สมบัติเบื้องต้นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

BASIC PROPERTIES AND SULFATE RESISTANCE OF CONCRETE WITH WET FLY ASH

เอกราช จำนงค์รัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สมบัติเบื้องต้นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

เอกราช จำนงค์รัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติเบื้องต้นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก
	Basic Properties and Sulfate Resistance of Concrete with Fly Ash
ชื่อ – นามสกุล	นายเอกราช จำนงค์รัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรางคณา แสงสร้อย, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2560

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

Krittiya K. ..... กรรมการ
(อาจารย์กฤติยา แก้วมณี, ปร.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จินดารัตน์ มณีเจริญ, D.Eng.)

Waranghana S. ..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรางคณา แสงสร้อย, ปร.ด.)

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 30 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติเบื้องต้นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก
ชื่อ - นามสกุล	นายเอกราช จำนงค์รัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรางคณา แสงสร้อย, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำเถ้าลอยเปียกไปใช้ประโยชน์

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าลอย BLCP จำนวน 2 ชนิด โดยเถ้าลอยใช้ทั้งสภาพแห้งและเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน) และเปียกจากห้องปฏิบัติการทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)

ผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าลอย (ทั้งแห้งและเปียก) แทนที่ใน OPC ส่งผลให้ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากกว่า การก่อตัวของเพสต์นานกว่า ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์มากกว่า กำลังอัดประลัย (f_c')ของมอร์ต้าร์น้อยกว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้อยกว่า f_c' ของคอนกรีตน้อยกว่า และการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของOPC ล้วน และพบว่าการใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่ใน OPC ส่งผลให้ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากกว่า การก่อตัวของเพสต์นานกว่า ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์มากกว่า f_c' ของมอร์ต้าร์ไม่ต่างกัน ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมากกว่า f_c' ของคอนกรีตมากกว่า และการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตไม่ต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับของเถ้าลอยแห้ง นอกจากนี้พบว่าระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกที่นานกว่า ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อยลง และการก่อตัวของเพสต์นานขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์ f_c' ของมอร์ต้าร์ ค่าการยุบตัวและ f_c' ของคอนกรีต และการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ส่วนปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียก ส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมากขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัวของเพสต์ ความต้องการน้ำและ f_c' ของมอร์ต้าร์ f_c' ของคอนกรีต และการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ และสุดท้ายสามารถเปรียบเทียบสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ระหว่างของ OPC ล้วน ของเถ้าลอยแห้ง และของเถ้าลอยเปียกได้

คำสำคัญ : คอนกรีต เถ้าลอยเปียก สมบัติเบื้องต้น การต้านทานซัลเฟต

Thesis Title	Basic Properties and Sulfate Resistance of Concrete with Fly Ash
Name - Surname	Mr. Aekkarat Jumnongrat
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Assistant Professor Warangkana Sengsoy, Ph.D.
Academic Year	2017

ABSTRACT

This thesis aimed to study the basic properties and the sulfate resistance of concrete with wet fly ash to serve as wet fly ash utilization guideline.

In this study, wet fly ash and dry fly ash from the BLCP power plant were used. Wet fly ash was prepared from the plant and from the laboratory. Moisture contents of the wet fly ashes were 25%, 45%, and 65%. The wet exposure periods of fly ash were 1 week, 1 month, and 3 months. Fly ashes were replaced in Ordinary Portland Cement (OPC) only.

The study indicated that the use of fly ash (both wet fly ash and dry fly ash) replaced in OPC resulted in more normal consistency of paste, longer setting time of paste, more water requirement of mortar, less compressive strength of mortar, less concrete slump, less compressive strength of concrete, and the expansion and weight loss in sulfate solution of mortar less when compared to those of plain OPC. In addition, it was found that the use of wet fly ash partially replaced in OPC resulted in more normal consistency of paste, longer setting time of paste, more water requirement of mortar, no different compressive strength of mortar, more concrete slump, more compressive strength of concrete, and the expansion and weight loss in sulfate solution of concrete were not different when compared to those of dry fly ash. Moreover, the longer exposure time wet exposure periods of fly ash resulted in less normal consistency of paste and longer setting time of paste, but there was no effect on water requirement of mortar, compressive strength of mortar, concrete slump, compressive strength of concrete, and the expansion and weight loss in sulfate solution of concrete. Moisture contents of the wet fly ash resulted in more concrete slump, but there was no effect on normal consistency and setting time of paste, water requirement of mortar, compressive strength of mortar, compressive strength of concrete and the expansion and weight loss in sulfate solution of concrete. Finally, the properties of paste, mortar, and concrete of plain OPC , dry fly ash and wet fly ash can be compared.

Keywords: concrete, wet fly ash, basic properties, sulfate resistance

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา แสงสร้อย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่กรุณาแนะนำและเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบพระคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ และ ดร.กฤติยา แก้วมณี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต ร่วมถึงเพื่อนๆปริญญาโททุกคน ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ผู้ทำวิจัยต้องกราบขออภัยเป็นอย่างสูง มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุพัฒน์ จำนงค์รัตน์ คุณแม่ประโลม จำนงค์รัตน์ ที่อดทนด้วยความยากลำบากในการเลี้ยงดู ส่งเสียและคอยอบรมสั่งสอนให้ลูกคนนี้ได้เล่าเรียนตลอดจนให้แง่คิดที่ดีในการดำเนินชีวิต ขอบคุณครอบครัวที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด จนมีโอกาสจบการศึกษาถึงระดับนี้

เอกราช จำนงค์รัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย…….. (3)

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ…… (4)

กิตติกรรมประกาศ…….. (5)

สารบัญ…… (6)

สารบัญตาราง…….. (8)

สารบัญรูป……..... (9)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ…… (17)

บทที่ 1 บทนำ…… 19

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา…… 19

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา…..…… 21

1.3 ขอบเขตของการศึกษา..…… 21

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ…….. 21

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง…… 23

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง……...……... 23

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……... 40

บทที่ 3 วิธีการศึกษา…… 45

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา……... 45

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา……... 45

3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต…… 52

บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์...……... 61

4.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย…… 61

4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัวของเพสต์……..... 63

4.3 ปริมาณน้ำที่ต้องการและกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์…….. 70

4.4 ค่ายุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต…… 83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 การต้านทานในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย…….. 117
4.6 การเปรียบเทียบสมบัติและการต้านทานซัลเฟตของเพสต์ มอร์ต้าร์ และ
คอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก…… 132
บทที่ 5 สรุป…….... 134
บรรณานุกรม……... 135
ภาคผนวก 137
ภาคผนวก ก ตารางแสดงค่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก 138
ภาคผนวก ข ตารางแสดงค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟต
ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก…… 149
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่…… 154
ประวัติผู้เขียน…….. 167

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน..... 30
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางด้านกายรูปของเถ้าลอยตามมาตรฐาน..... 33
ตารางที่ 2.3 สภาวะของซัลเฟต..... 36
ตารางที่ 2.4 ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต..... 40
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของเพสต์ ที่ใช้ในการศึกษา..... 53
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้หาปริมาณน้ำที่ต้องการและกำลังอัดประลัย 54
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้หาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟต 56
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีต 57
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย..... 61
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย..... 63
ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์..... 65
ตารางที่ 4.4 การก่อตัวของเพสต์..... 68
ตารางที่ 4.5 ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์..... 72
ตารางที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์..... 74
ตารางที่ 4.7 ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต..... 83
ตารางที่ 4.8 สมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ผสมเปรียบเทียบกับ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน 133
ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตระหว่างเถ้าลอยแห้งกับเถ้าลอยเปียก..... 133

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัด……..……. 25
รูปที่ 2.2 เถ้าลอยหินรูปร่างกลม ……..... 31
รูปที่ 2.3 เถ้าลอยหินกลวง ……...……...…... 32
รูปที่ 2.4 เถ้าลอยหินรูปร่างเหลี่ยม ……..……...……..…... 32
รูปที่ 3.1 เถ้าลอยแห้ง……..……..... 46
รูปที่ 3.2 เถ้าลอยเปียก……..... 47
รูปที่ 3.3 เครื่องมือไวแคต…...……..... 48
รูปที่ 3.4 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร……...……..…... 48
รูปที่ 3.5 เครื่อง UTM (Universal Testing Machine)……..... 48
รูปที่ 3.6 ชิ้นตัวอย่างขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 เซนติเมตร……..… 50
รูปที่ 3.7 การวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ด้วยเครื่องวัดความยาว……..... 50
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร……...……..…. 51
รูปที่ 3.9 การชั่งน้ำหนักการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์..……...…..... 52
รูปที่ 4.1 รูปถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่……..……..... 62
รูปที่ 4.2 รูปถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย BLCP ชนิด HS ……... 62
รูปที่ 4.3 รูปถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย BLCP ชนิด HM……..... 62
รูปที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์……..……... 66
รูปที่ 4.5 การก่อตัวของเพสต์……..... 69
รูปที่ 4.6 ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย..... 73
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ต
แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอยแห้ง……..... 76
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ต
แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต……..... 77

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25……..... 78
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45……..…… 79
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65……..... 80
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W……..... 81
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M……..…… 82
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3M……..... 83
รูปที่ 4.15 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอยแห้ง ……..... 86
รูปที่ 4.16 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้งและผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25……..…… 88
รูปที่ 4.17 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้งและผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45..……..…… 89

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.18 ค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65..... 90
รูปที่ 4.19 การผสมครั้งเดียว และ การผสม 2 ครั้ง…….. 91
รูปที่ 4.20 ขั้นตอนการผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้ศึกษาโดยวิธีการผสมครั้งเดียว (NM) และการผสม 2 ครั้ง (DM)……..... 91
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าการยุบตัว (Ratio of Slump) กับอัตราส่วนน้ำแรกต่อวัสดุประสาน (w1/b) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำทั้งหมด (W1+W2) ต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55…….. 92
รูปที่ 4.22 ค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W……..…… 93
รูปที่ 4.23 ค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M……..... 95
รูปที่ 4.24 ค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3M…… 96
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง……...…….... 97
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40……...…….... 100
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55……...…….... 100

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 102
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55…… 104
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4..... 106
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55..... 107
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..... 109
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55……..... 111
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40..…….. 113

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55……..... 115

รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55……..... 117

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก โดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 W……..... 118

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก โดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 M……..... 119

รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก โดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 3 เดือน……..... 119

รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์……..…… 120

รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 เดือน……...… 121

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 3 เดือน…..…….. 121
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อเถ้าลอยสัมผัสน้ำ……..... 122
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อเถ้าลอยสัมผัสน้ำ……..... 123
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อเถ้าลอยสัมผัสน้ำ…… 123
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณผสมของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์…….. 125
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกดีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณผสมของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 เดือน……..…… 125
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณผสมของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 3 เดือน…….…….. 126

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์…… 127
รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 เดือน……..... 127
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 3 เดือน..... 128
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อเถ้าลอยสัมผัสน้ำ……..... 129
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อเถ้าลอยสัมผัสน้ำ…… 129
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อเถ้าลอยสัมผัสน้ำ…… 130
รูปที่ 4.55 การสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 270 วันในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกร้อยละ 30 โดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์, 1 เดือน และ 3 เดือน…..…….. 131

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.56 การสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 270 วันในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์1 เดือน และ 3 เดือน..... 131

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
Al_2O_3	Aluminium oxide
$CaCO_3$	Calcium Carbonate
$Ca(OH)_2$	Calcium hydroxide
CaO	Calcium Oxide
$CaSO_4$	Calcium sulfate
C_2S	Dicalcium Silicate
C_3A	Tricalcium Aluminate
C_3S	Tricalcium Silicate
C_4AF	Tetracalcium Alumino Ferrite
Fe_2O_3	Ferric Oxide
H_2O	Water
H_2SO_4	Sulfuric Acid
K_2O	Potassium Oxide
KCl	Potassium Chloride
MgO	Magnesium Oxide
$MgCO_3$	Magnesium Carbonate
$MgSO_4$	Magnesium Sulfate
NaCl	Sodium Chloride
NaOH	Sodium Hydroxide
Na_2O	Sodium Oxide
$NaSO_4$	Sodium Sulfate
SiO_2	Silicon Dioxide
SO_3	Sulfur Trioxide
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
B.S.	British Standards

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

CAH	Calcium Aluminate Hydrates
C-A-H	Calcium Aluminate Hydrates
CH	Calcium hydroxide
CSH	Calcium Silicate Hydrate
C-S-H	Calcium Silicate Hydrate
MH	Magnesium Hydroxide
M-S-H	Magnesium Silicate Hydrate
SEM	Scanning Electron Microscope
XRD	X-Ray Diffraction
XRF	X-Ray Fluorescence
CO_2	Carbon Dioxide

บทที่ 1
บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันงานก่อสร้างส่วนใหญ่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลักในโครงการก่อสร้าง อีกทั้งคอนกรีตเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งคอนกรีตสามารถนำมาใช้ได้ทั้งงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก งานคอนกรีตอัดแรง และงานผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ซึ่งการออกแบบหรือการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าการออกแบบการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีตมักจะใช้ค่ากำลังของคอนกรีตที่อายุใดอายุหนึ่ง เช่น ที่อายุ 28 วัน เป็นเกณฑ์ โครงสร้างที่ออกแบบมานั้น จะรับน้ำหนักที่ออกแบบได้ตลอดไปก็ต่อเมื่อกำลังและคุณสมบัติทางกลอื่นๆ ของคอนกรีตไม่แย่ลงไปกว่าที่อายุ 28 วัน แต่ในหลายสภาวะแวดล้อม คอนกรีตจะมีคุณสมบัติทางกลโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อม ทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และอื่นๆ ดังนั้นในการที่จะได้คอนกรีตที่นอกจากจะมีกำลังตามที่ต้องการแล้วยังมีสมบัติที่ดีในด้านความคงทนนั้น[1] ต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลาย ๆ ประการด้วยกันและต้องศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อให้ได้องค์ความรู้ในการนำมาใช้พัฒนาวัสดุคอนกรีตเพื่อให้มีความคงทน

ส่วนระดับความรุนแรงของสิ่งแวดล้อมขึ้นอยู่กับปัญหาของการทำลายคอนกรีต ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายคอนกรีตในแต่ละสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น สิ่งแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนของซัลเฟต ระดับความรุนแรงก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ความชื้น และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ทำให้การบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างให้มีความแข็งแรงคงเดิมนั้น ต้องเสียค่าใช้จ่ายมหาศาล[1]

สำหรับในปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้แร่ธาตุผสมเพิ่ม (Minerals Admixtures) เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าก้นเตา ผงหินปูน ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย เป็นต้น ซึ่งการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ใน

งานคอนกรีต ยังสามารถช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และลดปริมาณการใช้พลังงาน นำไปสู่การลดต้นทุนในการผลิต การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมคอนกรีต และปรับปรุงความทนทานของผลิตภัณฑ์คอนกรีต

เถ้าลอย (Fly Ash) คือผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งที่ได้จากการเผาถ่านหินประเทศไทยจะมีปริมาณเถ้าลอยประมาณ 3 ล้านตันต่อปี [2] ที่ผ่านมาเถ้าลอยส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต โดยการนำเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเหตุผล 2 ประการ คือประการแรกพบว่าเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลากา อลูมินา และเหล็กซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น [3] อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าลอยที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตมีเพียงบางส่วนของปริมาณเถ้าลอย ทำให้ปริมาณเถ้าลอยมีมากเกินกว่าความต้องการ ช่วงที่ผ่านมาเถ้าลอยที่เหลือจากการนำไปใช้จะถูกทิ้งและไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพ โดยเถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้จะนำไปทิ้งใกล้บริเวณโรงไฟฟ้า โดยอาจสัมผัสกับความชื้นของสภาพแวดล้อมและน้ำฝน บางครั้งจะต้องมีการใส่น้ำเข้าไปก่อนที่จะนำไปทิ้งเพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจาย จึงทำให้เถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้อยู่ในรูปแบบเถ้าลอยเปียกและไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ต้องการพื้นที่เก็บเถ้าลอยเปียกขนาดใหญ่ เพื่อเป็นการจัดการเถ้าลอยเปียกอย่างถูกต้อง การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่วัสดุปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตดูเหมือนว่าจะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ [4,5] โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ เพราะว่าเถ้าลอยที่มี CaO สูงบางส่วนจะมีคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์เมื่อสัมผัสกับน้ำจะทำให้เกิดการแข็งตัว เมื่อนำมาใช้จะต้องอบให้แห้งและบดให้ละเอียดทำให้การผสมทำได้ยาก [6] และไม่คุ้มค่ากับการนำมาใช้ เพราะฉะนั้นความเป็นไปได้สำหรับการใช้เถ้าลอยเปียกในคอนกรีตคือเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ

จากปัญหาดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำเถ้าลอยเปียก กลับมาใช้ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก ประกอบด้วย ความข้นเหลวปกติและการก่อตัวของเพสต์ ความต้องการน้ำและกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ ค่ายุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต รวมไปถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดย

ใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน แล้วเปรียบเทียบกับสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง เพื่อเป็นแนวทางในการนำเถ้าลอยเปียกไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตอย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

1.2.3 เพื่อศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก

1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

1.2.5 เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้มีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1.3.1 วัสดุที่ใช้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย โดยแทนที่เถ้าลอย (เถ้าลอยแห้งและเปียก) ในปูนซีเมนต์

1.3.2 ทดสอบสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกซึ่งประกอบไปด้วย การก่อตัว ความต้องการน้ำ และกำลังอัดประลัย

1.3.3 ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในการศึกษาครั้งนี้ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ มีดังนี้

1.4.1 ทราบถึงสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

1.4.2 ทราบถึงสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

1.4.3 ทราบถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก

1.4.4 ทราบถึงผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

1.4.5 ทราบถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยเปียก

1.4.6 เพื่อสามารถนำเถ้าลอยเปียกไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมคอนกรีตได้ต่อไป

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

2.1.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

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

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

2.1.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2

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

2.1.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

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

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum : $CaSO4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของแอทริงไจท์ (Ettringite : $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4

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

2.1.1.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.5

$$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3 + Ca.SO_4.\ 2H_2O \longrightarrow CaO.(Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4 \quad (2.5)$$

เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียม และไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็น แคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต [7]

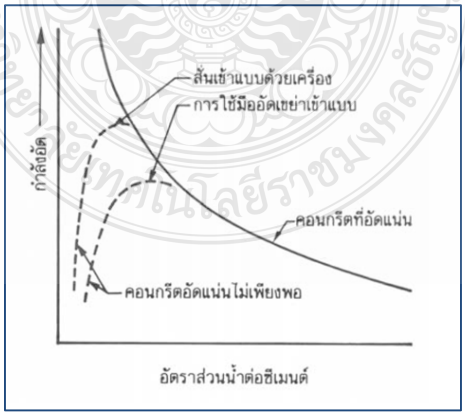
กำลังถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของคอนกรีต ทั้งนี้เพราะกำลังของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้โดยตรง เข้าใจง่าย และทดสอบได้ง่ายเช่นกัน ในบางกรณีคุณสมบัติอย่างอื่น เช่น ความคงทนต่อการกัดกร่อนหรือการทึบน้ำ อาจมีมีความสำคัญกว่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนต่อคอนกรีตรุนแรง แต่ในทางปฏิบัติพบว่าคอนกรีตที่รับกำลังได้ดีจะมีคุณสมบัติด้านอื่นดีด้วย

2.1.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต

มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต เช่น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ในกรณีที่ผสมวัสดุปอซโซลาน) อัตราส่วนเจลต่อปริมาตร อายุของคอนกรีต ชนิดของปูนซีเมนต์ ชนิดของมวลรวม วิธีการบ่มคอนกรีต เป็นต้น นอกจากนี้การทำคอนกรีตให้แน่นมีความสำคัญมากและส่งผลโดยตรงต่อกำลังของคอนกรีต การที่คอนกรีตมีฟองอากาศหรือโพรงมากจะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตและกำลังลดลง ดังนั้นต้องกระทุ้งหรือเขย่าคอนกรีตสดให้มีความหนาแน่นสูงๆ เพื่อลดฟองอากาศในคอนกรีต

1) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

โดยทั่วไปแล้ว กำลังของคอนกรีตที่อายุเท่ากัน ผ่านการบ่มและการทำให้แน่นเหมือนกันจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัด [7]

2) ชนิดของปูนซีเมนต์

ขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์และขนาดเม็ดปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีการบดละเอียดเม็ดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสจะมากทำปฏิกิริยาได้เร็ว ทำให้สามารถรับกำลังอัดได้สูงในระยะเวลาเร็ว

3) คุณภาพของหิน - ทราย

หิน – ทราย ที่เหมาะสมในการทำคอนกรีต และให้กำลังอัดสูงมีลักษณะดังนี้คือ มีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระแทกและการสึกกร่อน คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี มีรูปร่างเป็นแง่เหลี่ยมคม แต่ไม่เป็นแผ่นแบนหรือยาวเรียว และมีความสะอาด

4) อัตราส่วนของหิน – ทราย

จากการทำ TRIAL MIXED พบว่าอัตราส่วนของ หิน–ทราย ที่ให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงและสามารถทำงานได้ (WORKABILITY) อยู่ในช่วง 0.4 – 0.5 (S/A) กรณีที่ทรายมากเกินไปจะทำให้คอนกรีตมีลักษณะสีแดง ค่ารับกำลังอัดจะต่ำถึงแม้ว่าการทำงานจะง่ายก็จริงกรณีที่หินมากเกินไป คอนกรีตที่ได้จะมีสีออกไปทางสีขาวค่ารับกำลังอัดจะสูง แต่สภาพการทำงานหน้างานจะยาก เช่น การเทคอนกรีตที่มีลักษณะหน้าตัดคานแคบ หรืองานที่ใช้ SLUMP คอนกรีตอาจเกิดการแยกตัว (SEGREGATE) ได้ง่าย

5) น้ำยาผสมคอนกรีต

ขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำยาที่ใช้โดยทั่วไปแล้วน้ำยา TYPE D (PLASTICIZER) และน้ำยา TYPE G (SUPER PLASTICIZER) จะส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้สูงขึ้นที่ SLUMP เดียวกัน

2.1.2.2 กำลังอัดของคอนกรีต

โดยทั่วไปการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กใช้กำลังของคอนกรีตเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ โดยมีสมมุติฐานว่าคอนกรีตรับแรงอัดเป็นหลักโดยไม่สามารถรับแรงดึงได้ ดั้งนั้นการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตจึงต้องมีการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตในเรื่องของการรับแรง นอกจากนี้การทกสอบกำลังอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งที่กระทำได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบอื่นๆ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังของคอนกรีตที่นิยมใช้กันคือ ตัวอย่างรูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอกซึ่งให้ตัวอย่างรับแรงอักเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนกระทั่งตัวอย่างคอนกรีตวิบัติ โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 2 ถึง 4 นาทีต่อ

ตัวอย่าง กำลังอัดที่คอนกรีตรับได้อาจอยู่ในช่วง 100 ถึง 100 กก/ซม^2 สำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดาหรือมีค่ามีกว่า 1000 กก/ซม^2 ในกรณีที่เป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก

2.1.3 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.1.3.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

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

1) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

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

2) ปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟูม (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

2.1.3.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.7

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \qquad (2.6)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

2.1.4 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly Ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับจะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ในบางกรณีที่เผาถ่านหินด้วยอุณหภูมิซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหิน (ประมาณ 1500 ºC หรือ สูงกว่า) เถ้าถ่านหินจะหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้นทำให้มีน้ำหนักมาก และตกลงสู่ก้นเตา จึงเรียกว่า เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (Bottom Ash)

2.1.4.1 องค์ประกอบทางเคมี

เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะมีคุณสมบัติเป็นสาร Pozzolan มีส่วนประกอบหลักที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ อยู่ในรูปสารประกอบของ silica และ alumina เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ในสภาพที่มีความชื้น ในระยะแรก น้ำกับปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยา hydration เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน ที่แข็งตัว เช่น Calcium Silicate Hydrate, Calcium Aluminate Hydrate และเป็นสารละลาย $Ca(OH)_2$ อิสระอยู่ในโพรงของเนื้อคอนกรีต(pore solution) ซึ่งสามารถถูกชะล้างออกไปได้ ในช่วงต่อมา เถ้าลอยจะเข้าทำปฏิกิริยา pozzolanic กับสาร $Ca(OH)_2$ ส่วนนี้ เกิดเป็นสารเชื่อมประสานชนิดเดียวกันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตเหลือปริมาณ $Ca(OH)_2$ น้อยลง มีความแข็งแรงในระยะยาวเพิ่มขึ้น และมีความคงทนเพิ่มขึ้น [1] โดยเถ้าลอยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามมาตรฐาน ASTM 4-6 C-168

2.1.4.2 เถ้าลอย Class C

เถ้าลอย Class C ส่วนใหญ่มักเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง มักทำปฏิกิริยากับน้ำโดยตรงทำให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเอ็ททริงไจต์ (ettringite) นอกจากนี้ส่วนที่มีสถานะไม่เป็นผลึกซึ่งมีอยู่ในเถ้าลอย Class C โดยวัสดุส่วนนี้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและแอลคาไลไฮดรอกไซด์ที่ได้มาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำและบางส่วนของเถ้าลอยกับน้ำ

2.1.4.3 เถ้าลอย Class F

เถ้าลอย Class F มักมีปริมาณแคลเซียมต่ำ ส่วนใหญ่ประกอบด้วย ส่วนที่ไม่เป็นผลึกของซิลิกาสูงและส่วนที่เป็นผลึกซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาได้น้อย ได้แก่ มูลไลต์ แมกนีไทต์ หรือเฟอร์ไรต์ สปินิลและควอทซ์ เถ้าลอย Class C ชนิดที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (มักมาจากถ่ายหินประเภทลิกไนต์และซับบอทูมินัส) จะให้กำลังในระยะแรกสูงกว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (จากถ่านหินประเภทบิทูมินัส หรือแอนทราไซต์) เมื่อเปรียบเทียบที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยน้ำหนักเท่ากัน เนื่องจากมีปัจจัยทั้งทางเคมีและทางกายภาพที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM 4618 [1]

ข้อกำหนดทางเคมี	Class of Fly ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิก้าออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์และเฟอร์ริคออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3$ และ Fe_2O_3), Min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO3), Max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, Max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายจากการเผา (Loss on ignitionZ (Loi)), Max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), Max %	1.5	1.5

ที่มา : คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุในคณะกรรมการวิชาการ สาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศ ไทยในนพระบรมราชูปถัมภ์, “คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมี และทางกายภาพของเถ้าลอย” การสัมมนาเรื่องการใช่ท่อเถ้าลอยในงานคอนกรีต, (ณ หอประชุม 1 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 17 กุมภาพันธ์ 2542), หน้า 8

2.1.4.4 คุณสมบัติทางกายภาพ

จากการเผาถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 900-1,100 °C เมื่อไอร้อนลอยขึ้นไป และเกิดการถ่ายเทความร้อน จนไอร้อนเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ละอองเถ้าซึ่งเป็นของแข็งที่เหลืออยู่ จะรวมตัวกันก่อรูป เป็นอนุภาคเล็กๆ มีสัณฐานเป็นทรงกลม และมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 30 ไมครอน ด้วยความกลมและขนาดที่เล็ก อนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ จึงเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่นที่ดี ในลักษณะของ Ball Bearing ระหว่างที่ผสมคลุกเคล้าร่วมกับปูนซีเมนต์ หิน และทราย ในการผสมคอนกรีต การคลุกเคล้าจึงสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าที่ใช้กับคอนกรีตปกติ ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว เป็นสารเชื่อมประสาน [1]

1) สีและรูปร่าง

สีของเถ้าลอยและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในคอนกรีตจะส่งผลกระทบต่อสีของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงสีของปูนซีเมนต์หรือการเปลี่ยนวัสดุผสม โดยปกติเถ้าลอยจะมีสีเทา-น้ำตาล หรือ น้ำตาล-แดง ตามแต่ชนิดของถ่านหิน และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา สีของเถ้าลอยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต

คุณสมบัติที่เป็นทรงกลมขนาดเล็กของเถ้าลอยลิกไนต์จะช่วยอุดแทรกช่องว่างระหว่างเม็ดหิน ทราย และปูนซีเมนต์ ได้เป็นอย่างดี ทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่น ทึบน้ำมากขึ้น สารละลายต่างๆ แทรกซึมเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น ดังนั้น จึงส่งผลให้คอนกรีตชนิดนี้มีความคงทนต่อการทำลายของสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้นด้วย

เถ้าลอยหินโดยทั่วไปจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มม.)จนถึง 0.15 มม. ซึ่งจะพบว่าเถ้าถ่านหินโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นทรงกลมตัน

รูปที่ 2.2 เถ้าลอยหินรูปร่างกลม [7]

รูปที่ 2 เถ้าถ่านหินกลวง (Cenosphere)

รูปที่ 2.3 เถ้าลอยหินกลวง [7]

เถ้าลอยหินที่มีขนาดใหญ่และอาจมีเถ้าถ่านหิน ขนาดเล็กๆ อยู่ภายใน เรียกว่า เถ้าถ่านหินกลวง (Cenosphere) ซึ่งมีน้ำหนักเบาและลอยน้ำได้

รูปที่ 3 เถ้าถ่านหินรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม

รูปที่ 2.4 เถ้าลอยหินรูปร่างเหลี่ยม [7]

คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหินชนิดนี้ต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้นซึ่งทำให้กำลังของคอนกรีตตกลงได้

2) ความละเอียด

อนุภาคของเถ้าลอยมีหลากหลายขนาดขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร โดยเถ้าลอยที่ใช้กันได้มาจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งดักจับเถ้าลอยด้วยเครื่องดักจับแบบไฟฟ้าสถิตหรือใช้ถุงเก็บเถ้าลอยที่เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตมักมีอนุภาคเล็กซึ่งการทดสอบความละเอียดของเถ้าลอยที่มักนิยมใช้กัน คือ การทดสอบโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 μm) โดยน้ำหนักมาตรฐาน ASTM C 430 และการทดสอบความละเอียดโดยการวัดพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักโดยวิธี Air Blaine Permeability จะให้ค่าปกติอยู่ในช่วง 2,500 - 4,000 ซม^2 /กรัม โดยที่ค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีค่าไม่ต่ำกว่า 2800 ซม^2/กรัม ในการเก็บตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงงานผลิตไฟฟ้าโรงงานแม่เมาะ จำนวน 12 ตัวอย่าง จากแหล่งต่างๆกันเพื่อทดสอบการหาค่าความละเอียดของเถ้าลอย ตามวิธีของเบลน พบว่าเถ้าลอยเถ้าลอยมีค่าความละเอียดแตกต่างกันอยู่ ในช่วงกว้างๆ ระหว่าง 2,130 – 3,650 ซม^2/กรัม ซึ่งถือว่ามีค่าแตกต่างกันค่อนข้างสูง และส่วนใหญ่จะมีค่าความละเอียดกระจายอยู่ในช่วงระหว่าง 2,557 – 2,887 ซม^2/กรัม สำหรับคุณสมบัติของเถ้าลอย เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์สามารถดูได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางด้านกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618

ข้อกำหนดทางกายภาพ	Class of Fly ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 หลังจากการร่อนแบบเปียก, Max %	34	34
หาดัชนีกำลัง : โดยผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	75	75
7 วัน, Min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม		
14 วัน, Min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม		

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางด้านกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618 (ต่อ)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	Class of Fly ash	
	F	C
ความต้องการน้ำ : Max % ตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave, Max %	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		
ความหนาแน่น, Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
ส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325, Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
Multiple Factor % (LOI กับเปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่ค้างกับตะแกรงเบอร์ 325)	255	-
Drying shringkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน, Max % ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

3) ความถ่วงจำเพาะ

จากการศึกษาของ Luke พบว่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าระหว่าง 1.97 ถึง 3.02 แต่โดยทั่วไปค่านี้จะอยู่ระหว่าง 2.2-2.8 สำหรับเถ้าลอยจากแม่เมาะจะมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.0 แต่เมื่อทำการแยกให้มีขนาดเล็กลง มีความละเอียดสูงขึ้นจะมีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น เพราะเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่มักมีรูพรุนสูงกว่าเถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก

2.1.4.5 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนข้อดีกว่าความสามารถในการเทได้สูงกว่า, ความสามารถในการสูบฉีดไปตามท่อ (pump) สูงกว่า, slump loss ช้ากว่า, ลดความร้อนในคอนกรีตได้มากกว่า, กำลังในอายุยาวสูงกว่า, ความพรุนของคอนกรีตจะต่ำกว่า, การหดตัวแบบออโตจีนัสต่ำกว่า, การหดตัวแบบแห้งต่ำกว่า, การเกิดสนิมในเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ต่ำกว่า, ความต้านทานซัลเฟตและกรดสูงกว่า, ความต้านทานผลการขยายตัวจากปฏิกิริยา ระหว่างด่างกับมวลรวมสูงกว่าข้อด้อยกว่า ระยะเวลาการก่อตัวยาวกว่า, กำลังในระยะต้นต่ำกว่า, คาร์บอเนชั่นเกิดขึ้นสูงกว่า, ความต้านทานต่อการเยือกแข็งและการหลอมเหลวของน้ำสลับกัน (freezing and thawing) ต่ำกว่า (ซึ่งในเรื่องนี้มักไม่เป็นปัญหาใน

ประเทศไทย เพราะเป็นเมืองร้อน)คุณสมบัติเทียบเท่า คุณสมบัติทางกลศาสตร์ต่างๆ เช่น กำลังรับแรงดึง, กำลังรับแรงดัด, ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น, ค่าสัมประสิทธิ์ปัวซอง และความต้านทานต่อการขัดสี (เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ที่มีกำลังอัดใกล้เคียงกัน) [8]

2.1.5 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

ปัจจุบันการศึกษาความเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อคอนกรีตนับว่ามีความจำเป็นยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือที่ใกล้กับทะเลเช่น ตอม่อท่าเรือ ประภาคาร เขื่อน ฯลฯ เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล ซัลเฟตอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด อำนาจการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น การทำลายของซัลเฟตไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้นและรุนแรงมากในกรณีที่เปียกและแห้งสลับกัน เช่น ในท่อระบายน้ำโสโครก ในอาคารส่งน้ำเพื่อชลประทาน ฐานรากและพื้นอาคารในดินที่มีซัลเฟต

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตในทะเลเกิดขึ้นโดยการกัดกร่อนทางเคมีและการกัดเซาะทางกายภาพ เช่น การกระแทกของคลื่นและการที่คอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน สำหรับการกัดกร่อนทางเคมีพบว่าเกลือในรูปของสารละลายจะสามารถทำลายคอนกรีตได้เพราะจะซึมเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์ได้ สารละลายซัลเฟตในนำทะเลที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรง และรุนแรง คือแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ส่วนเกลือแกง (NaCl) กับโปตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งมักพบมากในน้ำทะเลเช่นกันจะทำให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้ง่ายในน้ำใต้ดินบริเวณที่มีแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$) มักมีซัลเฟตปนอยู่เสมอ โดยทั่วไปดินมีซัลเฟตอยู่เล็กน้อยคือประมาณร้อยละ 0.01 ถึง 0.05 ของน้ำหนัก แต่จะเพิ่มสูงมากขึ้นเนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยธรรมชาติ

การศึกษาการกัดกร่อนของซัลเฟตต่อคอนกรีตเป็นสิ่งที่น่าสนใจและจำเป็นอย่างมาก เพราะถ้าไม่ป้องกันผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในตอนเริ่มแรกของการก่อสร้างแล้วคอนกรีตอาจเสียหายได้ในอนาคตอันใกล้ ทำให้ต้องซ่อมแซมคอนกรีตและการซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟตจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ โดยธรรมชาติของซัลเฟตแต่ละชนิดมีความสามารถละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน (คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, 2536) กล่าวคือ แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ละลายน้ำเพียง 1.2 กรัม/ลิตร ส่วนโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ละลายน้ำ 240 กรัม/ลิตร และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO4) ละลายน้ำ 300 กรัม/ลิตร เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟต (CaSO4) มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาความทนทานต่อซัลเฟตจึงใช้สารโซเดียมซัลเฟต (Na2SO4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO4) กลไกการกัดกร่อนของซัลเฟตอิออนทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้เกิดการขยายตัวในคอนกรีตที่แข็งตัวจนกระทั่งเกิดการแตกร้าว โดยสภาวะของซัลเฟตสามารถแบ่งตามสภาพแวดล้อมซัลเฟตดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สภาวะของซัลเฟต

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	1,500-10,000
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000

2.1.5.1 แหล่งของเกลือซัลเฟต

เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเล หรือในดินทั่วไป เกลือซัลเฟต ชนิดที่พบมากที่สุด มักจะเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต รองลงมาก็คือแมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังมักจะอยู่ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติ

2.1.5.2 กลไกการกัดกร่อนโดยโซเดียมซัลเฟต

การกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) ขึ้นอยู่กับปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยกลไกเริ่มจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายน้ำและมีความเป็นกรดเป็นด่างสูง ดังสมการที่ 2.8

$$Ca(OH)_2 + Na_22SO_4 \longrightarrow \text{ยิปซั่ม} + NaOH \quad (2.8)$$

ยิปซั่มที่ได้จากสมการที่ 2.8 จะทำปฏิกิริยากับโมโนซัลเฟตหรือไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ทำให้ได้ Secondary Ettringite เกิดเป็นชั้นบริเวณผิวด้านนอก ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10

$$C\text{-}A\text{-}H + \text{ยิปซั่ม} \longrightarrow \text{Ettringite} + Ca(OH)_2 \quad (2.9)$$

$$C3A + \text{ยิปซั่ม} \longrightarrow \text{Ettringite} \quad (2.10)$$

ยิปซั่มและ Ettringite ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นกว่า 2 เท่าโดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลปฏิกิริยาไฮเดรชั่นชนิดอื่นมากจึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำละลายโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต

2.1.5.3 กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต

เริ่มจากการทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ยิปซั่มและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ดังสมการที่ 2.11

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 \longrightarrow \text{ยิปซั่ม} + Mg(OH)_2 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.10 ปฏิกิริยานี้ทำให้ความเป็นด่าง (pH) ของสารละลายลดลงซึ่งส่งผลให้เกิดการไม่อยู่ตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) โดยจะเกิดการสลายตัวเพื่อทำให้ความเป็นด่าง (pH) สูงขึ้น ดังสมการที่ 2.12

$$\text{C-S-H} \longrightarrow \text{สารละลาย } SiO_2 + Ca(OH)_2 \qquad (2.12)$$

พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)2) นี้ทำปฏิกิริยากันกับแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ก่อให้เกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) การลดลงของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) มาจากการที่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ที่อยู่ในรูปของสารละลายได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการเชื่อมประสาน ดังนั้นกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จะก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงมากกว่าในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.11 ถึง2.12 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมากและค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างไม่สูง จึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettingite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังสมการที่ 2.14

จากสมการที่ 2.13 และ2.14 ทั้ง $C\text{-}S\text{-}H_2$ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย $C\text{-}S\text{-}H_2$ จะถูกสะสม ในช่องว่าง (pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิก้าเจล (S_2H) ดังแสดงในสมการที่ 2.15 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย ดังนั้นการทำลายโดยแมกซีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม $C\text{-}S\text{-}H_2$ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต

$$CH + MS + 2H \longrightarrow C\text{-}S\text{-}H_2 + MH \qquad (2.13)$$

$$C_XS_YH_Z + XMS + (3X + 0.5Y + Z)H \longrightarrow XC\text{-}S\text{-}H_2 + XMH + 0.5_YS_2H \qquad (2.14)$$

$$4MH + SH_{11} \longrightarrow M_4SH_{8.5} + (n - 4.5)H \quad (2.15)$$

2.1.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟตมีดังนี้

1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต

2) ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยากลดการทำลายขั้นรุนแรง

3) ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF สูงและปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_2AและC_3S ต่ำก็มีความสามรถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

