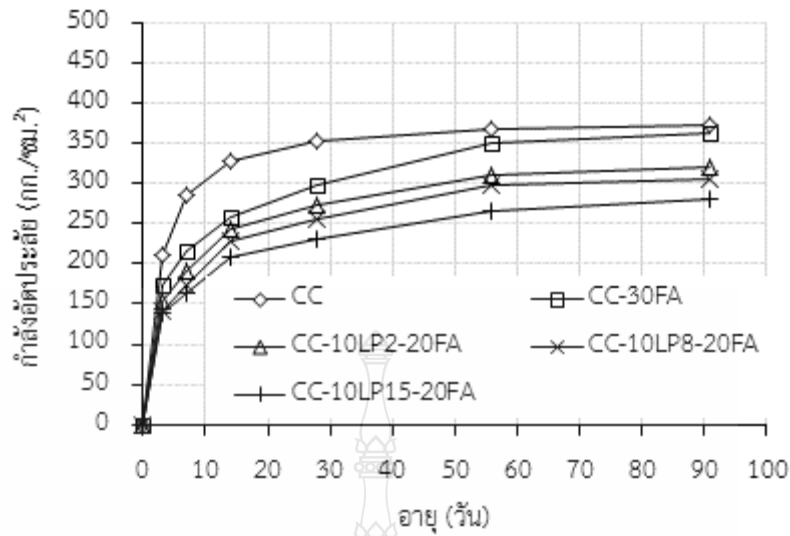
จากรูปที่ 4.12 (ก) คอนกรีตผสมผงหินปูนต่อเถ้าลอยที่อัตราส่วนเท่ากับ 5:25 โดยผงหินปูนมีขนาด 2 ไมโครเมตร มีการพัฒนากำลังอัดประลัยที่สูงกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ยกตัวอย่างที่อายุ 3 และ 7 วัน แรก คอนกรีตผสมผงหินปูนมีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 162.52 และ 207.67 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต่ำกว่าคิดเป็นร้อยละ 6.09 และ 3.59 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างเดียว ตามลำดับ สาเหตุสำคัญของการพัฒนาดังกล่าวมาจากผลของความละเอียดของผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้กลไกการเติมแทรกเป็นไปได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ผลของความละเอียดของผงหินปูนมีน้อยลงซึ่งจะดูได้จากในช่วงหลังจากคอนกรีตมีอายุ 14 วัน ถึง 28 วัน อัตราการพัฒนา กำลังอัดประลัยมีค่าลดลงมาก (เส้นกราฟลดความชันลงอย่างเห็นได้ชัด) แต่ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย เถ้าลอยจะที่ทำ

ปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องหลังจากอายุคอนกรีตที่ 14 วัน ภายใต้สภาวะความชื้นภายในเพียงพอจึงส่งผลให้ในช่วง 14 วัน ถึง 56 วัน คอนกรีตมีอัตราการพัฒนากำลังที่สูง เนื่องจากคอนกรีตมีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อผ่านช่วง 56 วัน ไปจนถึงอายุ 91 วัน

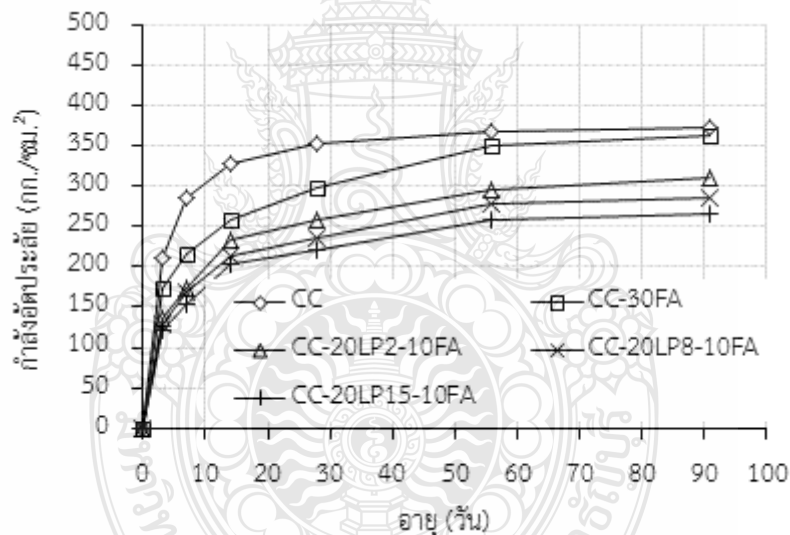
ในรูปที่ 4.12 (ก) เช่นเดียวกัน เมื่อขนาดของผงหินปูนเพิ่มขึ้นเป็น 8 และ 15 ไมโครเมตร การพัฒนากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีแนวโน้มค่อนข้างใกล้เคียงหรือต่ำกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เล็กน้อย ทั้งนี้ด้วยผลของเติมแทรกที่ลดลงเนื่องจากขนาดของผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ระยะนานขึ้น เถ้าลอยกลับมีส่วนช่วยในการพัฒนากำลังอัดประลัยได้เป็นอย่างดี ในส่วนของคอนกรีตผสมผงหินปูนต่อเถ้าลอยที่อัตราส่วนเท่ากับ 10:20 (รูปที่ 4.12 (ข)) และ 20:10 (รูปที่ 4.12 (ค)) มีแนวโน้มของการพัฒนากำลังประลัยที่มีลักษณะเดียวกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงหินปูนต่อเถ้าลอยเท่ากับ 5:25 แต่จะเห็นได้ว่าในช่วงคอนกรีตที่อายุ 14 วัน ถึง 28 วัน อัตราการพัฒนากำลังอัดประลัยกลับมีค่าที่สูงกว่า เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะมีการเสริมกันของกลไกการเติมแทรกของผงหินปูนร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยขึ้น



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

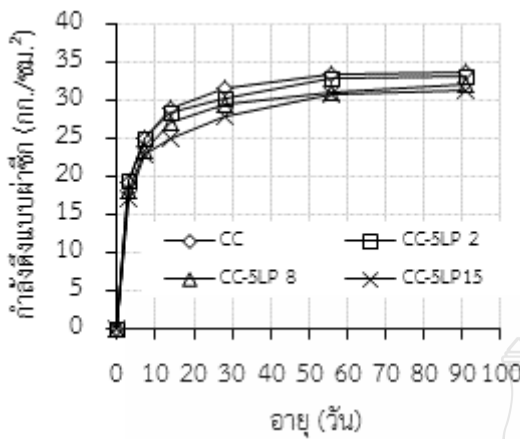
4.2.6 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมผงหินปูน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน แสดงดังตารางที่ 4.6

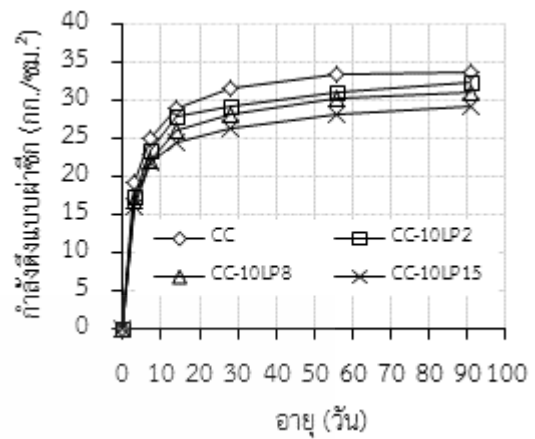
และรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่า การพัฒนากำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตนั้นไปในทิศทางเดียวกับของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต กล่าวคือ คอนกรีตที่กำลังอัดประลัยที่มาก ก็จะมีแนวโน้มให้กำลังดึงแบบผ่าซีก ก็จะมากตามไปด้วย ส่วนความสัมพันธ์อื่นๆ ก็ไปในทิศทางเดียวกับของการรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต อย่างเช่น ขนาดความละเอียดของผงหินปูน เป็นต้น เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

ตารางที่ 4.6 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 และ 91 วัน

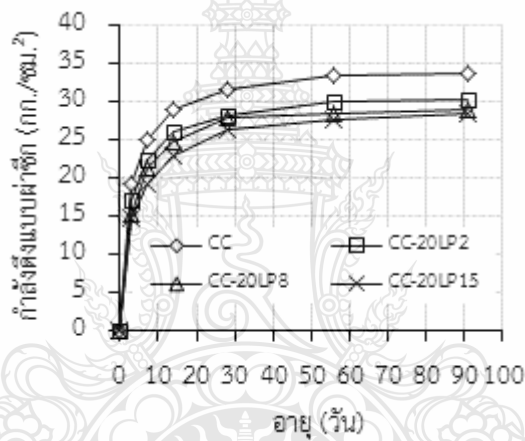
ลำดับที่	คอนกรีต	กำลังดึงประลัยแบบผ่าซีก (กก./ซม. ²)	
		บ่มน้ำ 28 วัน	บ่มน้ำ 91 วัน
1	CC	31.44	33.62
2	CC-5LP2	30.29	33.07
3	CC-5LP8	29.44	32.02
4	CC-5LP15	27.97	31.16
5	CC-10LP2	29.28	32.31
6	CC-10LP8	28.04	31.01
7	CC-10LP15	26.26	29.08
8	CC-20LP2	28.26	30.19
9	CC-20LP8	27.80	29.04
10	CC-20LP15	26.31	28.26
11	CC-30FA	26.68	32.28
12	CC-5LP2-25FA	23.82	29.09
13	CC-5LP8-25FA	22.70	27.34
14	CC-5LP15-25FA	21.41	25.21
15	CC-10LP2-20FA	22.55	26.84
16	CC-10LP8-20FA	21.21	25.03
17	CC-10LP15-20FA	18.95	22.75
18	CC-20LP2-10FA	21.33	25.63
19	CC-20LP8-10FA	19.41	24.21
20	CC-20LP15-10FA	18.16	22.38



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5

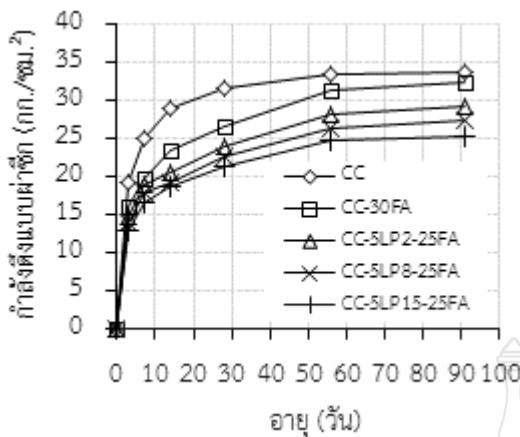


(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10

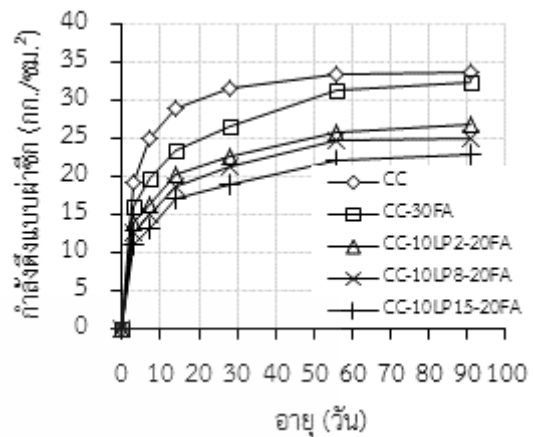


(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

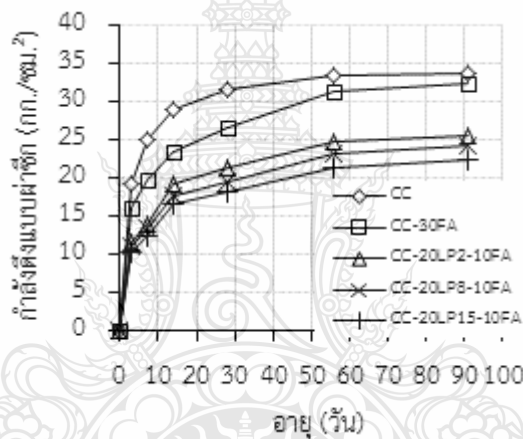
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงแบบผ่าซีกกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

