ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต

EFFECTS OF SEAWATER AS MIXING WATER ON CEMENTITIOUS PROPERTIES, AUTOGENOUS SHRINKAGE AND DRYING SHRINKAGE OF PASTE/MORTAR/CONCRETE

ทศพร พรมวงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต

ทศพร พรมวงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต Effects of Seawater as Mixing Water on Cementitious Properties, Autogenous Shrinkage and Drying Shrinkage of Paste/ Mortar/ Concrete
ชื่อ – นามสกุล	นายทศพร พรมวงค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2563

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

Krittiya K ..... กรรมการ
(อาจารย์กฤติยา แก้วมณี, Ph.D.)

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

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส และ การหดตัวแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต
ชื่อ - นามสกุล	นายทศพร พรมวงค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมคอนกรีตมีการใช้น้ำจืดหลายพันล้านตันต่อปี ถ้าสามารถนำน้ำทะเลมาใช้แทนน้ำจืดได้ ทำให้สามารถประหยัดน้ำจืดและประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้ ดังนั้นมีความจำเป็นในการศึกษาวิจัยเพื่อนำน้ำทะเลมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตให้เป็นที่ยอมรับได้

วิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนด้วยเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน แล้วทำการทดสอบสมบัติด้านซีเมนต์ของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ และการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ แล้วเปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวระหว่างน้ำจืดกับน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของเพสต์น้ำจืดใช้ผสม และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์น้ำทะเลใช้ผสมเร็วกว่าของเพสต์น้ำจืดใช้ผสม ส่วนการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกกว่าของเพสต์น้ำจืดใช้ผสม สำหรับค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมนั้น มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม และค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสม นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตในช่วงอายุต้น (น้อยกว่า 28 วัน) ให้ค่าที่มีแนวโน้มเดียวกันกับกรณีเมื่อน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม กล่าวคือมีการพัฒนากำลังไปตามอายุที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่ออายุมากขึ้น (91 วัน) กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้นกลับมีแนวโน้มที่ลดลง โดยกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มในช่วงอายุ 28 วันนั้นมีค่ามากกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม แต่เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น (ที่ 91 วัน) นั้น กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น กลับให้ค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม สุดท้ายการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม

คำสำคัญ : น้ำทะเล สมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง

Thesis Title	Effects of Seawater as Mixing Water on Cementitious Properties, Autogenous Shrinkage and Drying Shrinkage of Paste/ Mortar/ Concrete
Name - Surname	Mr. Todsaporn Promwong
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Academic Year	2020

ABSTRACT

In the concrete industry, billions of tons of freshwater are used annually. If seawater can be used instead of freshwater, it can save freshwater and construction costs. Hence, there is a need for research studies to make the use of seawater in the concrete industry to be acceptable.

This study aimed to investigate the effects of seawater as mixing water on cementitious properties, autogenous shrinkage, and drying shrinkage of the paste/mortar/concrete, by partially replacing Portland Cement Type I with fly ash, ground granulated bottom ash, and limestone powder. The cementitious properties of the paste/mortar/concrete, the autogenous shrinkage of the mortar and the drying shrinkage of the mortar were examined. The cementitious properties, the autogenous shrinkage and the drying shrinkage of the paste/mortar/concrete mixed and cured with freshwater were compared with the ones mixed and cured with seawater.

The research results showed that the optimal water quantity of seawater mixed in the paste was greater than that of freshwater, while the setting time of the mixed seawater paste was shorter than that of the freshwater paste. The autoclave expansion of the mixed seawater paste was greater than that of the freshwater paste. In addition, the result of flow table test of the mixed seawater mortar was less than that of the freshwater mortar. The slump of the mixed seawater concrete was less than that of the freshwater concrete. In addition, it was found that the compressive strength and the splitting tensile strength of the concrete mixed and cured with seawater at an early age (less than 28 days) seemed to give the same values as that mixed and cured with freshwater. In other words, it was developing with increasing age. However, once the age of the concrete was longer (91 days), the compressive strength and the splitting tensile strength of the concrete mixed and cured with seawater were lower than that mixed and cured with freshwater. Finally, the autogenous shrinkage and the drying shrinkage of the mixed seawater mortar were greater than that of the freshwater mixed mortar.

Keywords: seawater, cementitious properties, autogenous shrinkage, drying shrinkage

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ด้วย ได้รับการอนุเคราะห์ และให้ความสนับสนุนเป็นอย่างดีจากหลายฝ่าย ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ดร.กฤติยา แก้วมณี และ รองศาสตราจารย์นิรชร นกแก้ว ที่ได้ให้ความกรุณา ในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้ และขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมโยธา ซึ่งส่งผลให้วิทยานิพนธ์บรรลุตามจุดประสงค์และเป้าหมายที่ตั้งไว้อีกทั้งปลูกฝังแนวคิดแนวทางปฏิบัติตน เพื่อให้เป็นบุคลากรที่ดีของสังคม

ขอขอบคุณครอบครัวภรรยาและลูกๆ ที่คอยสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจตลอดมา

และท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อไหล่ คุณแม่ทอง พรมวงค์ ที่ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ให้เป็นคนดี ส่งเสียให้การศึกษา และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด จนมีโอกาสจบการศึกษาถึงระดับนี้

ทศพร พรมวงค์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... (3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... (4)
กิตติกรรมประกาศ ..... (5)
สารบัญ ..... (7)
สารบัญตาราง ..... (9)
สารบัญรูป ..... (11)
บทที่ 1 บทนำ 13
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 13
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 15
1.3 ขอบเขตของการศึกษา 16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 50
บทที่ 3 วิธีการศึกษา 54
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา 55
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา 55
3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา 63
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ 66
4.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานและน้ำทะเลที่ใช้ในการศึกษา 66
4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำทะเล 69
4.3 สมบัติด้านซีเมนต์ของ เพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต 70
4.4 การหดตัวแบบออโตจีนัสแของมอร์ต้าร์ผสมน้ำทะเล 91
4.5 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมน้ำทะเล 103
4.6 เปรียบเทียบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต 115

สารบัญ

หน้า

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 116

5.1 สรุป 116

5.2 ข้อเสนอแนะ 117

บรรณานุกรม 118

ภาคผนวก 120

ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ 121

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบ 143

ประวัติผู้เขียน 148

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 21
ตารางที่ 2.2 สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 21
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5..... 22
ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618..... 37
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแหล่งต่างๆ 38
ตารางที่ 2.6 ร้อยละข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545..... 39
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา 41
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานโดยน้ำหนักที่ใช้ในการศึกษา
ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ การก่อตัวของเพสต์ และการขยายตัว
แบบออโตเคลฟของเพสต์..... 62
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว
การสูญเสียค่าการยุบตัวกำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต
โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.70..... 63
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ที่ใช้ในการทดสอบค่าการไหล
การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวั
สดุประสานเท่ากับ 0.50 64
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ที่ใช้ในการทดสอบค่าการไหล การหดตัวแบบออโตจีนัส
และแบบแห้งของมอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60..... 65
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา..... 67
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย
เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา 69
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟตและคลอไรด์ของน้ำทะเล
จากหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี..... 69
ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์..... 71
ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์..... 73
ตารางที่ 4.6 ร้อยละการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์..... 76

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.7 ค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต 78
ตารางที่ 4.8 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มและ
ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 81
ตารางที่ 4.9 กำลังดึงแยกของคอนกรีตโดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 28
และ 91 วันและใช้อัตราส่นน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 87
ตารางที่ 4.10 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ 90

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 31
รูปที่ 2.2 การทดสอบกำลังดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต 33
รูปที่ 2.3 แบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และออโตจีนัส 44
รูปที่ 2.4 อัตราการหดตัวแบบออโตจีนัส..... 46
รูปที่ 2.5 ผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่สร้างอยู่กลางแจ้ง เกิดการแตกร้าวเนื่องจาก
การหดตัวแบบแห้ง 49
รูปที่ 3.1 ขวดเลอชาเตอลิเอร์ (la chatelier flask) 55
รูปที่ 3.2 เครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (air permeability apparatus) 55
รูปที่ 3.3 เครื่องมือทดสอบแบบไวแคต (vicat needles)..... 56
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความยาว (length comparator)..... 57
รูปที่ 3.5 แบบหล่อมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร..... 58
รูปที่ 3.6 หม้อนึ่ง autoclave 58
รูปที่ 3.7 แบบหล่อและแท่นทดลองการไหล..... 58
รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต..... 59
รูปที่ 3.9 เครื่อง UTM (universal testing machine)..... 60
รูปที่ 3.10 การทดสอบกำลังดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต (splitting tensile strength)..... 60
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,000 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน 68
รูปที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ 71
รูปที่ 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ 74
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์เมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม 74
รูปที่ 4.5 การขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์..... 76
รูปที่ 4.6 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต..... 79
รูปที่ 4.7 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที 79
รูปที่ 4.8 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที 80
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตเมื่อน้ำจืดใช้ผสม
และบ่ม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 83

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตเมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 84

รูปที่ 4.11 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มที่อายุ 1 7 28 และ91 วัน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 86

รูปที่ 4.12 กำลังดึงแยกของคอนกรีตโดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 28 และ 91 วัน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.70 88

รูปที่ 4.13 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ 91

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 94

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 96

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 97

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสม 98

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสม 99

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 101

รูปที่ 4.20 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 100

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์เมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.60 102

รูปที่ 4.22 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอรีต้าร์ ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.60 103

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 105

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 107

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60..... 109

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสม..... 110

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสม..... 110

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์เมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 112

รูปที่ 4.29 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 113

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เปรียบเทียบเมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 114

บทที่ 1
บทนำ

สำหรับบทนำนั้นเป็นการกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีการขยายตัวมากขึ้น สืบเนื่องมาจากความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ ในงานก่อสร้างต่างๆ เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการผลิตปูนซีเมนต์สูงขึ้น โดยในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก เช่น การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจากกระบวนการเผาเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ ปัญหาด้านเสียงและฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิต ปัญหาต้นทุนทางด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์และโดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาด้านทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นผู้ผลิตปูนซีเมนต์จึงมีความพยายามที่จะศึกษาและค้นคว้าหาวัสดุมาทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยวัสดุทดแทนที่นิยมใช้คือ สารปอซโซลาน (pozzolan) เป็นวัสดุใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น วัสดุปอซโซลานที่ใช้กันและมีอยู่ในประเทศไทย เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (fly ash หรือ pulverized fuel ash) เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับ (electrostatic precipitator) จะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ในกรณีที่เถ้าถ่านหินหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักมากและตกลงสู่ก้นเตาจึงเรียกว่า เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (bottom ash) สาเหตุที่นิผมใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผลสองประการ คือประการแรก พบว่าเถ้าถ่านหินมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้ถ่านหินที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าถ่านหินจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และลักษณะทรงกลมของเถ้าถ่านหินจะช่วยทำให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีทำให้การสูบส่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกและง่ายขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมลงได้เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าถ่านหินทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง ในส่วนของเถ้าก้นเตานั้นมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนกว่าเถ้าถ่านหินมาก จากขนาดที่

ใหญ่คล้ายมวลรวมละเอียดของเถ้าก้นเตา จึงมีหลายงานวิจัยนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย ผลจากการศึกษาพบว่าเถ้าก้นเตาสามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดแต่เนื่องจากเถ้าก้นเตามีรูพรุนสูงมากทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้นมีผลให้กำลังอัดลดลง แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ ได้มีแนวคิดนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าก้นเตา แต่เนื่องจากเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่จึงต้องเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาให้ดีขึ้นโดยทำให้อนุภาคเล็กลง ส่วนผงหินปูน (limestone powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยปกติแล้วผงหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งหินย่อยนั้น โดยผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อตัวให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม และยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงแหล่งย่อยหินเหล่านั้น องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูนจะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (inert material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (reactive material)

การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลกในปัจจุบัน รวมทั้งการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของโลกเป็นแรงขับเคลื่อนต่อการเพิ่มปริมาณความต้องการใช้น้ำในทุกภาคส่วน ส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อวิกฤตน้ำในโลกที่มีความเป็นไปได้สูงในอนาคต นอกจากนี้สภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบัน อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโลกเพิ่มสูงขึ้น และระดับน้ำทะเลเฉลี่ยทั่วโลกเพิ่มขึ้นจากการละลายของธารน้ำแข็งบนแผ่นดิน และปริมาตรน้ำในมหาสมุทรขยายตัว สภาวะโลกร้อนยังส่งผลกระทบต่อวัฏจักรของน้ำบนโลก เกิดความผันแปรของพายุหมุนเขตร้อน เกิดภัยพิบัติต่าง ๆ ภาวะฝนแล้ง ฝนทิ้งช่วงยาวนาน หรือภาวะน้ำท่วมหนัก ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมซึ่งเป็นรากฐานที่สำคัญของความมั่นคงทางด้านเศรษฐกิจของโลก จากปัญหาขาดแคลนน้ำของโลกทำให้องค์การสหประชาชาติได้ให้ความสำคัญและรณรงค์ให้นานาประเทศช่วยกันอนุรักษ์น้ำ

สำหรับประเทศไทยในระยะเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมาได้เผชิญปัญหาเกี่ยวกับน้ำอย่างต่อเนื่อง อาทิ สถานการณ์ภัยแล้งที่รุนแรง ปริมาณน้ำสำรองในเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ไม่เพียงพอ ปัญหาแหล่งน้ำเสื่อมโทรม และปนเปื้อนสารพิษอันมีสาเหตุมาจากชุมชนเมือง ภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม รวมทั้งอุทกภัยรุนแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งวิกฤตน้ำดังกล่าวที่เกิดขึ้นได้สร้างความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และการดำรงวิถีชีวิตของประชาชนอย่างมหาศาล และมีแนวโน้มความรุนแรงเพิ่มขึ้น โดยสาเหตุดังกล่าวนั้นเกิดจากหลายปัจจัยร่วมกัน ทั้งขาดการบริหารจัดการน้ำที่มีประสิทธิภาพ ปริมาณความต้องการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้น พฤติกรรมการใช้น้ำ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อน