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

2.1.5.5 วิธีการป้องกันการทำลายของซัลเฟต

1) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และอัตราส่วน C_2S และ C_3S ต่ำ นั่นคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต (Sulfate Resisting Cement)

2) การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งช่วยลดปริมาณบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย

3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่มากเกินไป

ในบางกรณีการป้องกันความเสียหายจากการทำลายของซัลเฟตที่รุนแรงโดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่พอในสภาวะที่มีซัลเฟตเข้มข้นอยู่ในระดับรุนแรงมาก หากใช้ปอซโซลานร่วมด้วยจะเป็นการช่วยทำให้คอนกรีตมีความต่านทานต่อซัลเฟตได้

ดียิ่งขึ้น ตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงข้อแนะนำของสมาคมคอนกรีตในสหรัฐอเมริกาสำหรับการเลือกใช้วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต ในสภาวะที่มีซัลเฟตอยู่ในระดับรุนแรงต่างๆ กัน [7]

ตารางที่ 2.4 ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (SO_4^{2-},ร้อยละ)	ซัลเฟตในน้ำ (ppm.)	ประเภทของวัสดุประสาน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
เบาบาง	0.00-0.10	0-150	-	-
ปานกลาง	0.10-0.20	150-1500	Type 2,Type 1 + สารปอซโซลาน	ไม่สูงกว่า 0.50
รุนแรง	0.20-2.00	1500-10000	Type 5	ไม่สูงกว่า 0.45
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10000	Type 5 + สารปอซโซลาน	ไม่สูงกว่า 0.45

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธีรติ ศรีจันทร์ และคณะ, (2011) [10] ศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วม ปูนซีเมนต์ - เถ้าลอย, ปูนซีเมนต์ - ผงฝุ่นหินปูน และ ปูนซีเมนต์ – เถ้าลอย – ผงฝุ่นหินปูน การทดสอบได้ใช้ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1, 3 และ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C150 เพื่อศึกษาผลของความละเอียด และองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกันของปูนซีเมนต์ และใช้เถ้าลอย ประเภท 2ก และ 2ข ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1014 เพื่อศึกษาผลของชนิดของเถ้าลอย ผงฝุ่นหินปูนที่ใช้ในการทดสอบมีความละเอียด 5 ไมครอน สภาพการบ่มที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ การบ่มด้วยน้ำ และบ่มในอากาศ กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนัก (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.55 ในการศึกษาได้ประเมินอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้ดัชนีวัดผลต่อการบ่ม (Curing Sensitivity Index, CSI) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความแตกต่างด้านกำลังอัดของตัวอย่างที่บ่มในน้ำกับบ่มในอากาศ เทียบกับกำลังอัดของตัวอย่างที่บ่มในน้ำ ในกรณีที่คอนกรีตมีค่า CSI สูง แสดงว่า

การบ่มมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตนั้นๆ สูง จากการศึกษาพบว่า การบ่มมีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต คอนกรีตที่ได้รับการบ่มน้ำจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มในอากาศ เมื่อเปรียบเทียบผลตามชนิดของปูนซีเมนต์ พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 จะมีผลต่อการบ่มมากที่สุด ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 มีค่า CSI ลดลงตามลำดับ การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตทำให้ CSI สูงขึ้น โดยเถ้าลอยประเภท 2ก จะมี CSI มากกว่าเถ้าลอยประเภท 2ข การใช้ผงฝุ่นหินปูนในคอนกรีตสามารถลด CSI ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วมปูนซีเมนต์ – เถ้าลอยได้

Kula และคณะ, (2001) [11] ศึกษาผลเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยการแทนที่ปูนซีเมนต์ และเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ตามลำดับ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันทุกส่วนผสม จากผลการศึกษาพบว่า ช่วงอายุต้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตา มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตล้วน แต่ช่วงอายุปลายคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตา มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตล้วน ยกเว้นการแทนที่ของเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตาร้อยละ 20 และ 25 โดยกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วงอายุต้นการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้ลดปริมาณปูนซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง แต่ช่วงอายุปลายคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานนิกของเถ้าลอย ส่วนปริมาณน้ำในคอนกรีต ระยะเวลาการก่อตัว และการขยายตัวของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลเนื่องจากการลดปริมาณความละเอียดและปูนขาวอิสระของปูนซีเมนต์

N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis and S. Tsivilis ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านซีเมนต์ระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ผงหินปูน, ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan) ในที่นี้คือ เถ้าลอย ผลจากการทดลองพบว่า ซีเมนต์ผสมผงหินปูนให้ค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นสูงขึ้น ตรงกันข้ามกับซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นลดลง แต่เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุช่วง 90 ถึง 540 วันพบว่าซีเมนต์ผสมปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือซีเมนต์ผสม เถ้าลอย จะให้กำลังรับ

แรงอัดสูงกว่าทั้งซีเมนต์ปกติ และซีเมนต์ผสมผงหินปูน ซีเมนต์ผสมผงหินปูนจะมีความต้องการน้ำน้อยกว่าเมื่อเทียบกับซีเมนต์ผสมปอซโซลานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

S.Targan และคณะ, (2003) [12] ศึกษาผลการใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยกำหนดเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25, และ 30 ตามลำดับ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันทุกส่วนผสม จากผลการศึกษาพบว่า ช่วงอายุต้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตาในปริมาณร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตล้วน แต่ช่วงอายุปลายคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตา มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตล้วน เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานต้องอายุเวลาในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุต้นจึงต่ำ การใช้เถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตาทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยกำหนดเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาในปริมาณร้อยละ 10 ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่ของวัสดุปอซโซลานที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเพิ่มของวัสดุปอซโซลานเป็นการเพิ่มผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเกิดขึ้นเร็ว

L. B. Andrade และคณะ, (2009) [13] ศึกษาผลของเถ้าก้นเตาต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยใช้แทนที่มวลรวมละเอียด ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต ดังนี้ ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตและการหดตัวแบบพลาสติก ใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า มีความเป็นไปได้ที่ลักษณะอนุภาคของเถ้าก้นเตาที่เป็นรูพรุน ทำให้สามารถมีการดูดและกักเก็บน้ำไว้ภายในได้ การใช้เถ้าก้นเตามีผลต่อระยะเวลาการก่อตัว การสูญเสียน้ำเนื่องจาการเยิ้ม กำลังอัดและการหดตัวแบบพลาสติกของคอนกรีต โดยระยะเวลาการก่อตัวและการสูญเสียน้ำเนื่องจากการเยิ้มของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น กำลังอัดและการหดตัวแบบพลาสติกของคอนกรีตมีค่าลดลง ตามปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าก้นเตามีลักษณะเป็นรูพรุนเมื่อผสมในคอนกรีต จะมีผลต่อการดูดซึมน้ำและการสูญความชื้นภายในคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาจะมีการซึมน้ำไว้ภายในรูพรุนของคอนกรีต ทำให้ลดการเกิดแรงดึงภายในช่องว่างคะปิลารี ส่งผลให้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่ำ

นายธงฉาน อ่อนโอน และ นายนคร วงศ์สว่างทรัพย์ (2554) ศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมของคอนกรีตบดอัดที่มีกากยิปซัมและเถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่ม โดยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของก้อนคอนกรีตบดอัดที่มี เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และกากยิปซัม ผสมอยู่ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 12 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ซึ่งศึกษาคุณสมบัติการดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัด ได้แบ่งตัวอย่างการทดสอบออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 14 วัน แช่น้ำ กลุ่มที่2 ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน แช่น้ำ และกลุ่มที่ 3 อายุการบ่มที่ 14 วัน แช่น้ำ-อบแห้ง 5 รอบ ทดสอบการดูดซึมน้ำแล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 28วัน จากการทดสอบผลการทดสอบในเรื่องการกำลังรับแรงอัดมีปัญหาในด้านการเตรียมตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้จึงมีความแปรปรวนสูง ดังนั้นการทดสอบในการรับแรงอัดนี้จึงได้ข้อสรุปเป็นแนวโน้มเท่านั้น โดยไม่ได้ตัดข้อมูลทิ้ง เนื่องจากจำนวนข้อมูลในแต่ละตัวอย่างมีน้อย ซึ่งคอนกรีตบดอัดที่ แช่น้ำ-อบแห้ง 5 รอบ ที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตบดอัดที่ แช่น้ำและข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดสอบการกำลังรับแรงอัดจึงไม่สามารถนำไปใช้ได้ ส่วนข้อมูลในด้านการดูดซึมน้ำนั้นได้ผลการทดลองที่ชัดเจนคือ เมื่อใช้ปริมาณยิปซัมในส่วนผสมที่มากขึ้น จะทำให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มที่ลดลง โดยเมื่อใช้ปริมาณยิปซัม12เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือร้อยละ 7.59 โดยค่ากำลังรับแรงอัดไม่เปลี่ยนแปลงมากหนักมากนัก ซึ่งการดูดซึมน้ำจะลดลงร้อยละ 6.7 เมื่อเทียบกับกรณีไม่ใส่ยิปซัมเลย

Chindaprasirt et al. (2005) ทำการทดลองหาผลกระทบของความละเอียดของเถ้าลอยต่อกำลังอัดคอนกรีต ความพรุน และขนาดของโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีต โดยใช้เถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ 19.1 และ 6.4 ไมโครเมตร มีอัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย 0.00,0.20 และ 0.40 ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35 พบว่าการใช้สารปอซโซลานสามารถช่วยลดโพรงช่องว่างในเนื้อเพสต์ของคอนกรีตได้ ทำให้ส่งผลในด้านเพิ่มกำลังรับแรงอัดลดความสมมารถการซึมผ่านในเนื้อคอนกรีต และเพิ่มความคงทนของคอนกรีต

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2549) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่าการขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและ

แมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ต้ารปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกันมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่ลงกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak and H.T. Cao (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมปอซโซลาน (เถ้าลอยชนิด F และเถ้าแกลบ) ใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตัวอย่างที่ใช้วัดการขยายตัวจะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 และทำการตรวจสอบค่า pH ของสารละลาย จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยและเถ้าแกลบช่วยลดการขยายตัวของมอร์ต้าร์ และค่า pH นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าแกลบมีประสิทธิภาพมากกว่าเถ้าลอย จากผลการทดสอบ SEM ที่ผิวตัวอย่างที่แตกร้าวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตชี้ให้เห็นว่าการทำลายโดยซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสม เถ้าลอย หรือเถ้าแกลบถูกยับยั้งโดยการลดแคลเซียมออกไซด์ และอัตราส่วน C/S ของ CSH เจล เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วนพบว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีแคลเซียมซัลเฟตน้อยกว่า และเกิดแอททริงไจท์น้อยกว่าอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับในกรณีมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยก็จะน้อยกว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีมากกว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปอซโซลานทั้งสองชนิดนี้ในอัตราการแทนที่ถึง ร้อยละ 40 เพื่อสร้างซีเมนต์ผสมที่มีความต้านทานซัลเฟตด

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

สำหรับวิธีการศึกษานี้ประกอบด้วย วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150 โดยมีลักษณะเป็นปูนซีเมนต์ใหม่และไม่จับตัวเป็นก้อน

3.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash) ที่ใช้ในการศึกษานี้นำมาจากโรงไฟฟ้า BLCP จ. ระยอง คือ เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินที่ผสมระหว่าง Hunter Valley และ Spring Creek (HS) และ เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินที่ผสมระหว่าง Hunter Valley และ Melawan (HM) โดยเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณ CaO ต่ำ (Low CaO)

3.1.3 ทราย (Sand) ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

3.1.4 หิน (Stone) เลือกที่ไม่มีสิ่งเจือปน นำไปล้างด้วยน้ำสะอาดและร่อนค้างตะแกรงเบอร์ 4 และนำไปอบแห้ง

3.1.5 น้ำ (Water) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำประปาที่สะอาด

3.1.6 สารผสมเพิ่ม ที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F (Superplasticizer)

3.1.7 สารซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 1) แมกนีเซียมซัลเฟต 2 โซเดียมซัลเฟต

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

3.2.1 วิธีการเตรียมเถ้าลอย

สำหรับเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษามี 2 ลักษณะ คือเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก

3.2.1.1 เถ้าลอยแห้ง

ในส่วนของเถ้าลอยแห้งใช้เถ้าลอยบดละเอียด จากโรงงานไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง จำนวน 2 ชนิด คือ HS และ HM โดยเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินอยู่ในสภาพแห้ง ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 เถ้าลอยแห้ง

3.2.1.2 เถ้าลอยเปียก

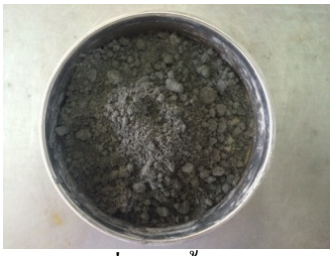
ในส่วนเถ้าลอยเปียกจะนำมาศึกษาถึง ระยะเวลาสัมผัสความชื้น และปริมาณความชื้นของเถ้าลอยมีรายละเอียดดังนี้

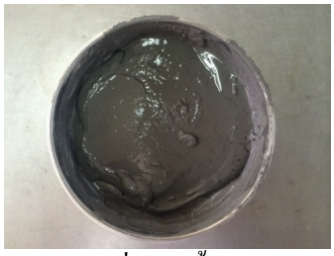
1) เถ้าลอยที่ได้จากแหล่งผลิต

โดยเถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้จะนำไปทิ้งใกล้บริเวณโรงไฟฟ้า โดยอาจสัมผัสกับความชื้นของสภาพแวดล้อมและน้ำฝน บางครั้งจะต้องมีการใส่น้ำเข้าไปก่อนที่จะนำไปทิ้งเพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจาย ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ (1W) 1 เดือน (1M) และ 3 เดือน (3M) สำหรับเถ้าลอยจากแหล่งผลิตชนิด HS มีความชื้นร้อยละ 10, 29 และ 41 และชนิด HM มีความชื้นร้อยละ 14, 24 และ 40 ตามลำดับ

2) เถ้าลอยที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

สำหรับเถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง 2 ชนิด) ได้เตรียมเถ้าลอยที่มีความชื้น 3 ปริมาณ ได้แก่ ร้อยละ 25, 45 และ 65 โดยแต่ละความชื้นได้เตรียมที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M ดังรูปที่ 3.2


(ก) เถ้าลอยที่ความชื้นร้อยละ 25


(ข) เถ้าลอยที่ความชื้นร้อยละ 45

(ง) เถ้าลอยที่ความชื้นร้อยละ 65

รูปที่ 3.2 เถ้าลอยเปียก

3.2.2 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยที่ใช้

3.2.2.1 ความถ่วงจำเพาะ (ตามมาตรฐาน ASTM C128)

3.2.2.2 ถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอย โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope

3.2.2.3 องค์ประกอบทางเคมี X-ray fluorescent analysis (XRF) ตามมาตรฐาน ASTM C311

3.2.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัวของเพสต์

3.2.3.1. ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187 ด้วยวิธีเข็มไวแคท (Vicat Apparatus) (ภาพที่ 3.3)

3.2.3.2. การก่อตัว (Setting Time) โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 191 ซึ่งทำการก่อตัวระยะต้นและระยะเวลาก่อตัวระยะปลายตัวของซีเมนต์เพสต์ ด้วยเครื่องมือไวแคท (รูปที่ 3.3)

3.2.4 ปริมาณน้ำที่ต้องการ และกำลังอัดของมอร์ต้าร์

3.2.4.1 ปริมาณน้ำที่ต้องการ (Water Requirement) (ตามมาตรฐาน ASTM C1437)

3.2.4.2 การทดสอบกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 ทำการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ โดยหาค่าการไหล จนได้ค่าการไหลร้อยละ 110±5 ตามมาตรฐาน ASTM C 1437จากนั้นหล่อตัวอย่างการทดสอบขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.4) และบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 1, 7, 28 และ 91 วัน และทดสอบกำลังอัดประลัยด้วยเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) (รูปที่ 3.5)

รูปที่ 3.3 เครื่องมือไวแคต

รูปที่ 3.4 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร

รูปที่ 3.5 เครื่อง UTM (Universal Testing Machine)

3.2.5 ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

3.2.5.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143 ด้วยกรวยทดสอบการยุบตัว (Slump Cone)

3.2.5.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881 ด้วยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร นำคอนกรีตเทลงในแบบหล่อแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นการทำให้เป็น เมื่อคอนกรีตอายุ 24 ชั่วโมง นำออกจากแบบและนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 1 7 28 และ 91 วันและทำการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) (รูปที่ 3.5)

3.2.6 การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยเปียก

3.2.6.1 การทดสอบการขยายตัวของมอร์ต้าร์

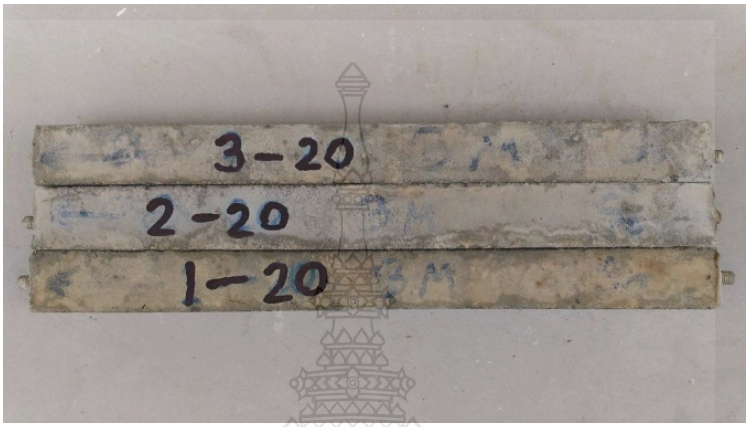
ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัวของตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์นั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จะวัดการขยายตัวของทั้งตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยใช้ตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 เซนติเมตร หลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง (Mold) แล้วหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ตัวอย่างจะถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งได้แยกเตรียมไว้เพื่อทำการทดสอบการขยายตัวของแท่งตัวอย่าง ที่อายุต่างๆ สำหรับสารละลายซัลเฟต จะมีการเปลี่ยนที่อายุทุกๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง

ในส่วนวิธีการวัดการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยหลังจากแช่ตัวอย่างในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 ต่อจากนั้นนำตัวอย่างแช่ในสารละลายซัลเฟต แล้วทำการวัดความยาวของตัวอย่าง ที่อายุทุกๆ 1 เดือน ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต สำหรับการขยายตัวของตัวอย่างเป็นการเฉลี่ยการขยายตัว 3 แท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคำนวณจาก

การขยายตัว (%) = $[(L_t - L_i)/285]x100$ (3.1)

โดยที่ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มม.)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต (มม.)



รูปที่ 3.6 ชิ้นตัวอย่างขนาด 2.5 x 2.5 x 28.5 เซนติเมตร

รูปที่ 3.7 การวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ด้วยเครื่องวัดความยาว

3.2.6.3 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

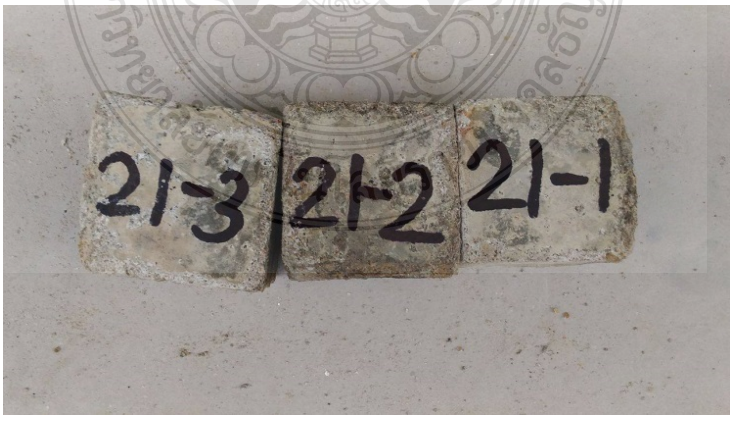
ในการประเมินการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ในการศึกษาครั้งนี้นั้นจะวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น โดยใช้ตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร หลังจากหล่อลงแบบตัวอย่างแล้วหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ตัวอย่างจะถอดแบบที่อายุ 1 วัน

ในส่วนการวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ในสารละลายซัลเฟตนั้น โดยหลังจากถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์ 1 วัน แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ของแต่ละสัดส่วนผสมชั่งน้ำหนักโดยเป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ หลังจากชั่งน้ำหนักเสร็จแล้วนำตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์แช่ในสารละลายซัลเฟต เมื่อครบอายุที่ต้องการวัดการสูญเสียน้ำหนักนำตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์มาขัดผิวด้วยแปลงเพื่อให้เศษมอร์ต้าร์ที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตหลุดออกต่อ จากนั้นนำตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าไปหาการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ เนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าร์ได้จาก

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (\%)} = [(W_i - W_x)/W_i]x100 \qquad (3.1)$$

โดย W_i คือ ค่าน้ำหนักเริ่มต้น

W_x คือ ค่าน้ำหนักที่อายุต่างๆที่แช่ในสารละลายซัลเฟต



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร

รูปที่ 3.9 การชั่งน้ำหนักการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์

3.2.6.3 การเตรียมสารละลายซัลเฟต

สำหรับสารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ 2 สารละลายซัลเฟต ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

1) สารละลายโซเดียมซัลเฟตใช้โซเดียมซัลเฟต เท่ากับ 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตรซึ่งให้ปริมาณของอิออนซัลเฟต (SO_4^{-2}) เท่ากับ 33,800 ppm

2) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตใช้แมกนีเซียมซัลเฟต เท่ากับ 42.36 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ปริมาณของอิออนซัลเฟต (SO_4^{-2}) เท่ากับ 33,800 ppm

3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

3.3.1 สัดส่วนผสมของเพสต์

กรณีสัดส่วนของเพสต์ที่ใช้ในการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัวมีรายละเอียดแสดงดัง ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของเพสต์ ที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมของเพสต์		
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	
		ประเภทที่ 1	HS	HM
1	PC	1.00	-	-
2	PC-20HS	0.80	0.20	-
3	PC-20HM	0.80	-	0.20
4	PC-20HS-1W	0.80	0.20	-
5	PC-20HM-1W	0.80	-	0.20
6	PC-20HS-1M	0.80	0.20	-
7	PC-20HM-1M	0.80	-	0.20
8	PC-20HS-3M	0.80	0.20	-
9	PC-20HM-3M	0.80	-	0.20
10	PC-20HS-25W-1W	0.80	0.20	-
11	PC-20HM-25W-1W	0.80	-	0.20
12	PC-20HS-25W-1M	0.80	0.20	-
13	PC-20HM-25W-1M	0.80	-	0.20
14	PC-20HS-25W-3M	0.80	0.20	-
15	PC-20HM-25W-3M	0.80	-	0.20
16	PC-20HS-45W-1W	0.80	0.20	-
17	PC-20HM-45W-1W	0.80	-	0.20
18	PC-20HS-45W-1M	0.80	0.20	-
19	PC-20HM-45W-1M	0.80	-	0.20
20	PC-20HS-45W-3M	0.80	0.20	-
21	PC-20HM-45W-3M	0.80	-	0.20
22	PC-20HS-65W-1W	0.80	0.20	-
23	PC-20HM-65W-1W	0.80	-	0.20

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของเพสต์ ที่ใช้ในการศึกษา(ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมของเพสต์		
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	
		ประเภทที่ 1	HS	HM
24	PC-20HS-65W-1M	0.80	0.20	-
25	PC-20HM-65W-1M	0.80	-	0.20
26	PC-20HS-65W-3M	0.80	0.20	-
27	PC-20HM-65W-3M	0.80	-	0.20

3.3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับการศึกษาสมบัติของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยนั้นเพื่อใช้หาปริมาณน้ำที่ต้องการและกำลังอัดประลัยโดยสัดส่วนของมอร์ต้าร์แสดงดังตารางที่ 3.2 ส่วนการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์นั้นใช้สัดส่วนของมอร์ต้าร์ดัง ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้หาปริมาณน้ำที่ต้องการและกำลังอัดประลัย

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ (กรัม)			
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย		ทราย
		ประเภทที่ 1	HS	HM	
1	MC	1.00	-	-	2.75
2	MC-20HS	0.80	0.20	-	2.75
3	MC-20HM	0.80	-	0.20	2.75
4	MC-20HS-1W	0.80	0.20	-	2.75
5	MC-20HM-1W	0.80	-	0.20	2.75
6	MC-20HS-1M	0.80	0.20	-	2.75
7	MC-20HM-1M	0.80	-	0.20	2.75
8	MC-20HS-3M	0.80	0.20	-	2.75
9	MC-20HM-3M	0.80	-	0.20	2.75

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้หาปริมาณน้ำที่ต้องการและกำลังอัดประลัย (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ (กรัม)			
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย		ทราย
		ประเภทที่ 1	HS	HM	
10	MC-20HS-25W-1W	0.80	0.20	-	2.75
11	MC-20HM-25W-1W	0.80	-	0.20	2.75
12	MC-20HS-25W-1M	0.80	0.20	-	2.75
13	MC-20HM-25W-1M	0.80	-	0.20	2.75
14	MC-20HS-25W-3M	0.80	0.20	-	2.75
15	MC-20HM-25W-3M	0.80	-	0.20	2.75
16	MC-20HS-45W-1W	0.80	0.20	-	2.75
17	MC-20HM-45W-1W	0.80	-	0.20	2.75
18	MC-20HS-45W-1M	0.80	0.20	-	2.75
19	MC-20HM-45W-1M	0.80	-	0.20	2.75
20	MC-20HS-45W-3M	0.80	0.20	-	2.75
21	MC-20HM-45W-3M	0.80	-	0.20	2.75
22	MC-20HS-65W-1W	0.80	0.20	-	2.75
23	MC-20HM-65W-1W	0.80	-	0.20	2.75
24	MC-20HS-65W-1M	0.80	0.20	-	2.75
25	MC-20HM-65W-1M	0.80	-	0.20	2.75
26	MC-20HS-65W-3M	0.80	0.20	-	2.75
27	MC-20HM-65W-3M	0.80	-	0.20	2.75

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้หาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟต

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ (กรัม)			
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ทราย	น้ำ
1	MC	1.00	-	2.75	0.55
2	MC-30HM	0.70	0.30	2.75	0.55
3	MC-50HM	0.50	0.50	2.75	0.55
4	MC-30HM-25W-1W	0.70	0.30	2.75	0.55
5	MC-50HM-25W-1W	0.50	0.50	2.75	0.55
6	MC-30HM-45W-1W	0.70	0.30	2.75	0.55
7	MC-50HM-45W-1W	0.50	0.50	2.75	0.55
8	MC-30HM-65W-1W	0.70	0.30	2.75	0.55
9	MC-50HM-65W-1W	0.50	0.50	2.75	0.55
10	MC-30HM-25W-1M	0.70	0.30	2.75	0.55
11	MC-50HM-25W-1M	0.50	0.50	2.75	0.55
12	MC-30HM-45W-1M	0.70	0.30	2.75	0.55
13	MC-50HM-45W-1M	0.50	0.50	2.75	0.55
14	MC-30HM-65W-1M	0.70	0.30	2.75	0.55
15	MC-50HM-65W-1M	0.50	0.50	2.75	0.55
16	MC-30HM-25W-3M	0.70	0.30	2.75	0.55
17	MC-50HM-25W-3M	0.50	0.50	2.75	0.55
18	MC-30HM-45W-3M	0.70	0.30	2.75	0.55
19	MC-50HM-45W-3M	0.50	0.50	2.75	0.55
20	MC-30HM-65W-3M	0.70	0.30	2.75	0.55
21	MC-50HM-65W-3M	0.50	0.50	2.75	0.55

3.4.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับการศึกษาค่ายุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต สัดส่วนผสมใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.โดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอยแห้ง		เถ้าลอยเปียก		ทราย	หิน	น้ำ
		ประเภทที่ 1	HS	HM	HS	HM			
1	CC-0.40	450	-	-	-	-	754	1003	175
2	CC-30HS-0.40	298	127	-	-	-	754	1003	168
3	CC-30HS-25W-1W-0.40	298	-	-	160	-	754	1003	136
4	CC-30HS-25W-1M-0.40	298		-	160	-	754	1003	136
5	CC-30HS-25W-3M-0.40	298	-	-	160	-	754	1003	136
6	CC-30HS-45W-1W-0.40	298		-	185	-	754	1003	110
7	CC-30HS-45W-1M-0.40	298	-	-	185	-	754	1003	110
8	CC-30HS-45W-3M-0.40	298		-	185	-	754	1003	110
9	CC-30HS-65W-1W-0.40	298	-	-	210	-	754	1003	85
10	CC-50HS-0.40	206	206	-	-	-	754	1003	162
11	CC-50HS-25W-1W-0.40	206	-	-	259	-	754	1003	111
12	CC-50HS-25W-1M-0.40	206	-	-	259	-	754	1003	111
13	CC-50HS-45W-1W-0.40	206	-	-	300	-	754	1003	69
14	CC-50HS-45W-1M-0.40	206	-	-	300	-	754	1003	69
15	CC-30HM-0.40	300	-	128	-	-	754	1003	169
16	CC-30HM-25W-1W-0.40	300	-	-	-	160	754	1003	137
17	CC-30HM-25W-1M-0.40	300	-	-	-	160	754	1003	137
18	CC-30HM-25W-3M-0.40	300	-	-	-	160	754	1003	137
19	CC-30HM-45W-1W-0.40	300	-	-	-	186	754	1003	111

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีต (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.โดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอยแห้ง		เถ้าลอยเปียก		ทราย	หิน	น้ำ
		ประเภทที่ 1	HS	HM	HS	HM			
20	CC-30HM-45W-1M-0.40	300	-	-	-	186	754	1003	111
21	CC-30HM-45W-3M-0.40	300	-	-	-	186	754	1003	111
22	CC-30HM-65W-1W-0.40	300	-	-	-	211	754	1003	85
23	CC-30HM-65W-1M-0.40	300	-	-	-	211	754	1003	85
24	CC-50HM-0.40	207	-	207	-	-	754	1003	163
25	CC-50HM-25W-1W-0.40	207	-	-	-	258	754	1003	112
26	CC-50HM-25W-1M-0.40	207	-	-	-	258	754	1003	112
27	CC-50HM-45W-1W-0.40	207	-	-	-	300	754	1003	70
28	CC-50HM-45W-1M-0.40	207	-	-	-	300	754	1003	70
29	CC-50HM-65W-1W-0.40	207	-	-	-	342	754	1003	28
30	CC-50HM-65W-1M-0.40	207	-	-	-	342	754	1003	28
31	CC-0.55	372	-	-	-	-	754	1003	205
32	CC-30HS-0.55	249	107	-	-	-	754	1003	196
33	CC-30HS-25W-1W-0.55	249	-	-	133	-	754	1003	169
34	CC-30HS-25W-1M-0.55	249	-	-	133	-	754	1003	169
35	CC-30HS-45W-1W-0.55	249	-	-	155	-	754	1003	148
36	CC-30HS-45W-1M-0.55	249	-	-	155	-	754	1003	148
37	CC-30HS-65W-1W-0.55	249	-	-	176	-	754	1003	126
38	CC-30HS-65W-1M-0.55	249	-	-	176	-	754	1003	126
39	CC-30HM-0.55	250	-	107	-	-	754	1003	196
40	CC-30HM-25W-1W-0.55	250	-	-	-	134	754	1003	169
41	CC-30HM-25W-1M-0.55	250	-	-	-	134	754	1003	169
42	CC-30HM-45W-1W-0.55	250	-	-	-	155	754	1003	148

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีต (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.โดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอยแห้ง		เถ้าลอยเปียก		ทราย	หิน	น้ำ
		ประเภทที่ 1	HS	HM	HS	HM			
43	CC-30HM-45W-1M-0.55	250	-	-	-	155	754	1003	148
44	CC-30HM-65W-1W-0.55	250	-	-	-	176	754	1003	127
45	CC-30HM-65W-1M-0.55	250	-	-	-	176	754	1003	127
46	CC-50HM-0.55	207	-	207	-	-	754	1003	142
47	CC-50HM-25W-1W-0.55	207	-	-	-	258	754	1003	90
48	CC-50HM-25W-1M-0.55	207	-	-	-	258	754	1003	90
49	CC-50HM-45W-1W-0.55	207	-	-	-	300	754	1003	49
50	CC-50HM-45W-1M-0.55	207	-	-	-	300	754	1003	49
51	CC-50HM-65W-1W-0.55	207	-	-	-	341	754	1003	8
52	CC-50HM-65W-1M-0.55	207	-	-	-	341	754	1003	8

กำหนดให้สัญลักษณ์ที่ใช้ในการแทนความหมายต่างๆ ในการทำวิจัย ดังนี้

PC หมายถึง ตัวอย่างเพสต์ปูนซีเมนต์มาตรฐานปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

MC หมายถึง ตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์มาตรฐานปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

CC หมายถึง ตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์มาตรฐานปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

20HS คือ เถ้าลอย Hunter Valley/Spring Creek แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

20HM คือ เถ้าลอย Hunter Valley/Melawan แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

25W, 45W, 65W คือ ความชื้นที่ร้อยละ 25, 45 และ 65 ตามลำดับ

1W, 1M, 3M คือ เถ้าลอยที่ได้มาจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยองที่สัมผัส ความชื้นเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์, 1 เดือน และ 3 เดือน

0.40 หมายถึง อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40

0.55 หมายถึง อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

ตัวอย่าง การอ่านค่าสัญลักษณ์ที่ใช้ในการแทนความหมายต่างๆ ดังนี้

PC-20HS หมายถึง เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย HS ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

MC-20HS-25W-1W หมายถึง มอร์ต้าร์ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย HS ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยเปียกมีปริมาณความชื้นร้อยละ 25 ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W

CC-30HM-45W-1M-0.55 หมายถึง คอนกรีตผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยเปียกมีปริมาณความชื้นร้อยละ 45 ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก ได้พิจารณาผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลโดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

จากผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.15 ส่วนเถ้าลอย HS มีค่าความความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 และเถ้าลอย HM มีค่าความความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.25

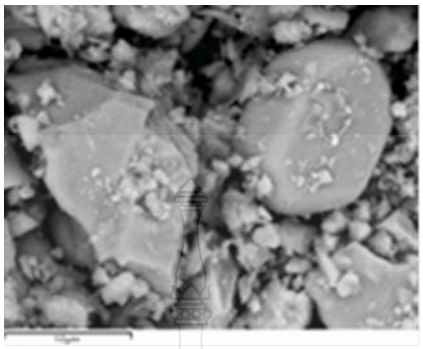
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

รายการ	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	3.15
เถ้าลอย HS	2.23
เถ้าลอย HM	2.25

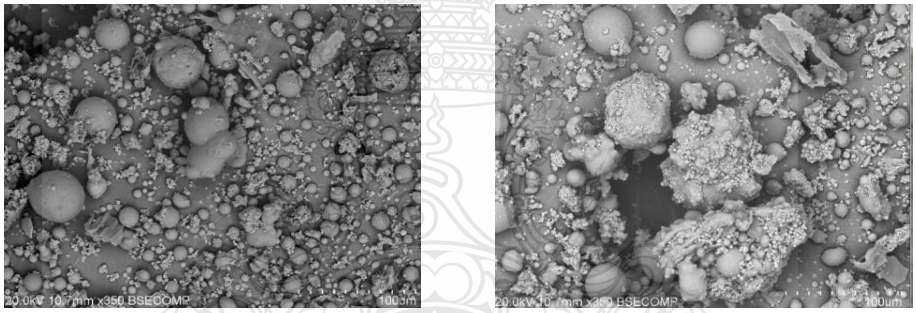
4.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

ในการถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย ในครั้งนี้ใช้วิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ 4.1) มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม มีมิติ ลักษณะผิวขรุขระ ขนาดคละกันไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่วๆ ไป ในขณะที่ลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอย HS (รูปที่ 4.2) จะมีลักษณะกลม แต่มีลักษณะผิวขรุขระไม่เรียบ และเมีขนาดของอนุภาคมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนเมื่เปรียบเทียบระหว่างอนุภาคของเถ้าลอยแห้ง (4.2 ก)) กับเถ้าลอยเปียก (4.2 ข)) จะเห็นว่าเถ้าลอยเปียกอนุภาคจะมีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนและพื้นที่ผิวที่ขรุขระ

กว่าเถ้าลอยแห้ง ในส่วนอนุภาคของเถ้าลอย HM (รูปที่ 4.3) มีลักษณะเช่นเดียวกับอนุภาคของเถ้าลอย HS

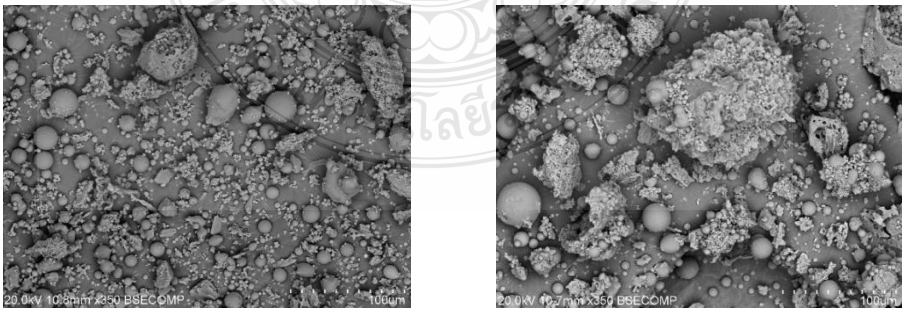


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



ก) เถ้าลอยแห้ง ข) เถ้าลอยเปียก

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย BLCP ชนิด HS



ก) เถ้าลอยแห้ง ข) เถ้าลอยเปียก

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคเถ้าลอย BLCP ชนิด HM

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-ray Fluorescence (XRF) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย

ร้อยละออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย							
		HS				HM			
		แห้ง	25W	45W	65W	แห้ง	25W	45W	65W
SiO_2	18.93	63.53	63.26	63.84	62.89	61.09	61.39	61.26	61.30
Al_2O_3	5.51	20.81	21.14	20.26	20.75	20.35	19.99	20.11	20.06
Fe_2O_3	3.31	4.06	4.04	4.07	4.12	5.20	5.32	5.19	5.14
CaO	65.53	1.84	1.85	1.92	1.92	2.32	1.75	1.83	1.90
MgO	1.24	1.00	0.92	0.96	0.98	1.35	1.36	1.35	1.37
SO_3	2.88	0.15	0.21	0.20	0.17	0.28	0.28	0.21	0.25
Na_2O	0.15	0.95	0.87	1.13	1.15	0.79	1.16	1.33	1.03
K_2O	0.31	1.23	1.20	1.22	1.29	1.36	1.32	1.40	1.41
TiO_2	-	1.05	1.03	1.02	1.05	0.98	1.01	0.93	0.99
P_2O_5	-	0.29	0.40	0.31	0.35	0.23	0.30	0.32	0.30
Free CaO	-	0.06	0.06	0.04	0.07	0.03	0.02	0.02	0.04
LOI	-	4.55	4.81	4.84	4.99	5.68	5.81	5.82	5.92

4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัวของเพสต์

4.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย โดยรูปที่ 4.4 ก) แสดงของเพสต์ผสมเถ้าลอย HS พบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอย (HS) ทั้งแห้ง เปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M) มีค่ามากกว่าของเพสต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยชนิด HS มีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบไม่ช่วยในการลื่นไหล และยังมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (แทนที่โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นตามปริมาณ จึงมีความต้องการปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพิ่มมากขึ้น และพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W และ 1M มีค่ามากกว่าของเพสต์ผสมเถ้าลอยแห้ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำในอนุภาคของเถ้าลอย (ที่มีอยู่) สามารถนำใช้ได้บางส่วน ส่งผลให้เพสต์มีความต้องการน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลานานกว่ามีค่าที่น้อยกว่าของเพสต์ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลาสั้น (3M<1M<1W) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อเถ้าลอยสัมผัสความชื้นเป็นเวลานานๆ จะทำให้น้ำในอนุภาคของเถ้าลอยออกมา เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเป็นรูกลวง จึงส่งผลให้มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมน้อยลง ส่วนปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยเปียก (ทั้งแหล่งผลิตและห้องปฏิบัติการ) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน

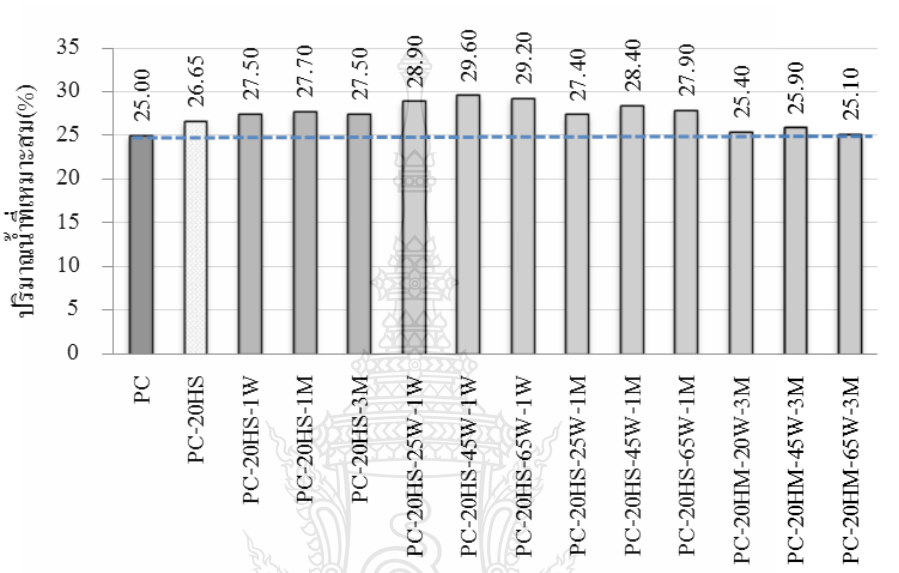
ส่วนภาพที่ รูปที่ 4.4 ข) แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอย HM พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมให้ผลในทิศทางเดียวกันกับของเถ้าลอย HS กล่าวคือ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอย ทั้งแห้ง เปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) มีค่ามากกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W และ 1M มีค่ามากกว่าของเพสต์ผสมเถ้าลอยแห้ง โดยปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลานานกว่ามีค่าที่น้อยกว่าของเพสต์ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลาสั้น (3M<1M<1W) ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และเช่นกันปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยเปียก (ทั้งแหล่งผลิตและห้องปฏิบัติการ) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

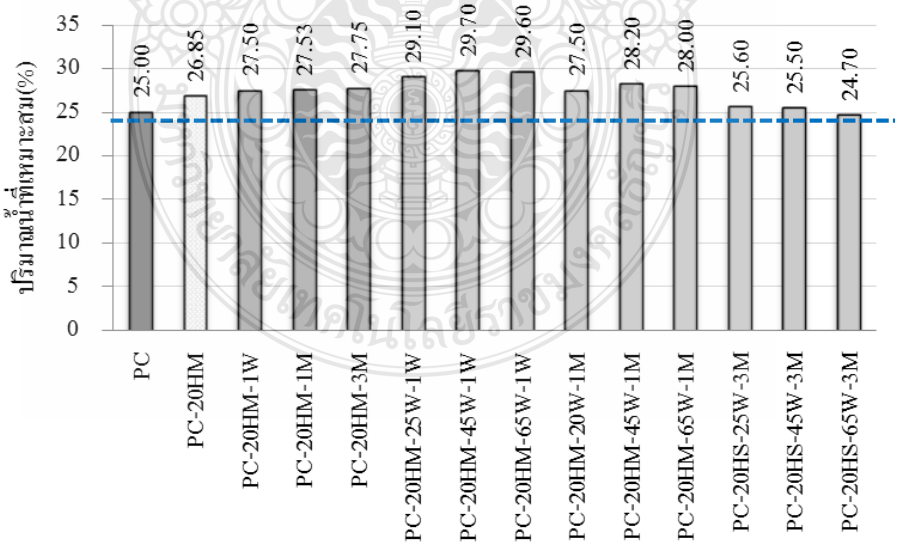
สัดส่วน	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม
PC	25.00
PC-20HS	26.65
PC-20HS-1W	27.50
PC-20HS-1M	27.70
PC-20HS-3M	27.50
PC-20HS-25W-1W	28.90
PC-20HS-45W-1W	29.60
PC-20HS-65W-1W	29.20
PC-20HS-25W-1M	27.40
PC-20HS-45W-1M	28.40
PC-20HS-65W-1M	27.90
PC-20HM-20W-3M	25.40
PC-20HM-45W-3M	25.90
PC-20HM-65W-3M	25.10
PC-20HM	26.85
PC-20HM-1W	27.50
PC-20HM-1M	27.53
PC-20HM-3M	27.75
PC-20HM-25W-1W	29.10
PC-20HM-45W-1W	29.70
PC-20HM-65W-1W	29.60
PC-20HM-20W-1M	27.50
PC-20HM-45W-1M	28.20
PC-20HM-65W-1M	28.00
PC-20HS-25W-3M	25.60

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ (ต่อ)

สัดส่วน	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม
PC-20HS-45W-3M	25.50
PC-20HS-65W-3M	24.70



ก) เถ้าลอย HS



ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

4.2.2 การก่อตัวของเพสต์

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย โดยรูปที่ 4.5 ก) แสดงของเพสต์ผสมเถ้าลอย HS พบว่า การก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอย (HS) ทั้งแห้ง เปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) มีค่ามากกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้น้อยลง และการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดหลังและช้ากว่า และพบว่า การก่อตัวของเพสต์ผสมถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W และ 1M มีค่ามากกว่าของเพสต์ผสมเถ้าลอยแห้ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำในอนุภาคของเถ้าลอย (ที่มีอยู่) มาทำปฏิกิริยา (ทั้งไฮเดรชั่นและปอซโซลาน) ได้ยากขึ้น ส่งผลให้เพสต์ก่อตัวที่ช้าขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการก่อตัวของเถ้าลอยเปียกทั้งจากแหล่งผลิตและจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลานานกว่ามีค่าที่มากกว่าของเพสต์ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลาสั้น (3M>1M>1W) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำในอนุภาคของเถ้าลอย (ที่มีอยู่) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลาที่นานกว่า น้ำมาทำปฏิกิริยา (ทั้งไฮเดรชั่นและปอซโซลาน) ได้ยากขึ้น ส่วนการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยเปียก (ทั้งแหล่งผลิตและห้องปฏิบัติการ) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน

ส่วนรูปที่ 4.5 ข) แสดงการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอย HM พบว่า การก่อตัวให้ผลในทิศทางเดียวกันกับของเถ้าลอย HS กล่าวคือ การก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอย (HM) ทั้งแห้ง เปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) มีค่ามากกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการก่อตัวของเพสต์ผสมถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W และ 1M มีค่ามากกว่าของเพสต์ผสมเถ้าลอยแห้ง โดยการก่อตัวของเถ้าลอยเปียกทั้งจากแหล่งผลิตและจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลานานกว่ามีค่าที่มากกว่าของเพสต์ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลาสั้น (3M>1M>1W) ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว สุดท้ายการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้า

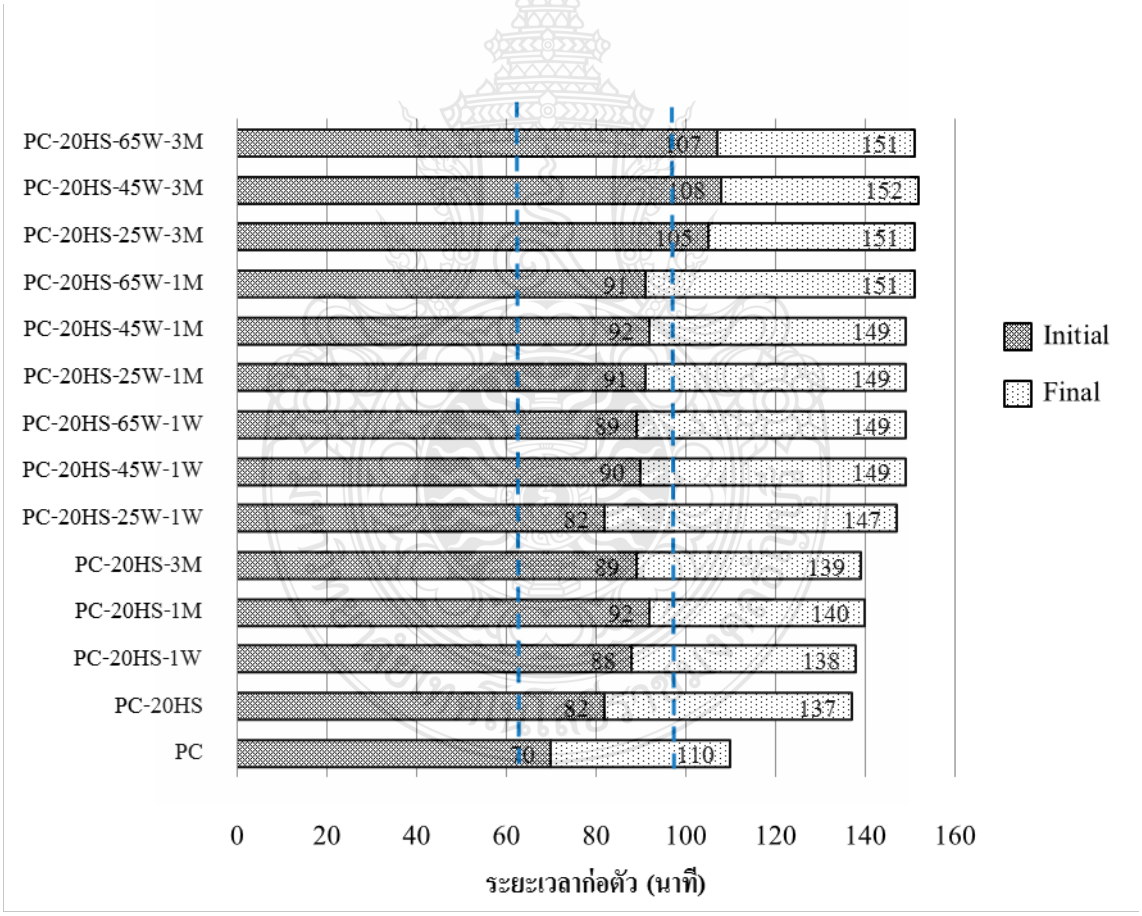
ลอยเปียก (ทั้งแหล่งผลิตและห้องปฏิบัติการ) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน

ตาราง 4.4 การก่อตัวของเพสต์

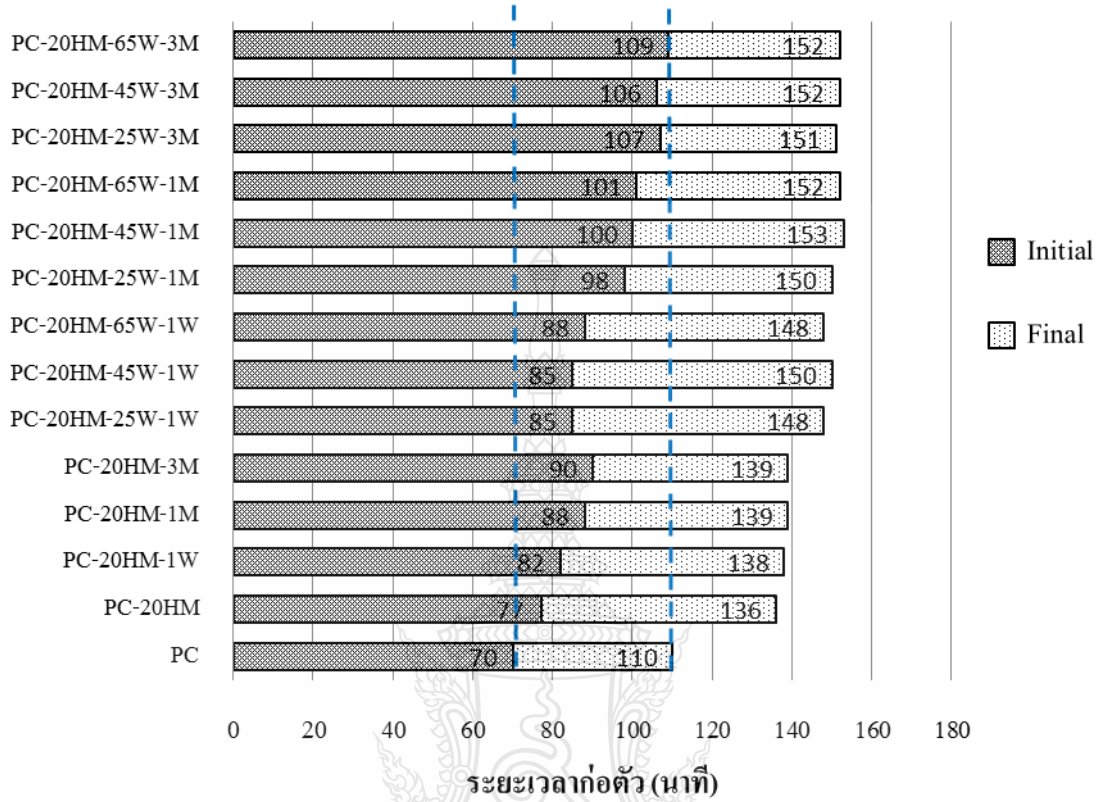
สัดส่วน	ระยะเวลาการก่อตัว	
	เริ่มต้น (นาที)	สุดท้าย (นาที)
PC	70	110
PC-20HS	82	137
PC-20HS-1W	88	138
PC-20HS-1M	92	140
PC-20HS-3M	89	139
PC-20HS-25W-1W	82	147
PC-20HS-45W-1W	90	149
PC-20HS-65W-1W	89	149
PC-20HS-25W-1M	91	149
PC-20HS-45W-1M	92	149
PC-20HS-65W-1M	91	151
PC-20HM-20W-3M	105	151
PC-20HM-45W-3M	108	152
PC-20HM-65W-3M	107	151
PC-20HM	77	136
PC-20HM-1W	82	138
PC-20HM-1M	88	139
PC-20HM-3M	90	139
PC-20HM-25W-1W	85	148
PC-20HM-45W-1W	85	150
PC-20HM-65W-1W	88	148

ตาราง 4.4 การก่อตัวของเพสต์ (ต่อ)

สัดส่วน	ระยะเวลาการก่อตัว	
	เริ่มต้น (นาที)	สุดท้าย (นาที)
PC-20HM-20W-1M	98	150
PC-20HM-45W-1M	100	153
PC-20HM-65W-1M	101	152
PC-20HS-25W-3M	107	151
PC-20HS-45W-3M	106	152
PC-20HS-65W-3M	109	152



ก) เถ้าลอย HS



ค) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.5 การก่อตัวของเพสต์

4.3 ปริมาณน้ำที่ต้องการและกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์

4.3.1 ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์

ตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.6 แสดงปริมาณน้ำที่ต้องการ (Water Requirement) ที่ทำให้ค่าการไหลมีค่าเท่ากับร้อยละ 110±5 ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย โดยรูปที่ 4.6 ก) แสดงของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย HS พบว่า ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (HS) ทั้งแห้ง และเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยชนิด HS มีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบไม่ช่วยในการลื่นไหล และยังมีค่าความถ่วงจำเพาะที่

น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (แทนที่โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นตามปริมาณ จึงมีความต้องการน้ำที่เพิ่มมากขึ้น และพบว่าปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ผสมถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W และ 1M มีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำในอนุภาคของเถ้าลอย (ที่มีอยู่) สามารถนำใช้ได้บางส่วน ส่งผลให้เพสต์มีความต้องการน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลานานกว่ามีค่าที่น้อยกว่าของเพสต์ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลาสั้น (3M<1M<1W) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อเถ้าลอยสัมผัสความชื้นเป็นเวลานานๆ จะทำให้น้ำในอนุภาคของเถ้าลอยออกมา เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเป็นรูกลวง จึงส่งผลให้มีค่าปริมาณน้ำที่ต้องการน้อยลง ส่วนปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก (ทั้งแหล่งผลิตและห้องปฏิบัติการ) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน

ส่วนรูปที่ 4.6 ข) แสดงความปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย HM พบว่า ปริมาณน้ำที่ต้องการให้ผลในทิศทางเดียวกันกับของเถ้าลอย HS กล่าวคือ ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ทั้งแห้ง เปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65 (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) มีค่ามากกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ผสมถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M) และเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W และ 1M มีค่ามากกว่าของเพสต์ผสมเถ้าลอยแห้ง โดยปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้งปริมาณความชื้นร้อยละ 25 45 และ 65) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลานานกว่ามีค่าที่น้อยกว่าของเพสต์ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลาสั้น (3M<1M<1W) ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และเช่นกันปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก (ทั้งแหล่งผลิตและห้องปฏิบัติการ) ที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M นั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน

ในการศึกษาปริมาณน้ำที่ต้องการ (Water Requirement) ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย พบว่าปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ค่าการไหล (Flow) เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยให้ผลไปในทิศทางเดียวกับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือ เมื่อเพสต์มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมมาก จะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ต้องการ

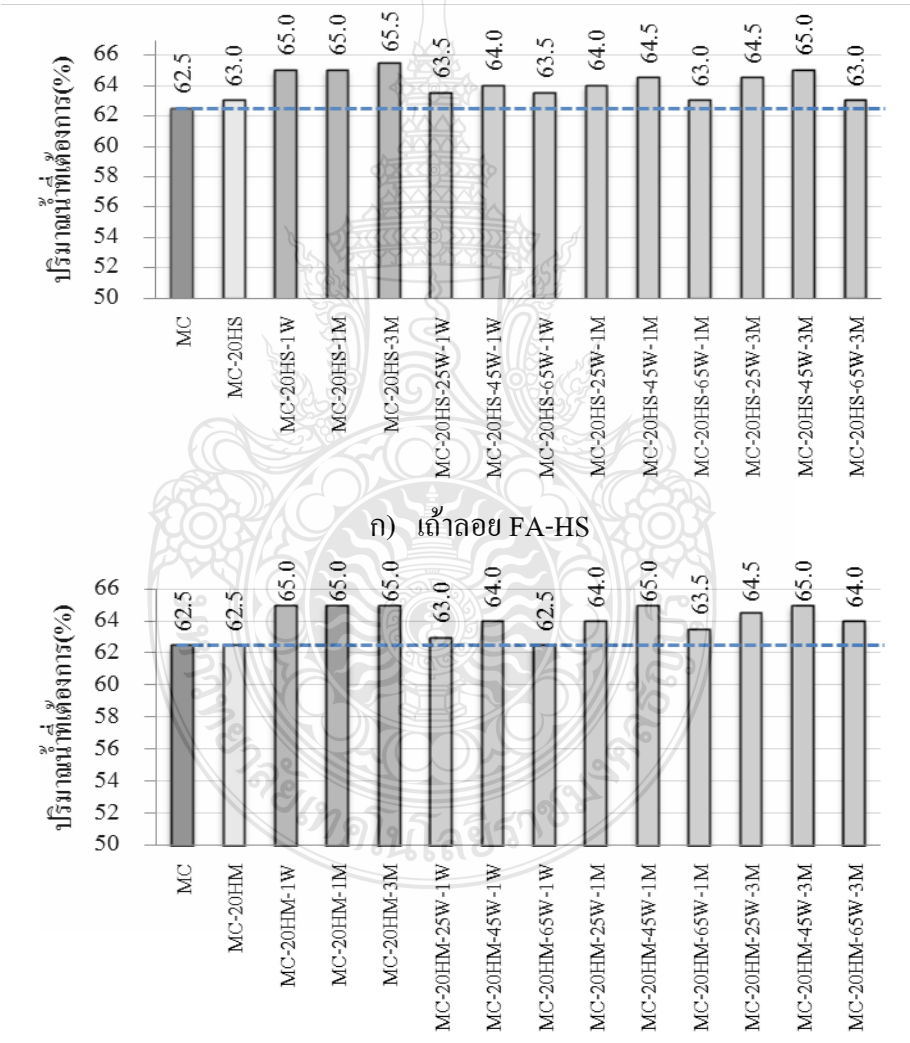
ของมอร์ต้าร์มาก และถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อย จะส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์น้อย ทั้งนี้ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.5 ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์

สัดส่วน	ปริมาณน้ำที่ต้องการ
MC	62.5
MC-20HS	63.0
MC-20HS-1W	65.0
MC-20HS-1M	65.0
MC-20HS-3M	65.5
MC-20HS-25W-1W	63.5
MC-20HS-45W-1W	64.0
MC-20HS-65W-1W	63.5
MC-20HS-25W-1M	64.0
MC-20HS-45W-1M	64.5
MC-20HS-65W-1M	63.0
MC-20HS-25W-3M	64.5
MC-20HS-45W-3M	65.0
MC-20HS-65W-3M	63.0
MC-20HM	62.5
MC-20HM-1W	65.0
MC-20HM-1M	65.0
MC-20HM-3M	65.0
MC-20HM-25W-1W	63.0
MC-20HM-45W-1W	64.0
MC-20HM-65W-1W	62.5
MC-20HM-25W-1M	64.0

ตารางที่ 4.5 ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ (ต่อ)

สัดส่วน	ปริมาณน้ำที่ต้องการ
MC-20HM-45W-1M	65.0
MC-20HM-65W-1M	63.5
MC-20HM-25W-3M	64.5
MC-20HM-45W-3M	65.0
MC-20HM-65W-3M	64.0



ก) เถ้าลอย FA-HS

ข) เถ้าลอย FA-HM

รูปที่ 4.6 ปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย

4.3.2 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย

สำหรับการศึกษากำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยในครั้งนี้ ประกอบด้วยมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยแห้งและเปียกจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้เถ้าลอย 2 ชนิด คือ HS และ HM ใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์แสดงดังตารางที่ 4.6 อย่างไรก็ตามในที่นี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ดังนี้ 1) ผลกระทบจากการแทนที่เถ้าลอย 2) ผลกระทบจากระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย และ 3) ผลกระทบปริมาณความชื้นของถ้าลอย โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์

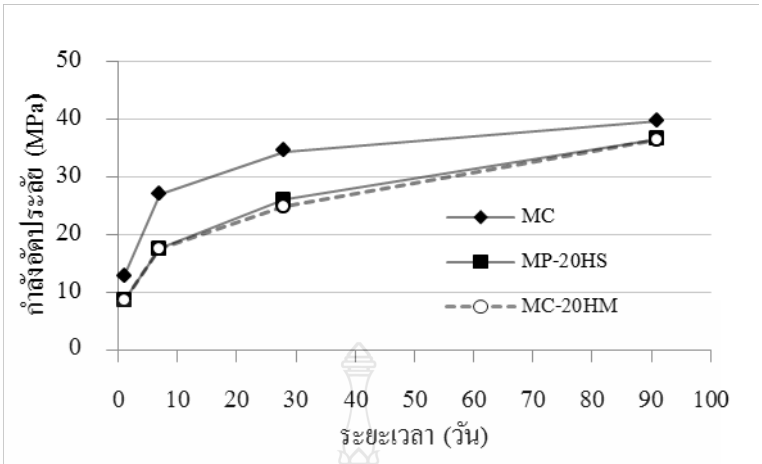
สัดส่วน	กำลังอัดประลัย (MPa)			
	1 วัน	7 วัน	28 วัน	91 วัน
MC	12.63	26.89	34.29	39.60
MC-20HS	8.48	17.53	25.95	39.13
MC-20HS-1W	8.82	21.84	27.07	37.10
MC-20HS-1M	8.80	20.24	26.75	37.28
MC-20HS-25W-1W	8.41	20.23	26.22	32.20
MC-20HS-45W-1W	5.65	19.69	25.52	31.38
MC-20HS-65W-1W	7.91	22.01	25.79	32.40
MC-20HS-25W-1M	6.75	17.80	24.96	32.36
MC-20HS-45W-1M	5.24	15.68	24.32	32.24
MC-20HS-65W-1M	8.75	18.91	24.62	32.96
MC-20HS-25W-3M	3.04	16.12	23.97	31.89
MC-20HS-45W-3M	2.13	12.11	23.28	30.76
MC-20HS-65W-3M	3.19	14.23	24.59	31.59
MC-20HM	8.48	17.41	24.79	36.36
MC-20HM-1W	9.68	21.16	28.49	35.70
MC-20HM-1M	8.21	20.80	27.44	33.68
MC-20HM-25W-1W	7.92	22.25	28.52	34.60

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ (ต่อ)

สัดส่วน	กำลังอัดประลัย (MPa)			
	1 วัน	7 วัน	28 วัน	91 วัน
MC-20HM-45W-1W	7.81	17.51	25.93	30.13
MC-20HM-65W-1W	8.15	19.83	26.80	35.64
MC-20HM-25W-1M	6.51	18.72	28.52	32.60
MC-20HM-45W-1M	6.03	16.32	24.16	33.27
MC-20HM-65W-1M	6.85	18.84	25.48	34.16
MC-20HM-25W-3M	3.04	16.12	23.97	31.89
MC-20HM-45W-3M	1.76	11.44	23.20	31.41
MC-20HM-65W-3M	1.97	13.30	23.47	33.08

1) ผลกระทบจากการแทนที่เถ้าลอย

การศึกษากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยจาก BLCP จำนวน 2 ชนิดคือ HS และ HM จากการศึกษา พบว่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20) (รูปที่ 4.7) ทั้งอายุ 1, 7 และ 28 วัน ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด มีค่าน้อยกว่าองมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ ทำให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้น้อยลง และการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดหลังและช้ากว่า อย่างไรก็ตามเมื่ออายุ 91 วัน กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์มีค่าใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากเถ้าลอยเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด พบว่า HS และ HM ในช่วงอายุต้นมีแนวโน้มกำลังอัดประลัยใกล้เคียงกัน

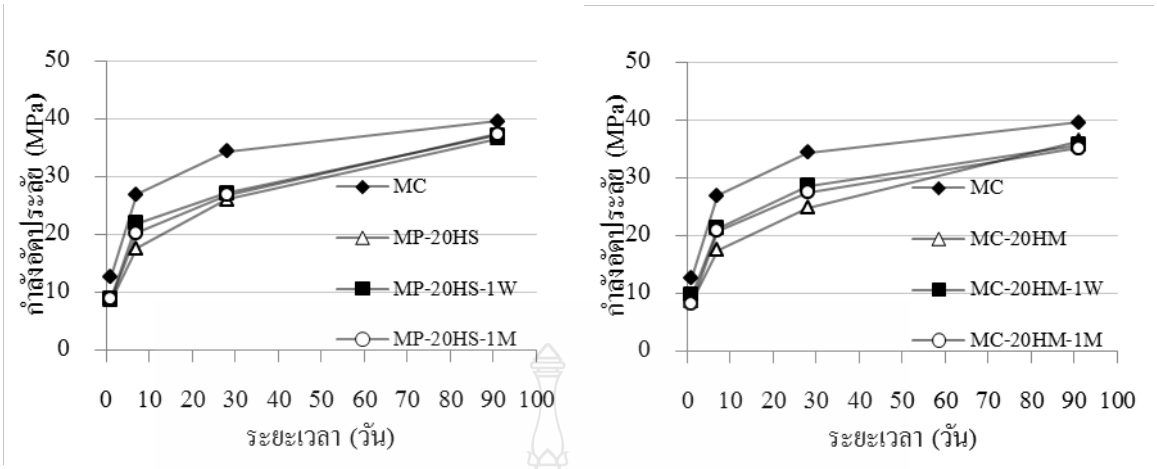


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอยแห้ง

2) ผลกระทบจากระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย

2.1) เถ้าลอยจากแหล่งผลิต

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต พบว่า กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต (ทั้ง HS แล HM) ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W และ 1M มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้น้อยลง และการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดหลังและช้ากว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิตที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W กับ 1M (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) มีค่าไม่แตกต่างกัน และก็ไม่แตกต่างจากกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง

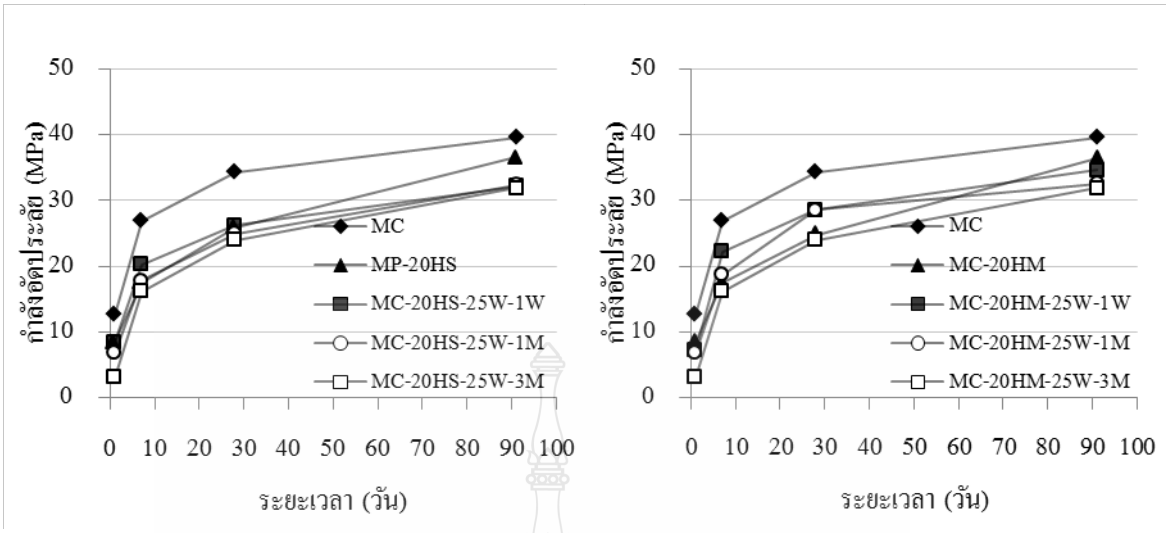


ก) เถ้าลอย HS ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากแหล่งผลิต

2.2) เถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 พบว่า กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM) ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1 M และ 3M มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) มีค่าไม่แตกต่างกัน และก็ไม่แตกต่างจากกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง

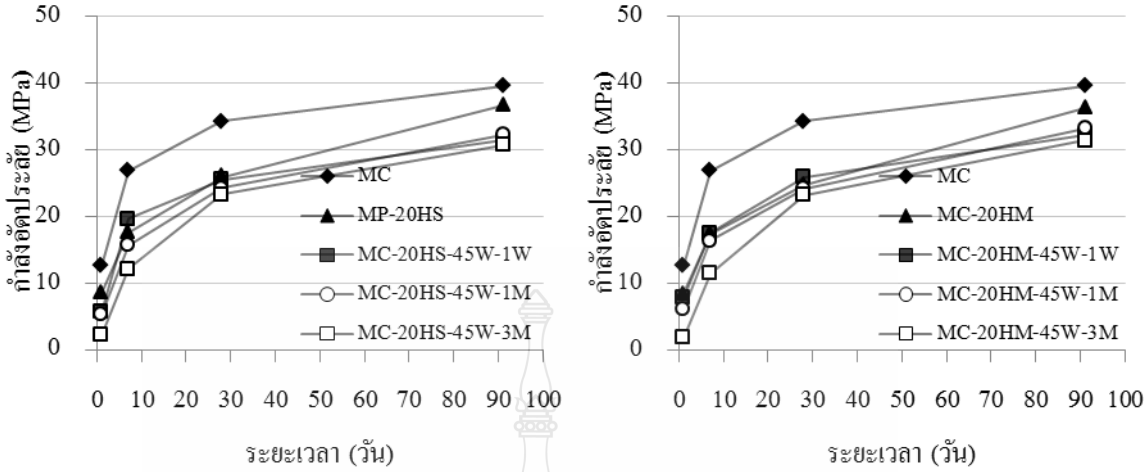


ก) เถ้าลอย HS ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25

2.3) เถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 พบว่า ให้ผลในทิศทางเดียวกับของมอร์ต้าร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 กล่าวคือ กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM) ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) มีค่าไม่แตกต่างกัน และก็ไม่แตกต่างจากกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง

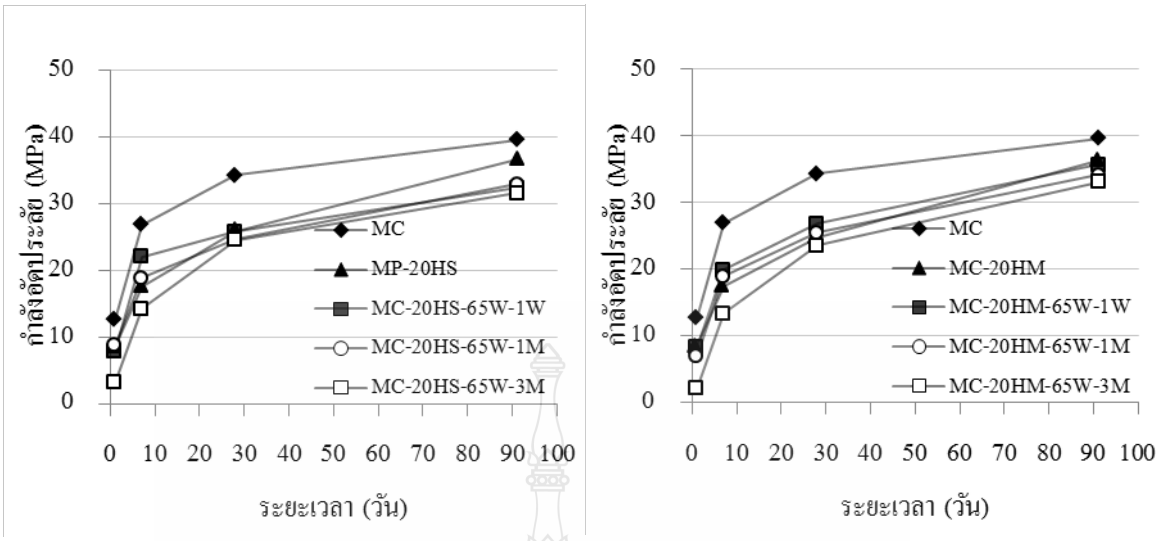


ก) เถ้าลอย HS ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45

2.4) เถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 พบว่า ให้ผลในทิศทางเดียวกับของมอร์ต้าร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 และ 45 กล่าวคือ กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM) ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) มีค่าไม่แตกต่างกัน และก็ไม่แตกต่างจากกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง



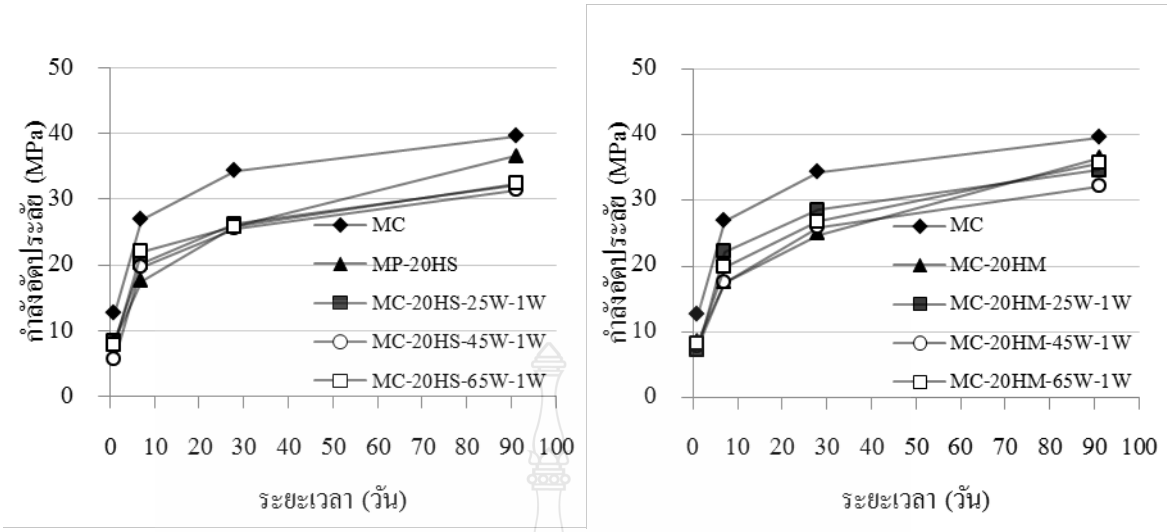
ก) เถ้าลอย HS ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65

3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของเถ้าลอย

3.1) เถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ (1W)

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W พบว่า กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM) ทั้งที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) มีค่าไม่แตกต่างกัน และก็ไม่แตกต่างจากกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง

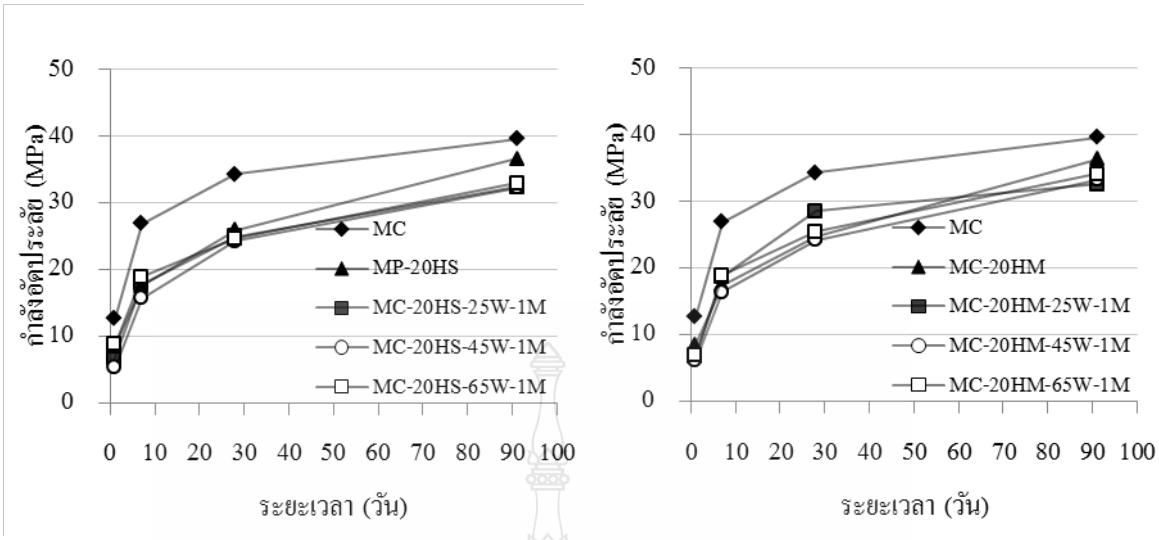


ก) เถ้าลอย HS ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W

3.2) เถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 เดือน (1M)

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M พบว่า กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM) ทั้งที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) มีค่าไม่แตกต่างกัน และก็ไม่แตกต่างจากกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง ซึ่งให้ผลในทิศทางเดียวกับของเถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W