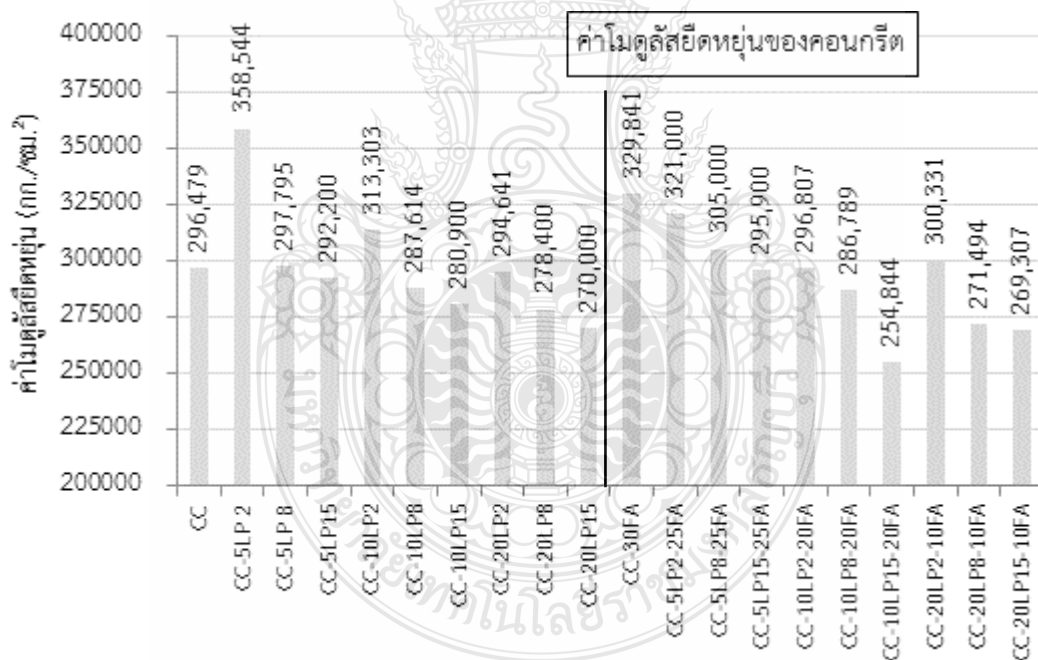
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงแบบผ่าซีกกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.2.7 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นดัชนีสมบัติทางกลในการบ่งชี้ความสามารถในด้านทานการเสีรูปภายใต้น้ำหนักกระทำ จากการศึกษาในครั้งนั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมผงหินปูน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน แสดงตามรูปที่ 4.15 พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน ค่าอยู่ในช่วง 2.91×10^5 ถึง 3.59×10^5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน อยู่

ในช่วง 2.55×10^5 ถึง 3.30×10^5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยในนี้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตรมีค่ามากกว่าของผงหินปูนขนาด 8 และ 15 ไมโครเมตรตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จะให้ผลไปในทิศทางเดียวกับของกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต

โดยการแบ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตออกเป็นสองส่วนเช่นเดียวกับค่ากำลังอัดประลัย ส่วนที่ 1 คอนกรีตผสมผงหินปูนพบว่าผงหินปูนที่มีขนาด 2 ไมโครเมตร มีค่าสูงสุด โดยเฉพาะที่อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับร้อยละ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างที่มีความอัดแน่นมากที่สุด ในขณะที่การผงหินปูนที่มีขนาด 8 และ 15 ไมโครเมตร กลับมีค่าลดต่ำลง และส่วนที่ 2 คือ คอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันลักษณะเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบทั้งสองกลุ่มแล้ว คอนกรีตผสมผงหินปูนและเถ้าลอยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของสูงกว่ากลุ่มคอนกรีตผสมผงหินปูน ด้วยเหตุผลจากปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย



รูปที่ 4.15 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ที่อายุการบ่มน้ำที่ 28 วันของตัวอย่างคอนกรีต

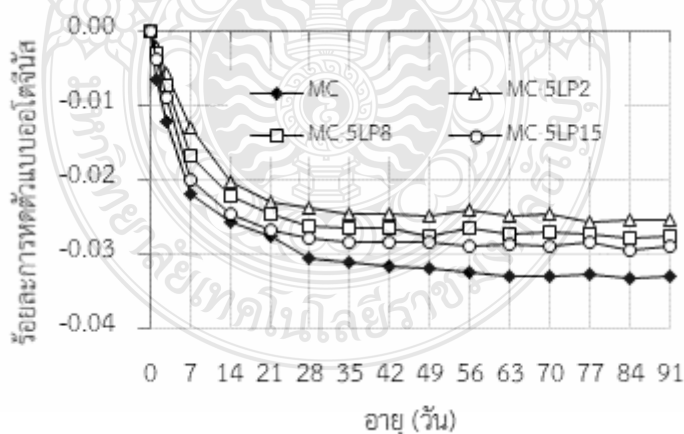
4.3 สมบัติความคงทนของคอนกรีต

4.3.1 การหดตัวของบ่อโตนีลของมอร์ตาร์

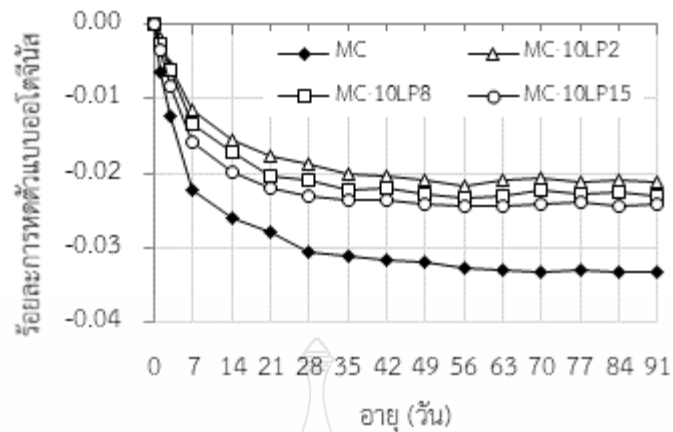
โดยกลไกหลักของหดตัวของบ่อโตนีล คือการสูญเสียน้ำภายในโพรงเนื้อของเพสต์ให้กับปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยไม่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำออกจากเนื้อเพสต์ทำให้ภายในโพรงมีความดันติดลบ จึงเกิดการหดตัวหรืออาจจะเรียกว่าการสูญเสียน้ำด้วยตัวเพสต์เอง (Self-desiccation) สำหรับปัจจัยที่ผลต่อการหดตัวประเภทนี้อยู่ที่ปริมาณน้ำ ลักษณะเฉพาะของโพรง และเนื้อเพสต์

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของบ่อโตนีลกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า การหดตัวของบ่อโตนีลของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้การต้องการน้ำไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง จึงทำให้การหดตัวของบ่อโตนีลมีค่าลดลง รวมทั้งผงหินปูนไปช่วยในการเติมเต็มจึงช่วยให้โครงสร้างของเพสต์สามารถต้านทานการหดตัวได้มากขึ้น

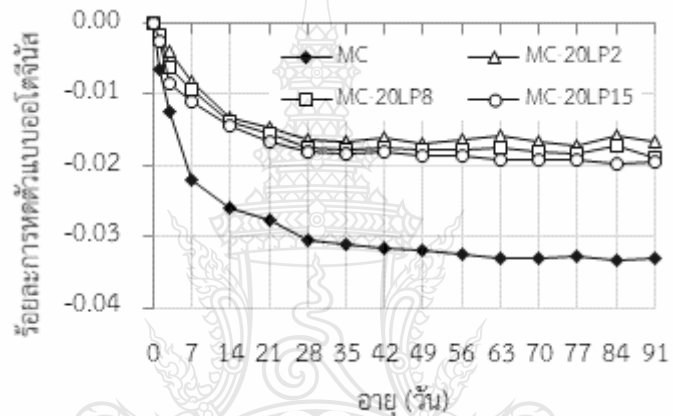
ส่วนการหดตัวของบ่อโตนีลของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่ามีแนวโน้มว่าจะมีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ของผงหินปูนที่มีความหยาบกว่า ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่าสามารถเข้าไปเติมเต็มได้ดีกว่า ส่งผลให้เพสต์มีความหนาแน่นมากขึ้น จึงทำให้สามารถต้านทานการหดตัวได้ดีกว่า



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



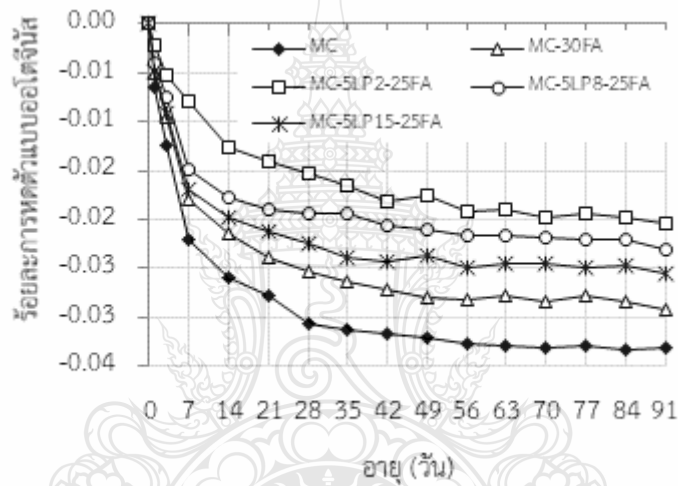
(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

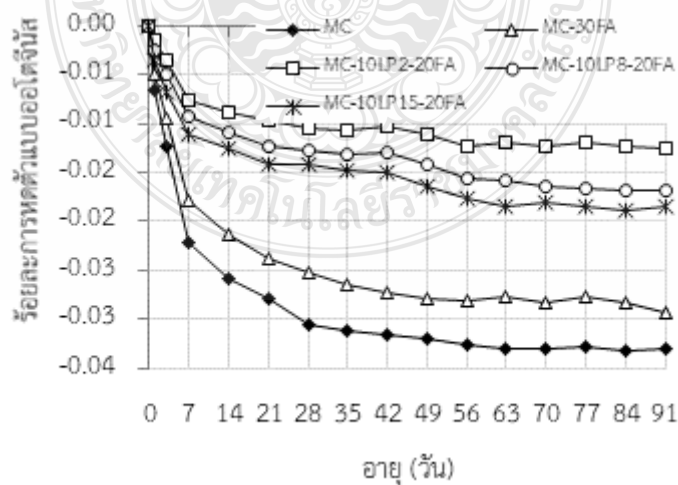
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่า การหดตัวแบบอโตจีนัสของมอร์ตาร์ มีแนวโน้มค่าการหดตัวของมอร์ตาร์มีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ มีอัตราสูงในช่วงต้นแล้วลดลงในช่วงหลัง โดยเฉพาะในช่วง 28 วัน แรก ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างเพสตีในมอร์ตาร์มีความแข็งแรงมากขึ้นตามปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้นซึ่งให้มีความสามารถในการต้านทานการหดตัวได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงต้น

สำหรับอิทธิพลของการผสมเถ้าลอยและผงหินปูน พบว่า การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ต่ำกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่ภายในเนื้อมอร์ตาร์มีแนวโน้มของปริมาณน้ำอิสระที่มากกว่าจากการที่เถ้าลอยมีลักษณะกลมมนช่วยให้น้ำอิสระไปเกาะกับผิวของอนุภาคร่วมกับการที่น้ำที่ผิวของผงหินปูน ดังนั้นจึงมีน้ำเหลือในโพรงได้มากขึ้น ส่งผลต่อเนื่องถึงความดันภายในโพรงที่ลดลงไม่มีซึ่งหมายถึงการหดตัวย่อมเกิดขึ้นได้น้อยลง

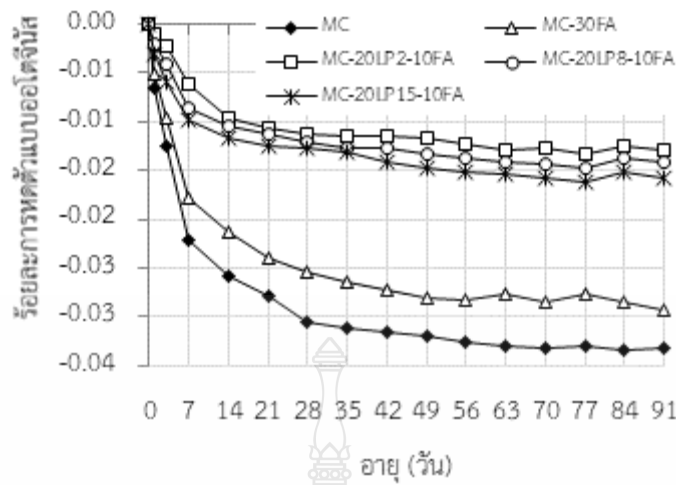
จากการเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคของผงหิน พบว่า มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่ามีการหดตัวแบบออโตจีนัสที่ต่ำกว่า เนื่องจากน้ำที่สะสมไว้ด้วยผงที่ขนาดเล็กกว่ามีปริมาณมากกว่าทำให้มีน้ำอิสระในระบบของโพรงได้มากกว่า



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

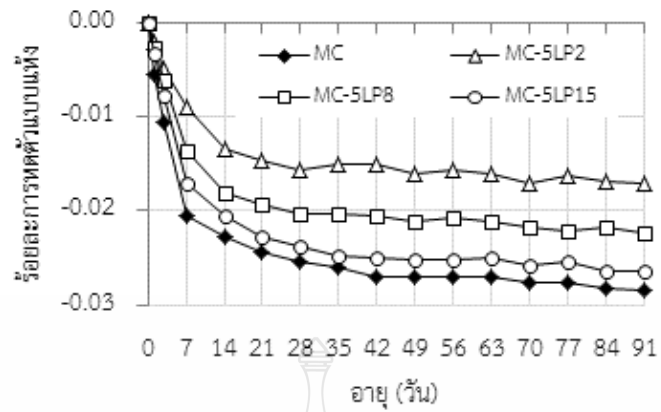
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอย และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.3.2 การหดตัวแบบแห้ง