ในงานคอนกรีต น้ำถูกใช้ผสมและบ่มคอนกรีตหลายพันล้านตันต่อปีถึงแม้ว่าน้ำทะเลไม่อนุญาตให้ใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่สามารถใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีตบางประเภทที่ไม่ต้อง

ใช้เหล็กเสริม เช่น ถนนคอนกรีตเสริมไม้ไผ่ โครงสร้างคอนกรีตเสริม GFRP ผลิตภัณฑ์คอนกรีตล้วน เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยที่มีการนำน้ำทะเลมาใช้ผสมคอนกรีตและบ่มในคอนกรีตที่ผ่านมานั้น Falah M. Wegian [1] พบว่า คอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลมีกำลังประลัย กำลังดึงแยก กำลังดัดและแรงยึดเหนี่ยว ของคอนกรีตที่สูงกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ในช่วงอายุ 7 และ 14 วัน เมื่ออายุ 28 วันจนถึงอายุ 90 วัน กำลังประลัย กำลังดึงแยก กำลังดัดและแรงยึดเหนี่ยว ของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืดจะมีค่าที่ดีกว่า ส่วน Qingyong Guo และคณะ [2] พบว่า คอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลกำลังอัดประลัยลดลงประมาณร้อยละ 15 เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืดที่อายุ 90 วัน และ S. O. Osuji and E. Nwankwo [3] พบว่า คอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลให้กำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ประมาณร้อยละ 15 ที่อายุ 28 วัน ส่วนคอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำทะเลแต่บ่มด้วยน้ำจืดให้กำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืดประมาณร้อยละ 10 ที่อายุ 28 วัน ในขณะที่ B.Sathish kumar และคณะ [4] พบว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลให้ กำลังอัดประลัย กำลังดัดและกำลังดึงแยกต่ำกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน Adiwijaya และคณะ [5] พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่ม มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสมและบ่มร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน ส่วน M. Khatibmasjedi และคณะ [6] พบว่า การใช้น้ำทะเลเป็นส่วนผสมในมอร์ต้าร์จะทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่ม มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยทั้งที่ผสมด้วยน้ำประปาและน้ำทะเลจะเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมอร์ต้าร์อายุมากขึ้น มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยที่ใช้น้ำทะเลผสมจะเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่มสูงขึ้น การใช้น้ำทะเลมีผลกระทบไม่มากต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ w/c เท่ากับ 0.36 ในทางกลับกันน้ำทะเลจะทำให้การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยสูงขึ้นเมื่อใช้ w/c เท่ากับ 0.45 การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตผสมน้ำทะเล อาจทำให้การหดตัวแบบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดปัญหาได้และน้ำทะเลจะเพิ่มการหดตัวแบบแห้งและการหดแบบออโตจีนัสให้สูงขึ้น

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อสมบัติด้านซีเมนต์และการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต เพื่อสามารถพัฒนาการนำน้ำทะเลมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตา บดละเอียด ผงหินปูน และน้ำทะเลที่ใช้

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์

1.2.3 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ต่อค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต

1.2.4 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ต่อค่าการไหลแผ่ การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้มีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน โดยการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน

1.3.2 ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลแยกกันใช้ผสมและบ่ม เพสต์ มอร์ต้าร์และคอนกรีต

1.3.3 ทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์

1.3.4 ทดสอบค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต

1.3.5 ทดสอบค่าการไหลแผ่ และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์

1.3.6 วิเคราะห์ผลกระทบของของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ผสมน้ำทะเล

1.3.7 วิเคราะห์ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ต่อค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีตผสมน้ำทะเล

1.3.8 วิเคราะห์ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ต่อค่าการไหลแผ่ การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมน้ำทะเล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาครั้งนี้

1.4.1 ทราบสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด ผงหินปูน และน้ำทะเลที่ใช้

1.4.2 ทราบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัว และการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์

1.4.3 ทราบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ต่อค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต

1.4.4 ทราบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ต่อค่าการไหลแผ่ การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์

1.4.5 เพื่อสามารถพัฒนาการนำน้ำทะเลมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อสมบัติด้านซีเมนต์และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต ในครั้งนี้ มีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ปูนซีเมนต์

คุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ การปรับส่วนประกอบของวัตถุดิบจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

2.1.1.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1) วัสดุธาตุปูน (calcareous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม (calcium) ได้แก่ หินปูน (limestone) และหินชอล์ก (chalk)

2) วัสดุอาจิลลาเชียส (argillaceous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (silicon) และอลูมิเนียม (aluminium) ได้แก่ ดินเหนียว หินเชลหรือหินดินดาน (shale) และหินชนวน (slate)

2.1.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อวัตถุดิบถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นมีขั้นตอนดังนี้

1) น้ำระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง CaO

3) เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง ซิลิก้า อลูมิน่า และเหล็กออกไซด์ จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

โดยปูนซีเมนต์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์หลัก 2 กลุ่มใหญ่คือ ออกไซด์หลัก (major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์ทั้ง 4 ชนิดนี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (minor oxide) ซึ่งได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O และ K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และยังมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ TiO_2) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนผสมอื่นซึ่งจะจัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดด่าง (insoluble

residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (clinker) อยู่ในรูปของสารประกอบ สารประกอบหลักที่สำคัญมีอยู่ 4 อย่างคือ

ก) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $3CaO.SiO_2$ ชื่อย่อ C_3S

ข) ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $2CaO.SiO_2$ ชื่อย่อ C_2S

ค) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (tricalcium amuminate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $3CaO.Al_2O_3$ ชื่อย่อ C_3A

ง) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (tetracacium aluminoferrite) องค์ประกอบทางเคมีคือ $4CaO.Al_2O_3.Fe2O_3$ ชื่อย่อ C_4AF

2.1.1.3 วิธีคำนวณปริมาณสารประกอบ

การคำนวณปริมาณสารประกอบ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF ของปูนซีเมนต์นิยมใช้วิธีของ อาร์ เอช โบก (R. H. Bogue) สูตร Bogue's Equation แบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 : $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$

$C_3S = 4.071CaO-7.600SiO_2-6.718Al_2O_3-1.430Fe_2O_3-2.852SO_3$ (2.1)

$C_2S = 2.867SiO_2-0.7544C_3S$ (2.2)

$C_3A = 2.650718Al_2O_3-1.692Fe_2O_3$ (2.3)

$C_4AF = 3.043\ Fe_2O_3$ (2.4)

กรณีที่ 2 : $Al_2O_3/Fe_2O_3 \leq 0.64$

$C_3S = 4.071CaO-7.600SiO_2-4.479\ Al_2O_3-2.859\ Fe_2O_3-2.852\ SO_3$ (2.5)

$C_2S = 2.867SiO_2-0.7544\ C_3S$ (2.6)

$C_3A = 0$ (2.7)

$C_4AF = 2.100\ Al_2O_3+1.702\ Fe_2O_3$ (2.8)

2.1.1.4 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับงานหลากหลาย โดยเฉพาะด้านความแข็งแรง ความคงทน ความสวยงาม และการใช้งานเฉพาะด้าน สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผา และการเย็นลงของเม็ดปูนปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่า ร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$ ชื่อย่อ C_3S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม สีเทาแก่หรือมีสีอ่อนกว่า C_2S สมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือเมื่อผสมกับ

น้ำจะทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และการแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมงและจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 7 วันแรก โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อร้อยละของ C_3A เพิ่มขึ้น โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$ ชื่อย่อ C_2S)

ไดแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูปแบบโดยที่อุณภูมิปกติ C_2S จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต (β-C_2S) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลมมีสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆในช่วงแรกและช้ากว่า C_3S มากแต่กำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออายุมากกว่า 7 วัน และในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณ ร้อยละ 15 ถึง 35

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$ ชื่อย่อ C_3A)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีและทำให้ก่อตัวทันที (flash set) และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก การป้องกัน flash set ทำได้โดยการเติมยิปซั่มลงไปในขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์เพื่อหน่วงการก่อตัวเนื่องจากการเปิดปฏิกิริยาของ C_3A และจะพัฒนากำลังอัดในช่วง 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำปริมาณเมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 นอกจากนี้ยังพบว่าปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำกว่า จะสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดีกว่า

4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ชื่อย่อ C_4AF)

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (solid solution) เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอมูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และจะมีผลต่อสีของปูนซีเมนต์ โดยทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา C_4AF มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว และก่อตัวภายในไม่กี่นาที เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

2.1.1.5 คุณสมบัติของสารประกอบรอง

สารประกอบรองหมายถึงสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ที่นอกเหนือจากสารประกอบหลักทั้ง 4 อย่าง คือ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ปูนขาวอิสระ แมกนีเซียมออกไซด์ และออกไซด์ของอัลคาไล สารประกอบรองเหล่านี้มีอยู่ในจำนวนน้อยก็จริง แต่สารประกอบรองบางตัวมีผลกระทบต่อซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตทั้งขณะที่ยังไม่แข็งตัวและที่แข็งตัวแล้ว อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาในส่วนเฉพาะสมบัติของปูนขาวอิสระ และแมกนีเซียมออกไซด์

1) ปูนขาวอิสระ

ปูนขาวอิสระ (free lime, free CaO) เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ กรณีที่หนึ่ง เกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุดิบมีปริมาณปูนขาว (CaO) มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้

หมดในเตาเผา หรือกรณีที่สอง เกิดขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวมีไม่มาก แต่การทำปฏิกิริยากับ oxide เป็นปูนเม็ดไม่สมบูรณ์ทำให้เหลือปูนขาวอิสระ โดยทั่วไปปูนซีเมนต์จะมีปูนขาวอิสระอยู่ร้อยละ 0.5 ถึง 1.0 เนื่องจากอุณหภูมิสลายตัวของ $CaCO_3$ ประมาณ 900 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิในการเผาปูนซีเมนต์สูงถึง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ปูนขาวถูกเผาจนเกรียม เป็นผลให้ปูนขาวอิสระสามารถรวมตัวกับน้ำได้อย่างช้า ๆ ซึ่งการรวมตัวของปูนขาวอิสระกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว การรวมตัวจะทำให้เกิดสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่มีปริมาตรมากขึ้น ถ้าปูนขาวอิสระมีมากพออาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วขยายตัวและแตกร้าวได้ พฤติกรรมนี้เรียกว่า “ความไม่คงตัว (unsoundness)” สามารถทดสอบความไม่คงตัวได้โดยวิธีการทดสอบเลอชาเตอร์ลิเอร์ (le chatelier test)

2) แมกนีเซียมออกไซด์

วัตถุดิบสำหรับผลิตปูนซีเมนต์มีแมกนีเซียมคาร์บอร์เนต ($MgCO_3$) ผสมอยู่เล็กน้อย เมื่อเผาวัตถุดิบ $MgCO_3$ จะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะอยู่ในรูปผลึกอิสระและรวมตัวกับน้ำได้ช้ามากใช้เวลานับปีเช่นเดียวกับปูนขาวอิสระ การรวมตัวกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว การมีแมกนีเซียมออกไซด์ผสมอยู่อาจทำให้เกิดความไม่คงตัว และเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์กับน้ำจะช้ามาก ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาความไม่คงตัวของแมกนีเซียมออกไซด์จะใช้วิธีทดสอบแบบออโตเคลฟ (autoclave test) เพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นซึ่งเป็นการวัดผลรวมของความไม่คงตัวที่เกิดจาก MgO และ CaO

2.1.1.6 ประเภทของปูนซีเมนต์

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบทำให้สามารถปรับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่างๆ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบสำคัญ ได้แก่ C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, CaO และ MgO ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันจึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [12]

สารประกอบประเภทออกไซด์	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide)	CaO	60.0 - 67.0
ซิลิกอนออกไซด์ (silicon oxide)	SiO_2	17.0 - 25.0
อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide)	Al_2O_3	3.0 - 8.0
ไอออนออกไซด์ (ferric oxide)	Fe_2O_3	0.5 - 6.0
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide)	MgO	0.1 - 0.4
อัลคาไลท์ (alkalies)	Na_2O	0.2 - 1.3
ไททาเนียมออกไซด์ (titanium oxide)	K_2O	0.2 - 1.3
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (sulfer trioxide)	SO_3	1.0 - 3.0
สารประกอบอื่นๆ	-	0.5-3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition)	LOI	0.1-3.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (insoluble residue)	-	0.20-0.75

ตารางที่ 2.2 สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [12]

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
กำลังอัดประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย มอก. 15 เล่ม 1 ได้แบ่งปูนซีเมนตปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

ก) ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary portland cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตโดยทั่วไป เช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก, ถนน สะพาน, ถังกักเก็บน้ำ, อ่างเก็บน้ำ, ท่อน้ำ, และผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น

ข) ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ความร้อนปานกลาง (moderate heat cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนักความร้อนที่เกิดมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับดินหรือน้ำที่มีความเข้มค้นของซัลเฟตที่สูงกว่า

ปกติแต่ไม่ถึงระดับรุนแรง เช่นงานก่อสร้างบ่อบำบัดน้ำเสียหรือโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียโดยตรง เป็นต้น

ค) ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (rapid hardening portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรกให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูงเพราะมี C_3S และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก เหมาะสำหรับคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาอันสั้น มักใช้ในงานหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปชนิดต่างๆ เช่นแผ่นพื้นอัดแรง, เสาเข็มอัดแรง, เสาไฟฟ้า, เสาและคานสำเร็จรูปสำหรับอาคาร, คานสะพานสำเร็จรูป และหมอนรางรถไฟ เป็นต้น

ง) ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (low heat portland cement) ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำมากเพราะมีปริมาณ C_3S ต่ำแต่มีปริมาณ C_2S ที่ค่อนข้างสูง เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา (mass concrete) เช่น เขื่อนคอนกรีต ฐานรากและเสาตอม่อขนาดใหญ่ เป็นต้น เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (thermal cracking)

จ) ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (sulfate resisting portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ C_3A ต่ำมากดังนั้นจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลง เหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับเกลือซัลเฟตอย่างรุนแรงจากดินหรือน้ำที่มีปริมาณซัลเฟตสูง เช่นงานก่อสร้างบ่อบัดน้ำเสีย, โครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียโดยตรง และโครงสร้างใต้ดินเป็น

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 [12]

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)	49	46	56	25	30
ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)	25	29	15	50	46
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)	12	6	12	5	5
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์(C_4AF)	8	12	8	12	13
ความละเอียดของเบลน (ซม^2/กรัม)	3000	3000	4500	3000	3000
กำลังอัดที่อายุ 3 วัน (กก/ซม^2)	180	150	310	80	120
ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ 28 วัน (จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

หมายเหตุ: * กำลังอัดวัดจากลูกบาศก์มอร์ต้าร์ ขนาด 50 มม.