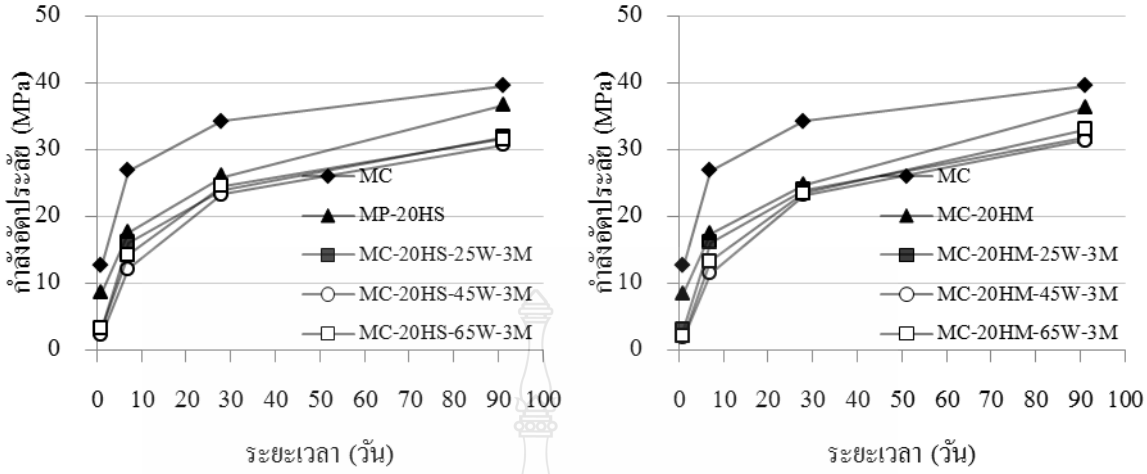


ก) เถ้าลอย HS ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M

3.3) เถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3 เดือน (3M)

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3M พบว่า กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS และ HM) ทั้งที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) มีค่าไม่แตกต่างกัน และก็ไม่แตกต่างจากกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้ง ซึ่งให้ผลในทิศทางเดียวกับของเถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W และ 1M



ก) เถ้าลอย HS ข) เถ้าลอย HM

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3M

4.4 ค่ายุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สำหรับค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ ประกอบด้วยคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้งแห้งและเปียก โดยเถ้าลอย 2 ชนิด คือ เถ้าลอย HS และ HM โดยตารางที่ 4.7 แสดงค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้

ตารางที่ 4.7 ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สัดส่วน	ค่าการยุบตัว	กำลังอัดประลัย (MPa)			
	(ซม.)	1 วัน	7 วัน	28 วัน	91 วัน
CC-0.40	5.0	33.88	46.70	54.79	61.01
CC-30HS-0.40	2.5	16.07	31.66	43.06	54.45
CC-30HS-25W-1W-0.40	3.0	23.70	33.86	44.73	55.40
CC-30HS-25W-1M-0.40	5.0	24.87	35.36	45.78	57.88
CC-30HS-25W-3M-0.40	5.0	28.52	35.71	46.29	57.25

ตารางที่ 4.7 ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ต่อ)

สัดส่วน	ค่าการยุบตัว (ซม.)	กำลังอัดประลัย (MPa)			
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	91 วัน
CC-30HS-45W-1W-0.40	3.5	23.59	35.62	45.60	56.16
CC-30HS-45W-1M-0.40	5.5	25.80	34.98	45.60	58.25
CC-30HS-65W-1W-0.40	3.5	21.51	34.20	44.17	55.51
CC-30HS-65W-1M-0.40	5.0	25.17	34.49	45.19	58.80
CC-50HS-0.40	1.5	8.02	22.33	37.24	50.31
CC-50HS-25W-1W-0.40	2.0	12.33	22.13	37.38	51.93
CC-50HS-25W-1M-0.40	3.0	14.86	28.64	41.94	53.03
CC-50HS-45W-1W-0.40	2.5	13.78	24.51	38.03	52.86
CC-50HS-45W-1M-0.40	4.0	16.51	28.81	42.60	53.03
CC-30HM-0.40	3.0	15.35	34.11	48.88	59.04
CC-30HM-25W-1W-0.40	3.0	21.72	37.25	51.38	60.05
CC-30HM-25W-1M-0.40	3.0	26.24	41.03	53.17	58.53
CC-30HM-25W-3M-0.40	3.0	25.68	42.03	52.50	58.22
CC-30HM-45W-1W-0.40	3.5	25.93	39.19	51.79	64.11
CC-30HM-45W-1M-0.40	4.0	27.49	41.22	53.59	62.72
CC-30HM-45W-3M-0.40	4.5	26.38	42.52	53.59	61.69
CC-30HM-65W-1W-0.40	3.0	24.57	38.34	53.54	62.78
CC-30HM-65W-1M-0.40	4.0	26.83	41.96	52.89	61.36
CC-50HM-0.40	2.0	12.36	23.72	36.92	43.55
CC-50HM-25W-1W-0.40	2.5	12.87	23.82	37.08	47.39
CC-50HM-25W-1M-0.40	3.0	15.23	28.36	43.58	51.37
CC-50HM-45W-1W-0.40	3.0	12.94	24.67	39.83	49.00
CC-50HM-45W-1M-0.40	4.0	17.83	29.56	44.51	51.99
CC-50HM-65W-1W-0.40	3.0	12.97	24.50	38.62	46.80
CC-0.55	15.0	16.54	28.48	36.26	42.68
CC-30HS-0.55	11.0	9.85	20.48	29.53	35.37

ตารางที่ 4.7 ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ต่อ)

สัดส่วน	ค่าการยุบตัว (ซม.)	กำลังอัดประลัย (MPa)			
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	91 วัน
CC-30HS-25W-1W-0.55	12.0	12.34	24.13	32.11	37.12
CC-30HS-25W-1M-0.55	13.0	11.28	23.52	31.95	39.30
CC-30HS-45W-1W-0.55	13.0	12.66	23.35	31.34	37.43
CC-30HS-45W-1M-0.55	13.0	13.35	26.04	34.29	39.55
CC-30HS-65W-1W-0.55	12.0	11.85	23.83	33.36	37.83
CC-30HS-65W-1M-0.55	12.0	13.11	25.57	34.99	42.33
CC-30HM-0.55	11.5	9.36	17.84	29.44	34.38
CC-30HM-25W-1W-0.55	12.0	12.06	20.93	30.25	36.87
CC-30HM-25W-1M-0.55	12.0	11.92	21.66	32.76	41.33
CC-30HM-45W-1W-0.55	13.0	13.53	22.40	32.40	37.20
CC-30HM-45W-1M-0.55	13.0	14.82	23.08	34.64	38.65
CC-30HM-65W-1W-0.55	12.0	12.66	23.35	31.34	37.43
CC-30HM-65W-1M-0.55	12.0	13.38	25.45	35.23	40.68
CC-50HM-0.55	10.0	4.65	13.09	19.48	31.06
CC-50HM-25W-1W-0.55	11.0	7.79	14.20	21.94	31.43
CC-50HM-25W-1M-0.55	10.0	7.06	14.21	24.67	32.40
CC-50HM-45W-1W-0.55	12.0	9.23	15.27	23.89	31.95
CC-50HM-45W-1M-0.55	10.5	8.38	17.65	24.84	34.24
CC-50HM-65W-1W-0.55	10.0	8.98	15.75	24.51	34.09
CC-50HM-65W-1M-0.55	12.0	7.57	15.46	25.17	32.31

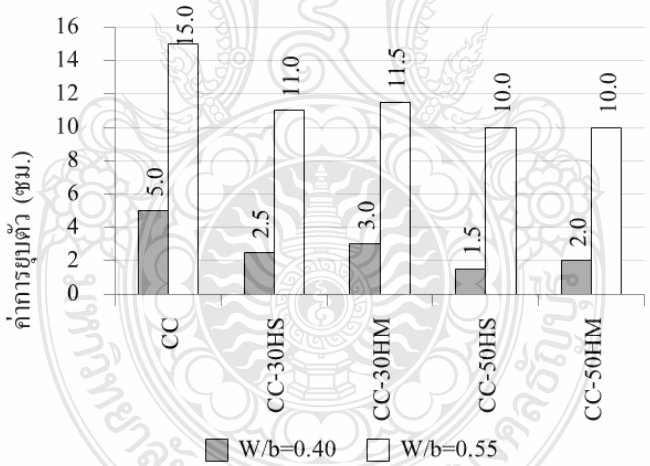
4.4.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีตในครั้งนี้ ประกอบด้วยคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้งและเปียกจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้เถ้าลอย 2 ชนิดคือ คือ HS และ HM แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตดังนี้ 1)

ผลกระทบจากการแทนที่เถ้าลอย 2) ผลกระทบจากระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย และ 3) ผลกระทบจากการผสม 2 ครั้ง 4) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของเถ้าลอย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบจากการแทนที่เถ้าลอย

รูปที่ 4.15 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง (ทั้ง HS และ HM)โดยแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 30 และ 50 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้ง HS และ HM) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะเถ้าลอย BLCP (ทั้ง HS และ HM) มีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบไม่ช่วยในการลื่นไหล และยังมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (แทนที่โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นตามปริมาณ จึงมีความต้องการน้ำที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอน HS กับ HM พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันหรือแนวโน้มว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย HM มีค่ามากกว่าของเถ้าลอย HS



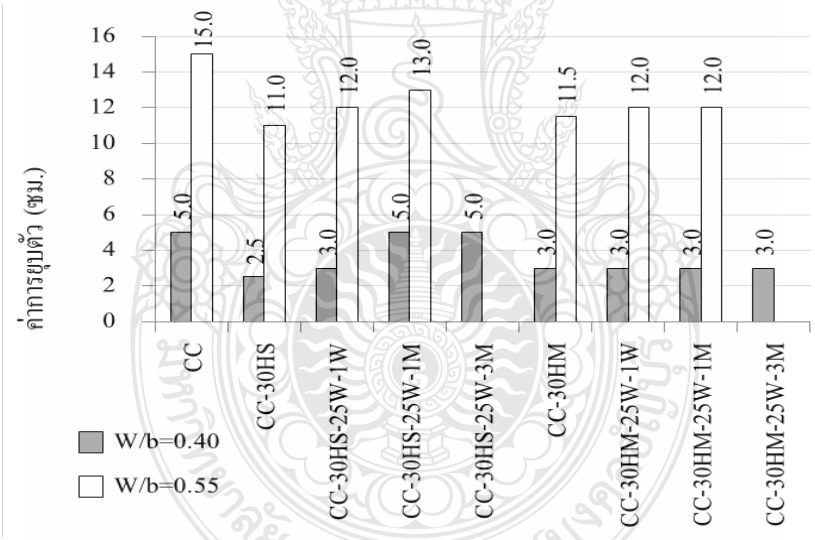
รูปที่ 4.15 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอยแห้ง

2) ผลกระทบจากระยะเวลาสัมผัสความชื้น

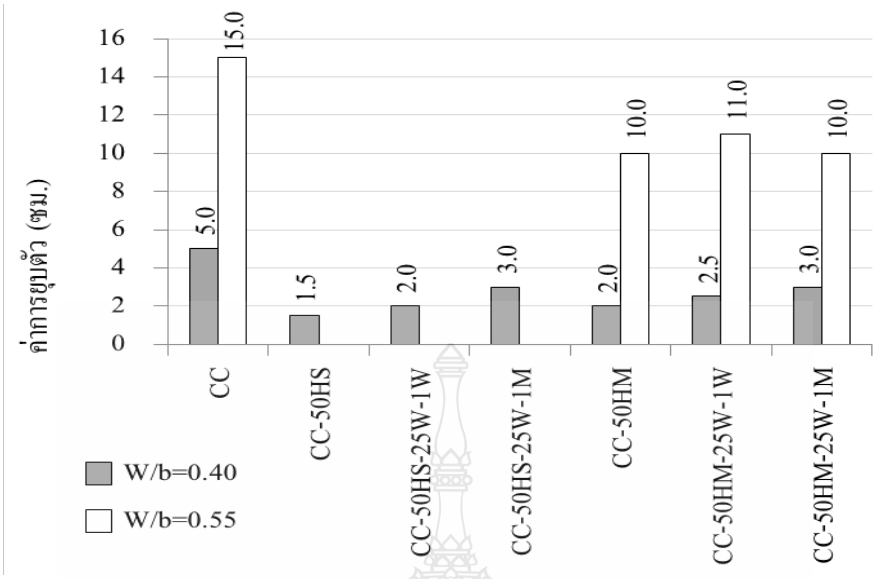
2.2) เถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25

รูปที่ 4.16 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง (ทั้ง HS และ HM) และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจาก

ห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 โดยแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM และทั้งแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50) ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1 M และ 3M มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (ทั้ง w/b เท่ากับ 0.40 และ 0.55) ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบไม่ช่วยในการลื่นไหล และยังมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (แทนที่โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นตามปริมาณ จึงมีความต้องการน้ำที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) พบว่า เถ้าลอยที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้นนานกว่ามีค่าที่มากกว่าของเถ้าลอยที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้นที่สั้นกว่า (3M>1M>1W) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อเถ้าลอยสัมผัสความชื้นเป็นเวลานานๆ จะทำให้น้ำในอนุภาคของเถ้าลอยออกมา เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเป็นรูกลวง จึงส่งผลให้มีค่าการยุบตัวของคอนกรีตมากขึ้น



ก) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30

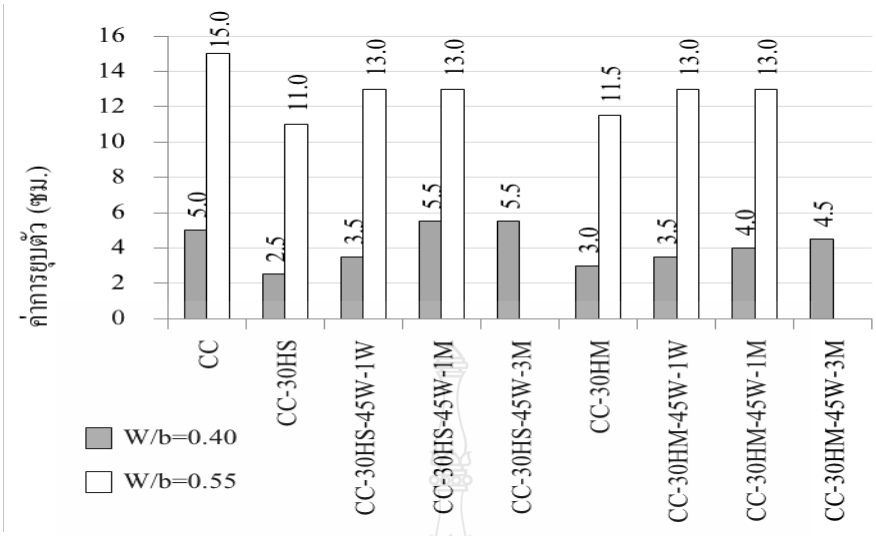


ข) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50

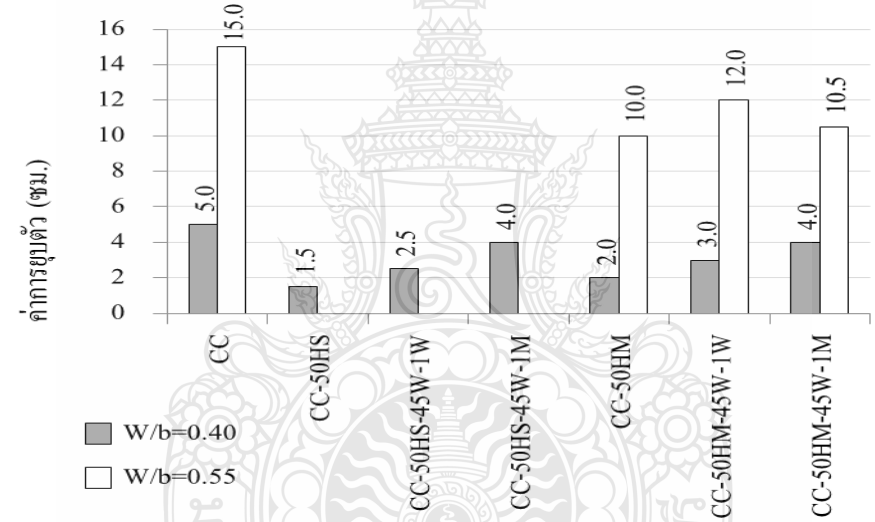
รูปที่ 4.16 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25

2.2) เถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45

รูปที่ 4.17 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง (ทั้ง HS และ HM) และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 โดยแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM และทั้งแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50) ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1 M และ 3M มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (ทั้ง w/b เท่ากับ 0.40 และ 055) เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM) พบว่า เถ้าลอยที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้นนานกว่ามีค่าที่มากกว่าของเถ้าลอยที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้นที่สั้นกว่า (3M>1M>1W) ซึ่งเหตุผลดังกรณีของเถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 ดังที่กล่าวแล้ว



ก) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30



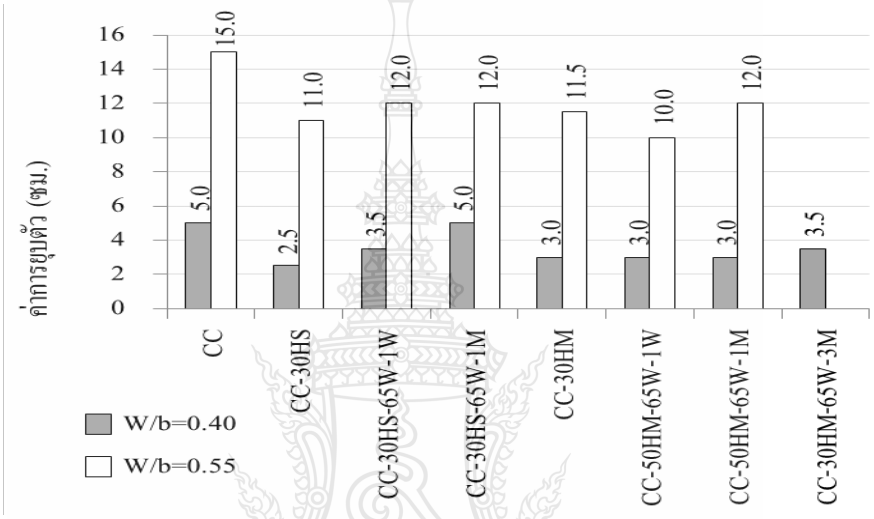
ข) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50

รูปที่ 4.17 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45

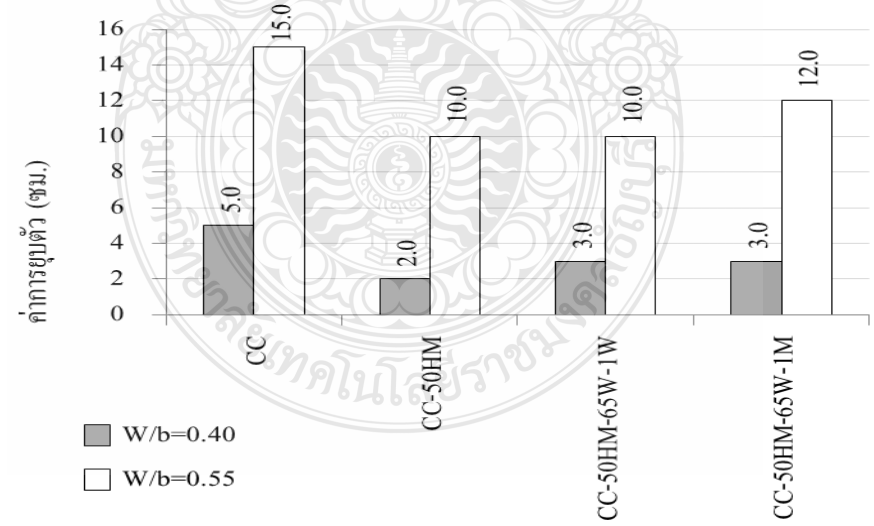
2.3) เถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65

รูปที่ 4.18 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง (ทั้ง HS และ HM) และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 โดยแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM และทั้งแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50)

ทั้งที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1 M และ 3M มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (ทั้ง w/b เท่ากับ 0.40 และ 0.55) เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่สัมผัสความชื้นระยะเวลา 1W 1M และ 3M (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) พบว่า เถ้าลอยที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้นนานกว่ามีค่าที่มากกว่าของเถ้าลอยที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้นที่สั้นกว่า (3M>1M>1W) ซึ่งเหตุผลดังกรณีของเถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 และ 25 ดังที่กล่าวแล้ว



ก) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30

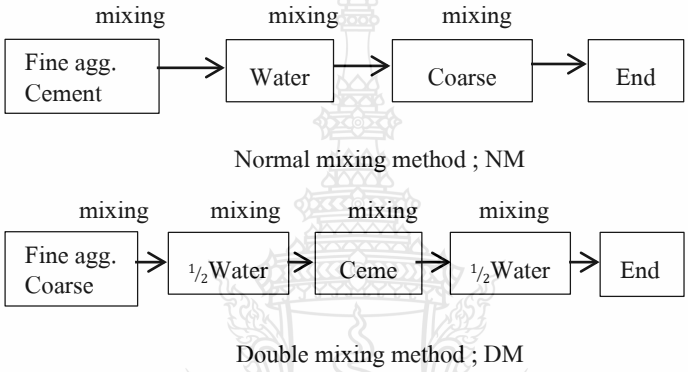


ข) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50

รูปที่ 4.18 ค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65

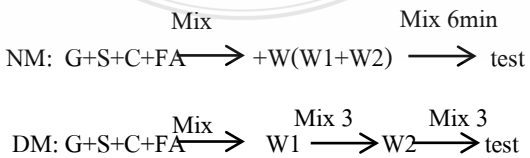
3) กระบวนการผสม 2 ครั้ง

โดยทั่วไปการผสมคอนกรีตเป็นการผสมครั้งเดียว (Normal Mixing Method : NM) อย่างไรก็ตามได้มีงานวิจัยได้กล่าวถึงกระบวนการผสม 2 ครั้ง (Double Mixing Method : DM) ซึ่งมีรายละเอียดคือแบ่งการผสมน้ำออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยการผสมน้ำ 2 ขั้นตอนนั้นจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน [9] ส่วนขั้นตอนวิธีของ NM และ DM ได้แสดงดังรูปที่ 4.19



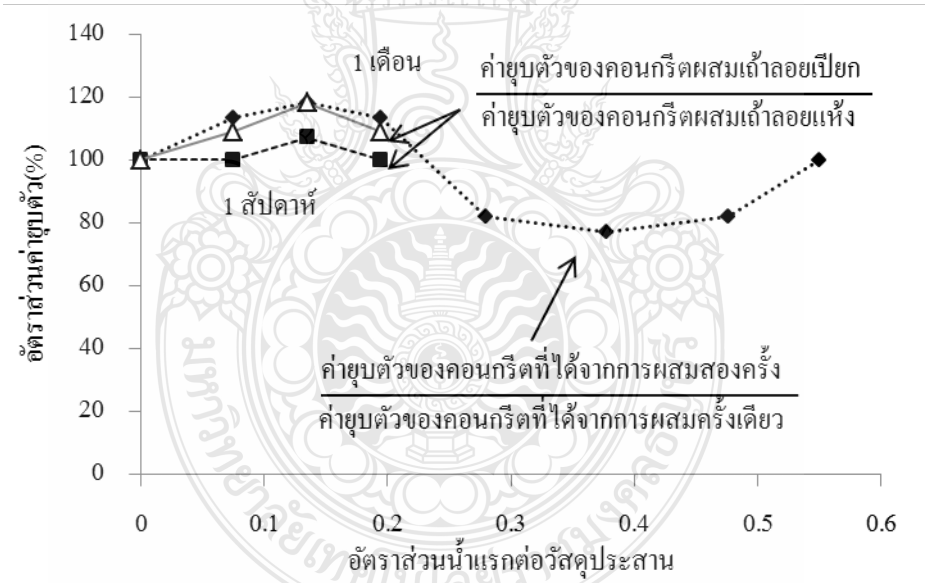
รูปที่ 4.19 การผสมครั้งเดียว และ การผสม 2 ครั้ง

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้มีการผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยโดยใช้วิธีผสมคอนกรีตแบบ NM และ DM กล่าวคืออัตราส่วนน้ำครั้งแรกที่ใช้จะแตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยรายละเอียดการผสมมีดังนี้ (รูปที่ 4.20) ลำดับแรกเตรียมหิน (G) ทราย (S) ซีเมนต์ (C) เถ้าลอย (FA) ตามลำดับ หลังจากนั้นผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาทีและเติมน้ำครั้งแรก(W1)จากนั้นผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาทีจึงเติมน้ำที่ 2 (W2) ผสมให้เข้ากันอีก 3 นาทีจึงทำการทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต



รูปที่ 4.20 ขั้นตอนการผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้ศึกษาโดยวิธีการผสมครั้งเดียว (NM) และการผสม 2 ครั้ง (DM)

เมื่อเปรียบเทียบอัตราค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมแบบ NM กับคอนกรีตผสมแบบ DM ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยแห้งชนิด FA-HM ซึ่งการผสมแบบ DM จะแบ่งน้ำที่ผสมคอนกรีตออกเป็น 2 ส่วน คือ W1 และ W2 พบว่าค่าการยุบตัวของการผสมแบบ DM จะสูงกว่าการผสมแบบ NM ในช่วงอัตราส่วนน้ำแรกต่อวัสดุประสาน (W1/B) ที่ต่ำ (ประมาณ 0.2) แต่เมื่อ W1/B มากขึ้นจะทำให้ค่าการยุบตัวของ DM มีค่าน้อยกว่าของ NM ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำที่เติมครั้งแรกจะทำให้วัสดุประสานจับตัวและเคลือบผิวของมวลรวมทำให้มวลมีพื้นที่ผิวกลมและเพิ่มการลื่นไหลได้ดี แต่เมื่อปริมาณน้ำครั้งแรก (W1) เพิ่มขึ้น กลับทำให้ค่าการยุบตัวมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ W1 ที่ทำให้วัสดุประสานจับตัวและเคลือบผิวมวลรวมมากเกินไป ทำให้น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตลดน้อยลง ส่วนเมื่อนำคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมาทดสอบค่าการยุบตัว พบว่าจะให้ผลในทิศทางเดียวกับกระบวนการผสม 2 ครั้ง (DM) ทั้งกรณีเถ้าลอยเปียกที่ 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน ส่งผลแสดงดังภาพที่ 4.21

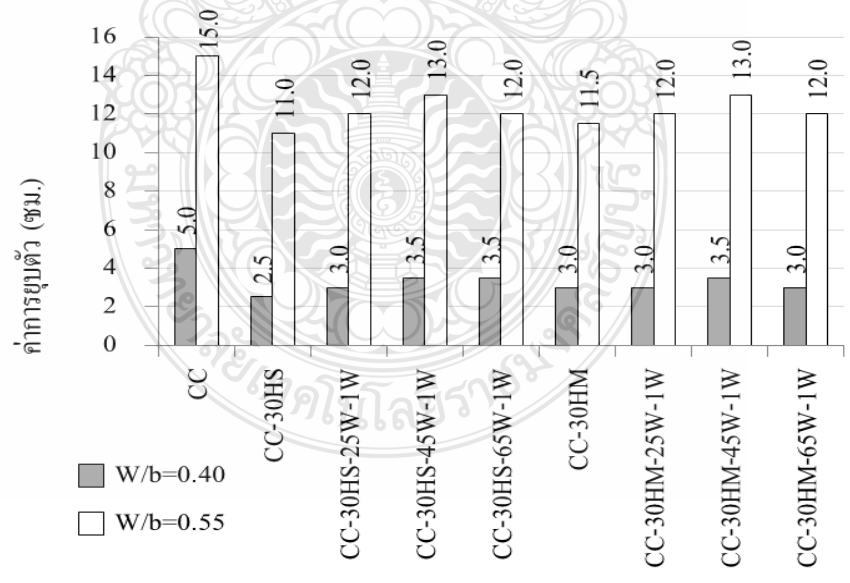


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าการยุบตัว (Ratio of Slump) กับอัตราส่วนน้ำแรกต่อวัสดุประสาน (w1/b) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำทั้งหมด (W1+W2) ต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55

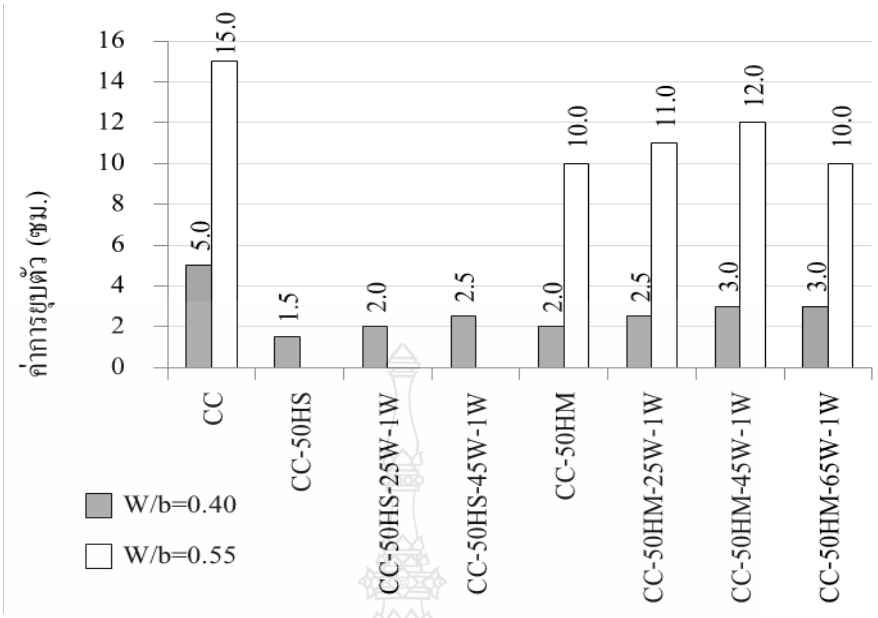
4) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของเถ้าลอย

4.1) เถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ (1W)

รูปที่ 4.22 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM) ทั้งที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (ทั้ง w/b เท่ากับ 0.40 และ 0.55) ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบไม่ช่วยในการลื่นไหล และยังมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (แทนที่โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นตามปริมาณ จึงมีความต้องการน้ำที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) นั้น พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่ปริมาณความชื้น 45W มีค่ามากกว่าของเถ้าลอย 25W และ 65W (โดยที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 25W มีค่าที่ไม่แตกต่างจากของเถ้าลอย 65W) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากขบวนการผสมสองครั้ง (Double mixing, DM) กล่าวคือ น้ำที่มีอยู่ในเถ้าลอยเปียกช่วยให้วัสดุประสานเคลือบผิวของมวลทำให้ผิวกลมขึ้นและลื่นขึ้นทำให้การลื่นไหลดีขึ้นนั้น



ก) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30

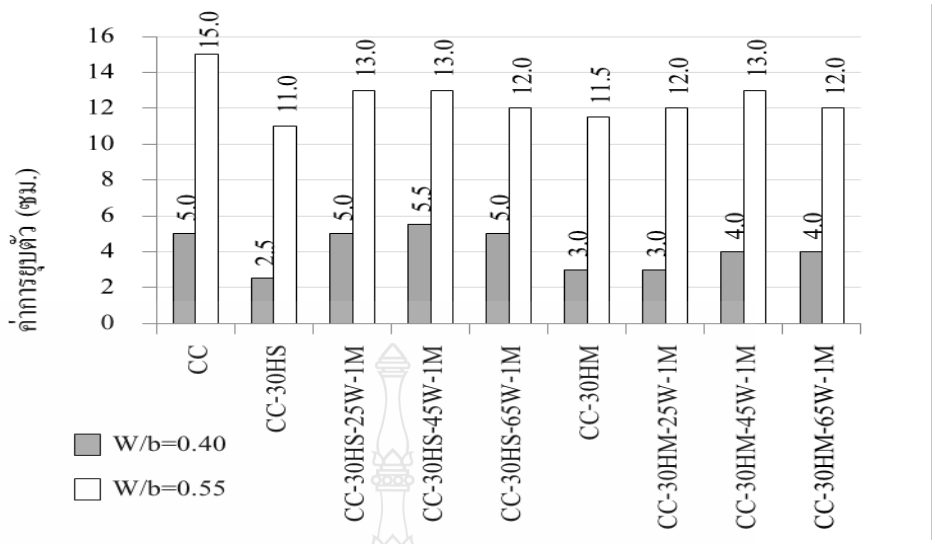


ข) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50

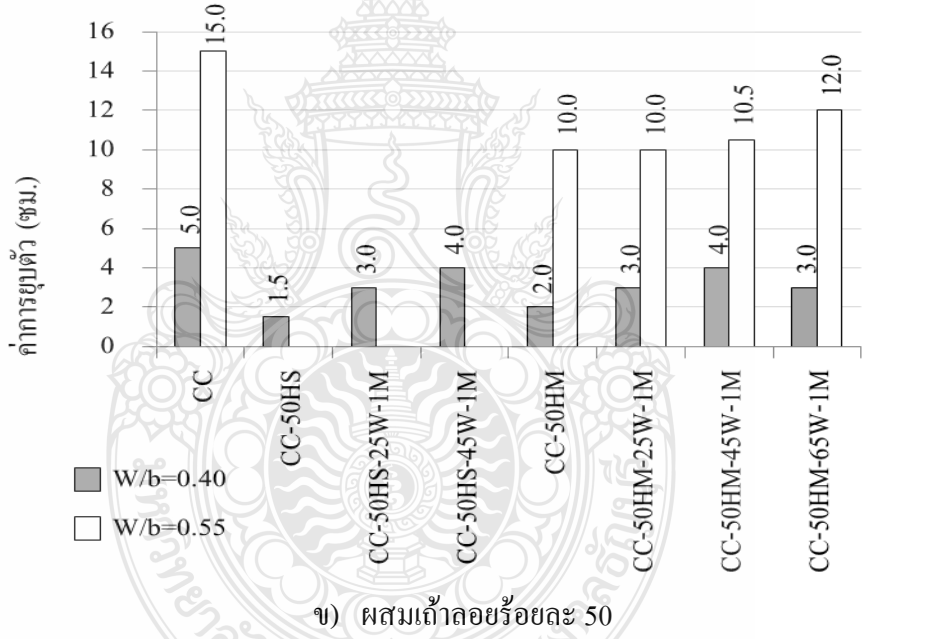
รูปที่ 4.22 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W

4.2) เถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 เดือน (1M)

รูปที่ 4.23 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตไปในทิศทางเดียวกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W



ก) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30



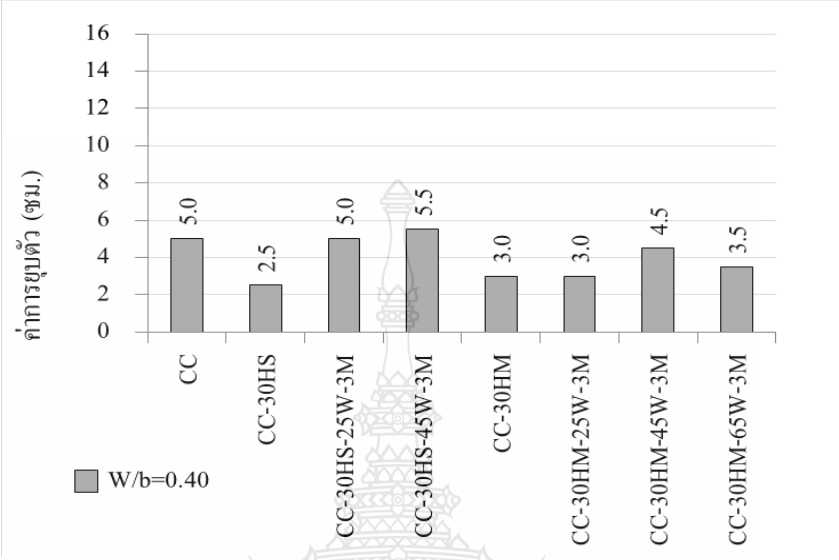
ข) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50

รูปที่ 4.23 ค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M

4.3) เถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3 เดือน (3M)

รูปที่ 4.24 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัส

ความชื้น 3M พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตไปในทิศทางเดียวกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W และ 1M



รูปที่ 4.24 ค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3M

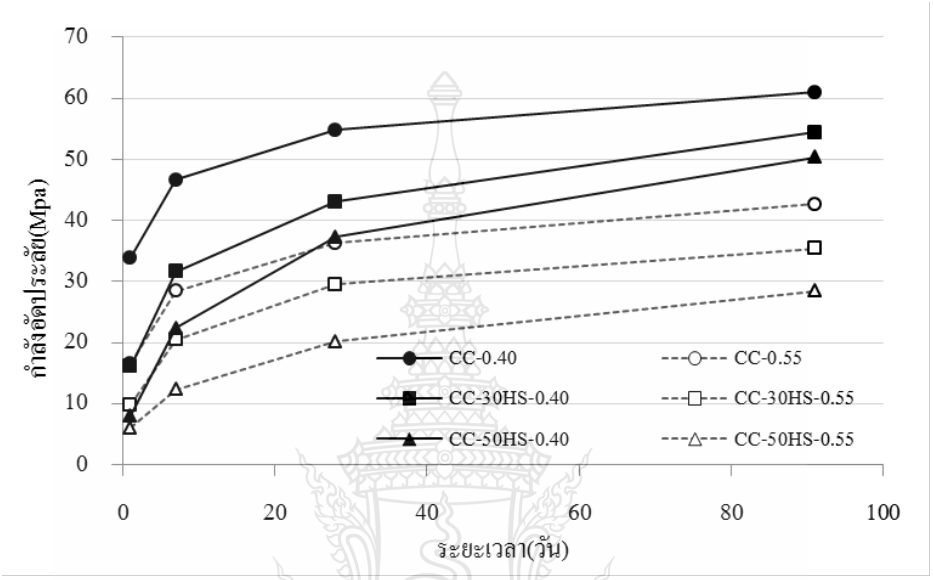
4.4.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สำหรับการศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตในครั้งนี้ ประกอบด้วยคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่แทนที่ถ้าลอย HS และ FM ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 ซึ่งในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ได้แก่ 1) ผลกระทบจากการแทนที่ของเถ้าลอย 2) ผลกระทบจากระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย และ 3) ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของเถ้าลอย โดยมีรายละเอียดดังนี้

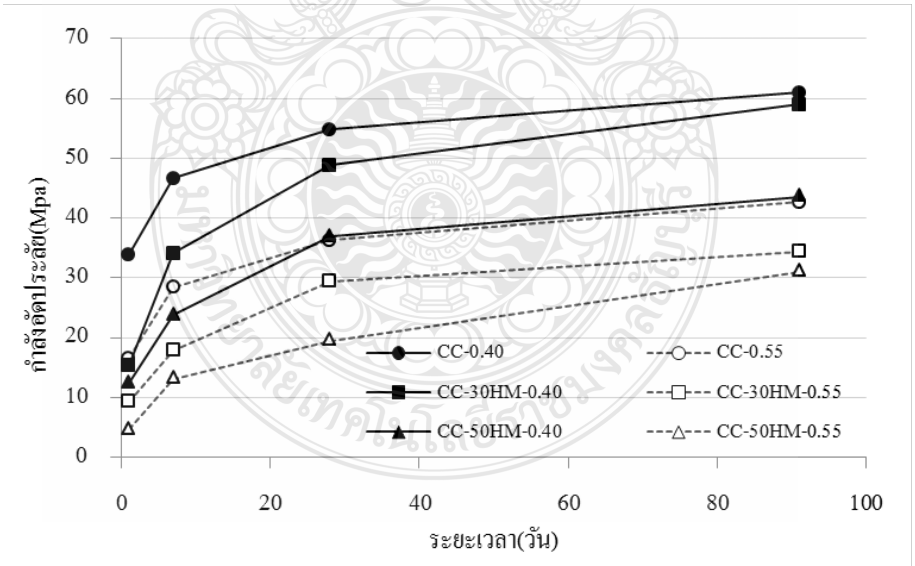
1) ผลกระทบจากการแทนที่เถ้าลอย

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งทั้งเถ้าลอย HS (รูปที่ 4.25 ก)) และเถ้าลอย HM (รูปที่ 4.25 ข)) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปริมาณ

ปูนซีเมนต์ที่เป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคอนกรีต จึงส่งผลให้กำลังอัดประลัยในช่วงต้นลดต่ำลง อย่างไรก็ตามเมื่ออายุมากขึ้น คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีการพัฒนากำลังอัดประลัยที่มีแนวโน้มสูงขึ้นมีแนวโน้มมีค่าที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากผลของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น