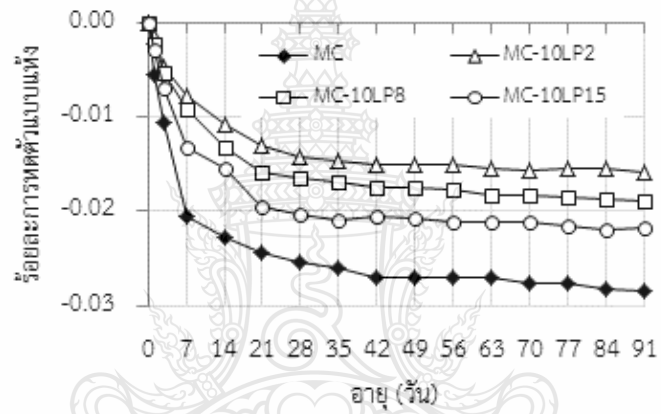
การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) เกิดขึ้นจากการสูญเสียน้ำ (Water) หรือความชื้น (Moisture) จากภายในเนื้อมอร์ตาร์ให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งมีความชื้นที่ต่ำกว่า โดยค่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มอร์ตาร์ผสมผงหินปูน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ สามารถสรุปโดยภาพรวมคือ ในช่วง 7 ถึง 28 วันแรก อัตราการหดตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์มีแนวโน้มลักษณะเดียวกัน กล่าวคือมีอัตราการลดลงที่สูง หลังจากนั้นการหดตัวมีอัตราที่ลดลงและเกือบเข้าใกล้ค่าคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงระยะเริ่มต้น ทั้งนี้เกิดขึ้นจากเมื่อปริมาณการสูญเสียน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้มอร์ตาร์มีค่าการหดตัวแบบแห้งในรูปของความเครียดเพิ่มขึ้นในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของมอร์ตาร์ที่ลดลงไม่เท่ากับปริมาณของน้ำที่สูญเสียทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการยึดรั้งของทั้งโครงสร้างเพสต์และมวลรวม (ทราย) ที่ต้านทานการหดตัวที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ในช่วงระยะปลายโครงสร้างของมอร์ตาร์มีความทึบน้ำหรือความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือปริมาณน้ำอิสระที่ฝังตัวอยู่ในโพรงคาพิลลารี (Capillary) มีปริมาณลดลง จึงทำให้ปริมาณน้ำที่สูญเสียลดลงตามไปด้วยส่งผลสุดท้ายทำให้การหดตัวลดลงในช่วงดังกล่าว

รูปที่ 4.18 แสดงค่าร้อยละของการหดตัวแบบแห้งที่ระยะเวลาในการบ่มแห้งจนถึงอายุ 91 วัน ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน โดยแบ่งกลุ่มของการแสดงค่าการหดตัวตามอัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนร้อยละ 5 (รูปที่ 4.18 (ก)) ร้อยละ 10 (รูปที่ 4.18 (ข)) และร้อยละ 20 (รูปที่ 4.18 (ค)) เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน พบว่า ที่อัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนร้อยละ 5 (รูปที่ 4.18 (ก)) มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีค่าการหดตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยยิ่งผงหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ค่าการหดตัวยิ่งมีค่าลดลงตามไปด้วย สาเหตุสำคัญอยู่ที่ขนาดที่เล็กของอนุภาคผงหินปูนจะยิ่งช่วยอุดโพรงคาพิวลารีให้มีขนาดเล็กลงส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกได้ยากและปริมาณลดลง โดยที่อายุ 91 วัน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนมีค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ -0.017, -0.022 และ -0.026 สำหรับผงหินปูนขนาด 2.8 และ 15 ไมโครเมตร ตามลำดับ (ค่าที่ติดลบแสดงว่ามีค่าหดตัว โดยยิ่งติดลบน้อยจะมีค่าการหดตัวน้อย ในขณะที่ยิ่งติดลบมากจะมีค่าการหดตัวมาก) หรือเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ที่มีค่าร้อยละ -0.029 อีกส่วนหนึ่งอัตราการหดตัวแบบแห้ง (ร้อยละค่าการหดตัวเทียบกับเวลา) ในช่วงต้นของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน อีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลดังกล่าวได้รับอิทธิพลมาจากขนาดอนุภาคของผงหินปูนตั้งแต่เริ่มต้นบ่มแห้ง

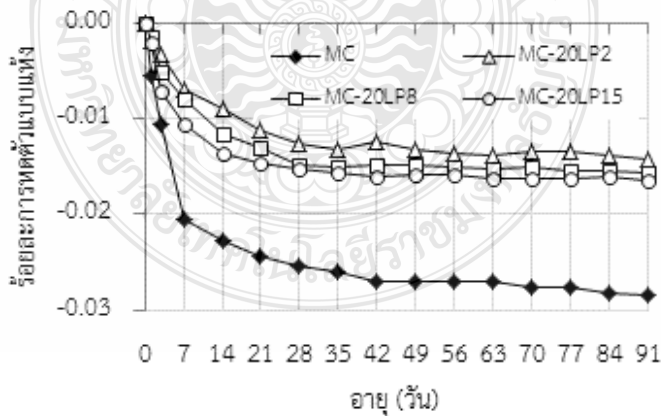
สำหรับมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนร้อยละ 10 (รูปที่ 4.18 (ข)) และร้อยละ 20 (รูปที่ 4.18 (ค)) มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับกรณีการแทนที่ของผงหินปูนร้อยละ 5 กล่าวคือ มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีค่าการหดตัวที่อายุ 91 วัน ต่ำกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยที่อัตราส่วนของผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ตาร์มีค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ -0.016, -0.019 และ -0.022 สำหรับผงหินปูนขนาด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีค่าการหดตัวที่อายุ 91 วัน ต่ำกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยที่อัตราส่วนของผงหินปูนร้อยละ 20 มอร์ตาร์มีค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ -0.014, -0.016 และ -0.017 สำหรับผงหินปูนขนาด 2.8 และ 15 ไมโครเมตร ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



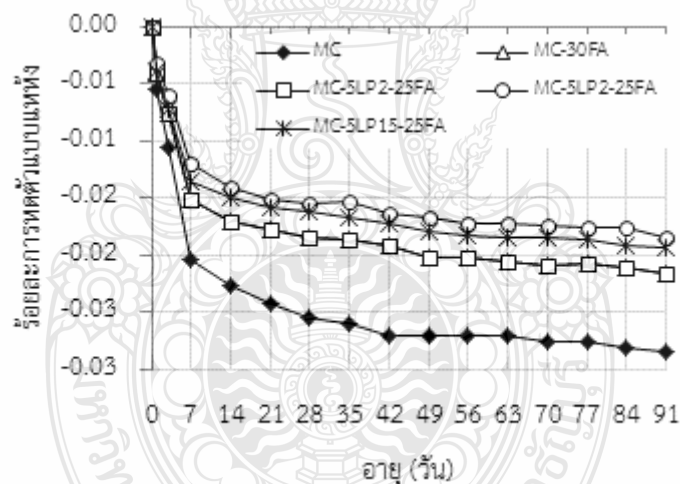
(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



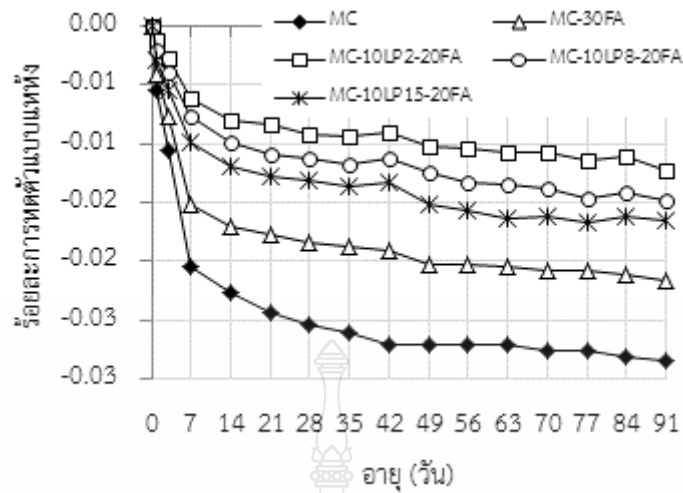
(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

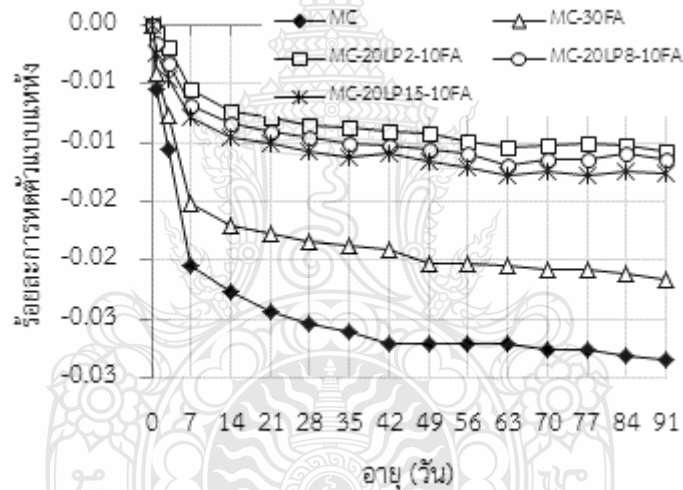
รูปที่ 4.19 แสดงค่าร้อยละของการหดตัวแบบแห้งที่ระยะเวลาในการบ่มแห้งจนถึงที่อายุ 91 วัน ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผสมผงหินปูน โดยแบ่งกลุ่มของการแสดงค่าการหดตัวประกอบด้วย การแทนที่ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนขนาด 2 8 และ 15 ไมโครเมตร ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุผง (รูปที่ 4.19 (ก)) โดยทำการแทนที่ด้วยผงหินปูนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง (รูปที่ 4.19 (ข)) และ โดยทำการแทนที่ด้วยผงหินปูนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุผง และเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุผง (รูปที่ 4.19 (ค)) เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และมอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน พบว่า มอร์ตาร์เถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่าการหดตัวแบบแห้งต่ำกว่ามอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แสดงว่าที่ทุกอัตราส่วนการแทนที่ของผงหินปูนมีผลต่ออัตราการสูญเสียน้ำอิสระที่มีในมอร์ตาร์ โดยอนุภาคผงหินปูนที่มีขนาดเล็กลงมีค่าการหดตัวของมอร์ตาร์ลดลงตามไปด้วย



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



(ค) ผสมผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอย และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.3.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

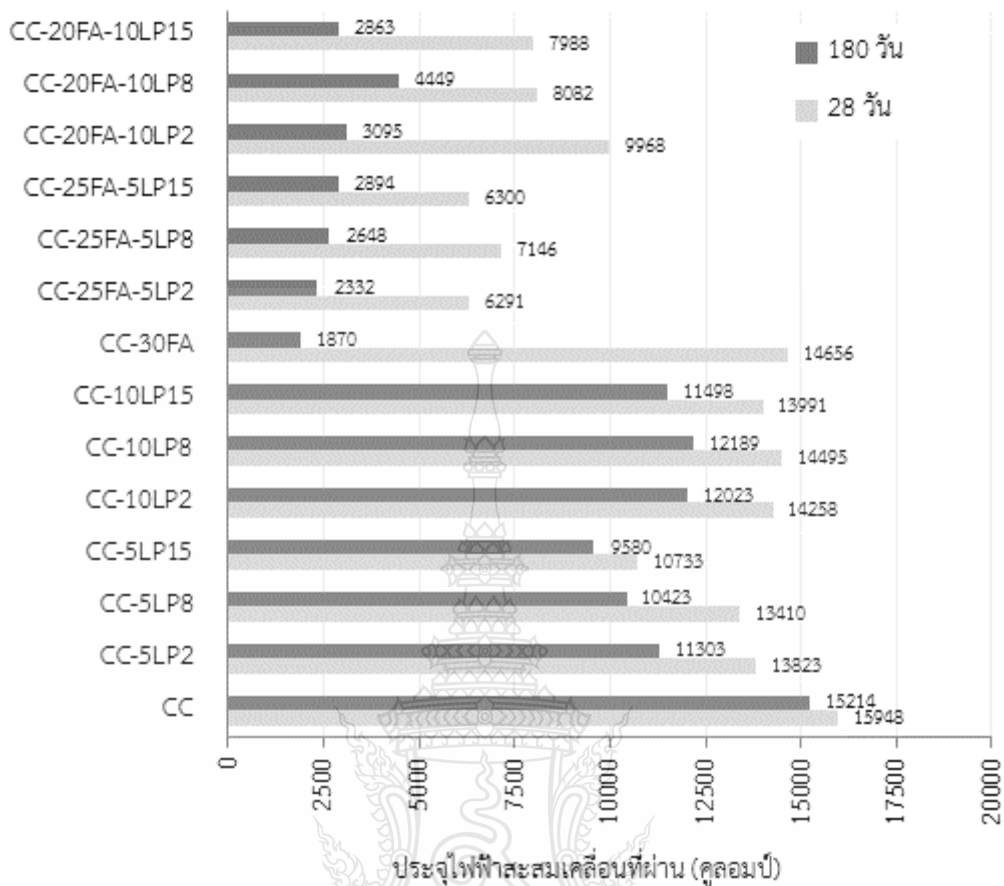
รูปที่ 4.20 แสดงประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างโดยมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (coulombs) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมผงหินปูน ผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่า ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงหินปูนดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่