2) ปูนซีเมนต์ประเภทอื่น

นอกจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5 ประเภทที่ประกอบไปด้วย C_3S C_2S C_3A และ C_4AF ในปริมาณที่ต่างกัน ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ทำมาจากการผสมสารอื่นบดกับปูนเม็ดหรือโดยการเพิ่มสารประกอบอื่นระหว่างการเผา เพื่อให้มีคุณสมบัติพิเศษต่างๆ เหมาะสมกับความต้องการใช้งานมากที่สุด เช่น

2.1 ปูนซีเมนต์ผสม (mixed cement หรือ silica cement) มอก. 80 กำหนดปูนซีเมนต์ผสม หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเติมวัสดุอื่นใดลงไปบด พร้อมกันกับการบดปูนเม็ดที่จะทำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือได้จากการผสมสม่ำเสมอ ระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับวัสดุอื่นใดที่บดเป็นผงแล้ว ปูนซีเมนต์ผสมได้จากการบดวัสดุเม็ดกับวัสดุเฉื่อยจำพวกทรายซึ่งประกอบด้วยซิลิกาหรือบดร่วมกับหินปูนที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาปริมาณวัสดุเฉื่อยที่ใช้ประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ทำให้ปูนซีเมนต์มีราคาถูกลง ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น การเยิ้มน้ำต่ำและการหดตัวเมื่อตากแห้งน้อยลง จึงช่วยลดการแตกร้าวที่ผิว เหมาะสำหรับใช้ในงานปูนก่อหรือปูนฉาบเพราะจะได้มีเวลาในการทำงานนานขึ้น แต่ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีกำลังอัดที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงไม่ควรใช้ในกับโครงสร้างหลักของอาคาร และอาคารที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมนี้ อายุจะสั้นกว่าที่ควรจะเป็นเพราะมีเนื้อปูนน้อยกว่าปกติ

2.2 ปูนซีเมนต์ขาว (white cement) สีเทาในปูนซีเมนต์เกิดจากสารออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ดังนั้นการผลิตปูนซีเมนต์ขาว ทำได้โดยการลดปริมาณสารดังกล่าวให้ต่ำลง ซึ่งอาจใช้ดินขาวจีน (china clay) กับดินสอพองหรือหินปูนที่ไม่มีออกไซด์ของธาตุเหล็กเป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยทั่วไปกำหนดให้ออกไซด์ของเหล็กในปูนซีเมนต์ขาวต่ำกว่าร้อยละ 0.5 ทำให้มีปริมาณของสารเฟอร์ไรด์ในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 0.5 เท่านั้น ดังนั้นปูนซีเมนต์ขาวจึงมีส่วนประกอบของ C_3A สูงและแทบจะไม่มี C_4AF และในการเผาจะใช้น้ำมันเพราะถ่านหินจะมีออกไซด์ของธาตุเหล็กและแมงกานีสปนอยู่สูง การใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงทำให้ปูนซีเมนต์ขาวมีต้นทุนราคาที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา ปูนซีเมนต์ขาวให้กำลังอัดไม่สูงมากนักจึงเหมาะกับงานโครงสร้างที่รับแรง แต่เหมาะกับงานที่ต้องการความสวยงาม เช่น งานหินล้าง งานหินขัด เป็นต้น

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (portland pozzolana cement) ได้จากการเผาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุปอซโซลาน (pozzolanic material) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาที่ละเอียด โดยตัวเองจะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) และน้ำที่อุณหภูมิปกติจะได้สารที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน วัสดุปอซโซลาน ได้แก่ ดินเหนียวเผา เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (fly ash) ซิลิกาฟูม (silica fume) และเถ้าแกลบบดละเอียด เป็นต้น การผสมวัสดุปอซโซลานลงในปูนซีเมนต์ส่วนมากแล้วจะทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไอเดรชั่นลดลง กำลังระยะแรกลดลงเพิ่มความสามารถในการต้านทานซัลเฟต ลดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา (alkali-silica reaction) ปริมาณปอซโซลานที่ใช้อยู่ระหว่างร้อยละ 15 ถึง 40 โดยน้ำหนัก

ของวัสดุประสาน การใช้วัสดุปอซโซลานนอกจากจะเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมแล้วยังทำให้ปูนซีเมนต์ราคาถูกลงด้วย

2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุง (Portland blast furnace slag cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดตะกรันเตาลุงเหล็กกับปูนเม็ด ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากการถลุงเหล็ก ซึงประกอบด้วย CaO SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนมากแล้วจะใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กในช่วงร้อยละ 25 ถึง 70 ของวัสดุซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กเมื่อทำปฏิกิริยาจะให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเหมือนกับผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3S แต่ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะช้ากว่า ดังนั้นการรับกำลังในระยะแรกจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก็ต่ำกว่า และการต้านทานซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกลันเตาถลุงเหล็กจะดีขึ้นเพราะปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เหมาะกับงานคอนกรีตหลาและนิยมใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีตในทะเล แต่ในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตปูนซีเมนต์ประเภทนี้

2.5 ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง (supersulfated cement) ทำจากการบดตะกลันเตาถลุงเหล็กประมาณร้อยละ 80 ถึง 85 กับสารแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซั่มที่ผ่านการเผาขจัดน้ำ) ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 และปูนเม็ดประมาณร้อยละ 5 ปูนชนิดนี้มีความร้อยจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำกว่าและทนต่อสารซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความคงทนต่อการกัดกร่อน เช่น ใช้ทำท่อคอนกรีตสำหรับน้ำทิ้ง เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์ที่ไม่ได้กล่าวถึงอีก เช่น ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วพิเศษ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กำลังระยะแรกสูงพิเศษ ปูนซีเมนต์งานก่อ ปูนซีเมนต์ขยายตัว ปูนซีเมนต์ก่อตัวละแข็งตัวเร็ว ปูนซีเมนต์บ่อน้ำมัน ปูนซีเมนต์อลูมิน่าสูง เป็นต้น

2.1.2 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัว และแข็งตัวของปูนซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกันและกันทำให้ปฏิกิริยาที่ได้มีความผิดแผกไปบ้างจากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบบริสุทธิ์แต่ละตัวกับน้ำ นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและในสภาพที่แข็งตัวแล้ว ดังนั้นในการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบกับน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญและสามารถนำไปอธิบายปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำได้ดี

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide : $Ca(OH_2)$ หรือ CH) ดังสมการที่ (2.9)

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (2.9)$$

หรือ $2C_3S + 6H \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำในทำนองเดียวกันกับไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นช้ากว่าเพราะไดแคลเซียมซิลิเกตไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับไตรแคลเซียมซิลิเกต ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างของไดแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำจึงน้อยกว่ากรณีของไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกัน คือ CSH และ CH ดังสมการที่ (2.10)

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2.10)$$

หรือ $2C_2S + 4H \longrightarrow C_3S_2H_3 + CH$

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันที่ทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ (2.11)

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad (2.11)$$

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (clinker) โดยยิปซัม (gypsum : $CaSO_4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นบางๆของแอทริงไจท์ (ettringite : $3CaO.Al2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ (2.12)

$$3CaO.Al_2O_3 + Ca.SO_4.2H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O \quad (2.12)$$

4. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าโดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้นโดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ (2.13)

$$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3 + Ca.SO_4.2H_2O \longrightarrow CaO.(Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4 \quad (2.13)$$

เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับ น้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์และจากการที่

สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียมและ ไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนต และเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้น จะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.3 น้ำสำหรับผสมคอนกรีต

น้ำเป็นส่วนผสมสำคัญในการทำคอนกรีตนอกจากนี้ยังมีบทบาทที่สำคัญต่องานคอนกรีตด้านเช่น เช่น ใช้น้ำในการบ่มคอนกรีตเพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ขึ้น และในกรณีที่มวลรวมมีความสกปรกจะใช้น้ำล้างมวลรวมให้มีความสะอาดพอสำหรับนำไปใช้ทำคอนกรีต ปัญหาเรื่องคุณภาพน้ำมักจะไม่เกิดขึ้นบ่อยนักเนื่องจากน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่มีคุณภาพอยู่ในขั้นดี เช่นน้ำประปา เป็นต้น กฎทั่วไปสำหรับน้ำในงานคอนกรีต คือควรเป็นน้ำจืดที่สะอาดหรือน้ำจืดที่ดื่มได้ อย่างไรก็ตามหากไม่แน่ใจว่าน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตมีคุณภาพดีพอหรือไม่ ก็ต้องทดสอบก่อน

น้ำที่ใช้สำหรับผสมทำคอนกรีตถ้ามีสารแปลกปลอมเจือปนอยู่มากเกินไปอาจก่อปัญหาด้านระยะเวลาในการก่อตัว การหดตัวของคอนกรีต การมีรอยคราบเกลือ (efflorescence) อยู่ที่ผิวของคอนกรีตกำลังที่ต่ำลง ตลอดความคงทนของคอนกรีตลดลง สารแปลกปลอมเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสารแขวนลอย สารละลายอนินทรีย์ และสารละลายอินทรีย์

1. สารแขวนลอย

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตไม่ควรมีความขุ่นที่เกิดจากสารแขวนลอยจำพวกดินตะกอนและดินเหนียวเกิน 2,000 ส่วนในล้าน (ppm.) หรือคิดเป็นร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักน้ำ ในกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และใช้น้ำที่มีสารแขวนลอย 2,000 ส่วนในล้านผสมคอนกรีตจะทำให้มีสารแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ในคอนกรีตนั้น ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่ยอมรับได้และไม่ส่งผลต่อคอนกรีตมากเกินไป ถ้าปริมาตรสารแขวนลอยจำพวกนี้เกิน 2,000 ส่วนในล้าน คอนกรีตอาจมีความต้องการน้ำและมีการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้น และในบางครั้งอาจทำให้เกิดรอยคราบเกลือที่บริเวรผิวของคอนกรีต ถ้าน้ำที่ผสมคอนกรีตมีความขุ่นมากควรทิ้งให้ตกตะกอนเสียก่อนแล้วจึงใช้น้ำนั้น สารแขวนลอยที่เป็นพืชจำพวกสาหร่าย (algae) มักจะไม่ตกตะกอนและเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำให้ปริมาณอากาศในซีเมนต์เพสเพิ่มขึ้นเป็นผลให้กำลังลดลงได้

2. สารละลายอนินทรีย์

น้ำจืดที่ดื่มได้จะมีสารละลายอนินทรีย์อยู่ไม่เกิน 2,000 ส่วนในล้านซึ่งสามารถนำน้ำดังกล่าวมาใช้ผสมคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามน้ำที่ดื่มไม่ได้ เช่น น้ำที่มีสารละลายอนินทรีย์อยู่เล็กน้อยก็สามารถใช้ผสมทำคอนกรีตได้อย่างปลอดภัย ยกเว้น สารละลายบางชนิด เช่น โซเดียมและแอมโมเนียมซัลไฟด์ที่

ปริมาณ 1,000 ส่วนในล้าน ทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น กำลังรับแรงและความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดลดลง และการหดตัวแห้งเพิ่มสูงขึ้น เกลือบางชนิดยังสามารถใช้เป็นสารผสมเพิ่มได้ดี เช่น เกลือแคลเซียมคลอไรด์ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต เกลือคาร์บอนเนตและไบคาร์บอเนตทำให้หินปูนซีเมนต์ก่อตัวเร็วและเกลือซัลเฟตเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะแรกมาตรฐาน BS 3148 ได้กำหนดปริมาตรของสารละลายอินทรีย์

สารละลายของเกลืออนินทรีย์บางชนิดอาจทำให้การก่อตัวของคอนกรีตช้าลง เช่น สารละลายเกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส ดีบุก สารละลายของฟอสเฟตสารละลายของอาร์ซีเนตและบอเรต เป็นต้น สารละลายพวกนี้ยอมให้มีได้ไม่เกิน 500 ส่วนในล้านน้ำที่มีความเข้มข้นของสารละลายจำพวกนี้ส่วนมากเป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือน้ำที่มาจากการทำเหมืองแร่น้ำที่มีความเป็นกรดสามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีตได้ แต่เมื่อระดับความเป็นกรดสูงขึ้นโดยมีค่า hp ต่ำถึง 3 ต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษในการใช้น้ำนั้น เพราะความเป็นกรดในระดับดังกล่าวอาจทำอันตรายต่อร่างรายได้ น้ำที่มีความเป็นด่างที่มีสารจำพวกโซเดียมและโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์อาจก่อให้เกิดปัญหาในการก่อตัวอย่างรวดเร็วและทำให้กำลังลดลงในภายหลัง โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นเกิน 500 ส่วนในล้าน สารอัลคาไลไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและทำให้ความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาของยิปซัมลดลงน้ำทะเลประกอบด้วยสารละลายอนินทรีย์จำพวกเกลือประมาณร้อยละ 3.5 โดยมีโซเดียมคลอไรด์มากที่สุดคิดเป็นประมาณร้อยละ 2.7 นอกจากนั้นเป็นเกลือคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งเป็นลักษณะน้ำทะเลของอ่าวไทย การใช้น้ำทะเลผสมคอนกรีตทำให้คอนกรีตในระยะต้นสูงขึ้นแต่กำลังที่อายุ 28 วันเป็นต้นไปจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสม โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดประมาณไม่เกินร้อยละ 15 นอกจากนี้ไม่ควรใช้น้ำทะเลผสมในงานคอนกรีตเสริมเหล็กเพราะเกลือคลอไรด์ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตอัดแรงจะไม่ยอมให้ใช้น้ำทะเลในการผสมคอนกรีตเด็ดขาด การใช้น้ำทะเลผสมในคอนกรีตยังทำให้เกิดในคราบเกลือที่ผิวหน้าของคอนกรีต ซึ่งจะมีปัญหามากในกรณีของคอนกรีตเปลือยที่ไม่ทาสีเพราะทำให้ผิวหน้าคอนกรีตดูสกปรก การใช้น้ำทะเลยังมีผลต่อการก่อตัวของคอนกรีต คือ มักทำให้คอนกรีตก่อตัวเร็วขึ้น มาตรฐาน BS 3148 กำหนดว่าการใช้น้ำที่ใช้สงสัยว่าจะมีปัญหาเมื่อนำมาผสมคอนกรีต คือ ต้องไม่ทำให้การก่อตัวระยะต้นเปลี่ยนไปเกิน 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำสะอาด (เช่น น้ำประปาหรือน้ำกลั่น)