ก) เถ้าลอย HS



ข) เถ้าลอย HM

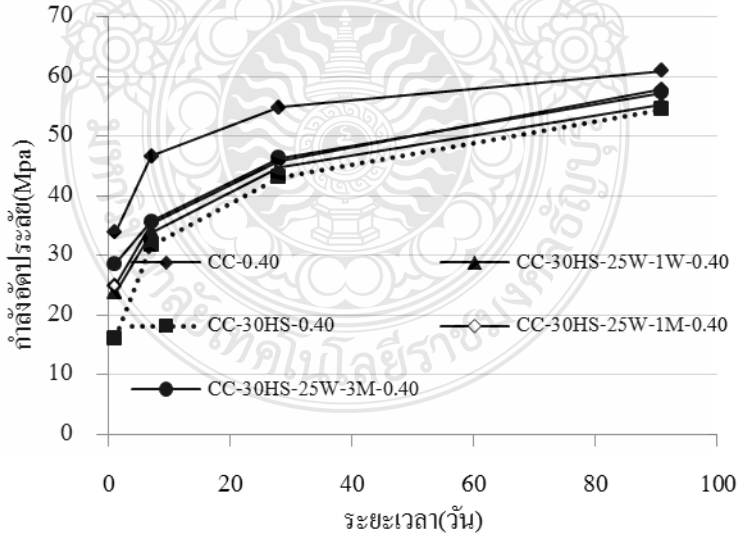
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง

2) ผลกระทบจากระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอย

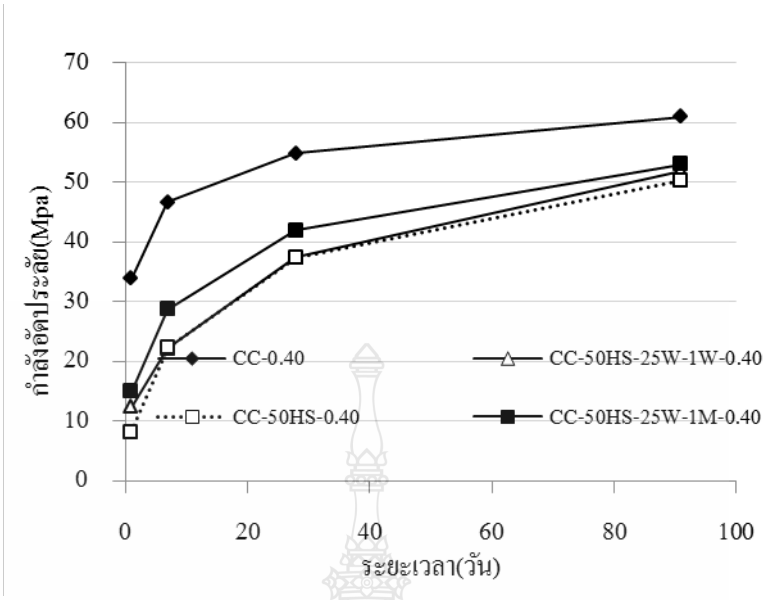
2.1) เถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25

รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM) มีแนวโน้มให้ค่าที่มากกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง อาจเป็นเพราะทั้งนี้อาจเป็นเพราะวัสดุประสานเข้าไปเคลือบผิวของมวลรวมก่อนทำให้บริเวณผิวของมวลรวมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ และทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวม (transition zone) กำลังอัดประลัยบริเวณนี้สูงขึ้น การยึดเกาะระหว่างมวลรวมและวัสดุประสานจึงมีประสิทธิภาพมากขึ้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตจึงมีค่ามาก ส่วนค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1M และ 3M แสดงว่าระยะเวลาสัมผัสความชื้นไม่มีผลต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเนื่องจากเถ้าลอยเปียกไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี

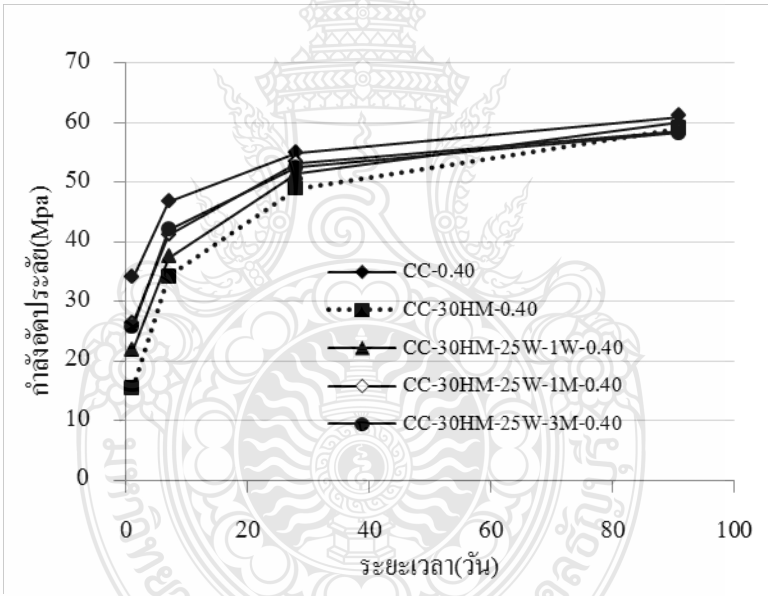
ส่วนกรณีคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 (รูปที่ 4.27) ก็ให้ผลในแนวโน้มเดียวกับของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



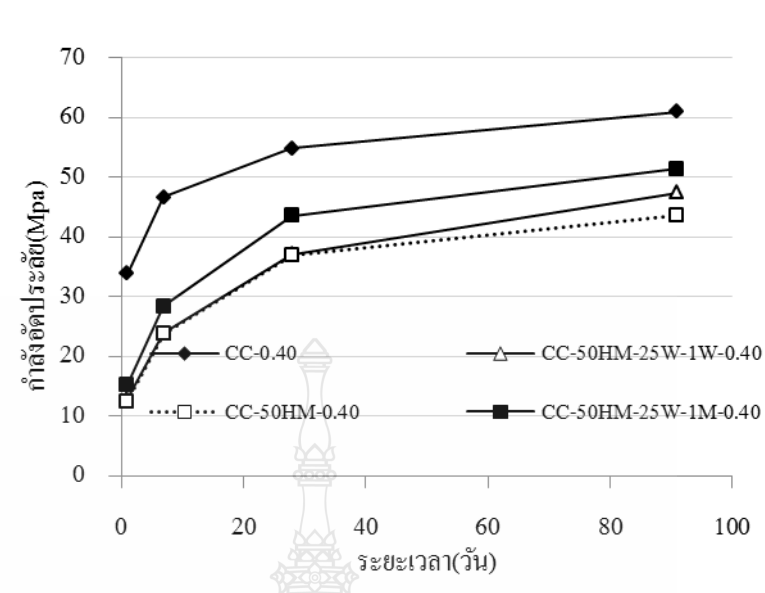
ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HS ร้อยละ 50

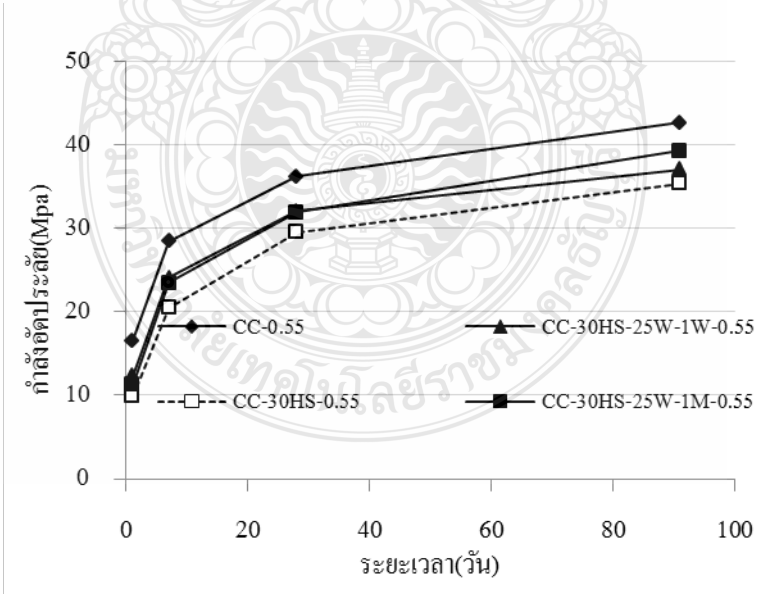


ค) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

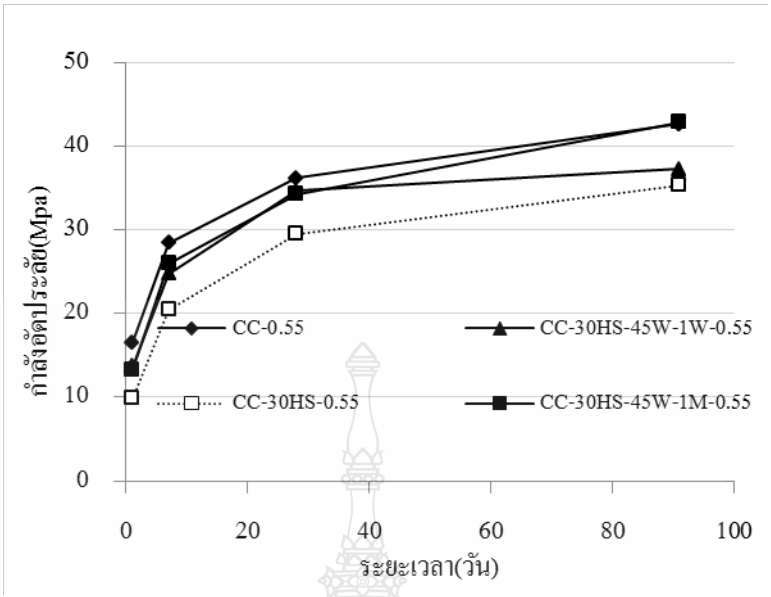


ง) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

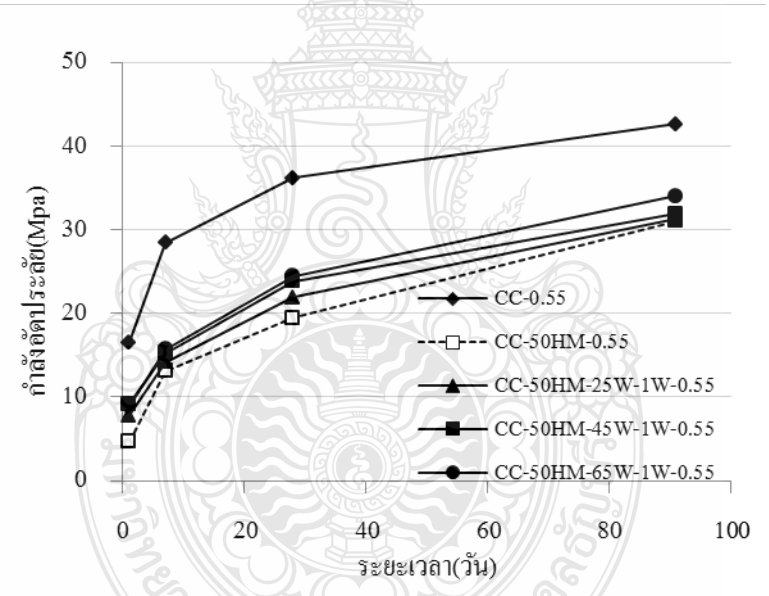
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

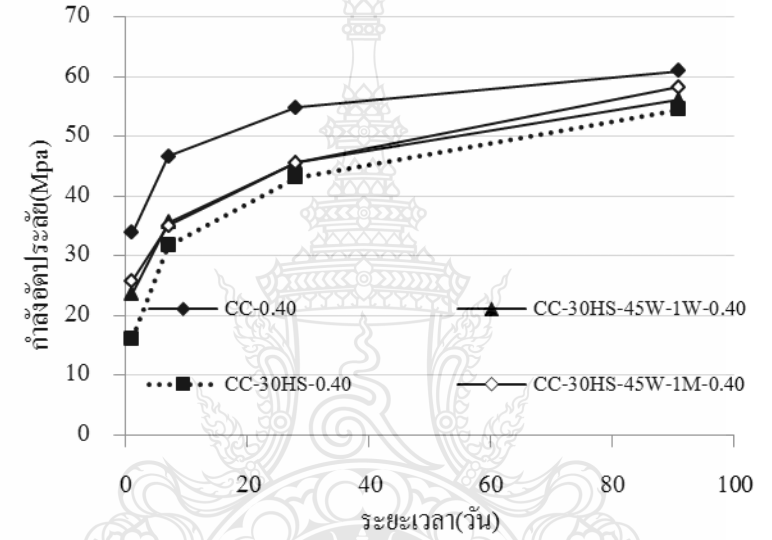


ค) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

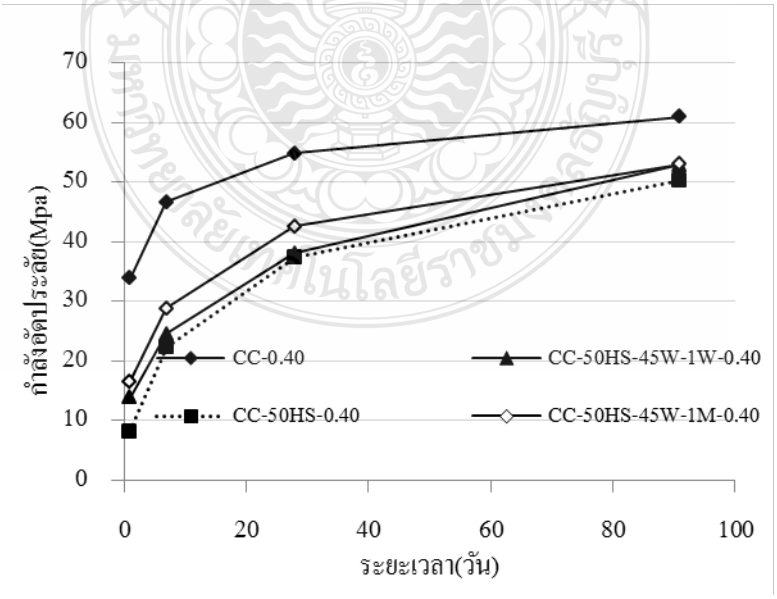
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ25 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

2.2) เถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45

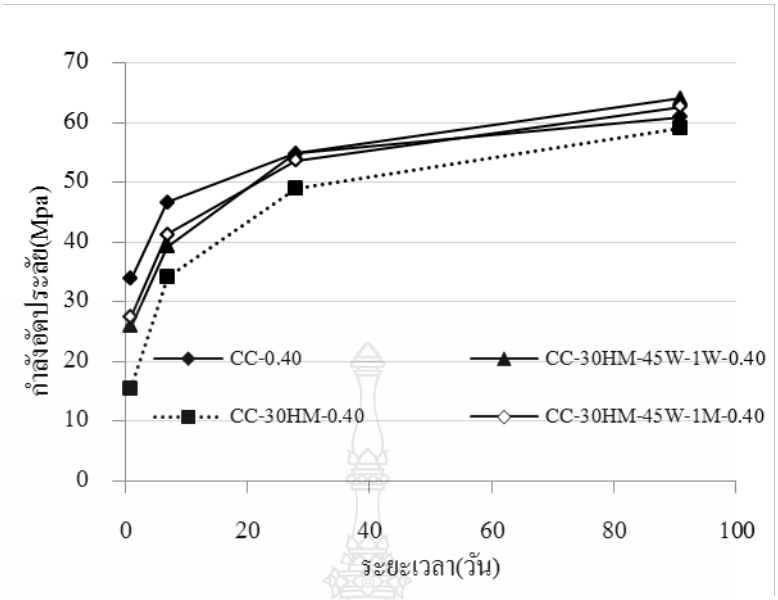
รูปที่ 4.28 และ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ตามลำดับ พบว่า ให้ผลของกำลังอัดประลัยมีแนวโน้มเดียวกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25



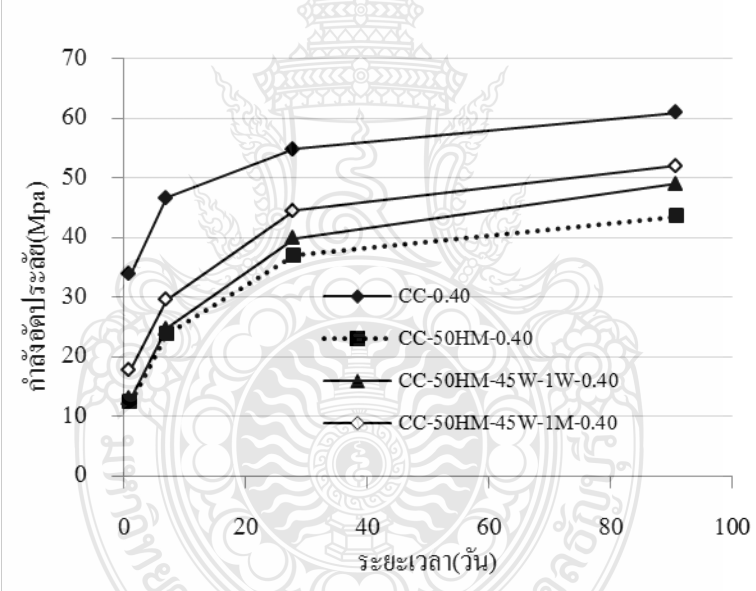
ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HS ร้อยละ 50

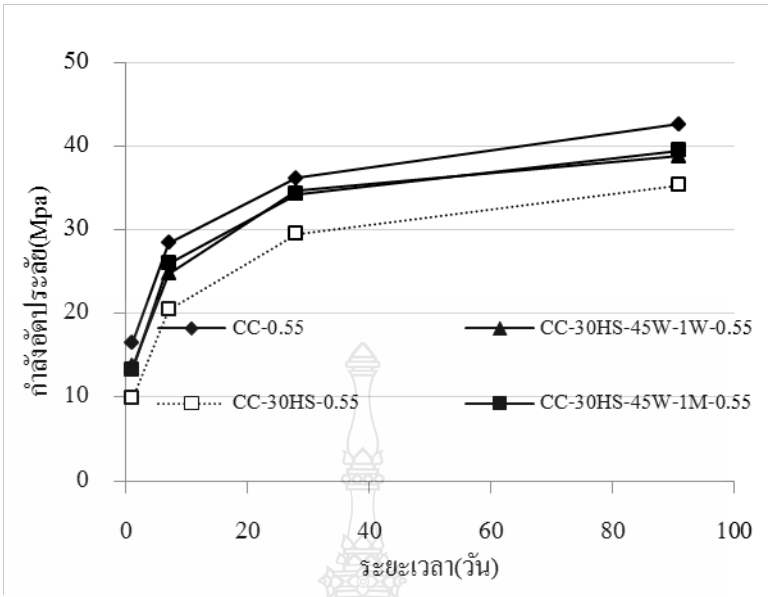


ค) เถ้าลอย HMร้อยละ 30

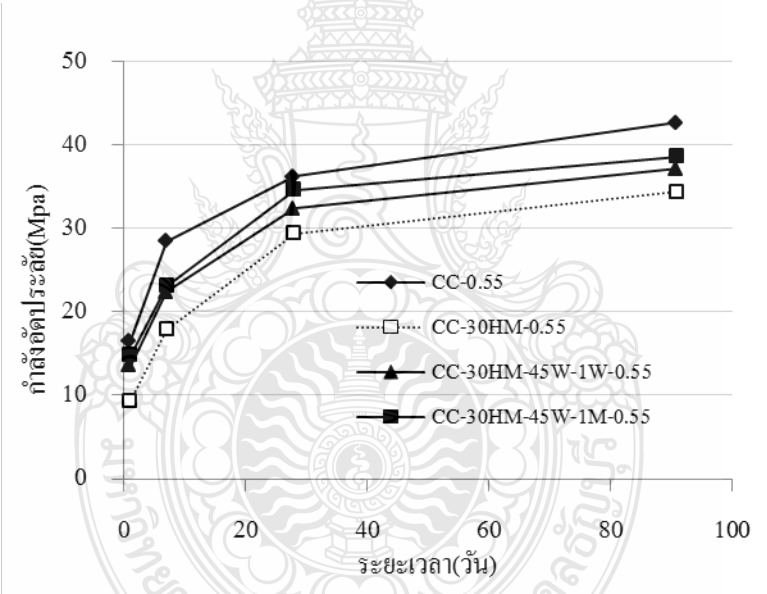


ง) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

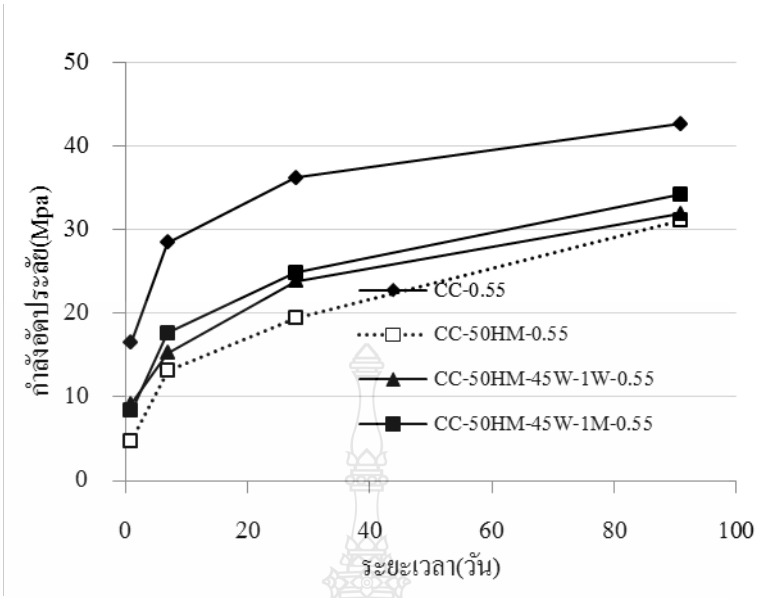
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

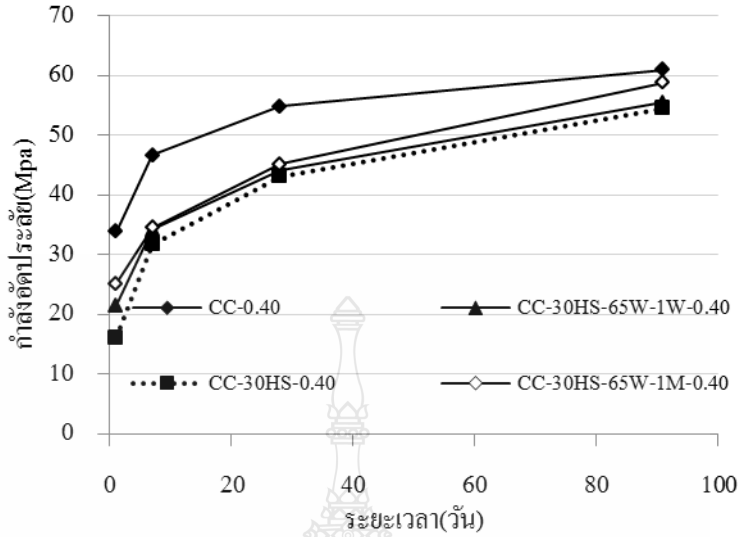


ค) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

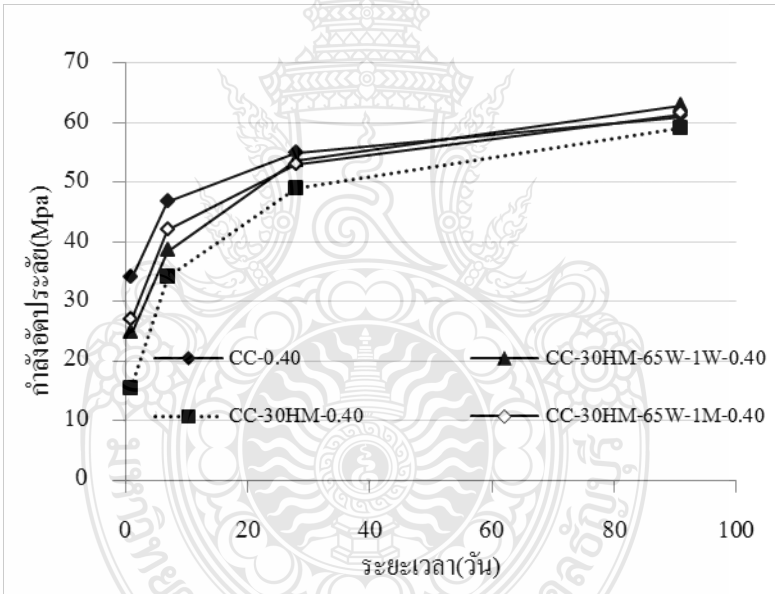
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 45 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

2.3) เถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65

รูปที่ 4.30 และ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ตามลำดับ พบว่า ให้ผลของกำลังอัดประลัยมีแนวโน้มเดียวกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 25 และ 45

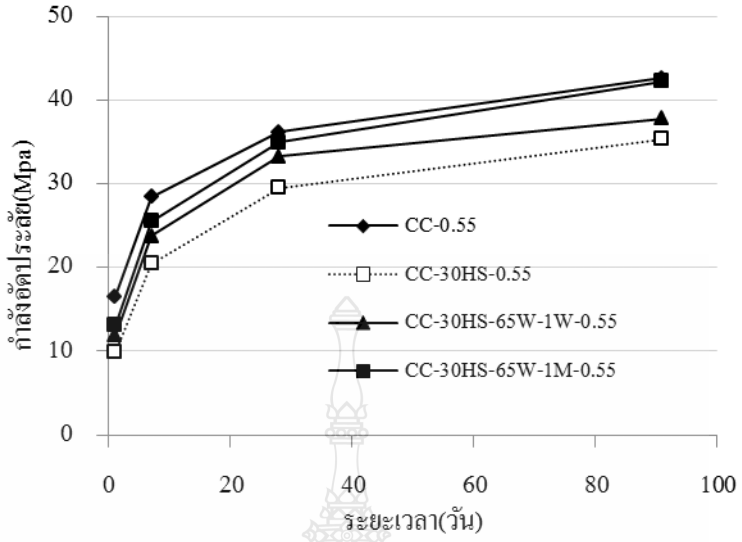


ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30

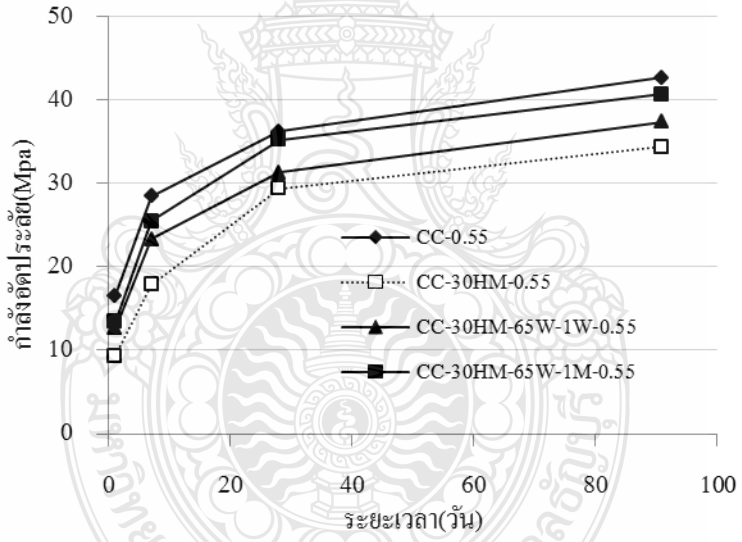


ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

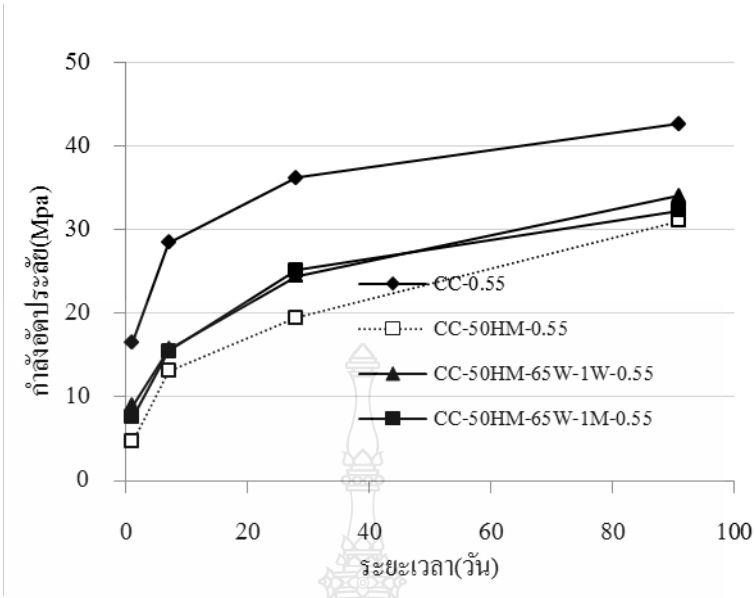
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30



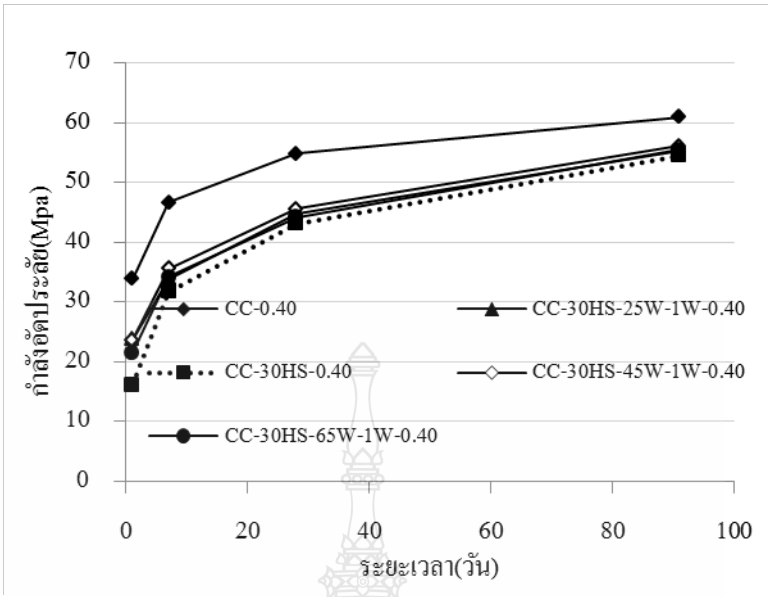
ค) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการปริมาณความชื้นร้อยละ 65 เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

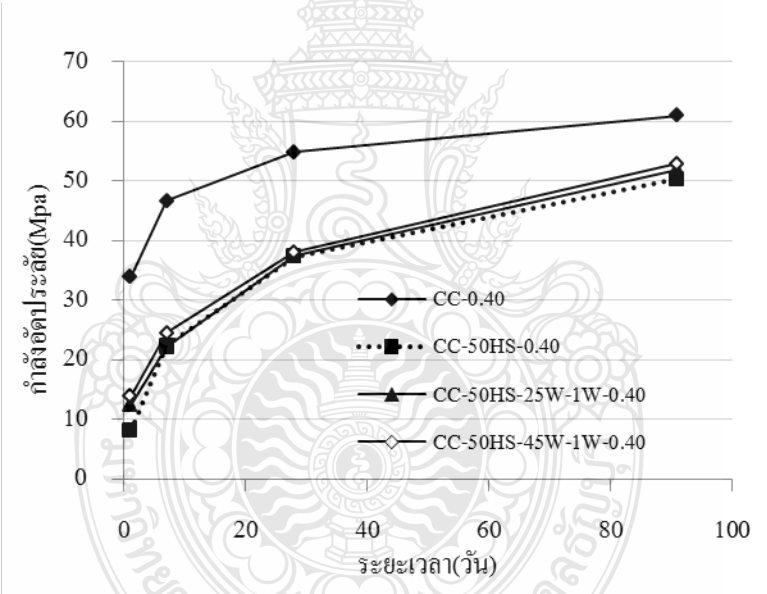
3) ผลจากกระทบจากความชื้นของเถ้าลอย

3.1) เถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ (1W)

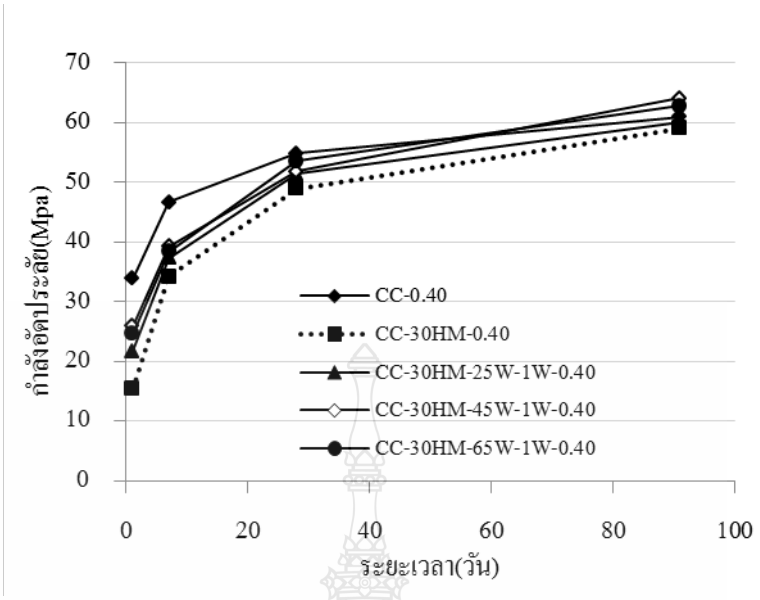
รูปที่ 4.32 และ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ตามลำดับ พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการ (ทั้ง HS แล HM) ทั้งที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W (ทั้งเถ้าลอย HS และ HM)) มีค่าไม่แตกต่างกัน



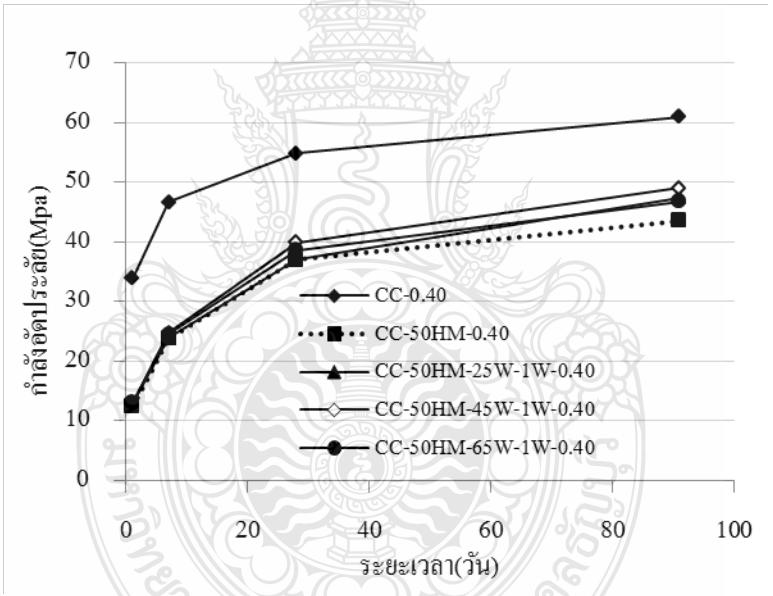
ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HS ร้อยละ 50

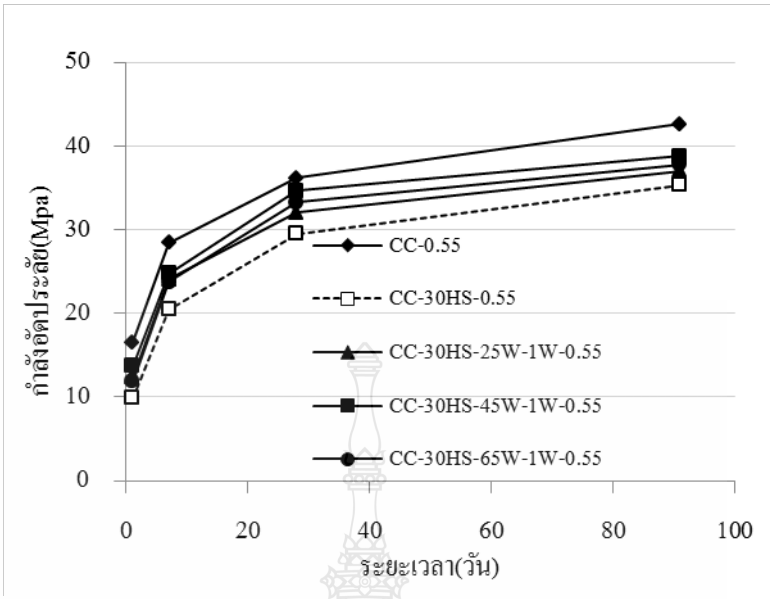


ค) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

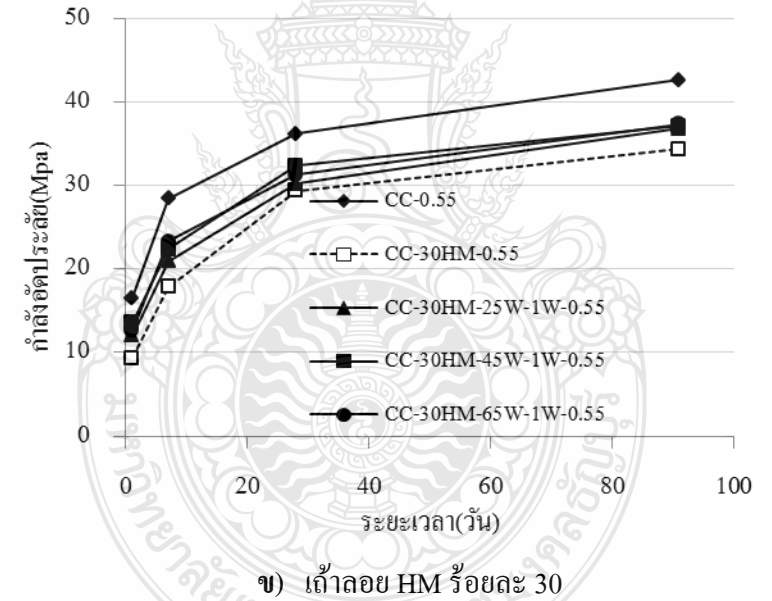


ง) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

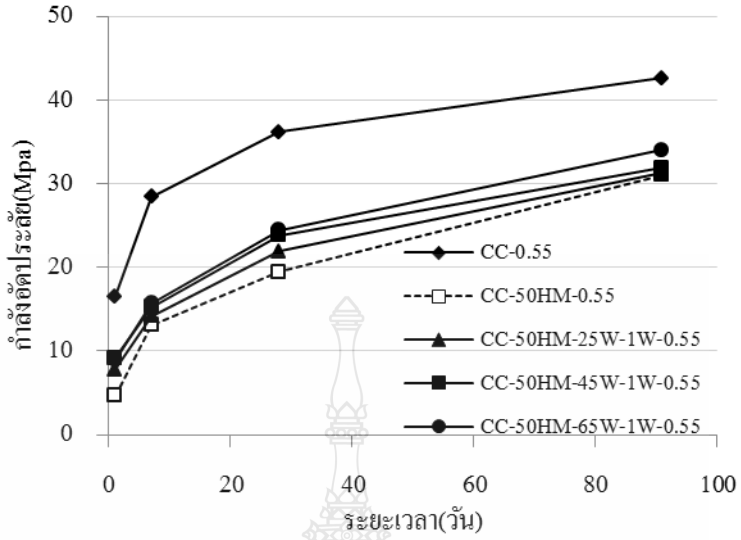
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