ด้วยผงหินปูนซึ่งมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะไปกระจายตัวแทรก
ระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้มากขึ้น รวมทั้งช่วยลดความพรุนของ
คอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมผงหินปูนมีความที่บึกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
ทำให้การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมากขึ้น และเมื่อแทนที่ผงหินปูน (ทั้งขนาดความ
ละเอียด 28 และ 15 ไมโครเมตร) ร้อยละ 5 มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าของการ
แทนที่ด้วยร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่น้อยกว่า (ร้อยละ 5) เป็น
ปริมาณที่เหมาะสมกว่าแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 ส่วนความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของ
คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วันนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันหรือมีแนวโน้มว่าดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ต
แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่ออายุมากขึ้น (180 วัน) จะเห็นว่าความสามารถในการต้านทานการแทรก
ซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าที่ดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
ค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะที่อายุน้อยปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยยังเกิดน้อย แต่เมื่ออายุมาก
ขึ้นปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้น รวมทั้งผลจากการช่วยเติมเต็มช่องว่างของเถ้าลอยในส่วนที่ยังไม่ทำ
ปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้คอนกรีตมีความที่บึกมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านทานการ
แทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ดีกว่า

สำหรับผลกระทบของขนาดความละเอียดของผงหินปูนที่มีต่อความต้านทานการแทรกซึม
คลอไรด์ของคอนกรีตนั้น พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงหินปูนที่มี
ความละเอียดมากกว่าจะสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า กล่าวคือความต้านทานการแทรก
ซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงหินปูนที่มีความละเอียด 2 ไมโครเมตร จะมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่
ผสมผงหินปูนความละเอียด 8 และ 15 ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนที่มีความ
ละเอียดมากกว่า จะสามารถแทรกตัวและเติมเต็มในช่องว่างของคอนกรีตที่ดีกว่า

ส่วนความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกรณี 3 วัสดุประสาน
(ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน) ให้ค่าที่ดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ต
แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยและการ
เติมเต็มของผงหินปูนและของเถ้าลอยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ยิ่งเป็นการเพิ่มความที่บึกให้กับ
คอนกรีต ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น

โดยความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกรณี 3 วัสดุประสานให้
ค่าที่ดีกว่ากรณี 2 วัสดุประสาน ทั้งนี้เหตุผลตามที่กล่าวมาแล้วกล่าวคือทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย
และการเติมเต็มของผงหินปูนและของเถ้าลอยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ยิ่งเป็นการเพิ่มความที่บึก
ให้กับคอนกรีต ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น



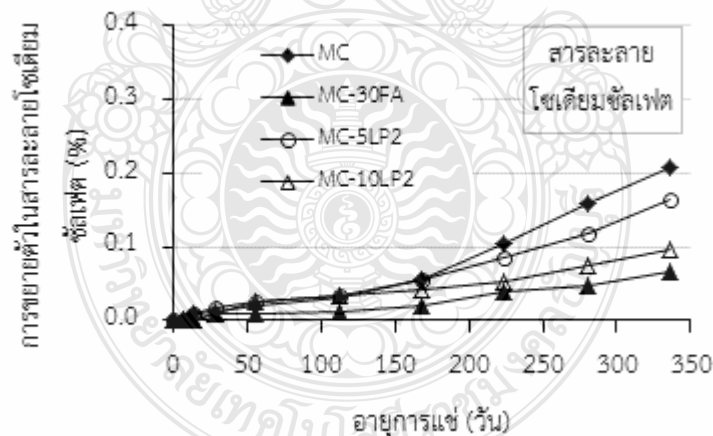
รูปที่ 4.20 ประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านขึ้นตัวอย่าง (คูลอมป์) ของคอนกรีต

4.3.4 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์

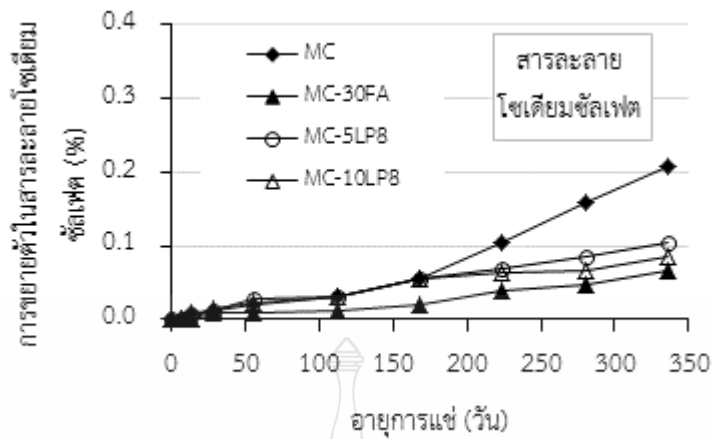
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) และผสมผงหินปูนทั้งความละเอียด 2.8 และ 15 ไมโครเมตร (ร้อยละ 5 และ 10) พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง รวมทั้งผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย ซึ่งต่างก็ไปลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ลง ทำให้เกิด Ettringite น้อยลง ส่งผลให้เกิดการขยายตัวน้อยลง ส่วนการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 (ทั้งความละเอียด 2.8 และ 15 ไมโครเมตร) มีแนวโน้มว่าใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนซึ่งมีความละเอียดมากกว่าเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 5) เข้าไปเติมเต็มช่องว่างของเฟสดี ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจึงลดช่องว่างลง ไม่มีช่องว่างพอสำหรับ Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัว

มากขึ้น แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น (ร้อยละ 10) จะเห็นว่าการขยายตัวมีแนวโน้มที่น้อยกว่าของเมื่อแทนที่ในปริมาณร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจเนื่องจากการแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง รวมทั้งปริมาณร้อยละ 10 อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไปทำให้ลดช่องว่างได้ไม่ดีเท่ากับการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 5 ส่งผลให้มีช่องว่างในเพสต์มากกว่า อย่างไรก็ตามการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 ยังให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตที่มากกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ส่วนรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์กรณีใช้ 3 วัสดุประสาน ซึ่งพบว่าให้ผลการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์สอดคล้องกับการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน

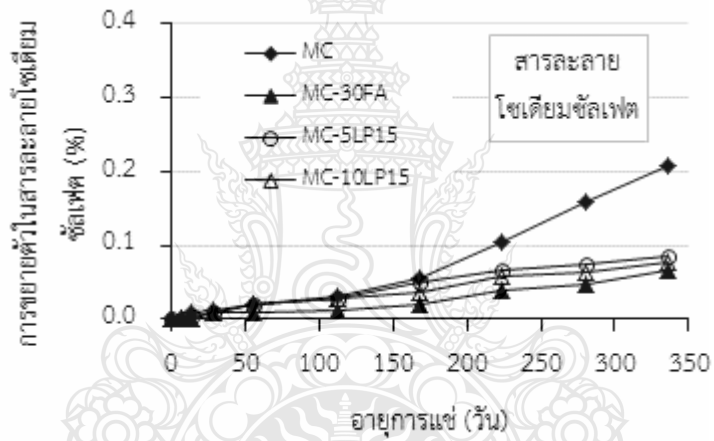
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ ในขณะที่รูปที่ 4.24 แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตที่อายุ 336 วันของมอร์ตาร์ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของความละเอียดของผงหินปูนที่มีต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่า จะให้ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์มากกว่าของผงหินปูนที่มีความละเอียดน้อยกว่า ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่าสามารถเติมเต็มในช่องว่างเพสต์ได้ดีกว่า ทำให้เกิดช่องว่างที่น้อยกว่า ไม่มีช่องว่างพอสำหรับ Ettringite ส่งผลให้การขยายตัวมีค่ามากกว่า



(ก) ผงหินปูนความละเอียด 2 ไมโครเมตร

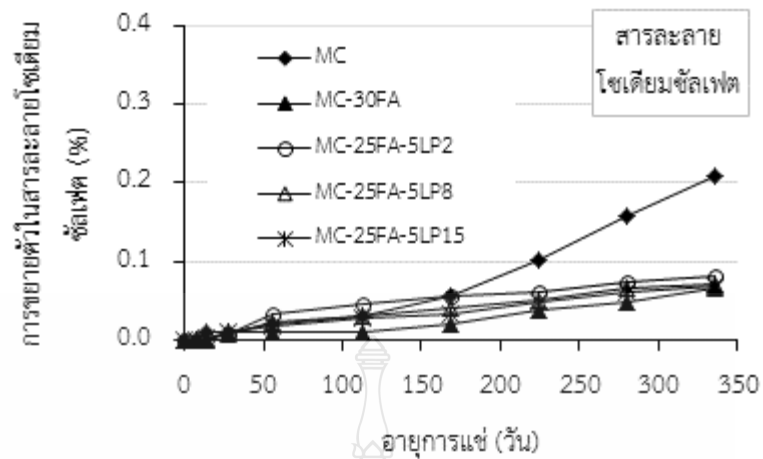


(ข) ผงหินปูนความละเอียด 8 ไมโครเมตร

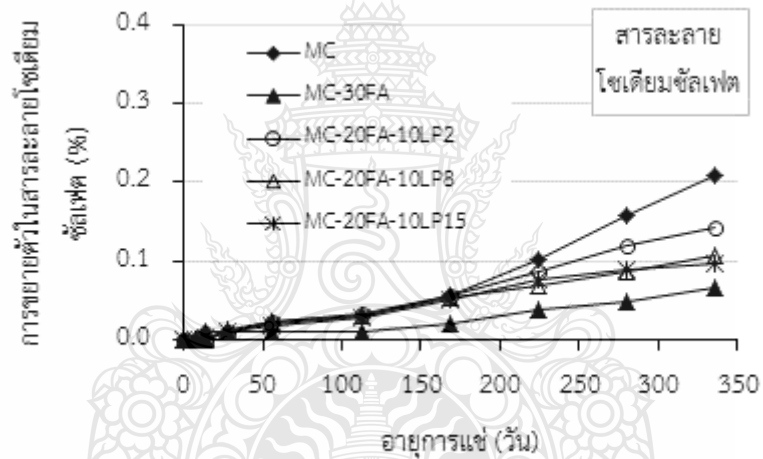


(ค) ผงหินปูนความละเอียด 15 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ 2 วัสดุประสาน

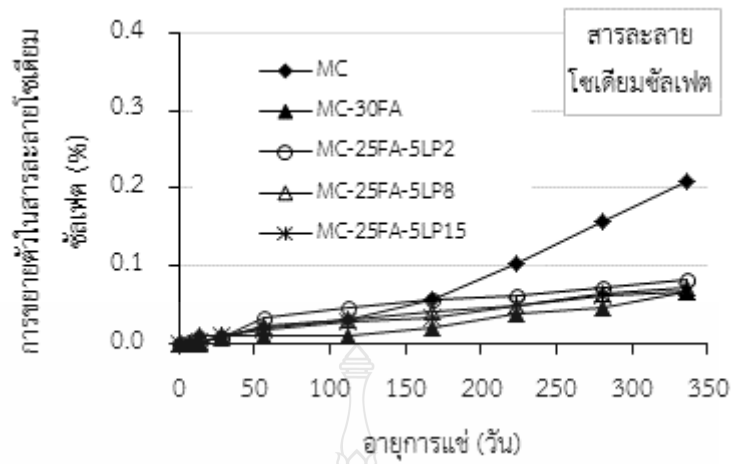


(ก) 3 วัสดุประสาน (แก้วลอยร้อยละ 25 ผงหินปูนร้อยละ 5)

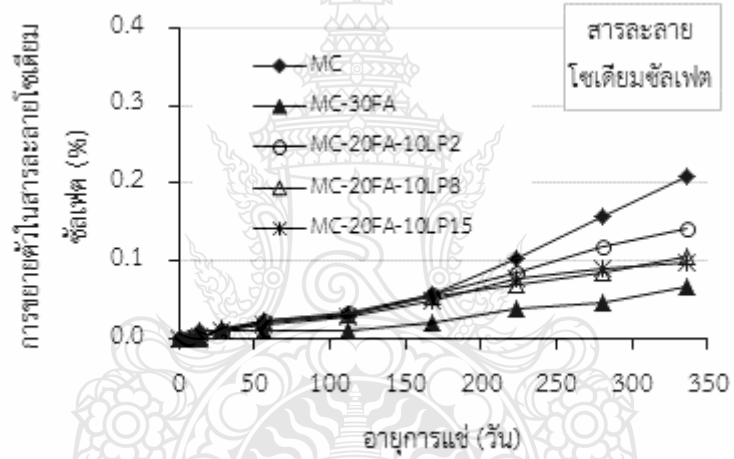


(ข) 3 วัสดุประสาน (แก้วลอยร้อยละ 20 ผงหินปูนร้อยละ 10)

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ 3 วัสดุประสาน

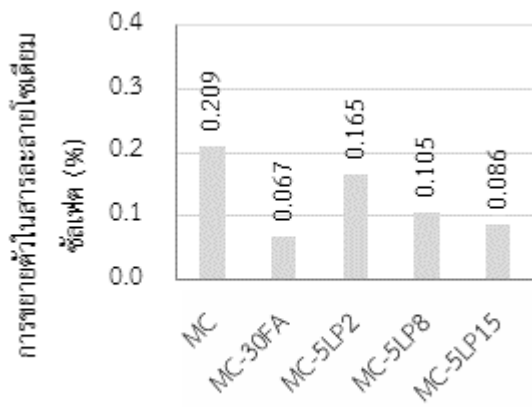


(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5

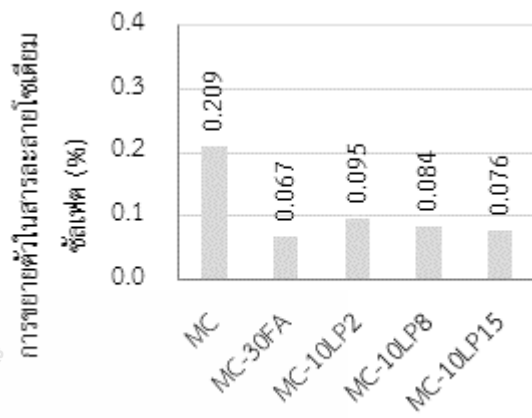


(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายไซเตียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ เพื่อเปรียบเทียบผลของความละเอียดของผงหินปูน



(ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



(ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10

รูปที่ 4.24 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 336 วัน ของมอร์ตาร์



บทที่ 5

สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของผงหินปูนที่มีขนาดอนุภาค (d_{50}) เท่ากับ 2.8 และ 15 ไมโครเมตร (μm) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 20 ร่วมกับเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต โดยทำการทดสอบองค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา สมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย กำลังดึงประลัยแบบผ่าซีก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และความทนทานซึ่งประกอบไปด้วยการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) ผงหินปูนตามขนาดระบุที่มีขนาดอนุภาค (d_{50}) เท่ากับ 2.8 และ 15 ไมโครเมตร มีขนาดจากการทดสอบการกระจายตัวอยู่ที่ 2.04, 6.91 และ 16.20 ไมโครเมตร อนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว ในขณะที่เถ้าลอยมีซิลิโคนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก

2) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมผงหินปูนทุกๆ อัตราส่วนผสมมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมสูงกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย และผงหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่ามีผลทำให้เพสต์มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมสูงกว่าเพสต์ที่มีผงหินปูนที่มีขนาดใหญ่กว่า

3) เพสต์ผสมผงหินปูนมีระยะเวลาการก่อตัวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนพบว่า เพสต์ซึ่งมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีเวลาการก่อตัวเริ่มต้นที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมผงหินปูน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น มีผลทำให้เพสต์มีระยะเวลาของการก่อตัวเริ่มต้นยิ่งเพิ่มขึ้น

4) ค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และโดยขนาดที่เล็กกว่าของผงหินปูนมีผลทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีขนาดใหญ่กว่า

5) ความละเอียดของผงหินปูนมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลของทั้งของคอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยผงหินปูนที่มีความละเอียดสูงกว่ามีผลทำให้สมบัติทางกลสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดต่ำกว่า

6) การหดตัวแบบออโตจิ้นัสและการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการผสมผงหินปูนที่มีขนาดเล็กช่วยลดการหดตัวแบบออโตจิ้นัส

7) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีคอนกรีต 3 วัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน) มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่า มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดน้อยกว่า

8) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 5) มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่า แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 10) ให้ค่าที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดน้อยกว่า ให้ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่น้อยกว่าของมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่า

บรรณานุกรม

- [1] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต,” พิมพ์ครั้งที่ 2, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552.
- [2] ปิติศานต์ กร้ามาตร และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, “การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ ฝุ่นหินปูน,” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.
- [3] Vogelis et al., “Portland-limestone cement. Their properties and hydration compared to those of other composite cements,” Cement & Concrete Composites (Electronic), 2005, Vol. 27, pp. 191-196. Available: Elsevier/Science Direct (3 may 2009).
- [4] จตุพร ชูตาภา และ วรพจน์ แสงราม, “แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: CaCO_3),” วิชาการแดง, ปีที่ 1, ฉบับที่ 6 มิถุนายน, 2552.
- [5] Kadri et al., “Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration,” RILEM (Electronic), 2009, pp. 5-6. Available: RILEM Union/RILEM (3 may 2009).
- [6] Neville, A.M., Properties of Concrete. Pittmen Book Limited, London, 1981.
- [7] American Society for testing and materials, ASTM C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [8] กระทรวงอุตสาหกรรม, “กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แก้วลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต,” มาตรฐาน มอก.2135-2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546.
- [9] สหลาภ หอมวุฒิม่วงค์, ดิลก คุรัตน์เวช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, “การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อถ่านหิน,” การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการนำถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [10] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [11] American Society for Testing and Material, ASTM C 1202-97 : Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration Annual Book of ASTM Standard, 1997.



ผลกระทบของความละเอียดผงหินปูนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต
และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

**EFFECT OF FINENESS OF LIMESTONE POWDER
ON CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF CONCRETE
AND EXPANSION IN SODIUM SULFATE SOLUTION OF MORTAR**

สุรสิทธิ์ เพาะบุญ¹ (Surasit Pohboon)¹

ปิติศานต์ กร้ามาต² (Pitisan Krammart)²

อภิชา หนูพันธ์³ (Apicha Nhoophan)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Email: surasit2720@hotmail.com

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Email: pitisan.k@en.rmutt.ac.th

³ครูชำนาญการพิเศษ ภาควิชาก่อสร้างและโยธา วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ สงขลา

Email: apicha.c5@hotmail.com

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบความละเอียดผงหินปูนต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน และการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยใช้เถ้าลอย และผงหินปูนมีความละเอียด 2 8 และ 15 ไมโครเมตร แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แล้วทำการทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์โดยแบบเร่งของตัวอย่างคอนกรีต และทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ผลการศึกษาพบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่ามีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดน้อยกว่า นอกจากนี้พบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 5) มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่า แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 10) ให้ค่าที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สุดท้ายพบว่า มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดน้อยกว่า ให้ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่น้อยกว่าของมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่า

ABSTRACT: This research was to study the effect of fineness of limestone powder on chloride penetration resistance of concrete mixed with fly ash and limestone powder, and the expansion in sodium sulfate solution (NS) of mortar mixed with fly ash and limestone powder. Limestone powder with having fineness equal to 2, 8 and 15 micrometers was taking into account by replacing in Type I Portland cement (OPC). The rapid chloride penetrability test of concrete specimens and the expansion of mortar specimens in sodium sulfate solution with a concentration of 5% were tested. The results showed that the chloride penetration resistance of concrete mixed with limestone powder, mixed with fly ash and mixed with fly ash together with limestone powder were better than those of OPC concrete. Also, the chloride penetration resistance of concrete mixed with finer limestone powder was better than those of concrete mixed with coarse limestone powder. In addition, it was found that the expansion in NS of mortar mixed with fly ash and mixed with fly ash together with limestone powder were less than those of OPC mortar. Besides, the expansion in NS of mortar mixed with small amounts of limestone powder (5%) tends to be close to or greater than that of OPC mortar. Though, mortar mixed with large amounts of limestone powder (10%) gave less expansion in NS when compared with those of OPC mortar.

Finally, the expansion in NS of mortar mixed with finer limestone powder tended to be greater than that of mortar with a coarse limestone powder.

KEYWORDS: Fineness of limestone powder, Chloride penetration resistance, Expansion in sulfate solution

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนทำให้มีเถ้าเหลือทิ้ง (By product) ทั้งชนิดเถ้าลอย (Fly Ash) และเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) เกิดขึ้นในปริมาณสูงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉลี่ยเถ้าลอยมีปริมาณ 3 ล้านตันต่อปี [1] ทางเลือกที่สำคัญทางหนึ่งของการกำจัดเถ้าดังกล่าวซึ่งหากปล่อยทิ้งไว้จะมีส่วนในการสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตและวัสดุซีเมนต์ในหลากหลายประเภท [2] โดยจากงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศซึ่งได้ดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 20 ปี ระบุข้อสรุปไว้ตรงกันของการใช้เถ้าลอย คือการใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในซีเมนต์เพสต์ลดลงและยังช่วยเพิ่มความทนน้ำให้กับคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เถ้าลอยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตได้ดีขึ้น [3] แต่อย่างไรก็ตามข้อดีของประการหนึ่งของเถ้าลอยที่มีต่อคอนกรีตคือ อัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช้าในช่วงต้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้นและทำให้อัตราการพัฒนากำลังรับแรงลดลงตามไปด้วย ดังนั้นในงานคอนกรีตที่ต้องการการพัฒนากำลังในช่วงต้นที่สูงหรือคอนกรีตกำลังสูงจึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นส่วนประกอบ ทางแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรมีการเพิ่มศักยภาพในอายุช่วงต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยอาศัยหลักการทางเลือกสองประการได้แก่ ประการแรก คือใช้เถ้าลอยร่วมกับวัสดุที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานระดับสูง อาทิเช่น การใช้เถ้าลอยร่วมกับซิลิกาฟูม แต่เนื่องจากข้อดีในเรื่องของราคาที่สูงจึงยังไม่เป็นนิยมใช้กับงานคอนกรีตปกติในประเทศไทย ประการที่สอง คือการคัดสรรวัสดุทางเลือก

ใหม่ที่เกิดขึ้นในประเทศและมีความสามารถในการเติมแทรกเข้าไปสู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ดีซึ่งจะมีผงหินปูน (Limestone Powder) ที่เกิดจากกระบวนการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และมวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตที่คุณสมบัติดังกล่าว ด้วยสาเหตุที่ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดีทำให้กำลังรับแรงในตอนต้นสามารถพัฒนาได้ดียิ่งขึ้น [3, 4, 5, 6, 7] อย่างไรก็ตามการใช้ผงหินปูนยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ถึงแม้ว่าจะมีราคาที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์อยู่ก็ตาม เนื่องจากยังขาดองค์ความรู้ทั้งในตัววัสดุและการประยุกต์ใช้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดเป้าหมายที่การพัฒนาการใช้ผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง

จากที่กล่าวมาข้างต้น ในการพัฒนาการใช้วัสดุร่วมทั้งสองชนิดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะต้องอยู่บนหลักของการพิจารณาศักยภาพและหน้าที่ของแต่ละวัสดุ โดยจากงานวิจัยจะพบว่า เถ้าลอยมีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีในช่วงหลังแต่ไม่ดีในช่วงต้น ในขณะที่ผงหินปูนมีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาได้ต่ำหรือถึงกับไม่ทำปฏิกิริยาดังนั้นปัจจัยที่สำคัญของการประยุกต์ใช้ผงหินปูนร่วมกับปูนซีเมนต์ตามกลไกของการเติมแทรก (Filling Effect) จึงอยู่ที่ขนาดของอนุภาคเป็นสำคัญ ซึ่งโดยปกติแล้วผงหินปูนเหล่านี้จะมีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดวัตถุประสงค์เฉพาะที่ต้องการศึกษาผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติต้านคลอไรด์และซัลเฟตของมอร์ตาร์/คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยเน้นผงหินปูนที่มีความละเอียดขนาด 2.8 และ 15 ไมโครเมตร ซึ่งมีการผลิตและใช้งานใน

อุตสาหกรรมอื่น ๆ ของในประเทศไทยอยู่ในปัจจุบัน โดยสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วยสมบัติด้านความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 [8] etailoy จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง ผงหินปูน ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิตมีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมหลาย ๆ ประเภท โดยมีความละเอียด 2 8 และ 15 ไมโครเมตร ทหราน้ำจืด หิน และน้ำประปา

ตารางที่ 1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลน ส่วนตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ในขณะที่ภาพที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 etailoy และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

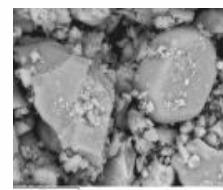
ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้

สมบัติ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	etailoy	ผงหินปูน (ไมโครเมตร)		
			2	8	15
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.47	2.70	2.69	2.68
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม. ² / ก.)	3,250	3,550	11,180	10,450	9,350

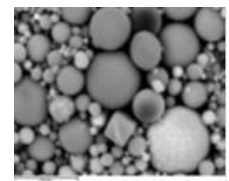
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้

ร้อยละออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	etailoy	ผงหินปูน (ไมโครเมตร)		
			2	8	15

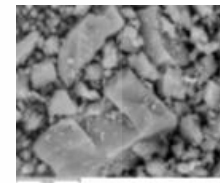
SiO ₂	19.50	40.93	0.46	0.45	0.44
Al ₂ O ₃	4.97	22.42	0.06	0.05	0.06
Fe ₂ O ₃	3.78	13.64	0.03	0.03	0.02
CaO	65.38	13.63	55.25	55.20	55.23
MgO	1.08	2.93	0.37	0.34	0.36
SO ₃	2.16	1.92	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Na ₂ O	< 0.01	0.89	< 0.01	< 0.01	< 0.01
K ₂ O	0.47	2.39	0.01	0.01	0.01
LOI	2.27	0.46	43.79	43.12	43.01
Free CaO	1.00	0.22	-	-	-
Insoluble	0.28	-	-	-	-
Residue					



ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



ข) etailoy



ค) ผงหินปูน

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 etailoy และผงหินปูน

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.2.1 ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C1202 [9] ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 180 วัน ของการบ่มตัวอย่างในน้ำ เมื่อตัวอย่างครบตามอายุที่กำหนดแล้ว นำตัวอย่างมาตัดให้ได้ขนาดหน้า 50 มิลลิเมตร จากนั้นนำก้อนขึ้นตัวอย่างทำการเคลือบผิว

ด้านข้างโดยรอบของชิ้นตัวอย่างด้วยอิพ็อกซี ยกเว้นส่วนผิวหน้าด้านบนและด้านล่าง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทุก ๆ 30 นาที ต่อเนื่องกันจนครบ 6 ชั่วโมง จากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้นำมาคำนวณหาค่าประจุที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างทดสอบโดยสมการ $Q_x = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360})$ เมื่อ Q_x คือ ประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่าง (coulombs) I_0 คือค่ากระแสเริ่มแรก (amperes) I_t คือค่ากระแสที่เวลา t นาที (amperes)