3. สารละลายอินทรีย์

สารละลายอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำตามธรรมชาติส่วนมากเป็นกรดเทนนิก (tannic acid) และกรดฮิวมิก (humic acid) ซึ่งทำให้น้ำธรรมชาติมีสีเข้มขึ้นและเมื่อนำน้ำดังกล่าวไปผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำช้าลง สารประกอบอินทรีย์หลายชนิดที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีผลต่อปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และบางชนิดสามารถทำให้เกิดฟองอากาศได้ เช่น ของเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมฟอกหนังและอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นต้น ซึ่งของเสียเหล่านี้สามารถนำมาใช้ทำสารเคมีผสมเพิ่มชนิดหน่วงเวลาก่อตัวและสารกักกระจายฟองอากาศได้

โดยมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของของเสียเหล่านั้นก่อน แต่โดยทั่วไปแล้วต้องระมัดระวังการใช้น้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรงเพราะมักเป็นผลเสียต่อคอนกรีดมากกว่าเป็นผลดีน้ำสำหรับบ่มคอนกรีตในทางปฏิบัติจะใช้น้ำที่สะอาดที่มีคุณภาพเดียวกันกับน้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตด้วย แต่ไม่ควรให้มีสารที่ทำลายคอนกรีตผสมอยู่ในน้ำนั้น เช่น สารซัลเฟตและพวกกรดต่างๆ นอกจากนี้การใช้น้ำทะเลบ่มคอนกรีตอาจทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ส่วนน้ำที่มีสนิมเหล็ก ดินตะกอน หรือ เกลือผสมอยู่จะทำให้ผิวของคอนกรีตเป็นรอยด่างแลดูไม่สวยงาม ถ้าน้ำมีน้ำมันผสมอยู่ก็จะทำให้ผิวของคอนกรีตสกปรกและทาสีทับได้ยาก

2.1.4 คอนกรีตสด

2.1.4.1 สมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต

1) ความข้นเหลวปกติ

ความข้นเหลวปกติ (normal consistency) ของปูนซีเมนต์ หมายถึงปริมาณน้ำที่ผสมลงไปในปูนซีเมนต์ แล้วทำให้เกิดสภาวะความข้นเหลวมาตรฐานคงที่ โดยจะพิจารณาให้เข็มมาตรฐานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ของชุดทดสอบไวแคต จมลงในซีเมนต์เพสต์เป็นระยะ 10 มิลลิเมตร ภายใน 30 วินาที ปริมาณน้ำที่ทำให้ปูนซีเมต์เกิดความข้นเหลวปกตินี้ จะได้เป็นค่ามาตรฐานเพื่อการหาคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ต่อไป เช่น ระยะการก่อตัว (setting time) ความอยู่ตัว (soundness) และแรงดึงของซีเมนต์เพสต์หรือซีเมนต์มอร์ตาร์ (tensile strength) ของปูนซีเมนต์เป็นต้น ค่าความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 24-28 เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาเคมี มีความร้อนเกิดขึ้นและได้วัสดุที่มีสภาพข้นเหนียว ซึ่งเรียกว่าซีเมนต์เพสต์ หลังจากนั้นช่วงระยะเวลาหนึ่งซีเมนต์จะเริ่มก่อตัวและแข็งตัวในที่สุด ระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์นี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งที่กำหนดไว้เพื่อที่จะให้ทราบระยะเวลาที่จะต้องทำงานให้แล้วเสร็จ ก่อนซีเมนต์หรือคอนกรีตจะเริ่มก่อตัวและแข็งตัว ซึ่งจะมีผลเกี่ยวข้องกับการเพิ่มกำลังของคอนกรีต ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์มีอิทธิพลมากต่อระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัว ซีเมนต์ผสมเปียกจะก่อตัวช้ากว่าซีเมนต์ผสมแห้ง ดังนั้นในการทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัวจึงกำหนดให้ทำการทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่มีสภาพความข้นเหลว (normal consistency) เป็นมาตรฐานสากล โดยกำหนดว่าความข้นเหลวปกติคือสภาวะที่ซีเมนต์เพสต์ยอมให้เข็มไวแคตขนาดมาตรฐานจมลง 10 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาที ปริมาณน้ำที่พอเหมาะในการผสมซีเมนต์ให้ได้สภาวะความข้นเหลวปกติ โดยปกติปริมาณจะมีค่าประมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ รายละเอียดความข้นเหลวปกติอยู่ในมาตรฐาน ASTM C 187

2) เวลาก่อตัว

ภายหลังจากการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ หากทิ้งไว้สักพักหนึ่งจะถึงเวลาที่ซีเมนต์เพสต์เริ่มก่อตัว (initial set) และทำให้คุณสมบัติเหลวปั้นได้หมดไป เรียกระยะเวลานี้ว่า เวลาก่อนตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ซีเมนต์เพสต์จะก่อตัวไปเรื่อยจนกระทั่งกลายเป็นก้อนแข็งซึ่งเป็นระยะสุดท้ายของการก่อ

ตัว เรียกว่าเวลาก่อตัวสุดท้าย (final setting time) หลังจากนี้เป็นการแข็งตัว (hardening) ซึ่งซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นตามลำดับ ระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งของปูนซีเมนต์ หากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อตัวเร็วเกินไปแล้ว เมื่อนำไปใช้ในงานคอนกรีตทั่วๆ ไป ผู้ดำเนินงานอาจจะไม่มีเวลาเพียงพอในการนำคอนกรีตไปเทลงแบบได้อย่างสมบูรณ์ ปูนซีเมนต์อาจก่อตัวก่อน ซึ่งหมายความว่าหลังจากเวลานั้นแล้ว ไม่ควรจะเคลื่อนย้ายคอนกรีตสดอีกต่อไป เพราะอาจทำให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพได้ อย่างไรก็ตามหากระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตนานมากจนเกินควร ก็อาจมีอุปสรรคต่อการก่อสร้างได้ เช่น ทำให้ถอดแบบได้ช้า การถอดแบบได้ช้าทำให้เสียเวลาก่อสร้าง เป็นต้น

การก่อตัวรวดเร็วระยะแรก การก่อตัวรวดเร็วระยะแรก (early stiffening) ของซีเมนต์เพสต์เกิดได้ 2 อย่างคือ

1) การก่อตัวผิดปกติ (false set) หมายถึงการที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวอย่างรวดเร็วผิดปกติภายหลังจากการผสมกับน้ำในเวลา 2 ถึง 3 นาที การก่อตัวผิดปกตินี้มีการคายความร้อนออกมาน้อยมาก และซีเมนต์เพสต์สามารถคืนตัวเป็นสภาพเหลวปั้นอีก เมื่อทำการผสมต่อไปโดยไม่ต้องเพิ่มน้ำในส่วนผสม การก่อตัวผิปกติส่วนมากเกิดจากการก่อตัวของยิปซั่ม

2) การก่อตัวทันที (flash set) หมายถึงการที่ซีเมนต์เพลสแข็งตัวอย่างรวดเร็วหลังจากการผสมและมีการคายความร้อนออกมามาก ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวนี้จะไม่สามารถคืนตัวเป็นสภาพพลาสติกเหลวปั้นได้อีก ถ้าผสมต่อไปโดยไม่เพิ่มน้ำ การก่อรัวทันทีเกิดจากปฏิกิริยาของ C_3A กับน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วและมีความแข็งแรก การก่อตัวนี้จะไม่สูญหายถ้าผสมต่อไปไม่เพิ่มน้ำ การป้องกันการก่อตัวทันทีสามารถทำได้โดยการเติมยิปซั่มลงในส่วนผสมของปูนซีเมนต์เพื่อหน่วงปฏิกิริยาของ C_3A

การหาเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยใช้เข็มแบบไวแคตนั้น หมายถึงระยะเวลา (นับตั้งแต่เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จ) ที่เมื่อน้ำเข็มไวแคตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรปล่อยลงไปในเพสต์ที่ผสมน้ำและมีความข้นเหลวปกติ แล้วเข็มนั้นจะจมลงไป 25 มิลลิเมตรหลังจากเมื่อปล่อยเข็มได้ 30 วินาที

3) การไม่คงตัว

ซีเมนต์เพสต์ที่ดีเมื่อแข็งตัวแล้วต้องมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่น้อยมาก การขยายตัวมากหรือความไม่คงตัว (unsoundness) ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ปฏิกิริยาอย่างช้าๆ ระหว่างน้ำในซีเมนต์เพสต์กับปูนขาวอิสระและ/หรือแมกนีเซียมอิสระทำให้เกิดการขยายตัว ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจใช้เวลาหลายเดือนหรือหลายปี ซึ่งวิธีการทดสอบการขยายตัวที่นิยมใช้คือ วิธีออโตเคลฟ (autoclave test)

4) การยุบตัวของคอนกรีต

โดยทั่วไปความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต หมายถึง ปริมาณพลังงานที่ต้องการสำหรับทำให้คอนกรีตอัดแน่นโดยไม่เกิดการแยกแยะ (segregation) ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตที่นิยมใช้กันมีอยู่หลายอย่าง ได้แก่ ความข้นเหลว (consistency) ความสามารถไหนได้ (flowabilty)

ความสามารถอัดแน่นได้ (compactability) ความสามารถปั๊มได้ (pumpability) ความสามารถเข้าแบบได้ (placeability) ความยุบตัวได้ (slump) ความสามารถแต่งผิวได้ (finishability) การเกาะตัว (cohesiveness) ความกระด้าง (harshness)

ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตเป็นสมบัติที่สำคัญ การวัดความสามารถทำงานได้ ทำให้รู้ถึงความเหมาะสมของคอนกรีตในการขนส่ง การเทเข้าแบบ และการอัดแน่นนอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตยังบ่งถึงการเปลี่ยนแปลงในสัดส่วนผสมของคอนกรีตและสามารถใช้เป็นตัวควบคุมคุณภาพของคอนกรีตได้อีกด้วย

การวัดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การทดสอบค่ายุบตัว (slump test) การทดสอบการไหล (flow test) การทดสอบการอัดแน่น (compactiong factor test) การทดสอบการจมของลูกบอลเคลลี (kelly's ball penetration test) การทดสอบรีโมลดิง (remoulding test) และการทดสอบวีบี (vebe test) วิธีเหล่านี้วัดคุณสมบัติหลายๆ ด้านของความสามารถเทได้ของคอนกรีต ดังนั้นการเปรียบเทียบวิธีวัดความสามารถทำงานได้แบบต่างๆ จึงทำได้ยาก เพราะแต่ละวิธีอาจเหมาะสมกับงานบางประเภทแต่อาจจะไม่เหมาะสมกับงานประเภทอื่น นอกจากนี้วิธีที่กล่าวมาข้างต้นวิธีหนึ่งวิธีใดยังไม่สามารถใช้วัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตได้ทั้งหมด คือไม่สามารถวัดคอนกรีตที่เหลวมากจนถึงข้นมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.5 กำลังของคอนกรีต

กำลังอัดถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของคอนกรีต ทั้งนี้เพราะกำลังของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้โดยตรง เข้าใจง่าย และทดสอบได้ง่ายเช่นกัน ในบางกรณีคุณสมบัติอย่างอื่น เช่น ความคงทนต่อการกัดกร่อนหรือการทึบน้ำ อาจมีมีความสำคัญกว่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนต่อคอนกรีตรุนแรง แต่ในทางปฏิบัติ พบว่าคอนกรีตที่รับกำลังได้ดีจะมีคุณสมบัติด้านอื่นดีด้วย

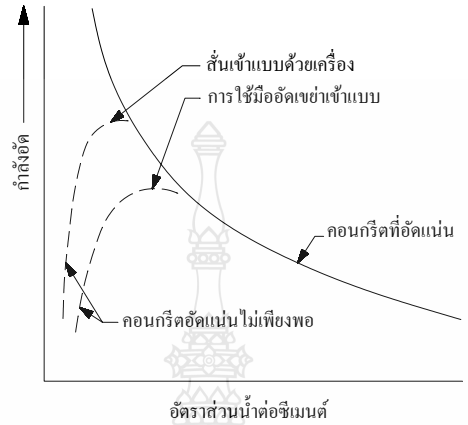
2.5.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต

มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต เช่น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ในกรณีที่ผสมวัสดุปอซโซลาน) อัตราส่วนเจลต่อปริมาตร อายุของคอนกรีต ชนิดของปูนซีเมนต์ ชนิดของมวลรวม วิธีการบ่มคอนกรีต เป็นต้น นอกจากนี้การทำคอนกรีตให้แน่นมี ความสำคัญมากและส่งผลโดยตรงต่อกำลังของคอนกรีต การที่คอนกรีตมี ฟองอากาศหรือโพรงมากจะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตและกำลังลดลง ดังนั้นต้องกระทุ้ง หรือเขย่าคอนกรีตสดให้มีความหนาแน่นสูงๆ เพื่อลดฟองอากาศในคอนกรีต

1. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

โดยทั่วไปแล้วกำลังของคอนกรีตที่อายุเท่ากันผ่านการบ่มและการทำให้แน่นเหมือนกันจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เมื่อกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์และมวลรวมมาให้ กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสม เทเข้าแบบกระทุ้งหรือเขย่าให้แน่นอย่างเต็มที่ และบ่มอย่างถูกต้อง จะขึ้นอยู่กับ

อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม ขนาดคละ ผิวของมวลรวม รูปร่าง ความแข็งและกำลังของมวลรวมหยาบ ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ แต่จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีผลต่อกำลังอัดมากกว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมและขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2. อัตราส่วนเจลต่อปริมาตร

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเจลต่อปริมาตรจะเป็นความสัมพันธ์ที่ครอบคลุมมากกว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เพราะว่าปริมาตรของเจลที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งจะขึ้นอยู่กับอายุและชนิดของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิ ปริมาณฟองอากาศภายในซีเมนต์เพสต์ ฯลฯ ดังนั้นปูนซีเมนต์ต่างชนิดกันจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาทำให้เกิดเจลที่ต่างกัน

3. ผลกระทบของอายุต่อกำลังของคอนกรีต

คอนกรีตจะพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมีน้ำหรือความชื้นพอเพียง กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกภายหลังแข็งตัว แต่หลังจากอายุ 28 วัน กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เป็นอายุที่นิยมใช้ในการออกแบบเนื่องจากครบรอบของระยะเวลา 4 สัปดาห์พอดี และคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดไปมากพอสมควรเหมาะแก่การนำไปใช้งานได้ง่าย การกำหนด อายุทดสอบคอนกรีตไม่ใช่ค่าตายตัวว่าจะต้องเป็นที่อายุ 28 วันเท่านั้น เพราะภายหลังจากอายุ 28 วันกำลังอัด ของคอนกรีตยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่สูงมากดังเช่นอายุก่อน 28 วัน สำหรับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสม เช่น ปูนซีเมนต์ปอซโซลานหรือปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก อาจกำหนดกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ มากกว่า 28 วัน เพราะปูนซีเมนต์ดังกล่าวมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นๆไม่มากนัก แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานจะทำให้กำลังอัดที่อายุมากมีค่าสูงขึ้นอีกมาก อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปยังคงนิยมใช้ที่อายุ 28 วัน ในการ ตรวจสอบกำลังของคอนกรีต ดังนั้นการกำหนดกำลังอัดที่อายุอื่นจึงใช้ประกอบกับกำลังที่อายุ 28 วัน เช่น

ต้องการใช้กำลังอัดที่อายุ 7 วัน ทำนายกำลังที่อายุ 28 วัน ในกรณีนี้จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจเปลี่ยนไปตามชนิดและปริมาณของปูนซีเมนต์หรือปัจจัยอื่นๆ ได้ เช่น ในสภาพอากาศร้อนการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้นๆมี ค่าสูงเนื่องจากการเร่ง ปฏิกิริยาจากความร้อน เป็นต้น

4. ผลกระทบต่อมวลรวมหยาบต่อกำลังของคอนกรีต

คุณสมบัติของมวลรวมโดยเฉพาะรูปร่างและลักษณะของผิวจะมีอิทธิพลต่อกำลังดัดหรือกำลังอัดที่เกิดรอยแตกมากกว่ากำลังอัดประลัย ทั้งนี้เนื่องจากภายใต้กำลังอัดการเกิดรอยแตกร้าวจะไม่นำไปสู่การวิบัติทันที นอกจากนี้ผลกระทบของชนิดของหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ อิทธิพลของชนิดของหินจะมีมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูง การใช้หินย่อยในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำกว่า 0.40 จะสามารถให้กำลังอัดสูงกว่าการใช้กรวดได้ถึงกว่าร้อยละ 30 และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.65 กำลังของคอนกรีตที่ทำจากหินย่อยหรือกรวดจะไม่แตกต่างกันมากนัก

5. อิทธิพลของปริมาณมวลรวม

จากการศึกษากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณของมวลรวมเพิ่มมากขึ้นพบว่าในช่วงการเพิ่มมวลรวมจากร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 20 กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงและเมื่อเพิ่มจากร้อยละ 40 ไปจนถึงร้อยละ 80 กำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลกระทบของมวลรวมต่อกำลังดึงก็มีลักษณะคล้ายกัน คอนกรีตหยาบ (lean concrete) ที่มีปริมาณของมวลรวมมากเมื่อวัดโดยใช้อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีมวลรวมน้อยหรือคอนกรีตแก่ปูน (rich concrete) เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากัน ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ทำให้การหดตัวเกิดขึ้นน้อยลงและการเยิ้มน้ำก็ลดลงเช่นกันจึงทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ดีขึ้น นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่ลดลงทำให้ปริมาณโพรงในคอนกรีตลดลงซึ่งทำให้กำลังดีขึ้น

2.5.1.2 กำลังอัดของคอนกรีต

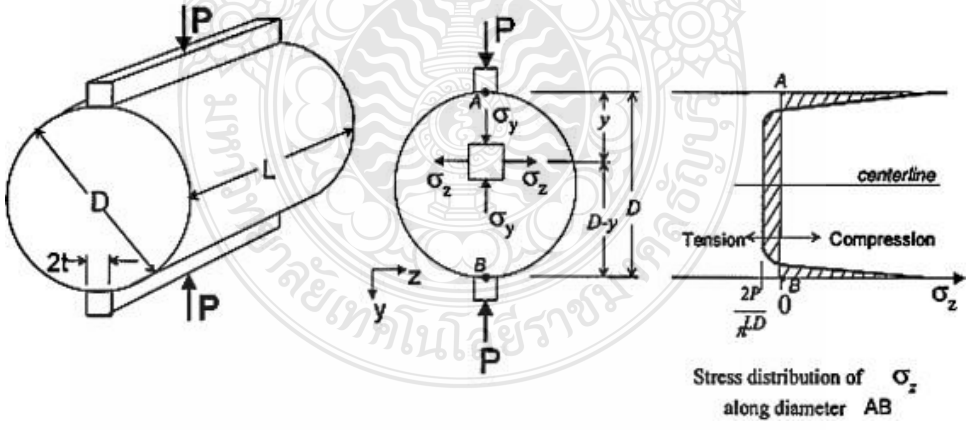
โดยทั่วไปการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กใช้กำลังของคอนกรีตเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ โดยมีสมมุติฐานว่าคอนกรีตรับแรงอัดเป็นหลักโดยไม่สามารถรับแรงดึงได้ ดั้งนั้นการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตจึงต้องมีการควบคุมคุณรูปของคอนกรีตในเรื่องของการรับแรงนอกจากนี้การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งที่กระทำได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบอื่นๆ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังของคอนกรีตที่นิยมใช้กันคือ ตัวอย่างรูปลูกบาศก์และรูปทรงกระบอกซึ่งให้ตัวอย่างรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนกระทั่งตัวอย่างคอนกรีตวิบัติ โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 2 ถึง 4 นาทีต่อตัวอย่าง กำลังอัดที่คอนกรีตรับได้อาจอยู่ในช่วง 100 ถึง 1,000 กก/ซม^2 สำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดาหรือมีค่ามีกว่า 1,000 กก/ซม^2 ในกรณีที่เป็นคอนกรีตกำลังสูงมาก

2.1.5.1.3 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

คอนกรีตรับแรงดึงได้ต่ำมากและเป็นวัสดุที่เปราะ ดังนั้นในการออกแบบคอนกรีตจึงไม่นิยมออกแบบให้คอนกรีตรับแรงดึง แต่มีงานบางประเภท เช่น งานพื้นถนนที่กำหนดให้คอนกรีตรับแรงดึงในรูปโมดูลัสแตกร้าว (modulus of rupture) โดยทั่วไปแรงดึงของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของแรงอัด ดังนั้นในการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงสมมติให้คอนกรีตรับแรงดึงไม่ได้เลยและให้เหล็กรับแรงดึงทั้งหมด

การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตมีอยู่ 2 วิธีได้แก่ วิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม วิธีทดสอบดึงโดยตรง คือ การดึงตัวอย่างคอนกรีตให้ขาดออกจากกัน แต่การยึดจับตัวอย่างคอนกรีตเพื่อดึง ทำได้ยากมากจึงต้องทำการดัดแปลงอุปกรณ์ในการจับชิ้นตัวอย่างคอนกรีตให้สามารถรับแรงดึงโดยตรง นอกจากนี้ถ้าดึงคอนกรีตไม่ตรงแนวศูนย์กลางจริงๆจะมีแรงบิดหรือโมเมนต์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยทำให้คอนกรีตแตกหรือหักด้วยแรงอื่นไม่ใช่แรงดึงโดยตรง ดังนั้นผลการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตจากอุปกรณ์ที่ดัดแปลงขึ้นจึงมีผลไม่แน่นอนและยากต่อการทดสอบ

การทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีทางอ้อมเป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะทำได้ง่าย สะดวกและให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจ การทดสอบแรงดึงโดยวิธีดัด (bending) หรือเรียกการทดสอบว่า ค่าโมดูลัสแตกร้าวและการทดสอบแรงดึงโดยวิธีผ่าซีก (splitting tensile test) เป็นการทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีอ้อมที่ใช้กันมาก และพบว่าค่าแรงดึงที่ได้จากการทดสอบด้วยแรงดัดหรือโมดูลัสแตกร้าวมีค่าสูงกว่าแรงดึงที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการผ่าซีก ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทดสอบกำลังดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต (splitting tensile strength)

ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตจะมีค่าสูงกว่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตประมาณร้อยละ 60 ถึง 100 และมีค่าประมาณร้อยละ 11 ถึง 23 ของกำลังอัด ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังอัดประมาณ 250 กก/ซม^2 จะมีประมาณร้อยละ 15 ของกำลังอัด การใช้หินที่มีผิวหยาบและรูปร่างเป็น

เหลี่ยมจะทำให้การเพิ่มกำลังดัดสูงกว่าการเพิ่มกำลังอัด ในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้กำหนดให้โมดูลัสแตกร้าว (R) ของคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา ดังสมการ (2.14) และให้ปรับค่าลดลงเมื่อเป็นคอนกรีตน้ำหนักเบา

$$R = 2.0 \sqrt{f_c'} \text{ กก/ซม}^2 \qquad (2.14)$$

เมื่อ f_c' คือ กำลังอัดของคอนกรีตมีหน่วยเป็น กก/ซม.^{2}

2.1.6 น้ำทะเล

น้ำทะเล คือ น้ำเค็มในทะเลและมหาสมุทร ซึ่งปกคลุมพื้นผิวของโลกอยู่ถึงสาม ในสี่ส่วน ในบรรดาแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งปวง น้ำทะเลมีอยู่เป็นปริมาณมากที่สุด น้ำทะเลมีรสเค็ม เพราะมีเกลือและแร่ธาตุหลายชนิดละลายปนอยู่ เกลือที่มี มากที่สุดคือ เกลือแกง หรือโซเดียมคลอไรด์ โดยทั่วไปมหาสมุทรทั่วโลกมีความเค็ม (salinity) ประมาณร้อยละ 3.5 หรือ 35 ส่วนต่อพันส่วน นั่นหมายความว่าในน้ำทะเลทุกๆ 1 กิโลกรัม จะพบเกลืออยู่ 35 กรัม (ส่วนมากจะพบในรูปของไอออนโซเดียมคลอไรด์ (Na^+, Cl^-) ความหนาแน่นเฉลี่ยที่ผิวน้ำของมหาสมุทรอยู่ที่ 1.025 กรัมต่อมิลลิลิตร น้ำทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำจืด (น้ำจืดมีความหนาแน่นสูงสุดที่ 1.000 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) เพราะน้ำทะเลมีความหนักของเกลือและ electrostriction (ไฟฟ้าที่ไม่นำกระแส แต่อยู่ในเรื่องของสนามไฟฟ้า) จุดเยือกแข็งของน้ำทะเลอยู่ที่อุณหภูมิ –2 องศาเซลเซียสหรือ 28.4 องศาฟาเรนไฮต์ นับว่ามากกว่าน้ำจืด ในน้ำทะเลที่มีความเข้มข้น 35 ส่วนต่อพันส่วน (35 ppt) [13] ในน้ำทะเลประกอบด้วยเกลือคลอไรด์และซัลเฟตของโซเดียม และแมกนีเซียม ประมาณ 3.5% ในจำนวนนี้เป็นเกลือโซเดียม คลอไรด์มากถึง 78% ทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังในระยะแรกเพิ่มขึ้น แต่ในระยะยาว คอนกรีตจะมีกำลังลดลง เพราะเกลือซัลเฟตจะทำให้การตกพลิกของ Ettringite ช้าลง [12]

2.1.7 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (pozzolanic materials) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุอาจจะมีสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมีแต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตามบางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีแต่ในสัดส่วนผสมใดๆก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.1.7.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ชนิดของวัสดุปอซโซลาน มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และปอซโซลานดัดแปลง มีรายละเอียดดังนี้

1. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) เกิดขึ้นเอง ตามธรรมชาติเมื่อต้องการนำไปใช้งานต้องนำมาบด ให้ละเอียดก่อน ได้แก่ หินดินดาน (shales) เศษหินภูเขาไฟ (tuff) เถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) หินภูมิไซท์ (pumisite) หินโอเพิลเหลือง (opaline) หินชั้น (shale) หินเชิร์ต (chert) และหินปูนปอซโซลาน (limestone)

2. ปอซโซลานดัดแปลง ((modify pozzolan) เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตหรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by product) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้น ซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟูม (silica fume) ได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

2.1.7.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O3) ในวัสดุปอซโซลานเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ (2.15) และ (2.16)

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2+2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2\ 3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \qquad (2.15)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2+2AlO_3 \longrightarrow 3CaO.2AlO_3\ 3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \qquad (2.16)$$