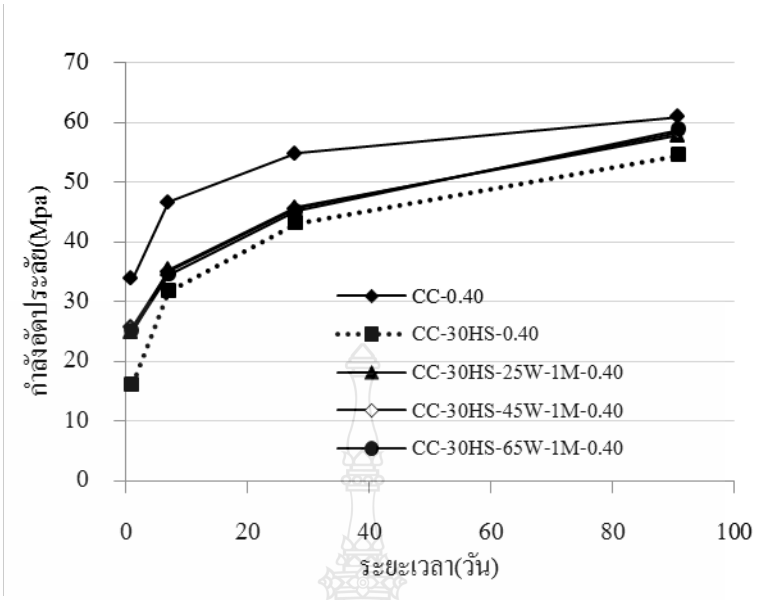


ค) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

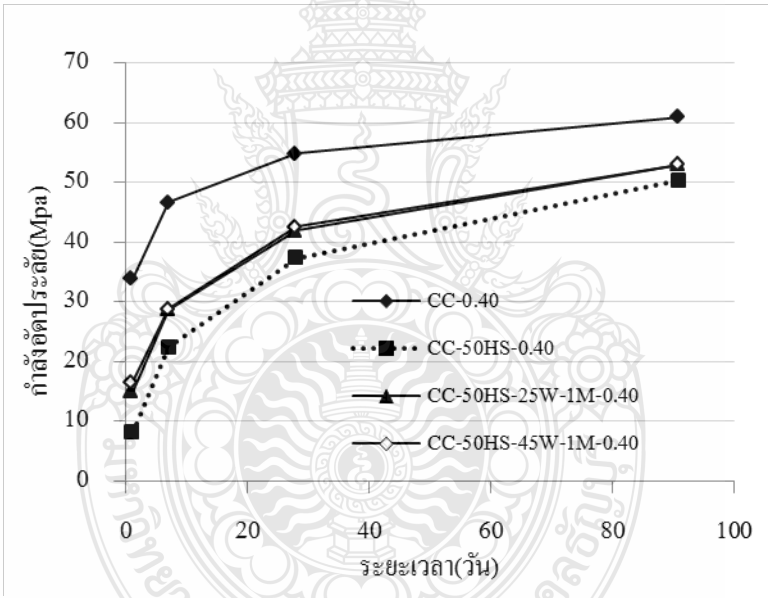
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

3.2) เถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 เดือน (1M)

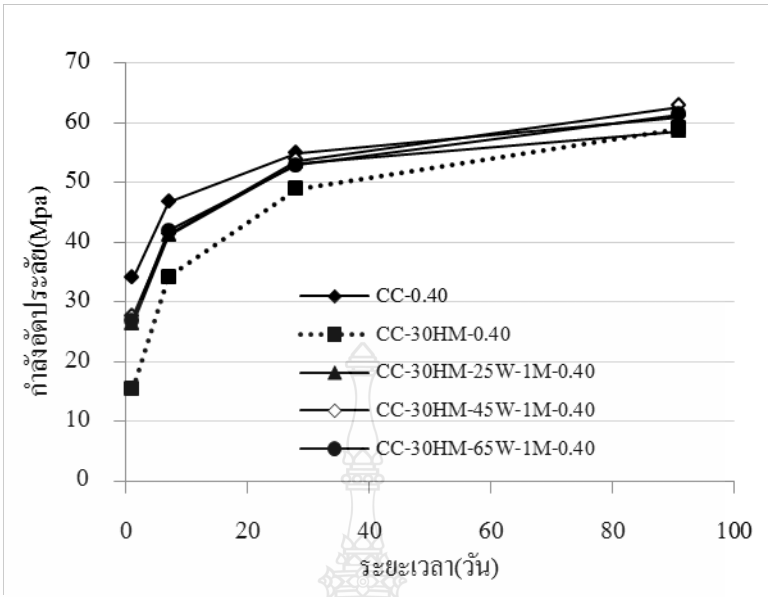
รูปที่ 4.34 และ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 ตามลำดับ พบว่า ให้ผลของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตไปในแนวโน้มเดียวกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W



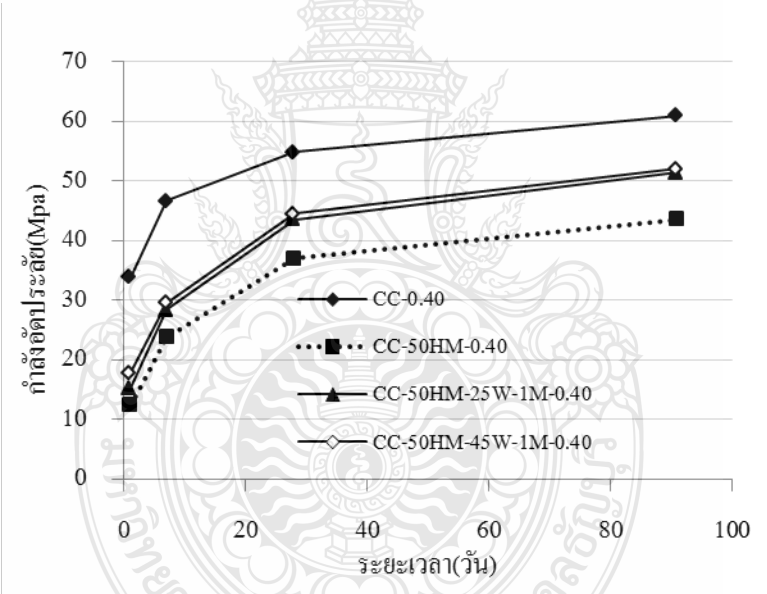
ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HS ร้อยละ 50

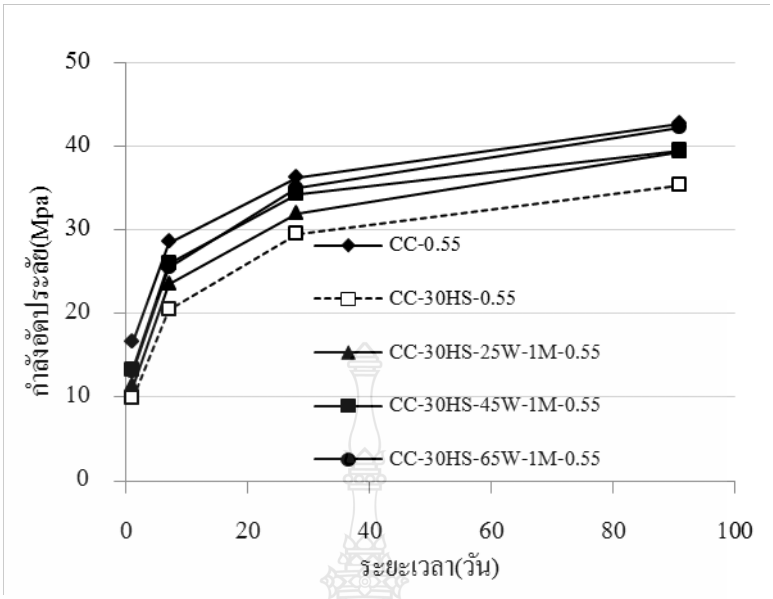


ค) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

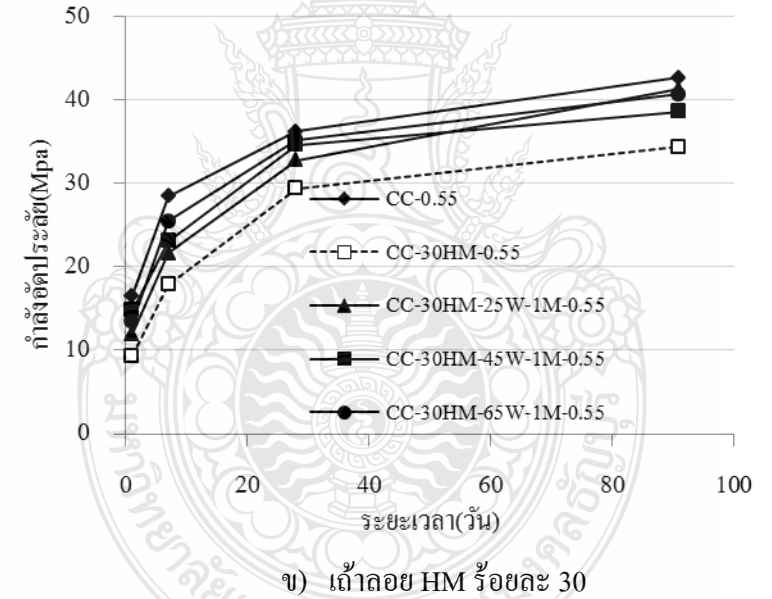


ง) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

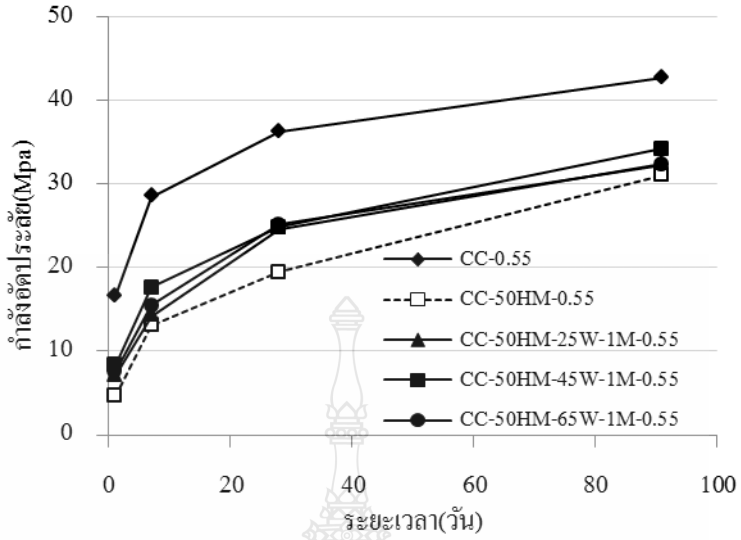
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



ก) เถ้าลอย HS ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

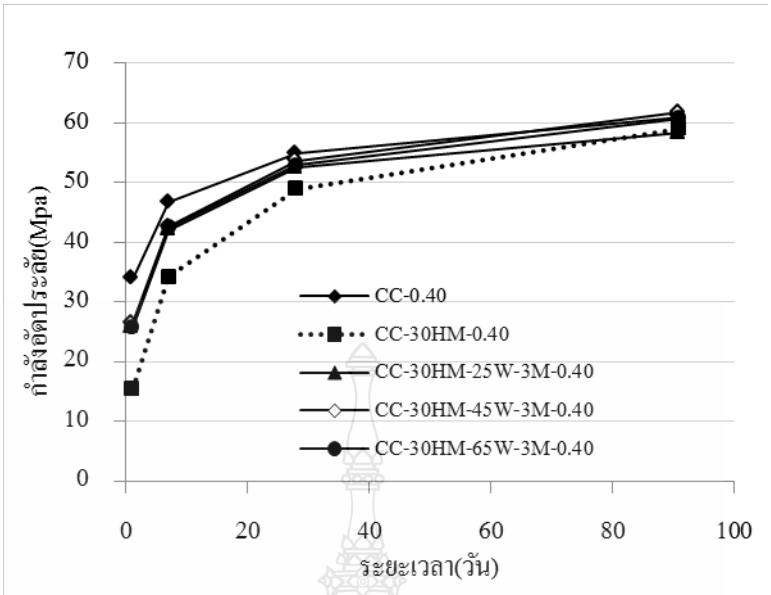


ค) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1M เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

3.3) เถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3 เดือน (3M)

รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3M เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 พบว่าให้ผลของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตไปในแนวโน้มเดียวกับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W และ 1M



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและระยะเวลาของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และผสมเถ้าลอยเปียกจากห้องปฏิบัติการระยะเวลาสัมผัสความชื้น 3M เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.5 การต้านทานในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย

ในการศึกษาการขยายตัวของมอร์ต้าร์ เพื่อศึกษาค่าการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์โดยใช้สารละลายซัลเฟต 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

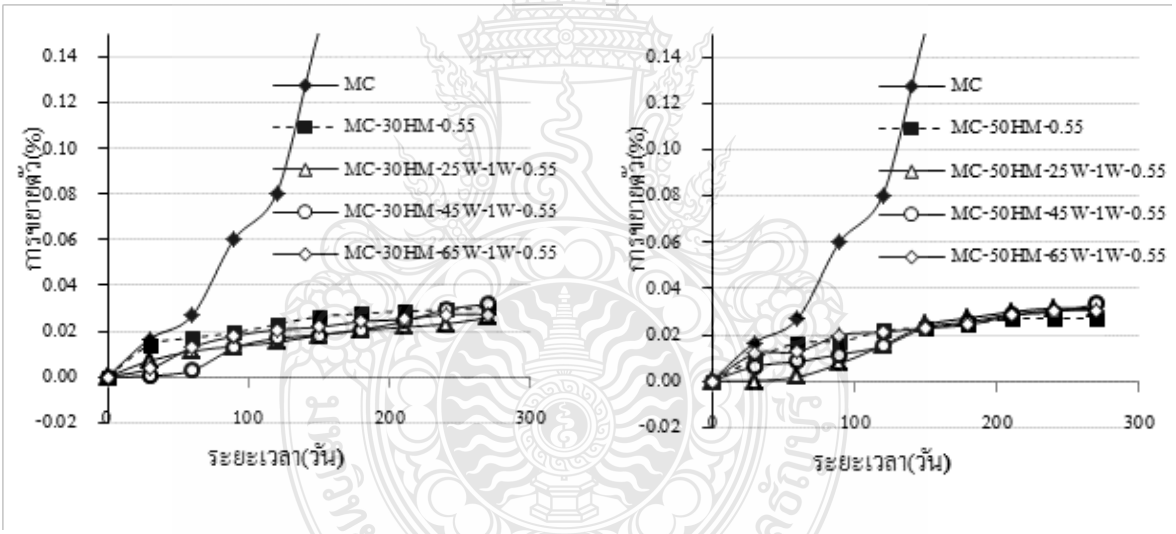
4.5.1 สารละลายโซเดียมซัลเฟต

สำหรับในการศึกษาการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตในครั้งนี้นั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบ 3 ลักษณะ คือ 1) ผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 2) ผลกระทบปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และ 3) ผลกระทบของระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้า

1) ผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

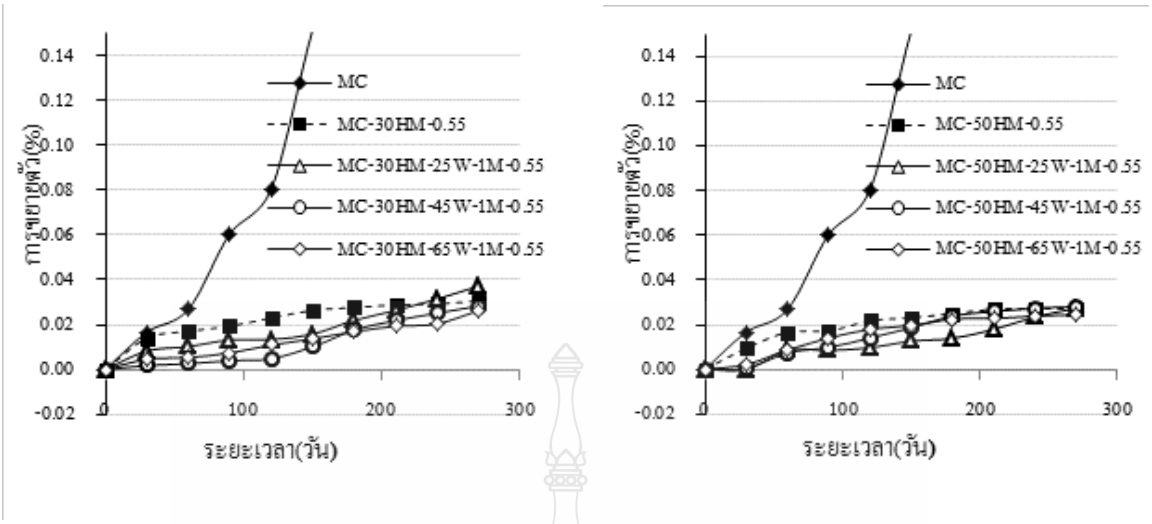
จากรูปที่ 4.37 ถึง 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกร้อยละ 25 45 และ 65 เมื่อระยะ

สัมผัสน้ำของเถ้าลอยเปียกที่ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือนตามลำดับ พบว่าค่าขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกน้ำที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25, 45 และ 65 และที่ระยะสัมผัสกับน้ำ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือนมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการลดปูนซีเมนต์ทำให้ C_3A ลดลง รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ลด $Ca(OH)_2$ ลง ส่งผลให้เกิดยิปซั่มและ Ettringite น้อยลง การขยายตัวจึงมีค่าน้อย ส่วนเมื่อพิจารณามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกทุกกรณีมีแนวโน้มว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งมีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเนื่องจากเถ้าลอยเปียกมีน้ำเคลือบอนุภาคของเถ้าลอยอยู่แล้วจึงทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้ดีกว่าส่งผลให้ลด $Ca(OH)_2$ ได้มากกว่า และทึบน้ำมากกว่าสารละลายซัลเฟตเข้าได้ยากขึ้นส่งผลให้เกิด Ettrigite น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเนื่องจากอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตยังน้อยจึงทำให้ยังไม่เห็นข้อแตกต่างอย่างได้ชัดเจน



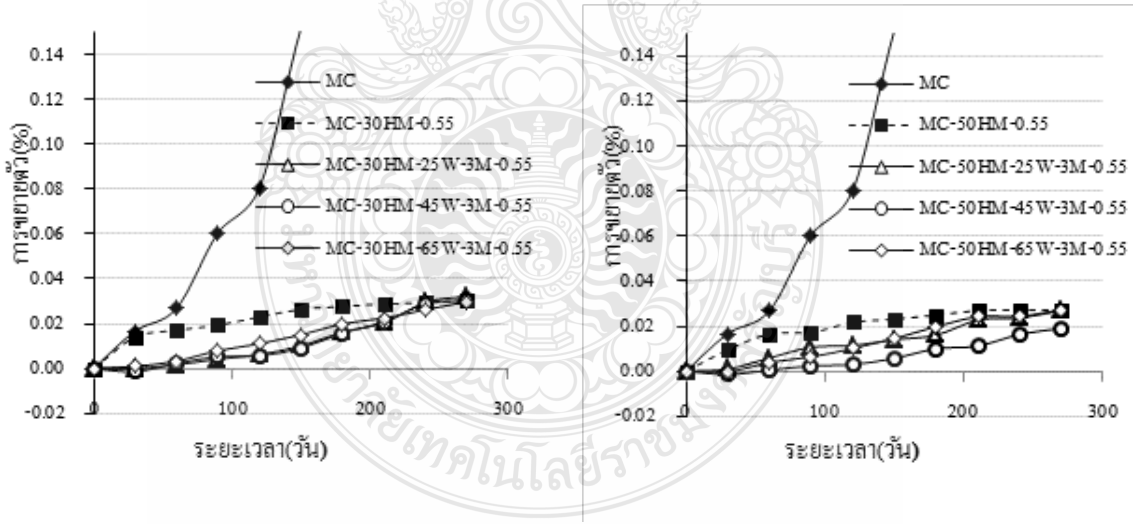
ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 W



ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก โดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 M

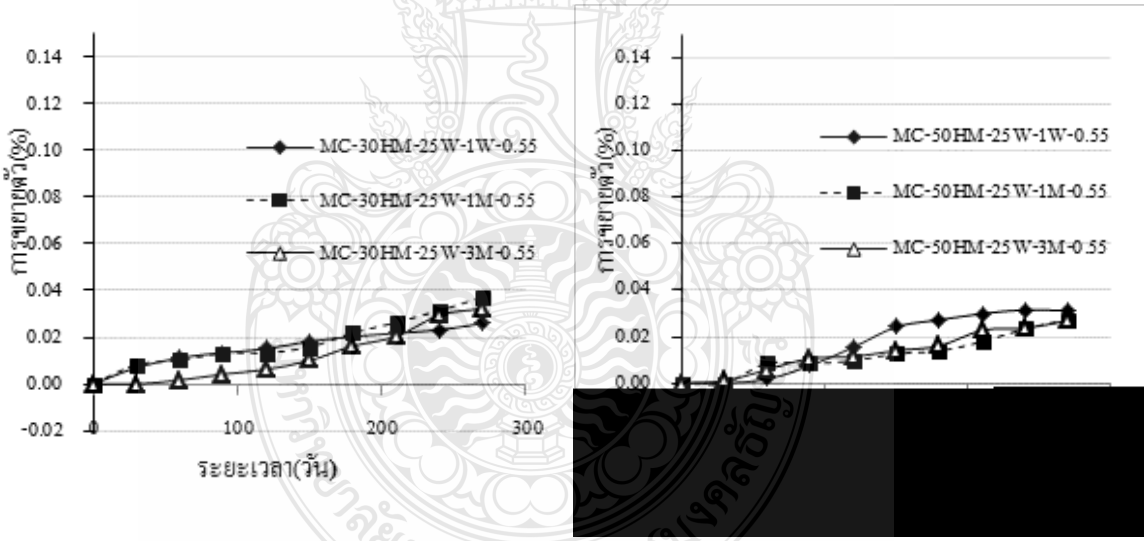


ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก โดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 3 เดือน

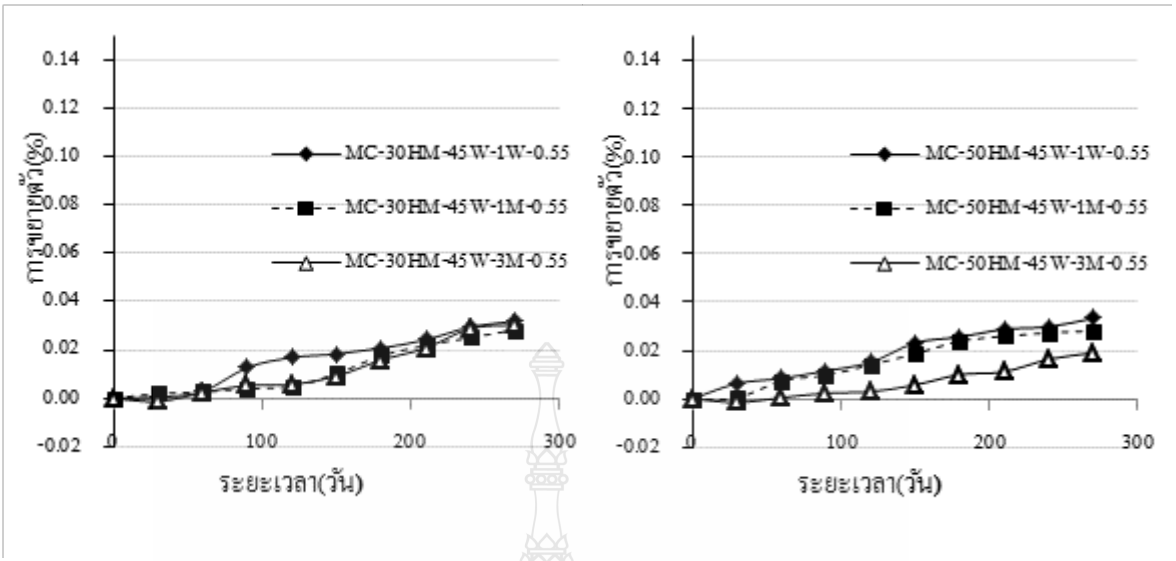
2) ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

จากรูปที่ 4.40 ถึง 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสม เถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน พบว่าค่าขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือนมีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงผลกระทบของระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ไม่มีผลต่อ ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าการขยายตัวของเถ้าลอยเปียกที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้นนานกว่า (3 เดือน) มีแนวโน้มจะน้อยกว่าที่ระยะเวลาสัมผัสน้อยกว่า (1 สัปดาห์และ 1 เดือน) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า จึงทำให้ลด $Ca(OH)_2$ ได้มากกว่า ทั้งนี้ทั้งนั้นเนื่องจากอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตยังน้อยจึงทำให้ยังไม่เห็นผลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



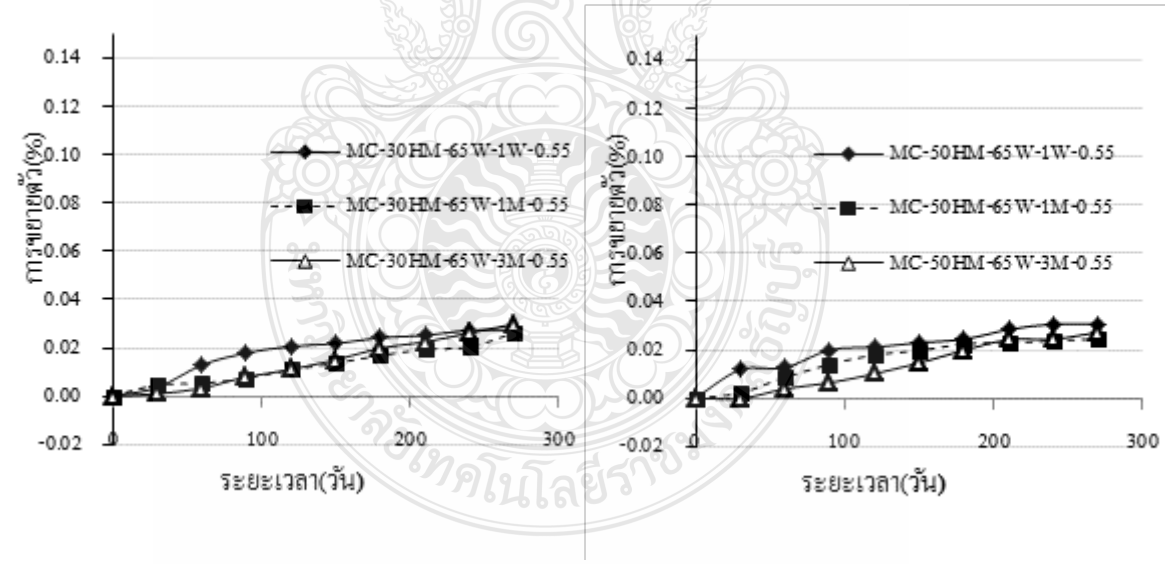
ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25



ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 45

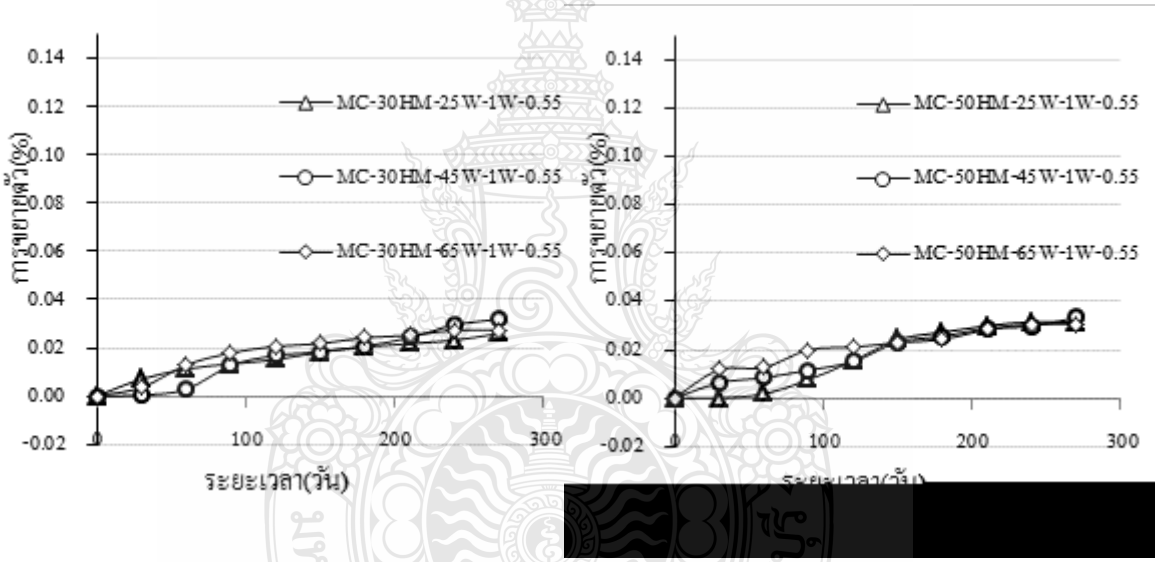


ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 65

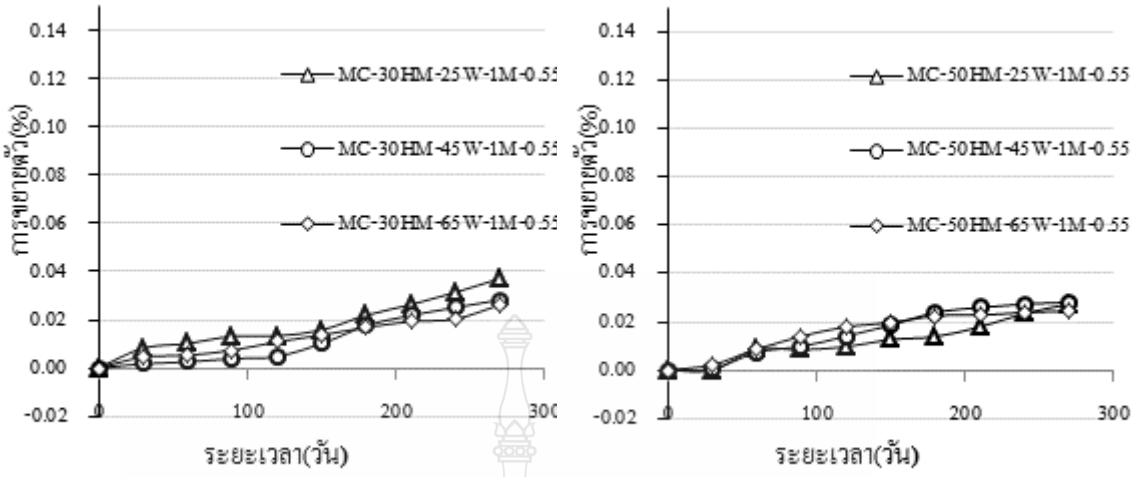
3) ผลกระทบของความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

จากรูปที่ 4.43 ถึง 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อเถ้าลอยสัมผัสกับน้ำ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน พบว่าค่าขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อเถ้าลอยสัมผัสกับน้ำ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือนมีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าผลกระทบของปริมาณความชื้นของเถ้าลอยไม่มีผลต่อค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต อย่างไรก็ตามเนื่องจากอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตยังน้อยจึงทำให้ยังไม่เห็นผลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



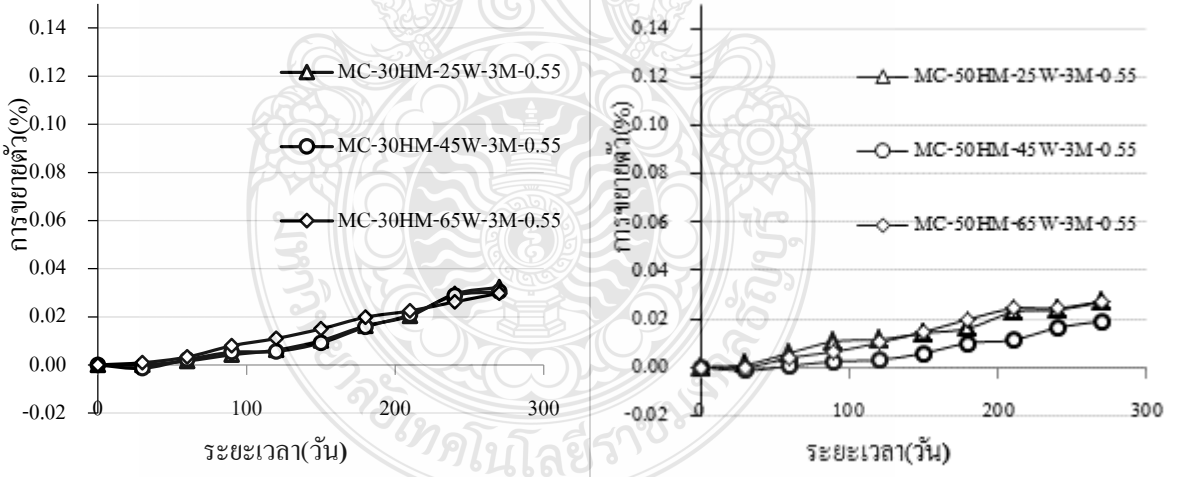
ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์



ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 เดือน



ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

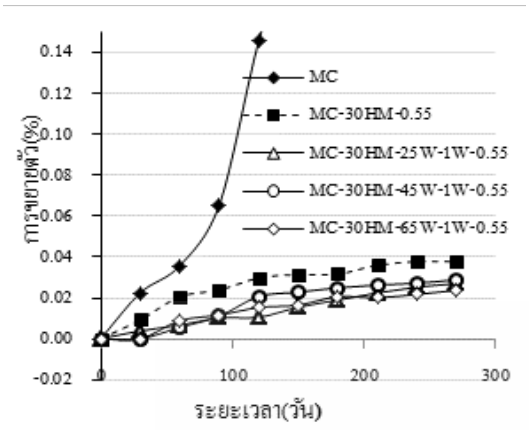
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 3 เดือน

4.5.2 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

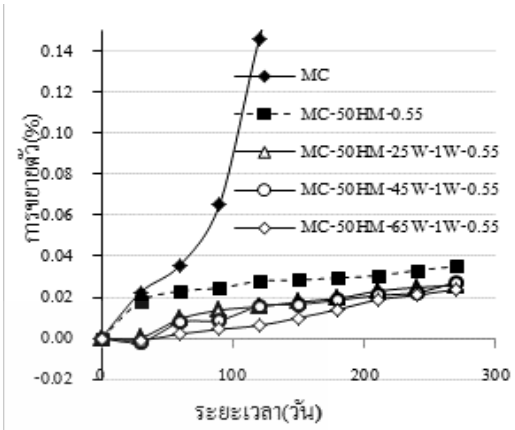
สำหรับในการศึกษาการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในครั้งนี้นั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบ 3 ลักษณะ คือ 1) ผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 2) ผลกระทบปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัว ของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและ 3) ผลกระทบของระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้า

1) ผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวในสารละลายแมกดีเซียมซัลเฟต

จากรูปที่ 4.46 ถึง 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอยเปียกที่ 1 สัปดาห์, 1 เดือน และ 3 เดือนตามลำดับ พบว่าค่าขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกน้ำที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25, 45 และ 65 และที่ระยะสัมผัสกับน้ำ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือนมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการลดปูนซีเมนต์ทำให้ C_3A ลดลง รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ลด $Ca(OH)_2$ ลง ส่งผลให้เกิดยิมซั่มและ Ettringite น้อยลง การขยายตัวจึงมีค่าน้อย ส่วนเมื่อพิจารณามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกทุกกรณีมีแนวโน้มว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งมีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเนื่องจากเถ้าลอยเปียกมีน้ำเคลือบอนุภาคของเถ้าลอยอยู่แล้วจึงทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้ดีกว่าส่งผลให้ลด $Ca(OH)_2$ ได้มากกว่า และทึบน้ำมากกว่าสารละลายซัลเฟตเข้าได้ยากขึ้นส่งผลให้เกิด Ettrigite น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเนื่องจากอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังน้อยจึงทำให้ยังไม่เห็นข้อแตกต่างอย่างได้ชัดเจน

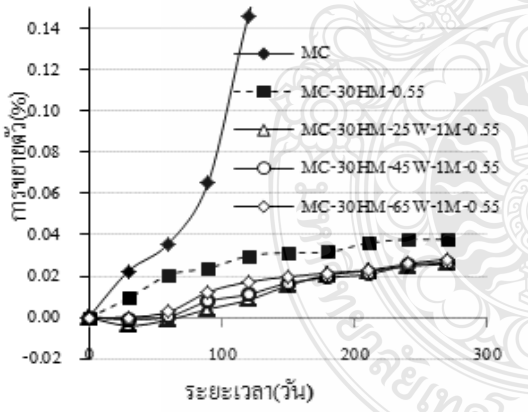


ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30

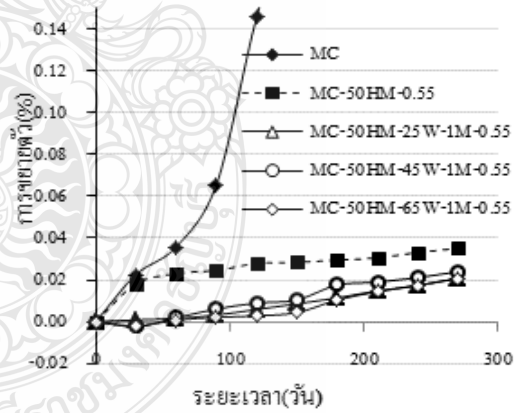


ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณผสมของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์

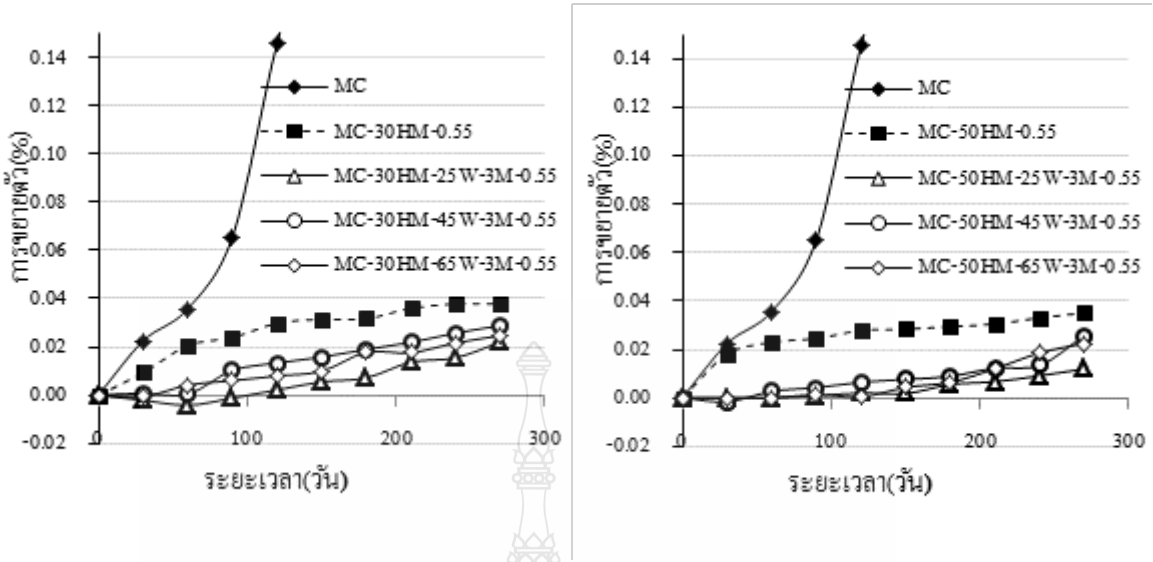


ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30



ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณผสมของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 เดือน

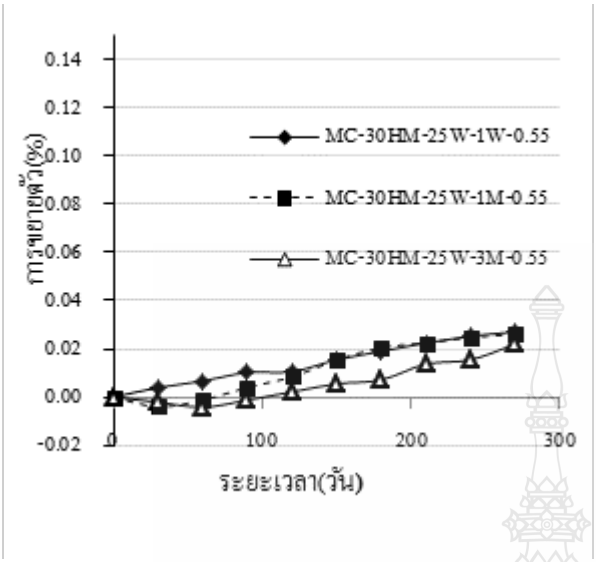


ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกโดยปริมาณผสมของเถ้าลอยร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 3 เดือน