2.2.2 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

สำหรับการทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C1012 [10] ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร โดยถอดแบบตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (ใช้สารโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร) โดยใช้แท่งตัวอย่างมอร์ตาร์จำนวน 3 แท่งต่อหนึ่งสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ แล้ววัดการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ ที่อายุ 1 2 3 4 8 12 และ 16 สัปดาห์ และทุก ๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สำหรับการวัดการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 490 [11] กล่าวคือ ร้อยละของการขยายตัว เท่ากับ $\{(L_t - L_i) / L_i\} \times 100$ เมื่อ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ส่วน L_t คือค่าเฉลี่ยความยาวหลังจากการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่าง

2.2.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีต/มอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ในส่วนความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต ใช้สัดส่วนผสม

ของคอนกรีตดังตารางที่ 3 ในขณะที่การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์นั้น สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

สัญลักษณ์	OPC	ผงหินปูน			เถ้าลอย	ทราย	หิน	น้ำ
		2 μ	8 μ	15 μ				
CC	332	-	-	-	-	790	1080	183
CC-5LP2	315	17	-	-	-	790	1080	183
CC-5LP8	315	-	17	-	-	790	1080	183
CC-5LP15	315	-	-	17	-	790	1080	183
CC-10LP2	299	33	-	-	-	790	1080	183
CC-10LP8	299	-	33	-	-	790	1080	183
CC-10LP15	299	-	-	33	-	790	1080	183
CC-30FA	232	-	-	-	100	790	1080	183
CC-25FA-5LP2	332	17	-	-	83	790	1080	183
CC-25FA-5LP8	332	-	17	-	83	790	1080	183
CC-25FA-5LP15	332	-	-	17	83	790	1080	183
CC-20FA-10LP2	332	33	-	-	67	790	1080	183
CC-20FA-10LP8	332	-	33	-	67	790	1080	183
CC-20FA-10LP15	332	-	-	33	67	790	1080	183

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ (กรัม) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

สัญลักษณ์	OPC	ผงหินปูน			เถ้าลอย	ทราย	น้ำ
		2 μ	8 μ	15 μ			
MC	1.00	-	-	-	-	2.75	0.55
MC-5LP2	0.95	0.05	-	-	-	2.75	0.55
MC-5LP8	0.95	-	0.05	-	-	2.75	0.55
MC-5LP15	0.95	-	-	0.05	-	2.75	0.55
MC-10LP2	0.90	0.10	-	-	-	2.75	0.55
MC-10LP8	0.90	-	0.10	-	-	2.75	0.55
MC-10LP15	0.90	-	-	0.10	-	2.75	0.55
MC-30FA	0.70	-	-	-	0.30	2.75	0.55
MC-25FA-5LP2	0.70	0.05	-	-	0.25	2.75	0.55
MC-25FA-5LP8	0.70	-	0.05	-	0.25	2.75	0.55
MC-25FA-5LP15	0.70	-	-	0.05	0.25	2.75	0.55
MC-20FA-10LP2	0.70	0.10	-	-	0.20	2.75	0.55
MC-20FA-10LP8	0.70	-	0.10	-	0.20	2.75	0.55
MC-20FA-10LP15	0.70	-	-	0.10	0.20	2.75	0.55

หมายเหตุ OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

CC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, CC-5LP2 หมายถึง คอนกรีตผสมผงหินปูนความละเอียด 2 ไมครอน ร้อยละ 5, CC-25FA-5LP15 หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 25) ร่วมกับผงหินปูนความละเอียด 15 ไมครอน (ร้อยละ 5), MC-10LP2 มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนความละเอียด 2 ไมครอน ร้อยละ 10 และ MC-20FA-10LP8 หมายถึง มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20) ร่วมกับผงหินปูนความละเอียด 8 ไมครอน (ร้อยละ 10) เป็นต้น

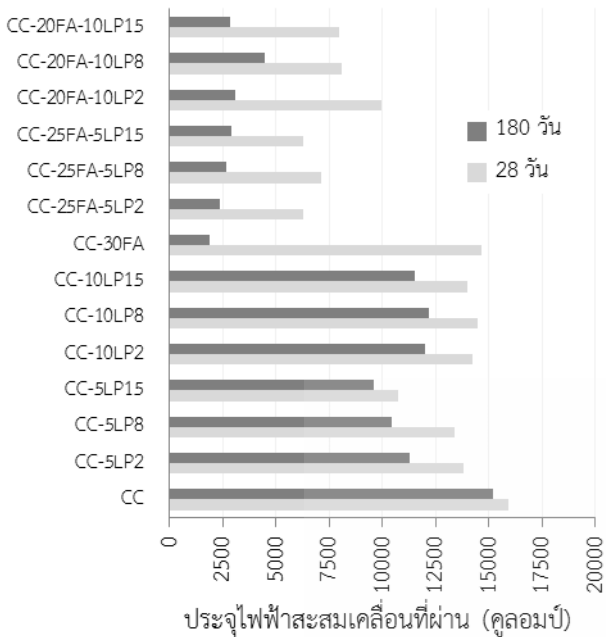
3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ภาพที่ 2 แสดงประจักษ์สมที่เคลื่อนที่ผ่านขึ้นตัวอย่างโดยมีหน่วยเป็นคูลอมป์ (coulombs) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมผงหินปูน ผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่า ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงหินปูนดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนซึ่งมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะไปกระจายตัวแทรกกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้มากขึ้น รวมทั้งช่วยลดความพรุนของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมผงหินปูนมีความทึบกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทำให้การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมากขึ้น และเมื่อแทนที่ผงหินปูน (ทั้งขนาดความละเอียด 2 8 และ 15 ไมครอนเมตร) ร้อยละ 5 มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าของการแทนที่ด้วยร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่น้อยกว่า (ร้อยละ 5) เป็นปริมาณที่เหมาะสมกว่าแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 ส่วนความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วันนั้นมีความแตกต่างกันหรือมีแนวโน้มว่าดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่ออายุมากขึ้น (180 วัน) จะเห็นว่าความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าที่ดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะที่อายุน้อยปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

ยังเกิดน้อย แต่เมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้น รวมทั้งผลจากการช่วยเติมเต็มช่องว่างของเถ้าลอยในส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้คอนกรีตมีความทึบมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ดีกว่า

สำหรับผลกระทบของขนาดความละเอียดของผงหินปูนที่มีต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตนั้น พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่าจะสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่า กล่าวคือ ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมผงหินปูนที่มีความละเอียด 2 ไมโครเมตร จะมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนความละเอียด 8 และ 15 ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่า จะสามารถแทรกตัวและเติมเต็มในช่องว่างของคอนกรีตที่ดีกว่า ส่วนความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกรณี 3 วัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน) ให้ค่าที่ดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยและการเติมเต็มของผงหินปูนและของเถ้าลอยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ยังเป็นการเพิ่มความทึบให้กับคอนกรีต ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่สูงขึ้น



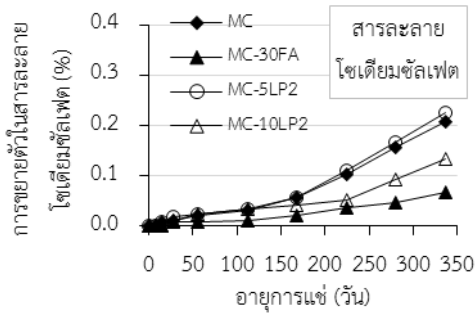
ภาพที่ 2 ประจุสะสมที่เคลื่อนที่ผ่านขึ้นตัวอย่าง (คุลมบป์) ของคอนกรีต

3.2 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์

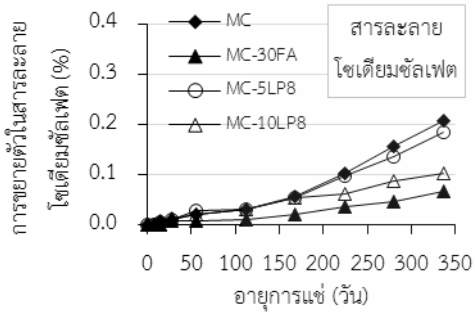
ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) และผสมผงหินปูนทั้งความละเอียด 2.8 และ 15 ไมโครเมตร (ร้อยละ 5 และ 10) พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง รวมทั้งผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย ซึ่งต่างก็ไปลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ลง ทำให้เกิด Ettringite น้อยลง ส่งผลให้เกิดการขยายตัวน้อยลง ส่วนการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 (ทั้งความละเอียด 2.8 และ 15 ไมโครเมตร) มีแนวโน้มว่าใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนซึ่งมีความละเอียดมากกว่าเมื่อแทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 5) เข้าไปเติม

เต็มช่องว่างของเพสต์ ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จึงลดช่องว่างลง ไม่มีช่องว่างพอสำหรับ Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น (ร้อยละ 10) จะเห็นว่า การขยายตัวมีแนวโน้มที่น้อยกว่าของเมื่อแทนที่ในปริมาณร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจเนื่องจากการแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงรวมทั้งปริมาณร้อยละ 10 อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไปทำให้ลดช่องว่างได้ไม่ดีเท่ากับการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 5 ส่งผลให้มีช่องว่างในเพสต์มากกว่า อย่างไรก็ตามการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 ยังให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มากกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ส่วนภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์กรณีใช้ 3 วัสดุประสาน ซึ่งพบว่าให้ผลการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์สอดคล้องกับการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน

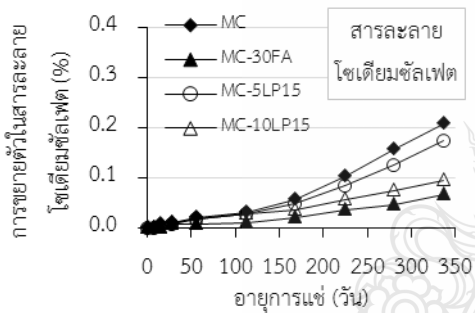
ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ ในขณะที่ภาพที่ 6 แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 336 วัน ของมอร์ตาร์ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของความละเอียดของผงหินปูนที่มีต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ จะเห็นว่าแนวโน้มของผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่า จะให้ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์มากกว่าของผงหินปูนที่มีความละเอียดน้อยกว่า ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่าสามารถเติมเต็มในช่องว่างเพสต์ได้ดีกว่า ทำให้เกิดช่องว่างที่น้อยกว่า ไม่มีช่องว่างพอสำหรับ Ettringite ส่งผลให้การขยายตัวมีค่ามากกว่า



ก) ผงหินปูนความละเอียด 2 ไมโครเมตร

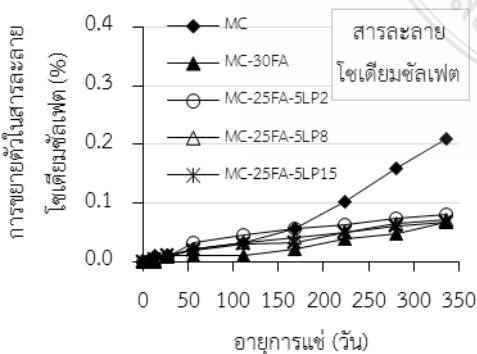


ข) ผงหินปูนความละเอียด 8 ไมโครเมตร

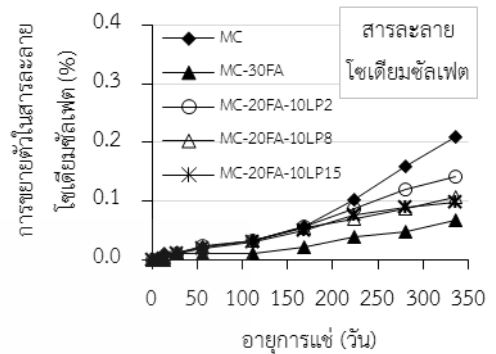


ค) ผงหินปูนความละเอียด 15 ไมโครเมตร

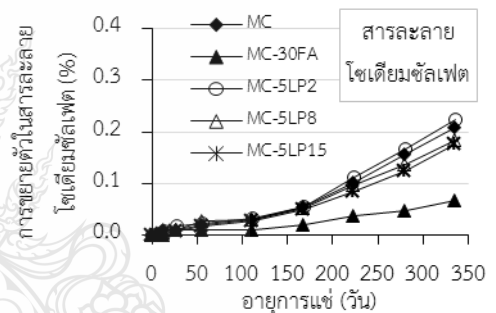
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ 2 วัสดุประสาน



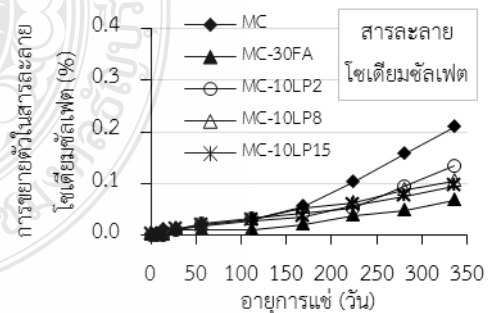
ก) 3 วัสดุประสาน (ถั่วลยร้อยละ 25 ผงหินปูนร้อยละ 5)



ข) 3 วัสดุประสาน (ถั่วลยร้อยละ 20 ผงหินปูนร้อยละ 10) ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ 3 วัสดุประสาน