ซึ่งสารประกอบทั้ง 2 ตัว คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานทำให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดที่ดีขึ้นเมื่อรวมกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดก่อนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะทำให้ได้ค่าการอัดตัวรวมของซีเมนต์เพสต์ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) เกิดขึ้นตามหลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นแล้วโดยปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยอิสระ เพราะต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ ASTM C 618 ได้นิยามสารปอซโซลานหมายถึง สารซิลิเซียส หรือสารอลูมิโน ซิลิเซียส โดยทั่วไปสารปอซโซลานจะมีสมบัติเป็นวัตถุประสานน้อยมาก แต่ในกรณีที่มีสารปอซโซลาน ที่มีความละเอียดสูงและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีที่อุณหภูมิปกติกับด่างอัลคาไลด์ เช่น แคลเซียมไอดรอกไซด์ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสาน โดยมาตรฐานได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน โดยมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์ควบคุม และกำหนดให้ขนาดของวัสดุปอซโซลานมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 และมีอัตราส่วนน้ำหนักต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.485

2.1.7.3 เถ้าลอย (fly ash)

เป็นผลพลอยได้ (by product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่ขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า

1. ชนิดของเถ้าลอยมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

ก. ชนิด F หรือ Class F

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (anthracite) และบิทูมินัส (bituminous) มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica, SiO_2) อลูมินา (alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F จะเป็นเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ โดยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide : CaO) ต่ำ สำหรับซิลิกา (SiO_2) ได้มาจากแร่ดินเหนียว และควอรตซ์ โดยถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส ดังนั้นจะว่าพบมีแร่ดินเหนียวสูง ส่งผลทำให้เถ้าลอยที่มีซิลิกา (SiO_2) สูง

ข. ชนิด C หรือ Class C

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ โดยมีผลรวมปริมาณของซิลิกา (silica, SiO_2) อลูมินา (alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (ferric oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 50 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด C จะมีปริมาณ CaO สูง เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง และสำหรับ อลูมินา (Al_2O_3) มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์

ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากจะมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C 618 [14]

ส่วนประกอบทางเคมี	ขนิดเถ้าลอย ชนิด F (ร้อยละ)	ชนิด C (ร้อยละ)
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ (SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3) อย่างต่ำ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงสุด	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O	1.5	1.5

2. ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

ความถ่วงจำเพาะเถ้าลอยโดยปกติแล้วจะมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 แต่อนุภาคที่มีลักษณะกลมและกลวง (cenosheres) จะมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.0 จึงสามารถลอยน้ำได้ เถ้าลอยที่มีปริมาณเหล็กสูงจะมีค่าความถ่วงจำเพาะแนวโน้มที่สูง แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนสูงค่าความถ่วงจำเพาะจะมีแนวโน้มลดลง

3. ขนาดและความละเอียดของเถ้าลอย

อนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน ความละเอียดของเถ้าลอยนิยมคำนวณโดยใช้การวัดพื้นที่ผิว โดยเถ้าลอยส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวระหว่าง 2,500-5,000 ซม^2/ก เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน (blaine) และค่าความละเอียดของเถ้าลอยยังวัดได้จากปริมาณผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐาน (sieve analysis) ซึ่งทั่วไปปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 80 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 6 ถึง 25 โดยน้ำหนักปริมาณเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 50 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 16 ถึง 40 โดยน้ำหนักและค้างบนตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร มีปริมาณ ร้อยละ 3 ถึง 14 โดยน้ำหนักค่าความละเอียดจะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของคอนกรีตนั่นคือเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถต้านทานแรงอัดสูงขึ้น

4. พื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอย

เถ้าลอยที่ได้จะลอยปะปนมากับก๊าซความร้อนจากปล่องควันและจะถูกจับโดยเครื่องดักจับผงฝุ่น (electrostatic precipitator) โดยจะมีความละเอียดอยู่ในช่วง 4,000 ถึง 7,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม โดยการดักจับสมัยใหม่สามารถดักจับเถ้าลอยที่มีความละเอียดได้ถึง 12,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งทั่วไปค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถหาได้จากเครื่องมือทดสอบหาความฟูมอากาศเบลน (blaine

Air Permeability Apparatus) โดยความละเอียดของเถ้าลอยจากวิธีนี้อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 5,500 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากจะมีพื้นผิวมากส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดีกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า

5. องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบไปด้วย SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO, Na_2O, K_2O, SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on lgnition, LOI) เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและลักษณะการเผาถ่านหินอย่างไรก็ดีต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต ตัวอย่างเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแหล่งต่างๆ [15]

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)								
เถ้าลอย	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.66	2.93	1.43	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	0.47	0.66	3.63	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	0.30	3.08	3.34	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	0.61	2.38	10.56	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	0.72	0.28	19.68	3.65

6. ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอยซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์(Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม หรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมีได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ร้อยละข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 [16]

ส่วนประกอบทางเคมี	ชนิดชั้นคุณภาพเถ้าลอย			
	ชั้น 1	ชั้น 2		ชั้น 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2)	30.0	30.0	30.0	30.0
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO)	-	>10.0	>10.0	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	5.0	5.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด	3.0	3.0	2.0	2.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	6.0	6.0	6.0	6.0

7. ความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

เถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานได้ง่ายขึ้น และต้องการน้ำลดลง เมื่อกำหนดให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน เถ้าลอยนอกจากสามารถลดปริมาณน้ำได้แล้ว ในหลายกรณียังพบว่าเพิ่มความสามารถของการทำงานของมอร์ต้าร์ และคอนกรีตได้โดยคงปริมาณน้ำไว้ ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

8. ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง เถ้าลอยที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น และในทางกลับกันเถ้าลอยที่หยาบมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวช้าลง เถ้าลอยที่มีปริมาณ SO_3 สูงจะมีเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นมากได้

9. การขยายตัวของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ดีแล้วไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงในด้านของปริมาตรมากเกินไป สิ่งที่ทำให้เกิดการขยายตัวสำหรับซีเมนต์เพสต์ คือ ปฏิกิริยาระหว่างน้ำในซีเมนต์เพสต์กับสารประเภทหินปูน แมกนีเซียม และแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งวิธีการทดสอบการขยายตัวในเตาออโตเคลฟ (Autoclave) จะทำการทดสอบโดยให้หล่อซีเมนต์เพสต์ แล้วบ่มในสภาพชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะเร่งปฏิกิริยาโดยให้ความร้อนและเพิ่มความดัน โดยคงสภาพความร้อนและความดันในช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นทำการลดความร้อนและ ความดันให้อยู่ในสภาวะปกติ แล้ววัดการขยายตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งสำหรับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แล้วไม่ควรมีการขยายตัวเกินร้อยละ 0.8 ของความยาวเดิม

ตัวอย่าง หาค่าการขยายตัวของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยคำนวณ (ร้อยละ) จากสมการ (2.17)

$$E,\% = (l_1-l_2 / l_0) \times 100 \qquad (2.17)$$

โดยที่ l_0 = ความยาวหลังการให้ความร้อน, มิลลิเมตร

l_1 = ความยาวก่อนการให้ความร้อน, มิลลิเมตร

ให้การคำนวณที่ได้มีความละเอียดถึง 0.01 % สำหรับความยาวหลังการให้ความร้อนลดลงให้ใช้เครื่องหมายลบหน้าค่าร้อยละ

10. กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยในอายุต้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าลอย โดยความละเอียดสูงจะให้กำลังในระยะต้นสูงเนื่องจากความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาส่วนเถ้าลอยซึ่งได้จากการเผาโดยตรงจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำเพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน ดังนั้นเมื่ออายุมากขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบสามารถมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยได้โดยเฉพาะกรณีที่เถ้าลอยมีความละเอียดสูง เช่น การใช้เถ้าลอยบดละเอียดซึ่งมีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตคุณภาพสูงโดยมีสารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับความสามารถในการเท พบว่าในช่วงอายุต้น 3 ถึง 7 วัน คอนกรีตผสมเถ้าลอยบดละเอียดมีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่เมื่ออายุ 28 และ 56 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยบดละเอียดร้อยละ 30 มีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่การแทนที่เถ้าลอยบดละเอียดในปริมาณที่สูงกว่านี้จะให้กำลังอัดต่ำทั้งอายุต้นและอายุปลาย

การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัดประลัยซึ่งแสดงถึงกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยที่มีส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดค่อนข้างสูง แต่การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย

2.1.7 เถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตา (bottom ash) เป็นผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าและมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับเถ้าลอย (fly ash) แต่เถ้าก้นเตามีขนาดค่อนข้างใหญ่และพรุน หากนำเอามาใช้ต้องปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพให้เหมาะสมโดยการบดให้อนุภาคลดลงจึงจะสามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้

1. องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาองค์จะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของถ่านหิน ขนาดของถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาจะประกอบไปด้วยธาตุโลหะประมาณร้อยละ 80-90 โดยน้ำหนัก ได้แก่ Si Fe Ca Al Na K และส่วนย่อยๆอีก ได้แก่ Mg Ti Cl Mn Ba Zn Cu Pb และ Cr

โดยเถ้าก้นเตาส่วนที่ติดอยู่กับตะแกรงก้นเตาประมาณร้อยละ 1-3 จะมี Pb Al Cu และ Zn อย่างเข้มข้นสำหรับธาตุอื่นๆที่อยู่ในเถ้าก้นเตา เช่น แคลเซียม จะมีมากจากการเผาถ่านหินลิหไนต์และซับบิทูมินัส ส่วนซัลเฟตมีปริมาณน้อยมากคือ ประมาณร้อยละ 1 เท่านั้น

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

สารประกอบประเภทออกไซด์	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide)	SiO_2	61.0±2.0
อลูมิเนียมออกไซด์ (Alunimuim Oxide)	Al_2O_3	25.4±0.3
เฟอร์ริกออกไซด์ (Feric Oxide)	Fe_2O_3	6.6±2.5
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)	TiO_2	0.8±0.3
แมงกานีสออกไซด์ (Manganese Oxide)	Mn_2O_3	0.1±0.05
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)	CaO	1.5±0.3
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)	MgO	1.0±0.05
โซเดียมออกไซด์ (Sodium Oxide)	Na_2O	0.9±0.1
โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium Oxide)	K_2O	0.2±0.15

2. คุณสมบัติเชิงกลของเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุเม็ดละเอียด พื้นที่ผิวมาก ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าน้อย เป็นวัสดุประเภท Non-plastic มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าวัสดุมวงรวมชนิดอื่น และมีความต้านทานต่อการสึกหรอและความคงทนน้อยเมื่อเทียบกับมวลรวมโดยทั่วไป

3. การใช้เถ้าก้นเตาในงานคอนกรีต

เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ มีลักษณะพรุน เป็นเหลี่ยมมุม พื่นที่ผวิจำเพาะมาก และดูดซึมน้ำสูง ทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาต้องการน้ำในปริมาณที่เพิ่มขึ้นซึ่งอาจจะต้องใช้น้ำเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 25-30 แต่การผสมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นในคอนกรีตจะส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลง ดังนั้นอาจจะใช้สารลดน้ำผสมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตจะช่วยลดปริมาณในส่วนผสมให้ลดลง ดังนั้นอาจจะใช้สารลดน้ำผสมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตจะช่วยลดปริมาณในส่วนผสมให้ลดลงไดเพื่อให้คุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ

2.1.8 ผงหินปูน

ผงหินปูน (limestone powder) เป็นผลพลอยได้ (by product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบเคมี ส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุ

เฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

1. วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้ซัลเฟตอีกด้วยในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$)

อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีอย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และ/หรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ (2.18) และสมการที่ (2.19)

$$CaCO_3+H_2O+heat \longrightarrow Ca(OH)_2+CO_2 \qquad (2.18)$$

$$MgCO_3+H_2O+heat \longrightarrow Mg(OH)_2+CO_2 \qquad (2.19)$$

2. วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำดังสมการที่ (2.20)

$$CaO+H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \qquad (2.20)$$

ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ดังสมกำรที่ 2.9 และ 2.10

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูนและวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสานซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.1.9 การหดตัวแบบออโตจีนัส [17]

การหดตัวของคอนกรีตมักจะเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ การหดตัวของคอนกรีตมีหลายประเภทเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆกัน และเกิดขึ้นจากสาเหตุที่แตกต่างกันไป ชนิดของการหดตัวอาจสรุปได้เป็น 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (chemical shrinkage หรือ hydration shrinkage)

2. การหดตัวแบบออโตจีนัส (autogenous shrinkage)

3. การหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage)

4. การหดตัวเนื่องจากคาร์บอเนชั่น (carbonation shrinkage)

การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงก่อนการก่อตัว เป็นการหดตัวที่มักไม่ก่อให้เกิดผลเสียหายต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว และมักไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต เนื่องจากจะเกิดมากในช่วงเวลาเริ่มแรกก่อนเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตมักจะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยไม่เกิดหน่วยแรงและลักษณะของการหดตัวจะเป็นการสร้างช่องว่างในเจล (gel pores) ของผลิตผลของไฮเดรชั่น ซึ่งจะเป็นผลทางจุลภาค (microscopic volume reduction) จึงไม่ค่อยมีผลต่อปริมาตรของคอนกรีตโดยรวม ดังนั้นการหดตัวประเภทนี้ในช่วงก่อนการก่อตัวของคอนกรีตจึงไม่ค่อยได้รับความสนใจมากนัก แต่ส่วนที่หดตัวหลังจากคอนกรีตก่อตัวสุดท้ายแล้ว จะเป็นปัญหาและจะคิดรวมอยู่ในการหดตัวแบบออโตจีนัส