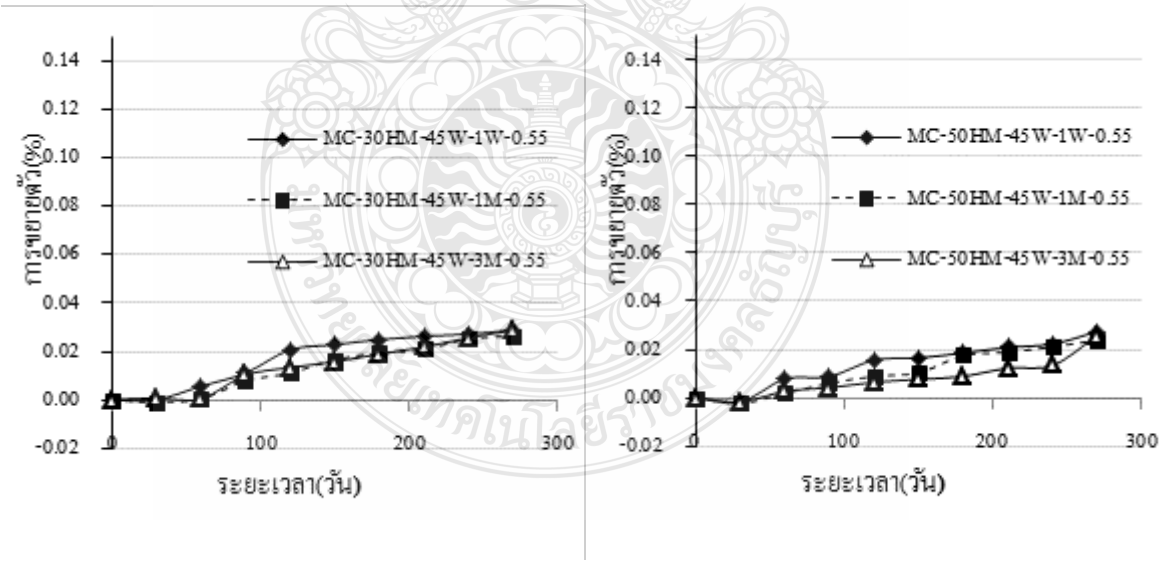
2) ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

จากรูปที่ 4.49 ถึง 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน พบว่าค่าขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือนมีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงผลกระทบของระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ไม่มีผลต่อค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าการขยายตัวของเถ้าลอยเปียกที่มีระยะเวลาสัมผัสความชื้นนานกว่า (3 เดือน) มีแนวโน้มจะน้อยกว่าที่ระยะเวลาสัมผัสน้อยกว่า (1 สัปดาห์และ 1 เดือน) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยเปียกส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่า จึงทำให้ลด $Ca(OH)_2$ ได้มากกว่า ทั้งนี้ทั้งนั้นเนื่องจากอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังน้อยจึงทำให้ยังไม่เห็นผลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



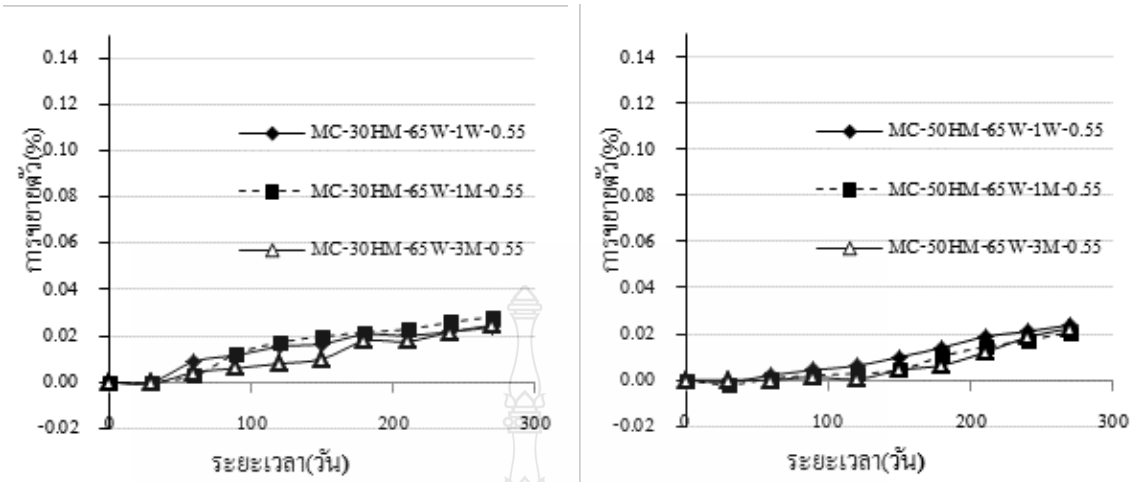
ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 25



ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 45

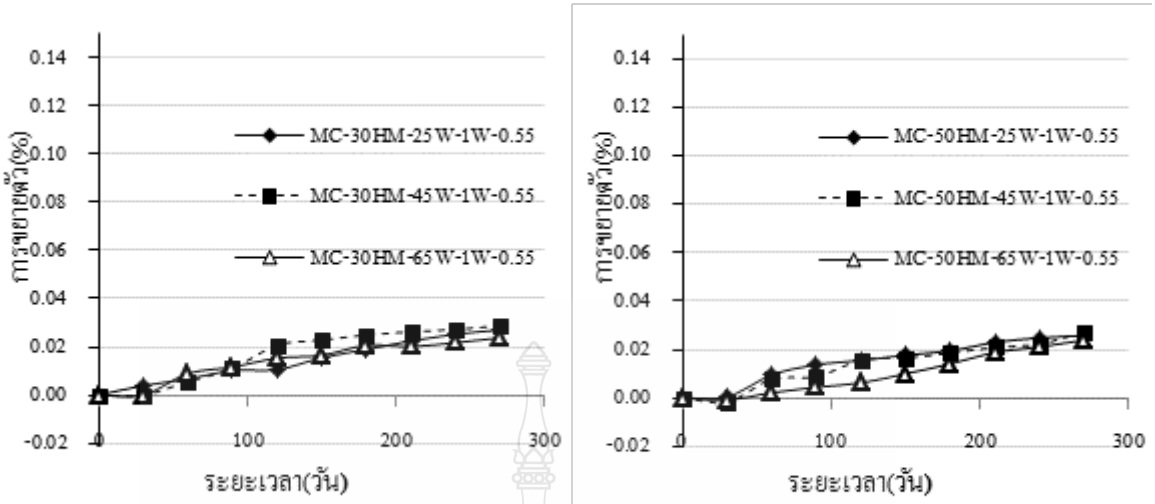


ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 65

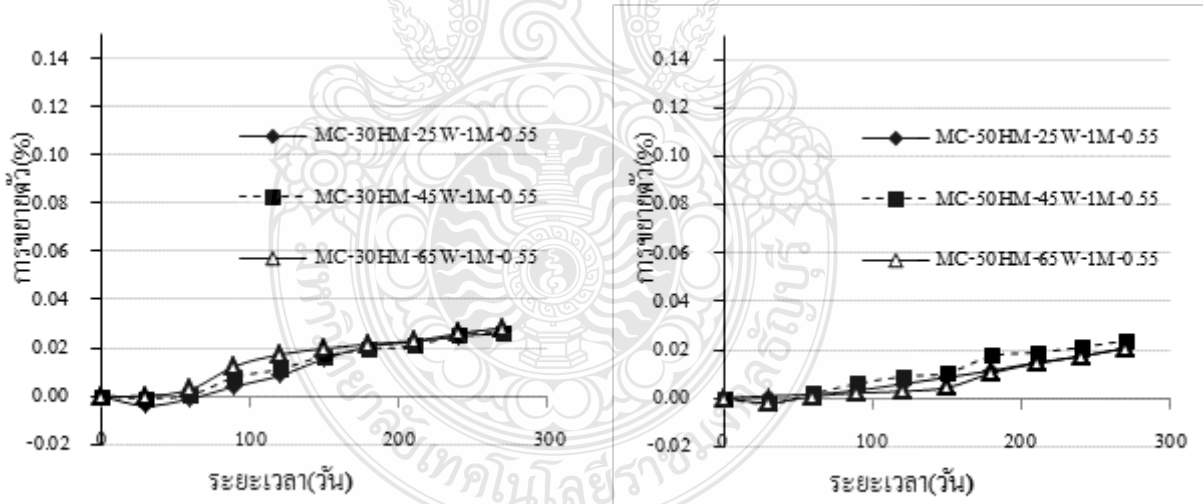
3) ปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการขยายตัวของมอร์ต้าในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

จากภาพที่ 4.52 ถึง 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อเถ้าลอยสัมผัสกับน้ำ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน พบว่าค่าขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อเถ้าลอยสัมผัสกับน้ำ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือนมีค่าไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าผลกระทบของปริมาณความชื้นของเถ้าลอยไม่มีผลต่อค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต อย่างไรก็ตามเนื่องจากอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังน้อยจึงทำให้ยังไม่เห็นผลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



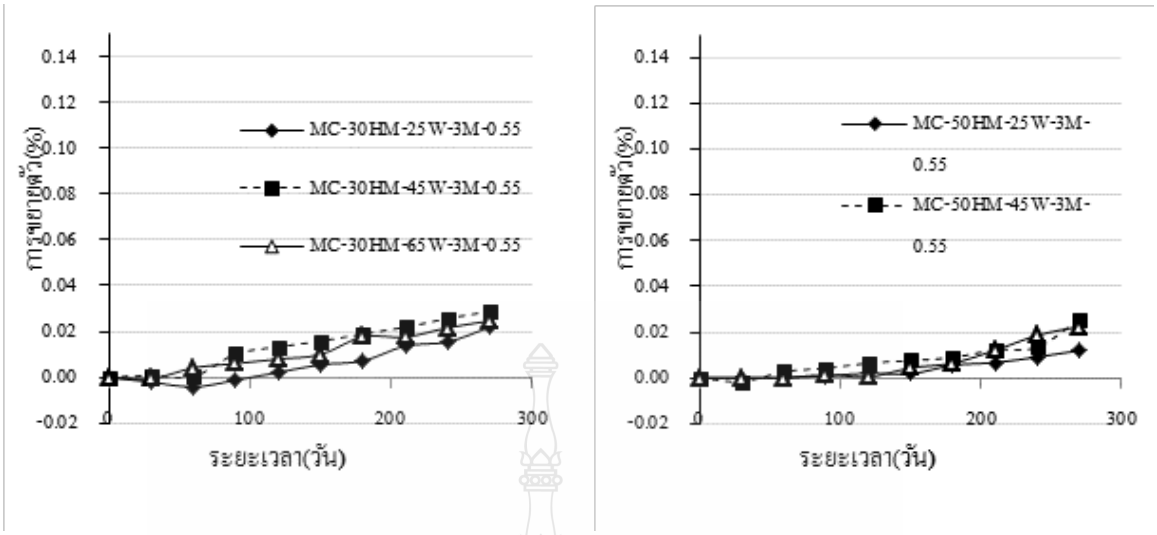
ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์



ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 เดือน



ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 30 ข) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวและระยะเวลาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกเมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 3 เดือน

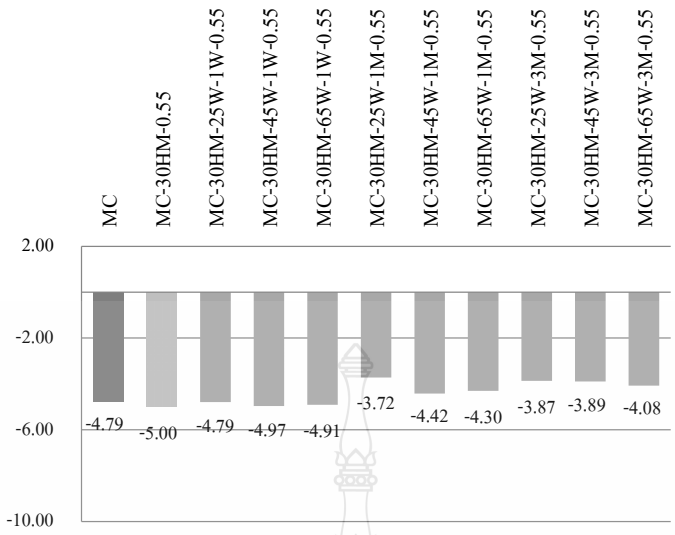
4.5.3 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียก

ในการศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ เพื่อศึกษาค่าการต้านทานซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ในครั้งนี้โดยใช้เพราะในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น ทั้งนี้เพราะกลไกการทำงานของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นการทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนัก

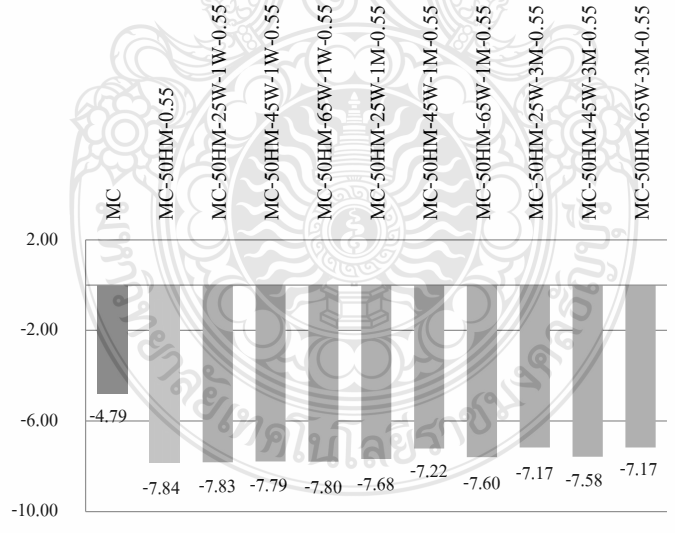
สำหรับในการศึกษาการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในครั้งนี้นั้น ได้ทำการศึกษาผลกระทบ 3 ลักษณะ คือ 1) ผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 2) ผลกระทบของระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์และ 3) ผลกระทบปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

1) ผลกระทบของเถ้าลอยเปียกต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 4.55 และ รูปที่ 4.56 แสดงการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 270 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 (รูปที่ 4.55) และเถ้าลอยร้อยละ 50 (รูปที่ 4.56) พบว่าทุกสัดส่วนผสมยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนักโดยมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ทั้งเถ้าลอยร้อยละ 30 เถ้าลอยร้อยละ 50 ทั้งนี้เนื่องจากอายุในการแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังน้อย



รูปที่ 4.55 การสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 270 วันในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกร้อยละ 30 โดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์, 1 เดือน และ 3 เดือน



ก) เถ้าลอย HM ร้อยละ 50

ภาพที่ 4.56 การสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 270 วันในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกร้อยละ 50 โดยปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกร้อยละ 25, 45 และ 65 เมื่อระยะสัมผัสน้ำของเถ้าลอย 1 สัปดาห์, 1 เดือน และ 3 เดือน

2) ผลกระทบของระยะสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์

รูปที่ 4.55 และ รูปที่ 4.56 แสดงการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 270 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 (รูปที่ 4.55) และเถ้าลอยร้อยละ 50 (รูปที่ 4.56)พบว่าระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1 M และ 3M ทุกสัดส่วนผสมยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนักโดยมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ทั้งที่ปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W ทั้งเถ้าลอยร้อยละ 30 เถ้าลอยร้อยละ 50 ทั้งนี้เนื่องจากอายุในการแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังน้อย

3) ผลกระทบปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 4.55 และ รูปที่ 4.56 แสดงการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 270 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยเปียกที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 (รูปที่ 4.55) และเถ้าลอยร้อยละ 50 (รูปที่ 4.56) พบว่าปริมาณความชื้น 25W 45W และ 65W ทุกสัดส่วนผสมยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนักโดยมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1W 1 M และ 3M ทั้งเถ้าลอยร้อยละ 30 เถ้าลอยร้อยละ 50 ทั้งนี้เนื่องจากอายุในการแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังน้อย

4.6 การเปรียบเทียบสมบัติและการต้านทานซัลเฟตของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

จากการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบถึงผลกระทบชนิดของเถ้าลอย โดยพิจารณา องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแต่ละชนิด และรวมถึงสมบัติของเพสต์ประกอบด้วยปริมาณน้ำที่เหมาะสม และระยะเวลาการก่อตัว สมบัติของมอร์ต้าร์ประกอบด้วย ความต้องการน้ำและกำลังอัดประลัย สมบัติของคอนกรีตประกอบด้วย ค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และการต้านทานในสารละลายซัลเฟตประกอบด้วย การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักโดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.8 สมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ผสมเถ้าลอยเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

รายการ	HS		HM	
	แห้ง	เปียก	แห้ง	เปียก
ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า
ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า
ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า
กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
ค่าการยุบตัวของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
ขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า
การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตตของมอร์ต้าร์	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตระหว่างเถ้าลอยแห้งกับเถ้าลอยเปียก

รายการ	ผลการศึกษา
ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์	เถ้าลอยแห้งมีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยเปียก
ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์	ระยะเวลาสัมผัสความชื้นนานขึ้นมีแนวโน้มการก่อตัวช้าลง
ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์	เถ้าลอยแห้งมีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยเปียก
กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์	เถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกมีค่าไม่ต่างกัน
ค่าการยุบตัวของคอนกรีต	เถ้าลอยแห้งมีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยเปียก
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	เถ้าลอยแห้งมีค่าน้อยกว่าของเถ้าลอยเปียก
ขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์	เถ้าลอยแห้งมีค่ามากกว่าของเถ้าลอยเปียก
การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์	เถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกมีค่าไม่ต่างกัน

บทที่ 5
สรุป

จากการศึกษาสมบัติเบื้องต้นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การใช้เถ้าลอย (ทั้งแห้งและเปียก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากกว่า การก่อตัวของเพสต์นานกว่า ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์มากกว่า กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์น้อยกว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้อยกว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตน้อยกว่า และการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2) การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลให้ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากกว่า การก่อตัวของเพสต์นานกว่า ความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์มากกว่า กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ไม่ต่างกัน ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมากกว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมากกว่า และการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตไม่ต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับของเถ้าลอยแห้ง

3) ระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกที่นานกว่า ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อยลง และการก่อตัวของเพสต์นานขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์ กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ส่วนปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียก ส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมากขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสมและการก่อตัวของเพสต์ ความต้องการน้ำและกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต และการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์

4) สามารถเปรียบเทียบสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ระหว่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ของเถ้าลอยแห้ง และของเถ้าลอยเปียกได้

บรรณานุกรม

[1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, (2543).**ความคงทนของคอนกรีต**.1:วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัม

[2] Warangkana Saengsoy,Thuy Bich Thi Nguyen and Somnuk Tangtermsirikul, 2014. A study on basic properties of mortar made with wet fly ash. International Conferenceof Asian Concrete.

[3] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล 2555. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. 1500. 7: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ส.ค.ท).

[4] Haldive S.A.,Kambekar A. R., 2013. Experimental study on combined effect of fly ash and pond ash on strength and durability of concrete. International journal of Scientific & Engineering Research Volume.

[5] Andrew B.' & Aceves P.G., 2012. The use of Non-Commercial Fly ash in Roller compected concrete structures. World of Coal Ash (WOCA) confence, Denver,CO,USA.

[6] Raungrut Cheerarot a, Chai Jaturapitakku, 2004. A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement. Accepted 2 February

[7] ปริญญา จินดาประเสริฐ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2553). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

[8] Krittiya Kaewmanee, Pitisan Krammart, Taweechai Sumranwanich, Pongsak Choktaweekarn and Somnuk tangtermsirikul, (2013).**Effect of free lime content on properties of cement – fly ash mixtures**. Construction and Building materials, 38:829-836

[9] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete

[10] Krammart P. and Tangtermsirikul S., (2002). **Strength Reduction and Expansion of Mortars with Fly Ash**, (Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand), V.13, No.3 pp. 9-16.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[11] Chindaprasirt, P., Cao, T., and Sirivivatnanom V., **Blended Cement Technology for Durable Concrete Structures**, Proceeding of the First Asia/Pacific conference on Harmonization of Durability Standard and performance Tests for Component in Building and Infrastructure,

[12] ASTM C187, Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste

[13] ASTM C191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle

[14] ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar

[15] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

[16] ASTM C151, Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement

[17] ASTM C157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement, Mortar, and Concrete

[18] ASTM C596, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement

[19] ASTM C856, Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete

[20] ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าและคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

ตารางที่ ก1 ค่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้า ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก

ลำดับ		สัดส่วน	ความต้องการน้ำ (%)	ความชื้นในเถ้าลอย (%)	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
					กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย (Mpa)	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย (Mpa)	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย (Mpa)	strength (N/mm^2)	91
1	1-1	MC	0.625	-	12.96	12.63	28.16	26.89	34.40	34.29	39.88	39.60
	1-2				13.56		25.48		34.18		39.28	
	1-3				11.36		27.04		34.29		39.64	
2	2-1	MC-20HS-1W	0.650	9.84	8.60	8.82	22.64	21.84	27.16	27.07	37.44	37.10
	2-2				9.04		22.60		26.96		36.76	
	2-3				8.52		21.84		27.08		37.11	
3	3-1	MC-20HM-1W	0.650	14.22	10.04	9.68	18.64	21.16	28.72	28.49	36.72	35.70
	3-2				9.48		22.64		28.00		34.76	
	3-3				9.52		22.20		28.76		35.62	
4	4-1	MC-20HS-1M	0.650	29.21	9.24	8.80	21.76	20.24	26.40	26.75	37.28	37.28
	4-2				8.80		21.88		26.52		36.48	
	4-3				9.40		20.24		27.32		38.08	
5	5-1	MC-20HM-1M	0.650	24.04	8.28	8.21	21.64	20.80	27.60	27.44	35.28	35.08
	5-2				8.24		20.00		28.36		35.68	
	5-3				8.12		20.76		26.36		34.88	
6	6-1	MC-20HS	0.630	-	8.48	8.48	17.36	17.53	25.80	25.95	36.44	36.60
	6-2				7.28		17.36		24.96		36.64	
	6-3				7.72		17.88		27.08		36.72	
7	7-1	MC-20HM	0.625	-	10.64	10.09	18.04	17.41	20.72	24.79	38.04	36.36
	7-2				9.60		18.04		24.80		43.28	
	7-3				10.04		16.16		28.84		34.68	
8	8-1	MC-20HS-3M	0.655	41.19	4.88	4.77	12.40	12.01	21.28	19.68	0.00	0.00
	8-2				4.48		10.36		17.44		0.00	
	8-3				4.96		13.28		20.32		0.00	
9	9-1	MC-20HM-3M	0.650	39.76	3.68	3.67	12.36	11.84	19.32	19.81	0.00	0.00
	9-2				3.68		10.76		19.04		0.00	
	9-3				3.64		12.40		21.08		0.00	

ตารางที่ ก1 ค่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้า ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก(ต่อ)

ลำดับ		สัดส่วน	ความต้องการน้ำ (%)	ความชื้นในเถ้าลอย (%)	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
					กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย (Mpa)	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย (Mpa)	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย (Mpa)	strength (N/mm^2)	91
10	10-1	MC-20HS-25W-1W	0.635	25.8	8.16	8.41	21.04	20.23	28.84	26.22	27.24	32.20
	10-2				8.72		19.56		27.12		33.04	
	10-3				8.36		20.08		25.32		31.36	
11	11-1	MC-20HM-25W-1W	0.630	26.2	8.00	7.20	22.68	22.25	28.52	28.52	34.96	34.60
	11-2				6.56		22.60		27.16		37.68	
	11-3				7.84		21.48		24.84		34.24	
12	12-1	MC-20HS-45W-1W	0.640	45.8	5.88	5.65	19.80	19.69	25.20	25.52	29.76	31.38
	12-2				5.36		19.00		23.72		33.00	
	12-3				5.72		20.28		27.32		26.20	
13	13-1	MC-20HM-45W-1W	0.640	43.8	8.00	7.81	15.40	17.51	27.92	25.93	32.60	32.16
	13-2				7.00		19.24		23.20		31.72	
	13-3				8.44		17.88		26.68		30.88	
14	14-1	MC-20HS-65W-1W	0.635	56.3	7.84	7.91	23.04	22.01	27.20	25.79	36.72	32.40
	14-2				7.28		20.36		24.76		34.48	
	14-3				8.60		22.64		25.40		30.32	
15	15-1	MC-20HM-65W-1W	0.625	62.5	7.72	8.15	20.04	19.83	27.04	26.80	34.28	35.64
	15-2				8.44		19.52		24.72		39.96	
	15-3				8.28		19.92		28.64		32.68	
16	16-1	MC-20HS-25W-1M	0.640	24.02	6.56	6.75	20.52	17.80	24.84	24.96	32.36	32.36
	16-2				6.76		20.72		24.72		29.64	
	16-3				6.92		17.80		25.32		27.80	
17	17-1	MC-20HM-25W-1M	0.640	24	6.76	6.76	18.08	18.72	28.52	28.52	42.36	32.60
	17-2				6.00		18.80		30.92		38.88	
	17-3				6.76		19.28		32.84		32.60	
18	18-1	MC-20HS-45W-1M	0.645	47.7	5.24	5.24	16.00	15.68	17.44	24.32	32.24	32.24
	18-2				5.32		15.72		24.32		38.84	
	18-3				5.16		15.32		28.00		38.92	

ตารางที่ ก1 ค่ากำลังอัดประลัยของมอร์ต้า ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก(ต่อ)

ลำดับ		สัดส่วน	ความต้องการน้ำ (%)	ความชื้นในเถ้าลอย (%)	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
					กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย (Mpa)	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย (Mpa)	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย (Mpa)	strength (N/mm^2)	91
19	19-1	MC-20HM-45W-1M	0.650	41.63	6.16	6.03	16.32	16.32	24.16	24.16	31.36	33.27
	19-2				6.20		19.04		19.16		33.52	
	19-3				5.72		22.60		17.72		34.92	
20	20-1	MC-20HS-65W-1M	0.630	62.37	9.52	8.75	18.60	18.91	24.04	24.62	32.96	32.96
	20-2				8.68		18.84		25.20		32.84	
	20-3				8.04		19.28		23.00		35.48	
21	21-1	MC-20HM-65W-1M	0.635	62.24	6.36	6.85	20.16	18.84	25.48	25.48	33.96	34.16
	21-2				6.76		18.40		17.24		33.12	
	21-3				7.44		17.96		23.64		35.40	
22	22-1	MC-20HS-25W-3M	0.645	24.52	3.16	3.04	15.64	16.12	25.72	23.97	30.20	31.89
	22-2				3.04		12.92		23.76		29.72	
	22-3				2.92		16.60		22.44		35.76	
23	23-1	MC-20HM-25W-3M	0.645	24.39	2.28	2.23	12.16	12.29	24.92	26.05	34.32	32.16
	23-2				2.16		12.44		26.80		20.80	
	23-3				2.24		12.28		26.44		30.00	
24	24-1	MC-20HS-45W-3M	0.650	45	2.24	2.13	12.72	12.11	23.84	23.28	30.20	30.76
	24-2				1.96		12.24		24.28		30.24	
	24-3				2.20		11.36		21.72		31.84	
25	25-1	MC-20HM-45W-3M	0.650	45	1.80	1.76	10.60	11.44	28.88	23.20	28.32	31.41
	25-2				1.76		11.92		23.20		33.04	
	25-3				1.72		11.80		29.72		32.88	
26	26-1	MC-20HS-65W-3M	0.630	65	3.20	3.19	14.64	14.23	26.20	24.59	35.12	31.59
	26-2				3.08		13.28		22.24		30.16	
	26-3				3.28		14.76		25.32		29.48	
27	27-1	MC-20HM-65W-3M	0.640	65	1.88	1.97	14.60	13.30	26.16	23.47	32.96	33.08
	27-2				2.00		12.36		22.24		33.20	
	27-3				2.04		14.24		22.00		27.80	

ตารางที่ ก2 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.40

ลำดับ		สัดส่วน	w/b	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
				กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย
1	1-1	CC	0.40	33.9	33.88	49.42	46.70	52.46	54.79	61.45	61.01
	1-2			33.6		44.88		57.44		60.56	
	1-3			34.13		45.79		54.46		51.96	
2	2-1	CC-30HS-0.40	0.40	16.55	16.07	35.06	31.66	40.44	43.06	49.04	54.45
	2-2			15.89		34.89		45.67		53.93	
	2-3			15.76		31.66		48.76		54.97	
3	3-1	CC-50HS-0.40	0.40	7.6	8.02	22.01	22.33	37.26	37.24	49.71	50.31
	3-2			7.67		22.78		37.23		48.65	
	3-3			8.8		22.19		37.24		50.9	
4	4-1	CC-30HM-0.40	0.40	13.8	15.35	32.11	34.11	49.48	48.88	58.77	59.04
	4-2			11.71		35.24		48.37		60.51	
	4-3			15.35		34.99		48.78		57.84	
5	5-1	CC-50HM-0.40	0.40	12.36	12.36	23.13	23.72	37.23	36.92	45.04	43.55
	5-2			13.35		24.58		36.85		42.91	
	5-3			13.29		23.44		36.68		42.71	
6	6-1	CC-30HS-25W-1W-0.40	0.40	23.78	23.70	32.02	33.86	44.31	44.73	58.3	55.40
	6-2			24.03		35.12		47.81		53.96	
	6-3			23.61		34.45		45.14		53.95	
7	7-1	CC-50HS-25W-1W-0.40	0.40	12.45	12.33	22.13	22.13	37.31	37.38	52.54	51.93
	7-2			12.13		22.74		37.45		51.31	
	7-3			12.4		21.53		34.99		55.2	
8	8-1	CC-30HM-25W-1W-0.40	0.40	22.62	21.72	37.13	37.25	51.39	51.38	62.9	60.05
	8-2			21.23		37.11		51.7		58.89	
	8-3			21.3		37.52		51.04		58.36	

ตารางที่ ก2 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.40 (ต่อ)

ลำดับ		สัดส่วน	w/b	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
				กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย
9	9-1	CC-50HM-25W-1W-0.40	0.40	7.33	12.87	24.51	23.82	36	37.08	47.49	47.39
	9-2			7.39		23.71		37.46		47.43	
	9-3			12.87		23.25		37.78		47.26	
10	10-1	CC-30HS-45W-1W-0.40	0.40	22.82	23.59	35.36	35.62	44.77	45.60	56.77	56.16
	10-2			22.04		36.05		45.34		52.06	
	10-3			23.59		35.44		46.69		55.55	
11	11-1	CC-50HS-45W-1W-0.40	0.40	13.41	13.78	23.46	24.51	36.76	38.03	52.04	52.86
	11-2			13.87		25.02		38.62		53.67	
	11-3			14.07		25.04		38.7		54.41	
12	12-1	CC-30HM-45W-1W-0.40	0.40	25.71	25.93	39.19	39.19	51.85	51.79	66.94	64.11
	12-2			27.26		42.4		52.42		62.03	
	12-3			26.15		41.52		51.09		63.37	
13	13-1	CC-50HM-45W-1W-0.40	0.40	9.94	12.94	24.33	24.67	36.29	39.83	55.04	49.00
	13-2			10.93		24.85		39.89		51.11	
	13-3			12.94		24.82		39.77		46.89	
14	14-1	CC-30HS-65W-1W-0.40	0.40	21.42	21.51	37.09	34.20	42.87	44.17	52.78	55.51
	14-2			21.58		37.61		45.47		55.51	
	14-3			21.52		34.2		48.09		52.02	
15	15-1	CC-30HM-65W-1W-0.40	0.40	24.83	24.57	33.28	38.34	55.69	53.54	63.12	62.78
	15-2			24.89		37.05		47.88		63.58	
	15-3			24.00		39.62		51.39		61.65	
16	16-1	CC-50HM-65W-1W-0.40	0.40	12.92	12.97	24.29	24.50	38.29	38.62	47.87	46.80
	16-2			12.99		24.44		38.62		45.73	
	16-3			12.99		24.77		38.96		52.98	

ตารางที่ ก2 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.40 (ต่อ)

ลำดับ		สัดส่วน	w/b	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
				กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย
17	17-1	CC-30HS-25W-1M-0.40	0.40	24.77	24.87	35.59	35.36	45.79	45.78	57.93	57.88
	17-2			25.08		35.11		45.84		58.12	
	17-3			24.77		35.38		45.72		57.6	
18	18-1	CC-50HS-25W-1M-0.40	0.40	15.01	14.86	28.75	28.64	42.25	41.94	52.57	53.03
	18-2			14.95		28.53		41.62		53.21	
	18-3			14.61		27.16		41.95		53.32	
19	19-1	CC-30HM-25W-1M-0.40	0.40	27.57	26.24	41.59	41.03	52.49	53.17	58.94	58.53
	19-2			25.38		40.11		53.84		58.12	
	19-3			25.77		41.38		50.72		61.6	
20	20-1	CC-50HM-25W-1M-0.40	0.40	15.29	15.23	27.79	28.36	46.25	43.58	51.57	51.37
	20-2			15.2		28.12		42.13		52.21	
	20-3			15.21		29.16		42.36		50.32	
21	21-1	CC-30HS-45W-1M-0.40	0.40	25.71	25.80	34.51	34.98	45.94	45.60	57.01	58.25
	21-2			25.98		35.11		45.13		59.12	
	21-3			25.7		35.33		45.72		58.62	
22	22-1	CC-50HS-45W-1M-0.40	0.40	16.02	16.51	28.57	28.81	42.21	42.60	52.72	53.03
	22-2			16.92		29.11		42.66		53.26	
	22-3			16.6		28.76		42.92		53.12	
23	23-1	CC-30HM-45W-1M-0.40	0.40	27.95	27.49	39.97	41.22	54.85	53.59	64.82	62.72
	23-2			26.93		41.08		52.74		51.63	
	23-3			27.6		41.35		53.19		60.618	
24	24-1	CC-50HM-45W-1M-0.40	0.40	17.39	17.83	29.82	29.56	43.6	44.51	52	51.99
	24-2			18.17		29.01		55.61		52.21	
	24-3			17.92		29.86		45.42		51.75	

ตารางที่ ก2 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.40 (ต่อ)

ลำดับ		สัดส่วน	w/b	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
				กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย
25	25-1	CC-30HS-65W-1M-0.40	0.40	25.01	25.17	34.31	34.49	45.23	45.19	58.31	58.80
	25-2			26.98		34.79		46.11		59.289	
	25-3			25.32		34.36		45.14		58.8	
26	26-1	CC-30HM-65W-1M-0.40	0.40	26.95	26.83	41.97	41.96	52.83	52.89	61.82	61.36
	26-2			26.93		42.38		52.74		61.63	
	26-3			26.6		41.53		53.11		60.618	
27	27-1	CC-30HS-25W-3M-0.40	0.40	28.61	28.52	35.97	35.71	44.55	46.29	57.03	57.25
	27-2			28.21		35.19		42.83		57.12	
	27-3			28.75		35.96		51.48		57.6	
28	28-1	CC-30HM-25W-3M-0.40	0.40	25.45	25.68	42.65	42.03	52.36	52.50	57.94	58.22
	28-2			25.9		42.62		52.46		58.12	
	28-3			25.82		40.83		52.69		58.6	
29	29-1	CC-50HM-25W-3M-0.40	0.40	15.51	15.36	29	28.29	42.81	42.25	51.07	50.53
	29-2			15.21		27.57		41.69		50.21	
	29-3			0		0		0		50.32	
30	30-1	CC-30HM-45W-3M-0.40	0.40	25.71	26.38	42.62	42.52	53.03	52.99	62.82	61.69
	30-2			27.56		42.41		52.95		61.63	
	30-3			27.05		0		0		60.618	
31	31-1	CC-30HM-65W-3M-0.40	0.40	26.6	25.79	42.66	42.42	48.43	47.76	60.82	60.69
	31-2			25		42.99		47.68		60.63	
	31-3			25.77		42.18		47.18		60.618	

ตารางที่ ก3 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.55

ลำดับ		สัดส่วน	w/b	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
				กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย
1	1-1	CC-0.55	0.55	16.44	16.54	27.11	28.48	35.79	36.26	41.33	42.68
	1-2			15.94		29.73		36.73		41.8	
	1-3			17.25		28.6		36.27		44.91	
2	2-1	CC-30HS-0.55	0.55	9.82	9.85	20.25	20.48	29.78	29.53	35.06	35.37
	2-2			8.55		20.8		29.14		31.19	
	2-3			9.88		20.38		29.67		35.68	
3	3-1	CC-50HS-0.55	0.55	5.8	6.02	13.77	12.30	18.55	20.13	29.56	28.48
	3-2			6.01		12.53		20.13		27.98	
	3-3			6.26		12.07		19.74		27.89	
4	4-1	CC-30HM-0.55	0.55	9.15	9.36	17.84	17.84	29.01	29.44	39.51	34.38
	4-2			9.57		18.09		29.47		30.2	
	4-3			10.07		17.58		29.83		33.43	
5	5-1	CC-50HM-0.55	0.55	4.61	4.65	13.67	13.09	18.95	19.48	31.97	31.06
	5-2			4.54		13.12		19.54		29.08	
	5-3			4.81		12.48		19.94		32.13	
6	6-1	CC-30HS-25W-1W-0.55	0.55	12.68	12.34	24.05	24.13	30.88	32.11	43.47	37.12
	6-2			11.72		24.13		31.21		37.12	
	6-3			12.63		24.21		34.23		43.4	
7	7-1	CC-30HM-25W-1W-0.55	0.55	11.92	12.06	20.98	20.93	30.24	30.25	35.91	36.87
	7-2			12.3		20.88		30.25		38.46	
	7-3			11.96		20.94		29.6		36.24	
8	8-1	CC-50HM-25W-1W-0.55	0.55	7.65	7.79	14.37	14.20	21.73	21.94	31.59	31.43
	8-2			8.14		14.02		21.5		31.15	
	8-3			7.58		13.39		22.59		31.55	

ตารางที่ ก3 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.55 (ต่อ)

ลำดับ		สัดส่วน	w/b	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
				กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย
9	9-1	CC-30HS-45W-1W-0.55	0.55	13.45	13.74	24.98	24.83	34.64	34.69	38.47	38.83
	9-2			13.85		24.83		36.86		38.29	
	9-3			13.93		24.67		34.74		39.72	
10	10-1	CC-30HM-45W-1W-0.55	0.55	14.5	13.53	21.67	22.40	32.51	32.40	33.09	37.20
	10-2			13		22.3		33.13		38.38	
	10-3			13.1		23.23		32.29		36.01	
11	11-1	CC-50HM-45W-1W-0.55	0.55	8.66	9.23	15.25	15.27	22.63	23.89	28.5	31.95
	11-2			9.27		15.31		24.63		31.95	
	11-3			9.75		15.24		24.42		29.19	
12	12-1	CC-30HS-65W-1W-0.55	0.55	12.13	11.85	24.16	23.83	32.84	33.36	37.75	37.83
	12-2			11.74		24.15		34.45		37.63	
	12-3			11.67		23.17		32.78		38.11	
13	13-1	CC-30HM-65W-1W-0.55	0.55	12.77	12.66	23.22	23.35	31.29	31.34	37.15	37.43
	13-2			12.63		23.37		31.39		37.7	
	13-3			12.59		23.47		33.08		40.32	
14	14-1	CC-50HM-65W-1W-0.55	0.55	8.95	8.98	15.81	15.75	25.16	24.51	32.4	34.09
	14-2			8.93		16.1		24.14		34.25	
	14-3			9.07		15.34		24.24		35.61	
15	15-1	CC-30HS-25W-1M-0.55	0.55	10.95	11.28	23.64	23.52	32.34	31.95	37.89	39.30
	15-2			12.06		23.39		32		40.64	
	15-3			10.84		25.16		31.51		39.38	
16	16-1	CC-30HM-25W-1M-0.55	0.55	11.95	11.92	21.66	21.66	31.34	32.76	39.88	41.33
	16-2			12.02		23.2		32		42.78	
	16-3			11.8		23.36		33.51		41.45	

ตารางที่ ก3 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ล้วน ผสมเถ้าลอยแห้ง และเถ้าลอยเปียก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน0.55 (ต่อ)