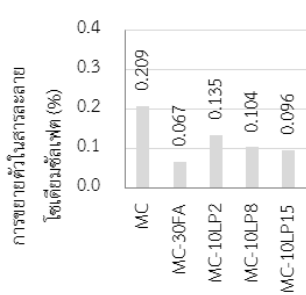
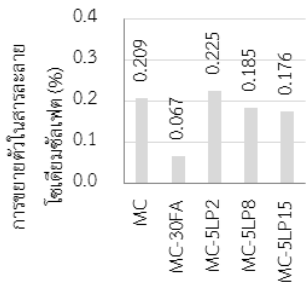


ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



ข-) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและอายุการแช่ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ เพื่อเปรียบเทียบผลของความละเอียดของผงหินปูน



ก) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10

ข) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 6 การขยายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตที่อายุ 336 วันของมอร์ตาร์

4. สรุป

จากผลของการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีคอนกรีต 3 วัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน) มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน โดยคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่า มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดน้อยกว่า

2) การขยายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 5) มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่า แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 10) ให้ค่าที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดน้อยกว่า ให้ค่าการขยายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตที่น้อยกว่าของมอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดมากกว่า

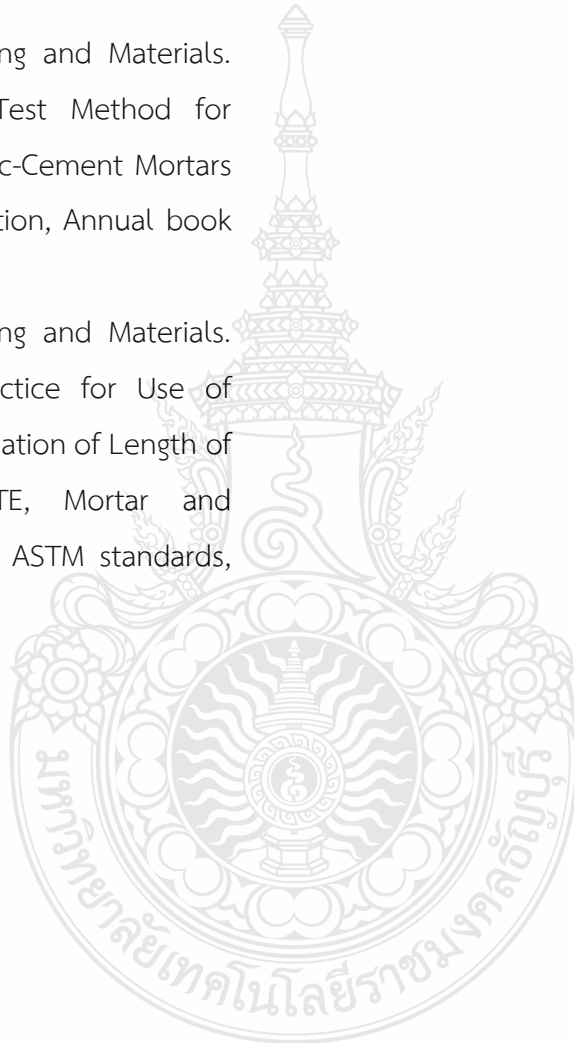
กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต,” พิมพ์ครั้งที่ 2, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552.
- [2] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, “ความคงทนของคอนกรีต,” พิมพ์ครั้งที่ 1, 2543.
- [3] ปิติศานต์ กร้ามาต และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, “การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ฝุ่นหินปูน,” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.
- [4] N. Voglisa, G. Kakalia, E. Chaniotakis, S. Tsvilisa, “Portland-limestone cement. Their properties and hydration compared to those of other composite cements,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 191-196, 2005.
- [5] จตุพร ชูตาภา และ วรพจน์ แสงราม, “แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: CaCO_3),” *วิชาการ* แดง, ปีที่ 1, ฉบับที่ 6 มิถุนายน, 2552.
- [6] Neville, A.M., *Properties of Concrete*. Pittmen Book Limited, London, 1981.
- [7] D. P. Bentz, Taijiro Sato, Igor de la Varga, W. Jason Weiss, “Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, pp.11-17, 2012.

- [8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1, 2547.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Annual book of ASTM standards, 2019.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM C1012, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, Annual book of ASTM standards, 2012.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM C490 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length of Hardened Cement PASTE, Mortar and Concrete, Annual book of ASTM standards, 2017.



ภาคผนวก

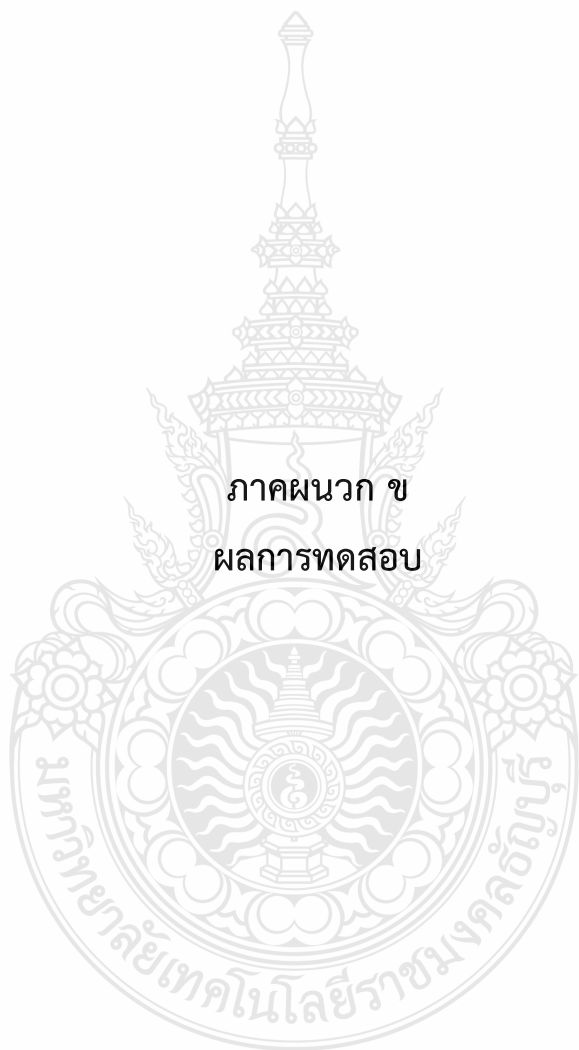




ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบ



ตารางผนวกที่ ข1 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

คอนกรีต	ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ซม.)	ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ซม.) ที่เวลา (นาที)								
		15	30	45	60	75	90	105	120	
CC	4.33	4.33	3.32	2.50	1.80	1.00	0.50	0		
CC-5LP2	3.00	3.00	1.40	0						
CC-5LP8	1.50	1.50	0.50	0						
CC-5LP15	1.50	1.50	0.67	0						
CC-10LP2	1.76	1.76	1.00	0						
CC-10LP8	1.50	1.50	0.67	0						
CC-10LP15	1.00	1.00	0.33	0						
CC-20LP2	2.71	2.71	2.00	1.33	0.67	0				
CC-20LP8	2.45	2.45	1.67	1.00	0.33	0				
CC-20LP15	2.12	2.12	1.50	0.61	0.10	0				
CC-30FA	4.50	4.50	3.33	2.50	2.33	2.20	1.00	0		
CC-5LP2-25FA	5.33	5.33	3.67	3.33	2.67	2.44	1.80	1.67	1.50	
CC-5LP8-25FA	4.00	4.00	2.67	2.20	1.68	1.28	1.33	0.80	0.33	
CC-5LP15-25FA	3.45	3.45	2.37	1.75	1.38	1.00	0.90	0.80	0.23	
CC-10LP2-20FA	2.50	2.50	2.33	2.10	1.80	1.50	1.00	0.67	0.33	
CC-10LP8-20FA	3.33	3.33	2.67	2.50	2.00	1.33	1.00	1.00	0.50	
CC-10LP15-20FA	3.50	3.50	3.00	2.33	2.20	1.67	1.50	1.33	0.67	
CC-20LP2-10FA	2.50	2.50	2.33	1.90	1.33	0.67	0.33	0		
CC-20LP8-10FA	2.40	2.40	2.20	1.67	1.00	0.90	0.50	0		
CC-20LP15-10FA	2.81	2.81	2.43	2.02	1.33	1.00	0.67	0.50	0.33	

ตารางผนวกที่ ข2 กำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีต

คอนกรีต	กำลังอัด (กก./ซม. ²)						
	0	3	7	14	28	56	91
CC	0.00	210.09	285.60	328.77	351.78	367.57	373.22
CC-5LP2	0.00	234.76	295.62	334.58	365.24	384.33	389.54
CC-5LP8	0.00	218.67	273.94	315.79	346.19	360.20	364.66
CC-5LP15	0.00	199.80	267.69	301.08	329.04	354.67	357.01
CC-10LP2	0.00	204.25	274.81	320.39	343.24	359.92	364.49
CC-10LP8	0.00	193.32	258.76	291.05	332.11	348.29	354.87
CC-10LP15	0.00	179.15	243.23	278.77	314.99	337.78	346.56
CC-20LP2	0.00	187.93	263.25	304.72	330.56	342.12	350.53
CC-20LP8	0.00	179.27	241.97	273.35	312.29	331.98	343.56
CC-20LP15	0.00	161.46	233.83	257.03	304.26	325.45	334.85
CC-30FA	0.00	173.04	215.40	258.91	296.71	349.79	363.35
CC-5LP2-25FA	0.00	162.50	207.67	248.49	286.75	330.38	340.02
CC-5LP8-25FA	0.00	156.01	193.53	230.46	263.51	316.81	330.98
CC-5LP15-25FA	0.00	145.59	186.99	219.38	259.00	296.11	306.06
CC-10LP2-20FA	0.00	152.50	189.74	244.09	272.07	310.63	320.25
CC-10LP8-20FA	0.00	140.34	172.32	227.93	256.71	296.71	305.38
CC-10LP15-20FA	0.00	137.62	162.81	207.61	230.52	265.32	280.64
CC-20LP2-10FA	0.00	136.30	173.64	231.92	258.08	296.08	310.52
CC-20LP8-10FA	0.00	128.99	167.91	214.18	235.89	278.81	284.73
CC-20LP15-10FA	0.00	122.22	154.79	203.59	221.41	258.33	264.87

ตารางผนวกที่ ข3 กำลังดึงแบบผ่าซีกเฉลี่ยของคอนกรีต

คอนกรีต	กำลังดึงแบบผ่าซีก (กก./ซม. ²)						
	0	3	7	14	28	56	91
CC	0.00	19.18	24.92	28.95	31.44	33.28	33.62
CC-5LP2	0.00	19.35	25.08	28.45	30.29	32.73	33.07
CC-5LP8	0.00	18.07	23.49	27.03	29.44	31.07	32.02
CC-5LP15	0.00	17.09	22.86	25.05	27.97	30.74	31.16
CC-10LP2	0.00	17.35	23.28	27.93	29.28	31.05	32.31
CC-10LP8	0.00	16.93	22.19	25.98	28.04	30.14	31.01
CC-10LP15	0.00	16.09	21.85	24.52	26.26	28.23	29.08
CC-20LP2	0.00	16.96	22.28	26.11	28.26	29.97	30.19
CC-20LP8	0.00	15.21	21.34	24.63	27.80	28.34	29.04
CC-20LP15	0.00	14.77	19.23	22.74	26.31	27.63	28.26
CC-30FA	0.00	15.97	19.68	23.41	26.68	31.27	32.28
CC-5LP2-25FA	0.00	14.76	18.97	20.50	23.82	28.09	29.09
CC-5LP8-25FA	0.00	13.90	17.75	19.24	22.70	26.42	27.34
CC-5LP15-25FA	0.00	12.80	16.67	18.79	21.41	24.63	25.21
CC-10LP2-20FA	0.00	13.98	16.32	20.12	22.55	25.88	26.84
CC-10LP8-20FA	0.00	12.55	14.99	18.72	21.21	24.68	25.03
CC-10LP15-20FA	0.00	11.10	13.09	16.97	18.95	21.96	22.75
CC-20LP2-10FA	0.00	11.60	14.02	19.07	21.33	24.62	25.63
CC-20LP8-10FA	0.00	10.96	13.53	17.53	19.41	23.13	24.21
CC-20LP15-10FA	0.00	10.38	12.39	16.62	18.16	21.33	22.38

ตารางผนวกที่ ข4 โมดูลสียืดหยุ่นเฉลี่ยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

มอร์ตาร์	โมดูลสียืดหยุ่น (กก./ชม. ²)
C	296478.8
CC-5LP2	358544.1
CC-5LP8	297795.0
CC-5LP15	292200.0
CC-10LP2	313303.0
CC-10LP8	287613.8
CC-10LP15	280900.0
CC-20LP2	294641.4
CC-20LP8	278400.0
CC-20LP15	270000.0
CC-30FA	329840.6
CC-5LP2-25FA	321000.0
CC-5LP8-25FA	305000.0
CC-5LP15-25FA	295900.0
CC-10LP2-20FA	296807.1
CC-10LP8-20FA	286789.4
CC-10LP15-20FA	254843.8
CC-20LP2-10FA	300331.4
CC-20LP8-10FA	271493.9
CC-20LP15-10FA	269306.8