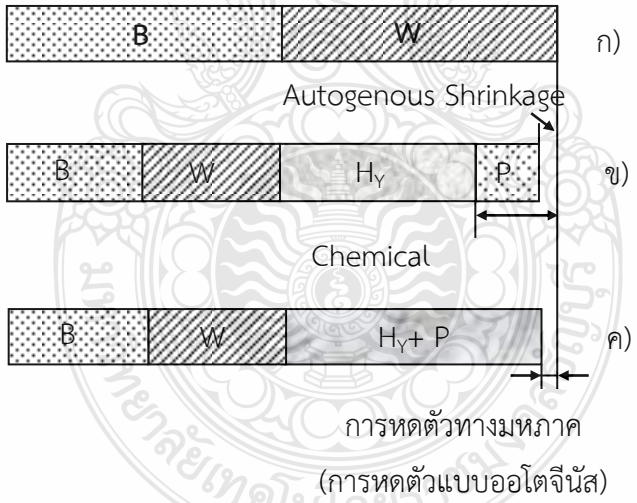
การหดตัวอีก 3 แบบที่เหลือ เป็นการหดตัวชนิดที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยรวมของคอนกรีตซึ่งจะนำไปสู่การแตกร้าวได้ถ้ามีการยึดรั้ง และจำเป็นต้องคำนึงถึงในการออกแบบคอนกรีตให้คงทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งรายละเอียดของการหดตัวเหล่านี้จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

1) กลไกของการหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (chemical shrinkage) ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีต รวมกับอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างคาปิลลารี (capillary pores) ในเพสต์ เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ ทำให้เกิด capillary suction ขึ้นในช่องว่างคาปิลลารี มีผลให้คอนกรีตหดตัวจากแรง capillary suction นี้ วัสดุประสานในที่นี้หมายความรวมถึง ปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานทั้งหลาย เช่น เถ้าลอย เถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็ก และซิลิกาฟูม เป็นต้น การหดตัวแบบออโตจีนัสแตกต่างจากการหดตัวแบบแห้งตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีตเอง การหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติ จะมีผลต่อปริมาตรหลังจากที่เทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลในทางโครงสร้างหลังจากที่

คอนกรีตก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยมวัดค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น

ในอดีต การหดตัวแบบนี้ไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้กันในอดีตมักเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคาปิลลารี (capillary pores) มาก มีขนาดใหญ่และต่อเนื่อง ดังนั้นความชื้นในคอนกรีตจึงสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง และน้ำจากการบ่มก็สามารถเข้าถึงภายในคอนกรีตได้ ทำให้การหดตัวแบบออโตจีเนียสในคอนกรีตเหล่านี้มีค่าต่ำจนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบ แต่ในทางตรงกันข้าม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตชนิดใหม่ๆขึ้นมาหลายชนิด ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและมีปริมาณเพสต์มาก เช่น คอนกรีตกำลังสูง (high strength concrete) และคอนกรีตที่ไม่ต้องใช้เครื่องเขย่า (self-compacting concrete) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาแล้ว คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคาปิลลารีที่น้อยกว่า มีขนาดเล็กกว่า และมีความต่อเนื่องของช่องว่างคาปิลลารีน้อยกว่าหรืออีกนัยหนึ่ง มีค่าความซึมน้ำต่ำมาก ดังนั้นเมื่อความชื้นในช่องว่างคาปิลลารีถูกใช้ไปในปฏิกิริยา จึงเป็นการยากที่ความชื้นจากส่วนอื่น หรือความชื้นจากการบ่มจะเข้ามาเสริมในบริเวณดังกล่าวได จึงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้สูงจนไม่สามารถละเลยได้ในการออกแบบ



ซึ่ง B : วัสดุประสาน

W : น้ำ

P : ช่องว่างที่แทรกตัวอยู่ในผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

H_Y: ผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

รูปที่ 2.3 แบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และออโตจีนัส

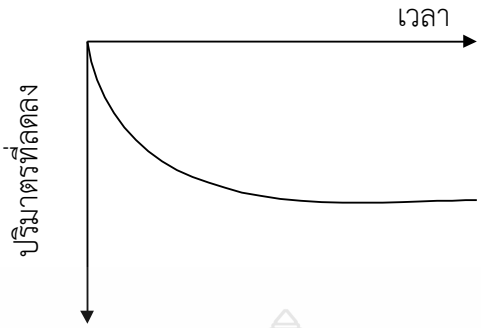
รูปที่ 2.3 อธิบายถึงแบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี และออโตจีนัส โดย ก) ปริมาตรของวัสดุประสานและน้ำ ก่อนทำการผสม ข) ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นไปแล้วบางส่วน ปริมาตรที่ลดลงทั้งหมดนี้คือ การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (chemical Shrinkage) ซึ่งมักไม่มีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต เพราะการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกๆ และการหดตัวที่เกิดขึ้นมักจะเกิดเป็นช่องว่างภายในผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น การหดตัวแบบนี้เป็นผลทางจุลภาค (microscopic volume reduction) ซึ่งไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในคอนกรีต หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ความชื้นบางส่วนจะถูกดึงจากช่องว่างคาปิลลารี เพื่อไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เรียกขบวนการนี้ว่า “การสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีต” ถ้าไม่มีน้ำเข้าไปทดแทนในส่วนที่นำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวขึ้น เรียกว่าการหดตัวแบบออโตจีนัส ซึ่งการหดตัวแบบนี้ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้น เป็นผล

ทางมหภาค (macroscopic volume reduction) เมื่อหน่วยแรงดึงนี้มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้น ค) แสดงส่วนที่หดตัวทางมหภาค โดยส่วนที่หดตัวทางจุลภาคจะเป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นในผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในคอนกรีต ส่วนการหดตัวทางมหภาคเป็นการหดตัวที่มีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในคอนกรีต

การหดตัวแบบนี้จะมีค่ามากขึ้นถ้าคอนกรีตยิ่งมีความซึมน้ำต่ำ เช่น คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมหรือวัสดุปอซโซลานที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของปูนซีเมนต์มาก เช่น เถ้าลอยที่ผ่านการคัดขนาด เป็นต้น คอนกรีตที่ใช้เถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็กซึ่งมักจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ในปริมาณมาก มักจะมีการหดตัวแบบออโตจีนัสสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นเถ้าตะกรันที่บดจนละเอียดมาก สำหรับปูนซีเมนต์ได้มีการพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูงจะมีการหดตัวแบบออโตจีนัสสูง การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบนี้ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการยึดรั้งเกิดขึ้น ดังนั้นบางครั้งอาจพบการแตกร้าวขึ้นภายในคอนกรีตโดยที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจากบริเวณผิวของคอนกรีตได้ เนื่องจากคอนกรีตข้างในหดตัว แต่คอนกรีตบริเวณผิวซึ่งได้รับน้ำจากการบ่มที่เพียงพอนั้นไม่หดตัว

บริเวณที่อาจจะเกิดรอยแตกร้าวจากการหดตัวแบบออโตจีนัส บริเวณที่น้ำบ่มคอนกรีตไม่สามารถเข้าไปถึงได้อย่างเต็มที่ และเป็นบริเวณที่ถูกยึดรั้งด้วยสิ่งที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่า เช่น ถูกยึดรั้งโดยเหล็กเสริม ถูกยึดรั้งโดยคอนกรีตหเดิมที่เทไว้แล้วหรือแม้แต่ถูกยึดรั้งโดยเนื้อคอนกรีตบริเวณผิวที่ได้รับการบ่มอย่างเพียงพอ เป็นต้น

ช่วงเวลาที่เกิดการหดตัวแบบออโตจีนัส



รูปที่ 2.4 อัตราการหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัสจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ เนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดในขณะที่มีปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ จึงทำให้การหดตัวแบบนี้มีอัตราสูงในช่วงวันแรก ๆ และจะค่อย ๆ มีอัตราต่ำลงเมื่อระยะเวลายาวนานออกไป ดังแสดงในรูป 2.4

2) ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบออโตจีนัส

1. ความเร็วของการดำเนินปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยมากถ้าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดเร็ว ก็จะทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดเร็วและสูงตามไปด้วย ดังนั้นการหดตัวแบบออโตจีนัสจะสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิการบ่มสูงขึ้น ในปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเร็วขึ้น เช่น มีปริมาณ C_3A สูง เป็นต้น

2. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ก็จะทำให้เกิดการหดตัวออโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากความซึมน้ำจะต่ำลง และขนาดของช่องว่างคาปิลลารี (capillary pores) ก็เล็กลงด้วย

3. ลักษณะของโครงสร้างช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ยิ่งมีขนาดเล็กและมีความไม่ต่อเนื่องก็จะทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากน้ำอิสระจะเคลื่อนตัวไม่สะดวก และช่องว่างที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดแรงดึงแบบคะปิลลารีสูง

3) ข้อเสนอแนะ วิธีการแก้ไข

1. ใช้เถ้าลอยผสม จากการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นจะช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัสได้ดียิ่งขึ้น และเถ้าลอยที่มีปริมาณ SO_3 สูงจะมีประสิทธิภาพสูงในการช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัส แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ SO_3 สูงเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด

2. ใช้สารช่วยการขยายตัว (expansive agent)

3. เลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A น้อย แต่มีปริมาณ C_2S มาก เช่น ปูนซีเมนต์ประเภท 2 หรือประเภท 4

4. หลีกเลี่ยงการใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่มีความซึมน้ำต่ำเกินความจำเป็น และมีปริมาณเพสต์มากเกินความจำเป็น

2.1.10 การหดตัวแบบแห้ง [17]

การหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) เกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำ และเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเปียกชื้นขึ้นมาใหม่

1) กลไกของการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง มีกลไกการเกิดเช่นเดียวกับการเกิดรอยแตกแบบพลาสติก นั่นคือในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศ มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นในช่องว่างคาปิลลารี (capillary pores) มาก เนื่องจากสูญเสียน้ำอิสระ (free water) ไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคาปิลลารี ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลง หรือหดตัวลงจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการหดตัวนี้ถูกยึดรั้ง ไม่ว่าด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียความชื้น รอยแตกร้าวก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยึดรั้งนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่าสูงกว่ากำลังแรงดึงของคอนกรีตในขณะนั้น การแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะแตกต่างกับการแตกร้าวแบบพลาสติกตรงที่ช่วงเวลาการเกิดการแตกร้าวแบบพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก และสามารถแก้ไขได้ง่ายโดยการตกแต่งผิวคอนกรีตก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว ส่วนการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว ซึ่งไม่สามารถจะตกแต่งผิวใหม่ได้แล้ว

2) ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง

เนื่องจากการหดตัวแบบแห้งเกิดจากการสูญเสียน้ำออกจากคอนกรีตไปสู่บรรยากาศแวดล้อม ดังนั้นปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีต จึงมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งทั้งสิ้น ปัจจัยดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

1.ปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตมาก จะมีปริมาณน้ำอิสระ (free water) มาก น้ำอิสระเป็นน้ำที่สามารถจะระเหยออกจากคอนกรีตไปได้

2. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง จะทำให้มีช่องว่างคาปิลลารี (capillary pores) มาก ปริมาณน้ำอิสระก็จะมากด้วย การที่คอนกรีตมีช่องว่างคาปิลลารีมาก จะทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก

3. ปริมาณมวลรวม โดยปกติแล้วการหดตัวจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยหรือ อีกนัยหนึ่งมีปริมาณมวลรวมมาก ก็จะทำให้เกิดการหดตัวน้อยลงด้วย

4. ชนิดและคุณภาพของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมมักจะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของปริมาตร ดังนั้นมวลรวมจึงมีคุณสมบัติที่จะช่วยต่อต้านการหดตัวในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่าง

ยิ่งถ้ามวลรวมมีโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง การแตะกันของมวลรวมเป็นกลไกที่สำคัญอันหนึ่งของการต้านทานการหดตัวซึ่งเกิดจากซีเมนต์เพสต์ได้ มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก ก็มักจะก่อให้เกิดการหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตมากตามไปด้วย ตัวอย่างมวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก เช่น มวลรวมเบา (light weight aggregate) เป็นต้น ซึ่งปกติแล้วมวลรวมที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงก็มักจะมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำด้วย ทำให้แรงต้านทานการหดตัวต่ำตามไปด้วย ขนาดคละของมวลรวมที่ดี ก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้การหดตัวของคอนกรีตลดลงเนื่องจากจะทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลง

5. ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้สารปอซโซลาน หรือวัสดุผงบางชนิด ก็มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น เถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต และเถ้าลอยบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อย ทำให้ชดเชยการหดตัวได้บางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้เนื่องจากช่วยเพิ่มความแน่นให้กับคอนกรีต การใช้ผงฝุ่นหินก็อาจสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งด้วยเช่นกันถ้าการใช้นั้นไม่เป็นการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีต เป็นต้น

6. อุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น

7. มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็ว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ง่าย

3) บริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งมักจะเกิดขึ้นให้เห็นตรงบริเวณผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ บางครั้งถ้าเป็นผนังบางก็อาจมีรอยแตกข้ามไปถึงพื้นผิวอีกด้านหนึ่งได้ ในกรณีของผิวถนนก็มักจะเห็นรอยแตกตามขวางหรือตามยาว รอยแตกตามมุมช่องเปิดของหน้าต่างหรือประตูก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของบริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

4) ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งมักจะเป็นช่วงเวลาที่หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเป็นต้นไป รอยแตกร้าวนี้อาจจะเพิ่มขึ้นไปได้เรื่อยๆ แม้แต่อายุคอนกรีตจะมากจนเป็นปีแล้วก็ตาม แต่ส่วนใหญ่แล้วมักจะเริ่มเกิดให้เห็นในช่วง 2-3 เดือนแรกหลังจากสิ้นสุดการบ่ม

5) วิธีป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

การป้องกันการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งอาจทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

1. การใส่เหล็กเสริมเพิ่มเพื่อช่วยรับแรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัว

2. การออกแบบให้คอนกรีตมีการหดตัวแบบแห้งต่ำ ซึ่งอาจทำได้ดังนี้

- ลดปริมาณน้ำต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีต ซึ่งอาจใช้น้ำยาลดน้ำช่วย

- ไม่ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณเพสต์มากเกินความจำเป็น