ลำดับ		สัดส่วน	w/b	1 วัน		7 วัน		28 วัน		91 วัน	
				กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย	กำลังอัดประลัย (Mpa)	เฉลี่ย
17	17-1	CC-50HM-25W-1M-0.55	0.55	7	7.06	15.28	14.21	24.84	24.67	32.37	32.40
	17-2			7.03		13.46		24.56		32.83	
	17-3			7.14		13.89		24.6		31.99	
18	18-1	CC-30HS-45W-1M-0.55	0.55	12.59	13.35	25.25	26.04	35.47	34.29	39.63	39.55
	18-2			13.66		27.31		35.77		39.09	
	18-3			13.81		25.55		31.64		39.94	
19	19-1	CC-30HM-45W-1M-0.55	0.55	14.21	14.82	22.25	23.08	34.41	34.64	38.37	38.65
	19-2			14.96		23.35		33.87		38.99	
	19-3			15.28		23.65		34.64		38.6	
20	20-1	CC-50HM-45W-1M-0.55	0.55	8.34	8.38	17.68	17.65	24.89	24.84	34	34.24
	20-2			8.39		17.67		24.14		33.55	
	20-3			8.41		17.6		25.49		35.16	
21	21-1	CC-30HS-65W-1M-0.55	0.55	12.95	13.11	25.17	25.57	34.44	34.99	42.14	42.33
	21-2			13.21		25.9		36.02		46.46	
	21-3			13.18		25.63		34.52		42.52	
22	22-1	CC-30HM-65W-1M-0.55	0.55	13.24	13.38	25.67	25.45	35.43	35.23	40.36	40.68
	22-2			13.69		25.31		35.02		40.91	
	22-3			13.21		25.36		34.51		40.76	
23	23-1	CC-50HM-65W-1M-0.55	0.55	7.31	7.57	15.28	15.46	24.89	25.17	32.26	32.31
	23-2			7.39		15.64		25.14		32.51	
	23-3			8.01		13.81		25.49		32.16	

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก

ตารางที่ ข 1 ค่าร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ลำดับ	ตัวอย่างมอร์ต้า	อายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต(วัน)									
		0	30	61	91	121	150	180	210	240	270
1	MC	0.000	0.0167	0.0268	0.0605	0.0805	0.1519	0.2088	0.3239	0.4314	0.5033
2	MC-30HM	0.000	0.014	0.0171	0.0193	0.023	0.0264	0.0276	0.0289	0.0292	0.0306
3	MC-50HM	0.000	0.0095	0.0167	0.0172	0.0218	0.0232	0.0249	0.027	0.0272	0.0272
4	MC-30HM-25W-1W	0.000	0.007	0.0112	0.0133	0.0151	0.0182	0.0204	0.0218	0.0232	0.026
5	MC-50HM-25W-1W	0.000	0.000	0.0018	0.0075	0.0154	0.0242	0.0273	0.0299	0.0316	0.0312
6	MC-30HM-45W-1W	0.000	4E-04	0.0028	0.0126	0.0168	0.0182	0.0207	0.0242	0.0295	0.0319
7	MC-50HM-45W-1W	0.000	0.0063	0.0084	0.0116	0.0151	0.0232	0.0256	0.0288	0.0298	0.0333
8	MC-30HM-65W-1W	0.000	0.0035	0.0129	0.0179	0.0206	0.0218	0.0242	0.0251	0.0273	0.0273
9	MC-50HM-65W-1W	0.000	0.0118	0.0126	0.02	0.0211	0.023	0.0244	0.0284	0.0307	0.0307
10	MC-30HM-25W-1M	0.000	0.0082	0.0102	0.0132	0.0133	0.0158	0.0219	0.0263	0.0314	0.0372
11	MC-50HM-25W-1M	0.000	0.000	0.0087	0.0084	0.0096	0.0126	0.0139	0.0179	0.0235	0.0274
12	MC-30HM-45W-1M	0.000	0.0018	0.0026	0.0039	0.0048	0.0102	0.0175	0.0219	0.0251	0.0283
13	MC-50HM-45W-1M	0.000	0.0005	0.0074	0.0098	0.014	0.0186	0.0239	0.026	0.0274	0.0281
14	MC-30HM-65W-1M	0.000	0.0046	0.0053	0.0074	0.0109	0.0137	0.0168	0.0193	0.0204	0.0263
15	MC-50HM-65W-1M	0.000	0.0021	0.0088	0.014	0.0179	0.0196	0.0225	0.0228	0.0239	0.0246
16	MC-30HM-25W-3M	0.000	3E-17	0.0016	0.0042	0.0062	0.0101	0.0163	0.0204	0.0295	0.0323

ตารางที่ ข 1 ค่าร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ต่อ)

ลำดับ	ตัวอย่างมอร์ต้า	อายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต(วัน)									
		0	30	61	91	121	150	180	210	240	270
17	MC-50HM-25W-3M	0.000	0.0009	0.0058	0.0106	0.0113	0.014	0.016	0.0228	0.0236	0.027
18	MC-30HM-45W-3M	0.000	-0.001	0.0022	0.0053	0.0056	0.0091	0.0158	0.0208	0.0289	0.0304
19	MC-50HM-45W-3M	0.000	-0.002	0.0005	0.0023	0.0029	0.0057	0.01	0.0112	0.0164	0.0191
20	MC-30HM-65W-3M	0.000	0.0009	0.0033	0.008	0.011	0.015	0.0198	0.0225	0.0262	0.0298
21	MC-50HM-65W-3M	0.000	-2E-04	0.0039	0.0063	0.0101	0.0145	0.0198	0.0242	0.0244	0.0274

ตารางที่ ข 2 ค่าร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ลำดับ	ตัวอย่างมอร์ต้า	อายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต(วัน)									
		0	30	61	91	121	150	180	210	240	270
1	MC	0.000	0.022	0.036	0.065	0.146	0.209	0.209	0.209	0.477	0.486
2	MC-30HM	0.000	0.009	0.021	0.024	0.030	0.031	0.032	0.036	0.038	0.038
3	MC-50HM	0.000	0.018	0.023	0.025	0.028	0.028	0.029	0.031	0.033	0.035
4	MC-30HM-25W-1W	0.000	0.004	0.007	0.010	0.011	0.015	0.019	0.022	0.025	0.027
5	MC-50HM-25W-1W	0.000	0.000	0.009	0.014	0.015	0.018	0.019	0.023	0.025	0.026
6	MC-30HM-45W-1W	0.000	0.000	0.006	0.011	0.021	0.023	0.025	0.026	0.027	0.029
7	MC-50HM-45W-1W	0.000	-0.002	0.008	0.009	0.016	0.016	0.019	0.021	0.022	0.027
8	MC-30HM-65W-1W	0.000	0.000	0.009	0.012	0.015	0.016	0.021	0.020	0.022	0.024
9	MC-50HM-65W-1W	0.000	-0.001	0.002	0.004	0.006	0.010	0.014	0.019	0.021	0.024
10	MC-30HM-25W-1M	0.000	-0.004	-0.001	0.004	0.008	0.015	0.021	0.022	0.025	0.026

ตารางที่ ข 2 ค่าร้อยละการขยายตัวของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

ลำดับ	ตัวอย่างมอร์ต้า	อายุในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต(วัน)									
		0	30	61	91	121	150	180	210	240	270
11	MC-50HM-25W-1M	0.000	0.001	0.002	0.003	0.006	0.009	0.011	0.015	0.017	0.021
12	MC-30HM-45W-1M	0.000	-0.002	0.000	0.008	0.011	0.017	0.019	0.021	0.025	0.026
13	MC-50HM-45W-1M	0.000	-0.002	0.002	0.006	0.009	0.010	0.018	0.019	0.021	0.024
14	MC-30HM-65W-1M	0.000	0.000	0.003	0.012	0.017	0.020	0.022	0.023	0.026	0.028
15	MC-50HM-65W-1M	0.000	-0.006	0.001	0.002	0.003	0.004	0.010	0.014	0.017	0.021
16	MC-30HM-25W-3M	0.000	-0.002	-0.004	-0.001	0.002	0.005	0.007	0.014	0.015	0.022
17	MC-50HM-25W-3M	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.005	0.007	0.009	0.012
18	MC-30HM-45W-3M	0.000	0.001	0.000	0.010	0.013	0.016	0.019	0.022	0.026	0.029
19	MC-50HM-45W-3M	0.000	-0.002	0.003	0.004	0.006	0.008	0.009	0.012	0.013	0.026
20	MC-30HM-65W-3M	0.000	-0.001	0.004	0.006	0.008	0.010	0.018	0.018	0.022	0.025
21	MC-50HM-65W-3M	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.004	0.006	0.012	0.019	0.022

ตารางที่ ข 3 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกร้อยละ 30 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตัวอย่างมอร์ตาร์	ค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ 270 วัน (กรัม)
MC	-4.79
MC-30HM-0.55	-5.00
MC-30HM-25W-1W-0.55	-4.79
MC-30HM-45W-1W-0.55	-4.97
MC-30HM-65W-1W-0.55	-4.91
MC-30HM-25W-1M-0.55	-3.72
MC-30HM-45W-1M-0.55	-4.42
MC-30HM-65W-1M-0.55	-4.30
MC-30HM-25W-3M-0.55	-3.87
MC-30HM-45W-3M-0.55	-3.89

ตารางที่ ข 4 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกร้อยละ 50 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตัวอย่างมอร์ตาร์	ค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ 270 วัน (กรัม)
MC	-4.79
MC-50HM-0.55	-7.84
MC-50HM-25W-1W-0.55	-7.83
MC-50HM-45W-1W-0.55	-7.79
MC-50HM-65W-1W-0.55	-7.80
MC-50HM-25W-1M-0.55	-7.68
MC-50HM-45W-1M-0.55	-7.22
MC-50HM-65W-1M-0.55	-7.60
MC-50HM-25W-3M-0.55	-7.17
MC-50HM-45W-3M-0.55	-7.58

ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุม
วิชาการคอนกรีตประจำปี
ครั้งที่ 10th ANNUAL
CONCRETE
CONFERENCE
คณะวิศวกรรมศาสตร์
FACULTY OF ENGINEERING
20-22 ตุลาคม 2557
ณ โรงแรมดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท
อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย
TCA
สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
Thailand Concrete Association
SIRDC
จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทความวิจัย สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง (MAT)(ต่อ)		หน้า
MAT-47	การศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีการบ่มแรงดันไอน้ำต่ำที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับการบ่มแบบปกติ	MAT-253
MAT-48	Internal curing with lightweight aggregate produced from biomass-derived waste	MAT-264
MAT-49	แบบจำลองการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบด	MAT-278
MAT-50	กำลังและความสามารถในการเสียรูปของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ภายใต้แรงดัดและแรงกระแทก	MAT-290
MAT-51	พฤติกรรมของกลไกภายในระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบลึนและชั้นดินเหนียวอ่อน	MAT-305
MAT-52	คุณสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยเหล็ก	MAT-305
MAT-53	การศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมจริงในจังหวัดนครปฐม	MAT-313
MAT-54	การพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกจากเศษหินภูเขาไฟ	MAT-320
MAT-55	การพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกประสานจากเศษหินภูเขาไฟ	MAT-327
MAT-56	การพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นจากเศษหินภูเขาไฟ	MAT-334
MAT-57	การใช้เศษหินภูเขาไฟสำหรับพัฒนาเป็นมวลรวมในคอนกรีต	MAT-341
MAT-58	ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก	MAT-347
MAT-59	ผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปูนภายในต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต	MAT-355
MAT-60	ผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระสูงต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์และการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย	MAT-363
MAT-61	การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง	MAT-371
MAT-62	คุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของคอนกรีตผสมมวลรวมเบาฝังตัวด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ	MAT-379
MAT-63	กำลังอัดของคอนกรีตกาอโด้แบบหล่อแบบอัดความดัน	MAT-384
MAT-64	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุกันน้ำระหว่างยางโพลีไวนิลคลอไรด์และยางบิวไทล์ในรอยต่อก่อสร้าง	MAT-389
MAT-65	ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อความต้านทานคาร์บอเนชั่นและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	MAT-395

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 10

ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเติมสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
ดร.เฉลิมชัย	วาณิชย์ล้ำเลิศ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.ปานเทพ	จุลนิพิฐวงษ์	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.วรางคณา	แสงสร้อย	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
น.อ.รศ.ดร.ธนากร	พีระพันธุ์	โรงเรียนนายเรืออากาศ
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ณัฐวัฒน์	จุฑารัตน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.วิรัช	เลิศไพฑูรย์พันธ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รศ.ว่าที่ พ.ต.อิทธิพร	ศิริสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.ธัชวีร์	ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.รัฐภูมิ	ปริชาตปรีชา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สรัณกร	เหมะวิบูลย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.นัฐวุฒิ	ทิพย์โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รศ.จรูญ	เจริญเนตรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.สนธยา	ทองอรุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา(ตาก)
ผศ.ดร.อุดมวิทย์	ไชยสกุลเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.จตุพล	ตั้งประกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ปิติศานต์	กร้ามาดร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐพงศ์	มกระธัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.กิตติภูมิ	รอดสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ปิติ	สุคนธสุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.วีรชาติ	ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิวรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.ชัย	จาตุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุรฉัตร	ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.วันชัย	สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 10(ต่อ)

ดร.นันทวัฒน์	ขมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.วัจน์วงค์	กรีพละ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุวิมล	สัจจวาณิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
คุณอนุชิต	เจริญศุภกุล	บริษัท วิสิทธิ์ เอ็นจิเนียริ่ง คอนซัลแตนส์ จำกัด
ผศ.ดร.วิทิต	ปานสุข	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก

Slump and Compressive Strength of Concrete made with Wet Fly ash

เอกราช จำนงค์รัตน์ (Aggarat Jamnongrut) [1]
ปิติศานต์ กรำมาตร (Pitisan Krammart) [2]
วรางคณา แสงสร้อย (Warangkana Saengsoy) [3]
สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (Somnuk Tangtermsirikul) [4]

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (bin_civil_15@hotmail.com)
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3]อาจารย์ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธรมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[4]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ผลกระทบของความชื้นในเถ้าลอย เปียกและผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก โดยแทนที่เถ้าลอยเปียกในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยความชื้นในเถ้าลอยเปียกเท่ากับร้อยละ 25, 45 และ 65 โดยน้ำหนัก ส่วนระยะเวลาสัมผัสความชื้นใช้เวลาที่ 1 สัปดาห์, 1 เดือน และ 3 เดือน พบว่ากรณีการผสม 2 ครั้งทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง ส่วนระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกไม่มีผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียก นอกจากนี้กระบวนการผสม 2 ครั้ง ทำให้มวลรวมมีการยึดเกาะเพิ่ม ขึ้นส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่มีความชื้นร้อยละ 25, 45 และ 65 มีค่าไม่แตกต่างกัน สุดท้ายพบว่าระยะเวลาสัมผัสความชื้นในเถ้าลอยเปียกไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

Abstract: This study is aimed to investigate feasibility of using wet fly ash as a cement replacing material in concrete. Effect of moisture content and exposure period of wet fly ash on properties of concrete are considered. Chemical properties of wet fly ash are studied. Slump and compressive strength of concrete made with wet fly ash are investigated and compared with those made with dry fly ash. Wet fly ashes prepared in laboratory are used in the investigation. Moisture contents of the wet fly ashes are 25%, 45%, and 65%. The wet exposure periods of fly ash are 1 week, 1 month and 3 months. The test results revealed that slump of concrete with wet fly ash are likely higher than concrete with dry fly ash explained by the concept of double mixing method. The concept of double mixing method causing the compressive strength of concrete with wet fly ash is higher than the concrete with dry fly ash. The compressive strength of concrete with fly ash, moisture contents of the wet fly ashes of 25%, 45%, and 65% were not significantly different. Finally, exposure period of wet fly ash has no effect on compressive strength of the concrete.

Keywords: *Wet fly ash; Moisture content; Slump; Compressive strength; Double mixing method*

MAT-347

1. บทนำ

เถ้าลอย (Fly Ash) คือผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งที่ได้จากการเผาถ่านหินประเทศไทยจะมีปริมาณเถ้าลอยประมาณ 3 ล้านตันต่อปี [1] ที่ผ่านมาเถ้าลอยส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตโดยการนำเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเหตุผล 2 ประการ คือประการแรกพบว่าเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็กซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีต เถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น [2] อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าลอยที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตมีเพียงบางส่วนของปริมาณเถ้าลอย ทำให้ปริมาณเถ้าลอยมีมากเกินกว่าความต้องการ ช่วงที่ผ่านมาเถ้าลอยที่เหลือจากการนำไปใช้จะถูกทิ้งและไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพ โดยเถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้จะนำไปทิ้งใกล้บริเวณโรงไฟฟ้า โดยอาจสัมผัสกับความชื้นของสภาพแวดล้อมและน้ำฝน บางครั้งจะต้องมีการใส่น้ำเข้าไปก่อนที่จะนำไปทิ้งเพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจาย จึงทำให้เถ้าลอยที่ไม่มีการนำมาใช้อยู่ในรูปแบบเถ้าลอยเปียกและไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ต้องการพื้นที่เก็บเถ้าลอยเปียกขนาดใหญ่ เพื่อเป็นการจัดการเถ้าลอยเปียกอย่างถูกต้อง การใช้เถ้าลอยเปียกแทนที่วัสดุปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตดูเหมือนว่าจะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ [3,4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ เพราะว่าเถ้าลอยที่มี CaO สูงบางส่วนจะมีคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์เมื่อสัมผัสกับน้ำจะทำให้เกิดการแข็งตัว เมื่อนำมาใช้จะต้องอบให้แห้งและบดให้ละเอียดทำให้การผสมทำได้ยาก [5] และไม่คุ้มค่ากับการนำมาใช้ เพราะฉะนั้นความเป็นไปได้สำหรับการใช้เถ้าลอยเปียกในคอนกรีตคือเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ

จากปัญหาดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำเถ้าลอยเปียกกลับมาใช้ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความชื้นและระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง เพื่อเป็นแนวทางในการนำเถ้าลอยเปียกไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตอย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

2. ระเบียบวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย 2 ชนิด (จากโรงไฟฟ้า BLCP จ.ระยอง) คือ FA-HM (เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินที่ผสมระหว่าง Hunter Valley และ Melawan) และFA-HS (เถ้าลอยที่ได้จากถ่านหินที่ผสมระหว่าง Hunter Valley และ Spring Creek) โดยเถ้าลอยอยู่ในสภาพแห้งและสภาพเปียก ส่วนมวลรวมใช้ทรายแม่น้ำ และหินปูน

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

ก) การเตรียมเถ้าลอย

สำหรับการเตรียมเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดให้อยู่ในสภาพเปียกนั้น โดยการใส่น้ำในเถ้าลอยแห้งแล้วให้เถ้าลอยเปียกมีความชื้นในเถ้าลอยแตกต่างกัน 3 ความชื้น คือร้อยละ 25 , 45 และ 65 ของน้ำหนักเถ้าลอย จากนั้นนำเถ้าลอยเปียกเก็บไว้ในระยะเวลาที่แตกต่างกัน คือ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาซึ่งทดสอบโดย X-ray fluorescent analysis (XRF) ตามมาตรฐาน ASTM C311 [6] แสดงดังตารางที่ 1

ข) สัดส่วนผสมคอนกรีต

สำหรับสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในครั้งนี้ได้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) โดยใช้สัดส่วนเท่ากับ 0.40 และ 0.55 สัดส่วนผสมคอนกรีตจำนวน 34 สัดส่วนผสม วัสดุประสานประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อใช้วัสดุประสานร่วม 2 ชนิด คือ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้ง (ทั้ง 2 ชนิด) ร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนักและแทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียก (ทั้ง 2 ชนิด) ที่มีความชื้นร้อยละ 25, 45 และ 65 ของน้ำหนักเถ้าลอย ที่ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน โดยรายละเอียดของสัดส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียกที่ใช้ในการศึกษา

	OPC	FA-HM	FA-HM-25	FA-HM-45	FA-HM-65	FA-HS	FA-HS-25	FA-HS-45	FA-HS-65
SiO_2	18.93	61.09	61.39	61.26	61.3	63.53	63.26	63.84	62.89
Al_2O_3	5.51	20.35	19.99	20.11	20.06	20.81	21.14	20.26	20.75
Fe_2O_3	3.31	5.20	5.32	5.19	5.14	4.06	4.04	4.07	4.12
CaO	65.53	2.32	1.75	1.83	1.90	1.84	1.85	1.92	1.92
MgO	1.24	1.35	1.36	1.35	1.37	1.00	0.92	0.96	0.98
SO_3	2.88	0.28	0.28	0.21	0.25	0.15	0.21	0.20	0.17
Na_2O	0.15	0.79	1.16	1.33	1.03	0.95	0.87	1.13	1.15
K_2O	0.31	1.36	1.32	1.4	1.41	1.23	1.20	1.22	1.29
TiO_2	-	0.98	1.01	0.93	0.99	1.05	1.03	1.02	1.05
P_2O_5	-	0.23	0.30	0.32	0.30	0.29	0.40	0.31	0.35
SrO	-	0.09	0.08	0.08	0.08	0.12	0.12	0.11	0.12
ZrO_2	-	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08
$_{Free}CaO$	-	0.03	0.02	0.02	0.04	0.06	0.06	0.04	0.07
LOI	-	5.68	5.81	5.82	5.92	4.55	4.81	4.84	4.99

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.โดยน้ำหนัก (กก.)					
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยแห้ง	เถ้าลอยเปียก	ทราย	หิน	น้ำ
0.4C	450	0	0	754	1003	175
0.4CFA-IIM30	300	128	0	754	1003	169
0.4CFA-IIM30-1W25 0.4CFA-IIM30-1M25 0.4CFA-IIM30-3M25	300	0	160	754	1003	137

ตารางที่ 2 (ต่อ)

สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม.โดยน้ำหนัก (กก.)					
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยแห้ง	เถ้าลอยเปียก	ทราย	หิน	น้ำ
0.4CFA-IIM30-1W45 0.4CFA-IIM30-1M45 0.4CFA-IIM30-3M45	300	0	186	754	1003	111
0.4CFA-IIM30-1W65 0.4CFA-IIM30-1M65	300	0	211	754	1003	85
0.4CFA-IIM50	207	207	0	754	1003	163
0.4CFA-IIM50-1W25	207	0	258	754	1003	112
0.4CFA-IIM50-1W45	207	0	300	754	1003	70
0.4CFA-IIM50-1W65	207	0	342	754	1003	28
0.4CFA-IIS30	298	127	0	754	1003	168
0.4CFA-IIS30-1W25 0.4CFA-IIS30-1M25 0.4CFA-IIS30-3M25	298	0	160	754	1003	136
0.4CFA-IIS30-1W45 0.4CFA-IIS30-1M45 0.4CFA-IIS30-3M45	298	0	185	754	1003	110
0.4CFA-IIS30-1W65	298		210	754	1003	85
0.4CFA-IIS50	206	206	0	754	1003	162
0.4CFA-IIS50-1W25	206	0	259	754	1003	111
0.4CFA-IIS50-1W45	206	0	300	754	1003	69
0.55C	372	0	0	754	1003	205
0.55CFA-IIM30	250	107	0	754	1003	196
0.55CFA-IIM30-1W25	250	0	134	754	1003	169
0.55CFA-IIM30-1W45	250	0	155	754	1003	148
0.55CFA-IIM30-1W65	250	0	176	754	1003	127
0.55CFA-IIS30	249	107	0	754	1003	196
0.55CFA-IIS30-1W25	249	0	133	754	1003	169
0.55CFA-IIS30-1W45	249	0	155	754	1003	148
0.55CFA-IIS30-1W65	249	0	176	754	1003	126

หมายเหตุ

0.4C หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อัตรส w/b – 0.4

0.4CFA-HM30 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแห้งชนิด FA-HM ร้อยละ 30

0.4CFA-HM30-1W25 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกชนิด FA-HM ร้อยละ 30 ความชื้นในเถ้าลอยร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ระยะสัมผัสความชื้นที่ 1 สัปดาห์

0.4CFA-HM30-1M25 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกชนิด FA-HM ร้อยละ 30 ความชื้นในเถ้าลอยร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ระยะสัมผัสความชื้นที่ 1 เดือน

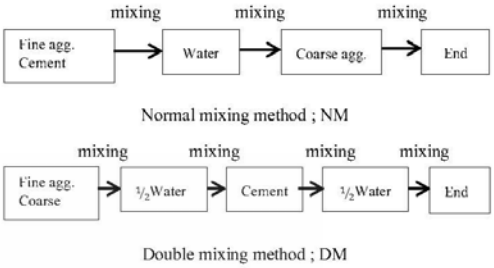
0.4CFA-HM30-3M25 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยเปียกชนิด FA-HM ร้อยละ 30 ความชื้นในเถ้าลอยร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ระยะสัมผัสความชื้นที่ 3 เดือน

ค) ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143 [7] โดยกำลังอัดประลัยของคอนกรีตใช้แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ซม.^{3} โดยหล่อ 3 ชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดประลัยประยุกต์ใช้มาตรฐานอังกฤษ BS 1881-116 [8] โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีส่วนผสมคล้ายกันจะมีค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตใกล้เคียงกัน แต่สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียก ความชื้นที่อยู่ในเถ้าลอยเปียกอาจจะส่งผลให้การยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่สอดคล้องกัน เนื่องจากกระบวนการผสม 2 ครั้ง (Double Mixing Method : DM) กล่าวคือความชื้นในเถ้าลอยเปียกจะเป็นเสมือนน้ำที่ผสมครั้งแรกของ DM

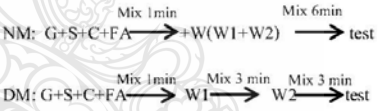
ง) กระบวนการผสม 2 ครั้ง

โดยทั่วไปการผสมคอนกรีตเป็นการผสมครั้งเดียว (Normal Mixing Method : NM) อย่างไรก็ตามได้มีงานวิจัยได้กล่าวถึงกระบวนการผสม 2 ครั้ง (Double Mixing Method : DM) ซึ่งมีรายละเอียดคือแบ่งการผสมน้ำออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยการผสมน้ำ 2 ขั้นตอนนั้นจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน [9] ส่วนขั้นตอนวิธีของ NM และ DM ได้แสดงดังภาพที่ 1 [10]



ภาพที่ 1 การผสมครั้งเดียว และ การผสม 2 ครั้ง [10]

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้มีการผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยโดยใช้วิธีผสมคอนกรีตแบบ NM และ DM กล่าวคืออัตราส่วนน้ำครั้งแรกที่ใช้จะแตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยรายละเอียดการผสมมีดังนี้ (ภาพที่ 2) ลำดับแรกเตรียมหิน(G) ทราย(S) ซีเมนต์(C) เถ้าลอย (FA) ตามลำดับ หลังจากนั้นผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาทีและเติมน้ำครั้งแรก(W1)จากนั้นผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาทีจึงเติมน้ำที่ 2 (W2) ผสมให้เข้ากันอีก 3 นาทีจึงทำการทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการผสมคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้ศึกษาโดยวิธีการผสมครั้งเดียว (NM) และการผสม 2 ครั้ง (DM)

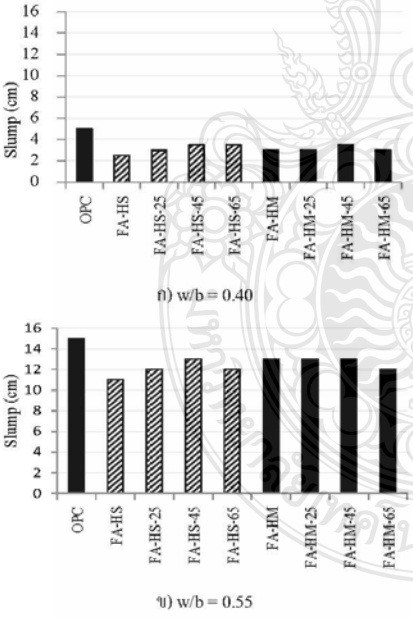
3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

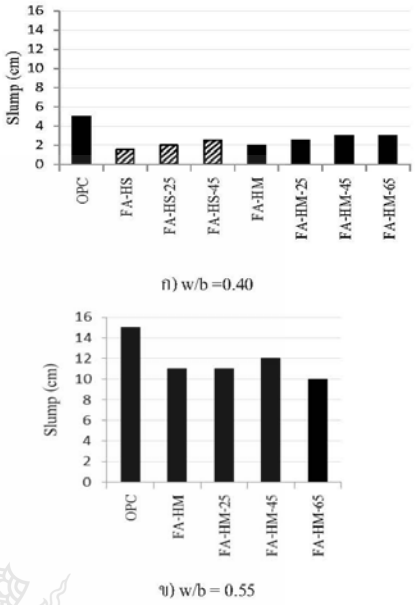
3.1.1 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อค่าการยุบตัว

ภาพที่ 3 และ 4 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 2 ชนิด (FA-HS และ FA-HM) ใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 พบว่า

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าการยุบตัวมากกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิดมีอนุภาคค่อนข้างเป็นเหลี่ยมและมีพื้นที่ผิวที่มากทำให้มีความต้องการน้ำมาก รวมทั้งการขัดกันของอนุภาคส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก (ระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์) พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มใกล้เคียงหรือสูงกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง (ทั้งที่น้ำในส่วนผสมของคอนกรีตเท่ากัน) ทั้งนี้อาจเป็นผลจาก DM กล่าวคือน้ำที่มีอยู่ในเถ้าลอยเปียกช่วยให้วัสดุประสานเคลือบผิวของมวลทำให้ผิวกลมขึ้นและลื่นขึ้นทำให้การลื่นไหลดีขึ้นนั้น ซึ่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกที่มีความชื้นร้อยละ 25 มีค่าการยุบตัวมากกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งแต่น้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกที่มีความชื้นร้อยละ 45



ภาพที่ 3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกร้อยละ 30 กับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

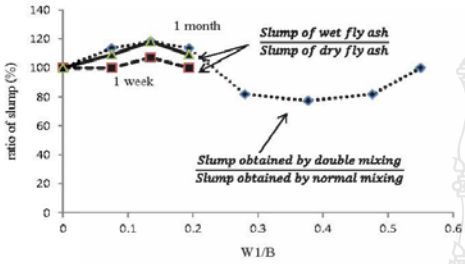


ภาพที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกร้อยละ 50 กับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3.1.2 ผลกระทบจากกระบวนการผสม 2 ครั้งต่อค่าการยุบตัว

เมื่อเปรียบเทียบอัตราค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมแบบ NM กับคอนกรีตผสมแบบ DM ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยแห้งชนิด FA-HM ซึ่งการผสมแบบ DM จะแบ่งน้ำที่ผสมคอนกรีตออกเป็น 2 ส่วน คือ W1 และ W2 พบว่าค่าการยุบตัวของการผสมแบบ DM จะสูงกว่าการผสมแบบ NM ในช่วงอัตราส่วนน้ำแรกต่อวัสดุประสาน (W1/B) ที่ต่ำ (ประมาณ 0.2) แต่เมื่อ W1/B มากขึ้นจะทำให้ค่าการยุบตัวของ DM มีค่าน้อยกว่าของ NM ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำที่เติมครั้งแรกจะทำให้วัสดุประสานจับตัวและเคลือบผิวของมวลรวมทำให้มวลมีพื้นที่ผิวกลมและเพิ่มการลื่นไหลได้ดี แต่เมื่อปริมาณน้ำครั้งแรก (W1) เพิ่มขึ้น กลับทำให้ค่าการยุบตัวมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ W1 ที่ทำให้วัสดุประสานจับตัวและเคลือบผิวมวลรวมมากเกินไป ทำให้น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตลดน้อยลง ส่วนเมื่อนำคอนกรีตผสม

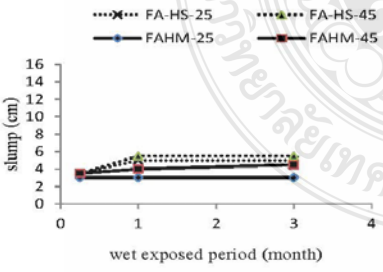
เถ้าลอยเปียกมาทดสอบค่าการยุบตัว พบว่าจะให้ผลในทิศทางเดียวกับกระบวนการผสม 2 ครั้ง (DM) ทั้งกรณีเถ้าลอยเปียกที่ 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน ส่งผลแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าการยุบตัว (Ratio of Slump) กับอัตราส่วนน้ำแรกต่อวัสดุประสาน (w1/b) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำทั้งหมด (W1+W2) ต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55

3.1.3 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อค่าการยุบตัว

ภาพที่ 6 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกทั้ง 2 ชนิดที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 ล้วน โดยในเถ้าลอยเปียกมีความชื้นร้อยละ 25 และ 45 จะเห็นได้ว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อระยะเวลาสัมผัสความชื้นที่ 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือนแสดงว่าผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นไม่มีผลต่อค่าการยุบตัว

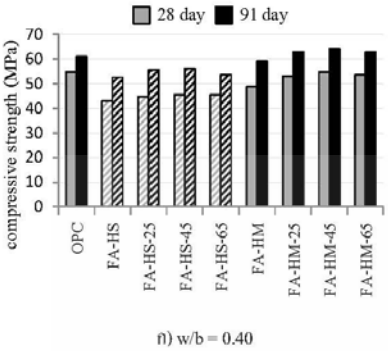


ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกกับระยะเวลาสัมผัสความชื้น

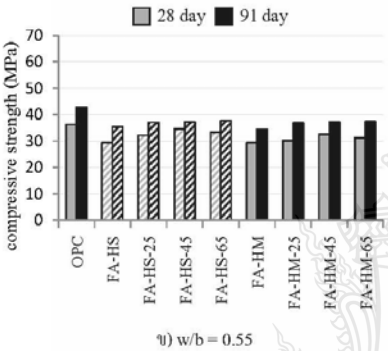
3.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

3.2.1 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียกต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย 2 ชนิด (FA-HS และ FA-HM) ใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 พบว่ากรณีกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน และ 91 วันของคอนกรีต (ภาพที่ 7 และ 8) พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด (FA-HS และ FA-HM) ทั้งกรณีเถ้าลอยแห้งและเถ้าลอยเปียก กล่าวคือคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยให้ค่ากำลังอัดประลัย (อายุ 28 วัน) น้อยกว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้นค่ากำลังอัดยิ่งลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดช้า อย่างไรก็ตามเมื่ออายุ 91 วัน จะเห็นได้ว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีการพัฒนาใกล้เคียงกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เพราะผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และเมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดประลัยระหว่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งกับผสมเถ้าลอยเปียก พบว่ากำลังอัดประลัยมีค่าใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามในช่วงอายุต้นค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มจะสูงกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะวัสดุประสานเข้าไปเคลือบผิวของมวลรวมก่อนทำให้บริเวณผิวของมวลรวมมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ และทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวม (transition zone) กำลังอัดประลัยบริเวณนี้สูงขึ้น การยึดเกาะระหว่างมวลรวมและวัสดุประสานจึงมีประสิทธิภาพมากขึ้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตจึงมีค่ามาก

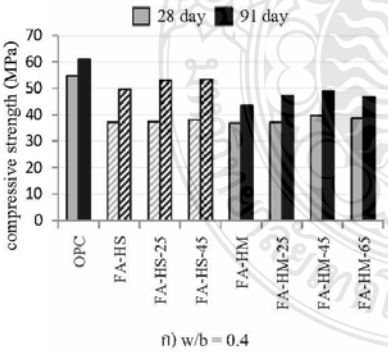


ก) w/b = 0.40

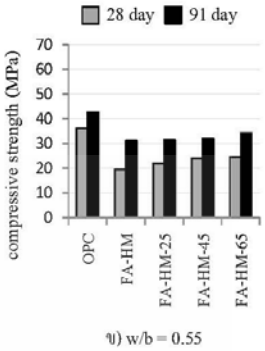


ข) w/b = 0.55

ภาพที่ 7 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกร้อยละ 30 กับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ก) w/b = 0.4

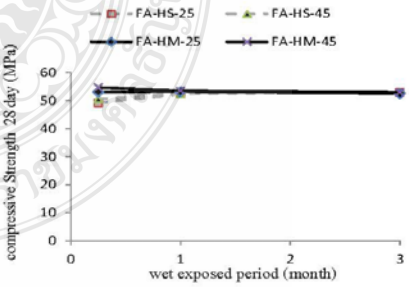


ข) w/b = 0.55

ภาพที่ 8 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกร้อยละ 50 กับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3.2.2 ผลกระทบของระยะเวลาสัมผัสความชื้นของเถ้าลอยเปียก

ภาพที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกทั้ง 2 ชนิดที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 ล้วนโดยในเถ้าลอยเปียกมีความชื้นร้อยละ 25 และ 45 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อระยะเวลาสัมผัสความชื้น 1 สัปดาห์ 1 เดือน และ 3 เดือน แสดงว่าระยะเวลาสัมผัสความชื้นไม่มีผลต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเนื่องจากเถ้าลอยเปียกไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกกับระยะเวลาสัมผัสความชื้น

4. สรุป

1 กระบวนการผสม 2 ครั้งทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง

2 กระบวนการผสม 2 ครั้ง ทำให้มวลรวมมีการยึดเกาะเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง

3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกที่มีความชื้นร้อยละ 25, 45 และ 65 มีค่าไม่แตกต่างกัน

4 ระยะเวลาสัมผัสความชื้นในเถ้าลอยเปียกไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงไฟฟ้า BLCP จ.ระยอง ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัยนี้

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Warangkana Saengsoy,Thuy Bich Thi Nguyen and Somnuk Tangtermsirikul, 2014. A study on basic properties of mortar made with wet fly ash. International Conferenceof Asian Concrete.

[2] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล 2555. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. 1500. 7: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (ส.ค.ท).

[3] Haldive S.A.,Kambekar A. R., 2013. Experimental study on combined effect of fly ash and pond ash on strength and durability of concrete. International journal of Scientific & Engineering Research Volume.

[4] Andrew B.' & Aceves P.G., 2012. The use of Non-Commercial Fly ash in Roller compected concrete structures. World of Coal Ash (WOCA) confence, Denver,CO,USA.

[5] Raungrut Cheerarot a, Chai Jaturapitakku, 2004. A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement. Accepted 2 February.

[6] ASTM C311,Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural Pozzolans for use as a mineral andmixture in Portland-cement concrete

[7] ASTM C143-90a: Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.

[8] British Standard. BS 1881-116 Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes, 1983.

[9] Nobuaki Otsuki, M.ASCE; Shin-ichi Miyazato; and Wanchai Yodsudjai, 2003. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial TransitionZone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. journal of materials science letters, 15:443-451.

[10]J.S.RYU, 2002. Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crused concrete coarse aggregate. journal of materials science letters, 21:1565-1567.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายเอกราช จำนงค์รัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	28 กันยายน 2533
ที่อยู่	41 หมู่ 2 ตำบลลำทับ อำเภอลำทับ จังหวัดกระบี่
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรโครงการ โครงการก่อสร้างอาคารโรงแสดงละคร สวนนงนุช พัทยา จ.ชลบุรี วิศวกรโครงการ โครงการก่อสร้างอาคารโรงแสดงช้าง สวนนงนุช พัทยา จ.ชลบุรี วิศวกรโครงการ โครงการก่อสร้างอาคารสัมมนา สวนนงนุช พัทยา จ.ชลบุรี ผู้จัดการโครงการ โครงการก่อสร้างห้องตัวอย่าง โรงแรม Banyan Tree Krabi อ.เมือง จ.กระบี่ วิศวกรโครงการ และฝ่ายบริหารงานก่อสร้าง ห้างหุ้นส่วน จำกัด รัษฎาโกลด์ เอ็นจิเนียริ่ง อ.เมือง จ.ตรัง ตั้งแต่ พ.ศ. 2561 จนถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	086-336-9037
อีเมล์	bin_civil_15@hotmail.com,bincivil15@gmail.com