ตารางผนวกที่ ข5 การหาค่าตัวแบบอโตจีเนสเฉลี่ยของมอร์ตาร์

มอร์ตาร์	การหาค่าตัวแบบอโตจีเนสเฉลี่ย (ร้อยละ)			
	0	1	3	7
MC	0.000	-0.007	-0.012	-0.022
MC-5LP2	0.000	-0.002	-0.006	-0.013
MC-5LP8	0.000	-0.003	-0.007	-0.017
MC-5LP15	0.000	-0.004	-0.009	-0.020
MC-10LP2	0.000	-0.002	-0.005	-0.011
MC-10LP8	0.000	-0.003	-0.006	-0.013
MC-10LP15	0.000	-0.004	-0.008	-0.016
MC-20LP2	0.000	-0.002	-0.004	-0.008
MC-20LP8	0.000	-0.002	-0.006	-0.009
MC-20LP15	0.000	-0.002	-0.008	-0.011
MC-30FA	0.000	-0.005	-0.010	-0.018
MC-5LP2-25FA	0.000	-0.002	-0.005	-0.008
MC-5LP8-25FA	0.000	-0.004	-0.008	-0.015
MC-5LP15-25FA	0.000	-0.005	-0.009	-0.017
MC-10LP2-20FA	0.000	-0.001	-0.003	-0.008
MC-10LP8-20FA	0.000	-0.003	-0.005	-0.009
MC-10LP15-20FA	0.000	-0.004	-0.007	-0.011
MC-20LP2-10FA	0.000	-0.001	-0.002	-0.006
MC-20LP8-10FA	0.000	-0.002	-0.004	-0.009
MC-20LP15-10FA	0.000	-0.003	-0.006	-0.010

ตารางที่ ข5 การหัดตัวแบบอโตจันัสเฉลียของมอรรต้าร (ต่อ)

มอรรต้าร	การหัดตัวแบบอโตจันัสเฉลีย (ร้อยลละ)			
	14	21	28	35
MC	-0.026	-0.028	-0.031	-0.031
MC-5LP2	-0.020	-0.023	-0.024	-0.025
MC-5LP8	-0.022	-0.025	-0.026	-0.027
MC-5LP15	-0.025	-0.027	-0.028	-0.029
MC-10LP2	-0.015	-0.018	-0.019	-0.020
MC-10LP8	-0.017	-0.020	-0.021	-0.022
MC-10LP15	-0.020	-0.022	-0.023	-0.024
MC-20LP2	-0.013	-0.015	-0.017	-0.017
MC-20LP8	-0.014	-0.015	-0.017	-0.018
MC-20LP15	-0.015	-0.017	-0.018	-0.018
MC-30FA	-0.021	-0.024	-0.025	-0.026
MC-5LP2-25FA	-0.013	-0.014	-0.015	-0.017
MC-5LP8-25FA	-0.018	-0.019	-0.019	-0.019
MC-5LP15-25FA	-0.020	-0.021	-0.023	-0.024
MC-10LP2-20FA	-0.009	-0.010	-0.011	-0.011
MC-10LP8-20FA	-0.011	-0.012	-0.013	-0.013
MC-10LP15-20FA	-0.013	-0.014	-0.014	-0.015
MC-20LP2-10FA	-0.010	-0.011	-0.011	-0.012
MC-20LP8-10FA	-0.010	-0.011	-0.012	-0.013
MC-20LP15-10FA	-0.012	-0.012	-0.013	-0.013

ตารางที่ ข5 การหาค่าตัวแบบอโตจีเนสเฉลี่ยของมอร์ตาร์ท (ต่อ)

มอร์ตาร์ท	การหาค่าตัวแบบอโตจีเนสเฉลี่ย (ร้อยละ)			
	42	49	56	63
MC	-0.032	-0.032	-0.033	-0.033
MC-5LP2	-0.025	-0.025	-0.024	-0.025
MC-5LP8	-0.027	-0.028	-0.027	-0.027
MC-5LP15	-0.028	-0.029	-0.029	-0.029
MC-10LP2	-0.020	-0.021	-0.022	-0.021
MC-10LP8	-0.022	-0.023	-0.023	-0.023
MC-10LP15	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024
MC-20LP2	-0.016	-0.017	-0.016	-0.016
MC-20LP8	-0.018	-0.018	-0.018	-0.018
MC-20LP15	-0.018	-0.019	-0.019	-0.019
MC-30FA	-0.027	-0.028	-0.028	-0.028
MC-5LP2-25FA	-0.018	-0.018	-0.019	-0.019
MC-5LP8-25FA	-0.021	-0.021	-0.022	-0.022
MC-5LP15-25FA	-0.024	-0.024	-0.025	-0.024
MC-10LP2-20FA	-0.010	-0.011	-0.012	-0.012
MC-10LP8-20FA	-0.013	-0.014	-0.016	-0.016
MC-10LP15-20FA	-0.015	-0.016	-0.018	-0.018
MC-20LP2-10FA	-0.012	-0.012	-0.012	-0.013
MC-20LP8-10FA	-0.013	-0.013	-0.014	-0.014
MC-20LP15-10FA	-0.014	-0.015	-0.015	-0.015

ตารางที่ ข5 การหัดตัวแบบอโตจันัสเฉลียของมอรรต้าร (ต่อ)

มอรรต้าร	การหัดตัวแบบอโตจันัสเฉลีย (ร้อยลละ)			
	70	77	84	91
MC	-0.033	-0.033	-0.033	-0.033
MC-5LP2	-0.025	-0.026	-0.026	-0.026
MC-5LP8	-0.027	-0.028	-0.028	-0.028
MC-5LP15	-0.029	-0.029	-0.030	-0.029
MC-10LP2	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021
MC-10LP8	-0.022	-0.023	-0.023	-0.023
MC-10LP15	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024
MC-20LP2	-0.017	-0.017	-0.016	-0.017
MC-20LP8	-0.018	-0.018	-0.017	-0.019
MC-20LP15	-0.019	-0.019	-0.020	-0.020
MC-30FA	-0.028	-0.028	-0.028	-0.029
MC-5LP2-25FA	-0.020	-0.019	-0.020	-0.020
MC-5LP8-25FA	-0.022	-0.022	-0.022	-0.023
MC-5LP15-25FA	-0.024	-0.025	-0.025	-0.026
MC-10LP2-20FA	-0.012	-0.012	-0.012	-0.013
MC-10LP8-20FA	-0.016	-0.017	-0.017	-0.017
MC-10LP15-20FA	-0.018	-0.018	-0.019	-0.018
MC-20LP2-10FA	-0.013	-0.013	-0.012	-0.013
MC-20LP8-10FA	-0.014	-0.015	-0.014	-0.014
MC-20LP15-10FA	-0.016	-0.016	-0.015	-0.016

ตารางผนวกที่ ข6 การหัดตัวแบบแห่งเฉลี่ยของมอรัตารี

มอรัตารี	การหัดตัวแบบแห่งเฉลี่ย (ร้อยละ)			
	0	1	3	7
MC	0.000	-0.006	-0.011	-0.020
MC-5LP2	0.000	-0.002	-0.005	-0.009
MC-5LP8	0.000	-0.003	-0.006	-0.014
MC-5LP15	0.000	-0.003	-0.008	-0.017
MC-10LP2	0.000	-0.002	-0.005	-0.008
MC-10LP8	0.000	-0.002	-0.005	-0.009
MC-10LP15	0.000	-0.003	-0.007	-0.013
MC-20LP2	0.000	-0.002	-0.003	-0.007
MC-20LP8	0.000	-0.001	-0.005	-0.008
MC-20LP15	0.000	-0.002	-0.007	-0.011
MC-30FA	0.000	-0.004	-0.008	-0.015
MC-5LP2-25FA	0.000	-0.002	-0.004	-0.010
MC-5LP8-25FA	0.000	-0.003	-0.006	-0.012
MC-5LP15-25FA	0.000	-0.004	-0.007	-0.013
MC-10LP2-20FA	0.000	-0.001	-0.003	-0.006
MC-10LP8-20FA	0.000	-0.002	-0.004	-0.008
MC-10LP15-20FA	0.000	-0.003	-0.005	-0.010
MC-20LP2-10FA	0.000	-0.001	-0.002	-0.005
MC-20LP8-10FA	0.000	-0.002	-0.003	-0.007
MC-20LP15-10FA	0.000	-0.002	-0.005	-0.008

ตารางผนวกที่ ข6 การหัดตัวแบบแห่งเฉลี่ยของมอร์ตารี (ต่อ)

มอร์ตารี	การหัดตัวแบบแห่งเฉลี่ย (ร้อยละ)			
	14	21	28	35
MC	-0.023	-0.024	-0.025	-0.026
MC-5LP2	-0.013	-0.015	-0.016	-0.015
MC-5LP8	-0.018	-0.019	-0.020	-0.020
MC-5LP15	-0.021	-0.023	-0.024	-0.025
MC-10LP2	-0.011	-0.013	-0.014	-0.015
MC-10LP8	-0.013	-0.016	-0.016	-0.017
MC-10LP15	-0.015	-0.020	-0.020	-0.021
MC-20LP2	-0.009	-0.011	-0.013	-0.013
MC-20LP8	-0.012	-0.013	-0.015	-0.015
MC-20LP15	-0.014	-0.015	-0.015	-0.016
MC-30FA	-0.017	-0.018	-0.018	-0.019
MC-5LP2-25FA	-0.013	-0.014	-0.014	-0.015
MC-5LP8-25FA	-0.014	-0.015	-0.016	-0.015
MC-5LP15-25FA	-0.015	-0.016	-0.016	-0.017
MC-10LP2-20FA	-0.008	-0.008	-0.009	-0.009
MC-10LP8-20FA	-0.010	-0.011	-0.011	-0.012
MC-10LP15-20FA	-0.012	-0.013	-0.013	-0.014
MC-20LP2-10FA	-0.007	-0.008	-0.008	-0.009
MC-20LP8-10FA	-0.008	-0.009	-0.010	-0.010
MC-20LP15-10FA	-0.010	-0.010	-0.011	-0.011

ตารางผนวกที่ ข6 การหัดตัวแบบแห่งเฉลี่ยของมอรัตำร (ต่อ)

มอรัตำร	การหัดตัวแบบแห่งเฉลี่ย (ร้อยละ)			
	42	49	56	63
MC	-0.027	-0.027	-0.027	-0.027
MC-5LP2	-0.015	-0.016	-0.016	-0.016
MC-5LP8	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021
MC-5LP15	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025
MC-10LP2	-0.015	-0.015	-0.015	-0.015
MC-10LP8	-0.018	-0.017	-0.018	-0.018
MC-10LP15	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021
MC-20LP2	-0.012	-0.013	-0.014	-0.014
MC-20LP8	-0.015	-0.015	-0.015	-0.015
MC-20LP15	-0.016	-0.016	-0.016	-0.016
MC-30FA	-0.019	-0.020	-0.020	-0.021
MC-5LP2-25FA	-0.016	-0.016	-0.016	-0.016
MC-5LP8-25FA	-0.016	-0.017	-0.017	-0.017
MC-5LP15-25FA	-0.017	-0.018	-0.018	-0.018
MC-10LP2-20FA	-0.009	-0.010	-0.010	-0.011
MC-10LP8-20FA	-0.011	-0.012	-0.013	-0.014
MC-10LP15-20FA	-0.013	-0.015	-0.016	-0.016
MC-20LP2-10FA	-0.009	-0.009	-0.010	-0.010
MC-20LP8-10FA	-0.010	-0.011	-0.011	-0.012
MC-20LP15-10FA	-0.011	-0.012	-0.012	-0.013

ตารางผนวกที่ ข6 การหัดตัวแบบแห่งเฉลี่ยของมอรัตารี (ต่อ)

มอรัตารี	การหัดตัวแบบแห่งเฉลี่ย (ร้อยละ)			
	70	77	84	91
MC	-0.028	-0.028	-0.028	-0.029
MC-5LP2	-0.017	-0.016	-0.017	-0.017
MC-5LP8	-0.022	-0.022	-0.022	-0.022
MC-5LP15	-0.026	-0.025	-0.026	-0.026
MC-10LP2	-0.016	-0.015	-0.015	-0.016
MC-10LP8	-0.018	-0.018	-0.019	-0.019
MC-10LP15	-0.021	-0.022	-0.022	-0.022
MC-20LP2	-0.013	-0.013	-0.014	-0.014
MC-20LP8	-0.015	-0.015	-0.015	-0.016
MC-20LP15	-0.016	-0.016	-0.016	-0.017
MC-30FA	-0.021	-0.021	-0.021	-0.022
MC-5LP2-25FA	-0.017	-0.017	-0.016	-0.016
MC-5LP8-25FA	-0.017	-0.018	-0.018	-0.018
MC-5LP15-25FA	-0.018	-0.019	-0.019	-0.019
MC-10LP2-20FA	-0.011	-0.011	-0.011	-0.012
MC-10LP8-20FA	-0.014	-0.015	-0.014	-0.015
MC-10LP15-20FA	-0.016	-0.017	-0.016	-0.017
MC-20LP2-10FA	-0.010	-0.010	-0.010	-0.011
MC-20LP8-10FA	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011
MC-20LP15-10FA	-0.013	-0.013	-0.012	-0.013

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสุรสิทธิ์ เพาะบุญ
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 27 พฤษภาคม 2520
ที่อยู่	18 หมู่ 10 ตำบลศรีชะกระบือ อำเภองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม เมื่อ พ.ศ. 2543 ปริญญาโท สาขารัฐศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยรามคำแหง เมื่อ พ.ศ. 2559
ประสบการณ์ทำงาน	2548-2563 วิศวกรโยธาชำนาญการ องค์การบริหารส่วนจังหวัดนครนายก
เบอร์โทรศัพท์	08-1996-3819
อีเมล	surasit2720@hotmail.com