- ใช้สารผสมบางชนิดช่วย เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟูม ผงฝุ่นหิน ซึ่งการเลือกใช้วัสดุเหล่านี้ต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติด้านอื่นที่ต้องการของคอนกรีต และความเหมาะสมในเรื่องราคาประกอบกันด้วย

- ใช้สารช่วยในการขยายตัว (expansive agent)

- ใช้มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำน้อยและมีขนาดคละที่ดี

3) บ่มคอนกรีตให้นานเพียงพอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตที่มีการใช้สารปอซโซลานในปริมาณมาก ยิ่งบ่มคอนกรีตนาน การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตก็จะยิ่งต่ำลง

4) การทาสี ปูกระเบื้อง หรือ เคลือบผิวคอนกรีตด้วยวัสดุต่างๆ ก็จะช่วยให้การหดตัวแบบแห้งลดลง หรืออาจไม่เกิดขึ้นเลยก็ได้

ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

รูปที่ 2.5 ผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่สร้างอยู่กลางแจ้ง เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Falah M. Wegian [1] ได้ศึกษาผลกระทบของการผสมและการบ่มคอนกรีตด้วยน้ำทะเลที่มีต่อกำลังอัด กำลังดึงแยก กำลังดัดและแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีต ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มในน้ำทะเลมีความสามารถในการรับแรงอัดแรงดึง การดัด และแรงยึดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มในน้ำจืดที่อายุ 7 และ 14 วัน หลังจาก อายุ 28 และ 90 วัน คอนกรีตที่ผสมและบ่มในน้ำจืดจะเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีต ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นจะสร้างความแข็งแรงสูงขึ้นห้าเท่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ กำลังของคอนกรีตยังได้รับผลกระทบจากชนิดและคุณสมบัติของมวลรวมและประเภทของปูนซีเมนต์ อายุและการบ่ม แต่มีอัตราที่ต่ำกว่าผลของปริมาณปูนซีเมนต์ การใช้ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต อาจช่วยต้านทานความเสียหายของคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์และการใช้การใช้ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต (SRC) ในคอนกรีตช่วยเพิ่มความต้านทานของคอนกรีตสำหรับการเสื่อมสภาพของน้ำทะเลและสารละลายเค็ม ควรใช้ความระมัดระวังในการผลิตคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำทะเล

Qingyong Guo และคณะ [2] ได้ศึกษาผลกระทบของการผสมและการบ่มด้วยน้ำทะเลต่อกำลังอัดคอนกรีตที่อายุต่างๆ โดยคอนกรีตผสมด้วยน้ำทะเลแต่บ่มในน้ำจืดและน้ำทะเลในช่วง 90 วัน ผลการศึกษาพบว่า (1) น้ำทะเลมีผลต่อการเพิ่มกำลังของคอนกรีตเมื่อใช้สำหรับผสมและบ่ม โดยในช่วงต้นกำลังอัดจะสูงขึ้น แต่กำลังอัดจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป (2) ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำจืดและบ่มด้วยน้ำทะเลกำลังอัดจะลดลงประมาณร้อยละ 7 ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลจะเห็นได้ชัดเจนว่ากำลังอัดจะลดลงประมาณร้อยละ 15 เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืดที่อายุ 90 วัน

S. O. Osuji and E. Nwankwo [3] ได้ศึกษาผลกระทบของน้ำในทะเลต่อกำลังอัดของคอนกรีต กรณีศึกษาพื้นที่ของสามเหลี่ยมปากแม่น้ำไนจีเรีย ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลให้กำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ประมาณร้อยละ 15 ที่อายุ 28 วัน ส่วนคอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำทะเลแต่บ่มด้วยน้ำจืดให้กำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ประมาณร้อยละ 10 ที่อายุ 28 วัน ส่วนคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำทะเลจะมีกำลังอัดประลัยที่สูงขึ้นร้อยละ 5 ถึง 10 เมื่อเปรียบเทียบกับบ่มด้วยน้ำจืดที่อายุ 28 วัน

B.Sathish kumar และคณะ [4] ได้ศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลต่อกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลให้ กำลังอัดประลัย กำลังดัดและกำลังดึงแยกต่ำกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

Morteza Khatib และคณะ [6] ได้ศึกษา พฤติกรรมการหดตัวของมอร์ต้าร์ผสมกับน้ำทะเล ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/c) เท่ากับ 0.36 และ 0.45 วัสดุประสานใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (OPC) และ มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (FA) ร้อยละ 20 โดย น้ำที่ใช้ในการศึกษา คือน้ำจืดและน้ำทะเล ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ใช้เวลาทดสอบ 65 วัน ผลการศึกษาพบว่า 1) การใช้น้ำ

ทะเลเป็นส่วนผสมในมอร์ต้าร์จะทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่มสูงขึ้น 2) การเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของมอร์ต้าร์ผสมน้ำทะเลในช่วงอายุต้นเป็นสาเหตุให้การหดตัวแบบออโตจีนัสให้เพิ่มสูงขึ้น 3) มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยทั้งที่ผสมด้วยน้ำประปาและน้ำทะเลจะเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมอร์ต้าร์อายุมากขึ้น 4) มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยที่ใช้น้ำทะเลผสม จะเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงอายุต้นของน้ำทะเล เมื่อมอร์ต้าร์มีอายุมากขึ้นจึงเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสที่เพิ่มสูงขึ้น 5) การใช้น้ำทะเลมีผลกระทบไม่มากต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ w/c เท่ากับ 0.36 6) ในทางกลับกันน้ำทะเลจะทำให้การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ w/c เท่ากับ 0.45 เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด 7) การหดตัวแบบแห้งที่เพิ่มขึ้นน่าจะเกิดจากการกระจายขนาดรูขุมขนที่ละเอียดขึ้นและการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสูญเสียมวล 8) การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตผสมน้ำทะเล อาจทำให้การหดตัวแบบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดปัญหาได้ 9) น้ำทะเลจะเพิ่มการหดตัวแบบแห้งและการหดแบบออโตจีนัสให้สูงขึ้น ดังนั้นควรใช้ความระมัดระวังเมื่อใช้คอนกรีตผสมน้ำทะเลในการใช้งานที่อาจเกิดปัญหาการหดตัวได้ 10) อย่างไรก็ตามการใช้คอนกรีตผสมน้ำทะเลส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ชายฝั่งซึ่งการหดตัวอาจไม่น่ากังวลเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์สูง

ปิติศานต์ กร้ำมาตร [7] ได้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ผลการศึกษา พบว่าความต้องการน้ำของเพสปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่าในขณะที่เพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย มีความต้องการน้ำน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการก่อตัว (ระยะต้นและระยะปลาย) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าแกลบและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความพรุนที่ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าแกลบและแทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยเถ้าลอย มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนโดยที่การแทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 4 ไมโครเมตร จะส่งผลให้ค่าการหดตัวแห้งมีน้อยกว่าผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร และสุดท้ายพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนมีผลให้กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์และของคอนกรีตช่วงอายุต้นมีแนวโน้มมากกว่าหรือใกล้เคียง(ถ้าแทนที่ในปริมาณที่เหมาะสม) แต่เมื่ออายุมากขึ้นกลับให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่กำลังประลัยของมอร์ต้าร์และคอนกรีตเถ้าลอยช่วงอายุต้นน้อยกว่า แต่เมื่ออายุมอร์ต้าร์มากขึ้นมีค่าใกล้เคียง เมื่อเทียบกับปูนซีแมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ยงยุทธ วัฒนกุล [8] ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนตและความต้านทานซัลเฟตของคอนกรตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ผลการศึกษา พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย

และเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เทียบเท่ากับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยและเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีระยะเวลาการก่อตัวที่มากขึ้น ในขณะที่เพสต์แทนที่ด้วยผงหินปูนมีระยะเวลาการก่อตัวที่ใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนค่ายุบตัวของคอนกรีต จะไปในทิศทางผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ สำหรับความพรุนของคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนให้ค่าความพรุนของคอนกรีตน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในด้านกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอย และเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนจะค่าน้อยกว่าเมื่อไม่แทนที่ โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

อรรถสิทธิ์ แสงระยับ [9] ได้ศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ผลการศึกษา พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่าน้อยกว่าในขณะที่ของเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP มีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยเร็วกว่าของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime สูง ส่งผลให้การก่อตัวของเพสต์ที่เร็วขึ้น ส่วนการขยายตัวในเตาออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime สูงให้ค่าที่มากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอยที่มีปริมาณ free lime ต่ำมีค่าใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้พบว่า การหดตัวแบบออโตจีนัส และแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์เถ้าลอย BLCP มีค่าที่มากกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะ ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่ามากกว่า ในขณะที่ของเถ้าลอย BLCP มีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่น้อย ทำให้กำลังมากนั้น เถ้าลอยที่มีผลรวมของปริมาณ SiO_2 กับ Al_2O_3 มาก ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มากกว่า

บวร มณีรัตน์ [10] ได้ศึกษาผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยผลการศึกษา พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่าน้อยกวาของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ในขณะที่การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน โดยการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดดีกว่าของ OPC ล้วน โดยการ

ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน สุดท้ายพบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าน้อยกวาของ OPC ล้วน ยกเว้นมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยที่มี แคลเซียมออกไซด์อิสระ สูง มีแนวโน้มให้ค่าการขยายตัวที่ใกล้เคียงกบของ OPC ล้วน สุดท้ายการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก และการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

สุรสิทธิ์ เพาะบุญ [11] ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ผลการศึกษา พบว่ากำลังอัดประลัยที่อายุช่วงต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่คอนกรีตผสมผงหินปูนและเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดประลัยที่ระยะยาวมีแนวโน้มสูงกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังอัดประลัย นอกจากนี้พบว่า ความต้านทานแทรกซึมของคลอไรด์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนดีกว่าค่อนข้างชัดเจนเมื่อเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สุดท้ายพบว่า ความละเอียดของผงหินปูนมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติของคอนกรีต โดยผงหินปูนที่มีความละเอียดสูงกว่ามีผลทำให้สมบัติของคอนกรีตที่ดีกว่าของคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนที่มีความละเอียดต่ำกว่า

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด ผงหินปูน ทราย หิน น้ำประปา และน้ำทะเล

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน ASTM C 150 หรือ มอก.80-2517 โดยใช้ปูนซีเมนต์ที่ใหม่ไม่จับตัวเป็นก้อน

2. เถ้าลอย ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง

3. เถ้าก้นเตาบดละเอียด โดยใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มาบดให้ละเอียด

4. ผงหินปูน ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิตมีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นสารตั้งต้น ในอุตสาหกรรมหลายๆประเภท โดยมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8 ไมโครเมตร

5. ทราย ใช้ทรายน้ำจืดที่สะอาดไม่มีดินและสิ่งเจือปนต่าง ๆ

6. หิน ใช้หินที่ไม่มีสิ่งเจือปน นำมาล้างด้วยน้ำสะอาด

7. น้ำจืด ใช้น้ำประปามีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในช่วง 7 ถึง 8

8. น้ำทะเล ใช้น้ำทะเล จากหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษา มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 สมบัติเบื้องต้นของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน โดยสมบัติเบื้องต้นที่ศึกษามีรายละเอียดดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188 ด้วยขวดเลอชาเตอลิเอร์ (le chatelier flask) (รูปที่ 3.1)

2. ความละเอียดโดยวิธีของเบลน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 204 ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน (air permeability apparatus) (รูปที่ 3.2)

รูปที่ 3.1 ขวดเลอชาเตอลิเอร์ (la chatelier flask)

รูปที่ 3.2 เครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (air permeability apparatus)

3. ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค โดยวิธี scanning electric microscope (SEM)
4. องค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี X-Ray fluorescence (XRF)

3.2.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำทะเล

1. การทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ ด้วยวิธีซิลเวอร์ไนเตรต (argentometric method)
2. การทดสอบเพื่อหาปริมาณซัลเฟต ด้วยวิธีแกรวิเมทรี (gravimetric analysis)
3. การทดสอบความเป็นกรด-ด่าง (pH) วัดด้วยเครื่องมือพี เอช มิเตอร์ (pH meter)

3.2.3 สมบัติด้านซีเมนต์ของ เพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต

สำหรับสมบัติด้านซีเมนต์ของ เพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต ที่ศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ การก่อตัวของเพสต์ การขยายตัวออโตเคลฟของเพสต์ ค่าการไหลของมอร์ต้าร์ ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต กำลังอัดประลัยของคอนกรีต และกำลังดึงแยกของคอนกรีต ซึ่งมีรายละเอียดและวิธีการศึกษาดังนี้

1. ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

การทดสอบปริมาณน้ำที่เหมาะสม (normal consistency) ของเพสต์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 187 ด้วยเครื่องมือเข็มไวแคต (vicat needles) (รูปที่ 3.3)

รูปที่ 3.3 เครื่องมือทดสอบแบบไวแคต (vicat needles)

2. การก่อตัวของเพสต์

การทดสอบหาระยะเวลาก่อตัว (setting time) ของเพสต์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 191 โดยใช้เข็มไวแคต

3. การขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์

การทดสอบการขยายตัวแบบออโตเคลฟ (autoclave expansion) ของเพสต์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 151/C 151M โดยใช้เครื่องวัดความยาว (length comparator) (รูปที่ 3.4) วัดความยาวที่เปลี่ยนแปลง การเตรียมตัวอย่างใช้แท่งทดสอบเพสต์ที่เตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.5) ในแต่ละสัดส่วนผสมเพสต์ใช้แท่งตัวอย่าง 1 ชิ้น หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างเพสต์ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างเพสต์วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น แล้วนำชิ้น

ตัวอย่างเพสต์ไปเข้าหม้อต้ม autoclave (รูปที่ 3.6) โดยน้ำที่อยู่ในหม้อต้ม autoclave มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 20–28 องศาเซลเซียส ปรับหม้อต้มให้พร้อมใช้งาน แล้วปรับแรงดันของหม้อต้มให้อยู่ที่ 2 เมกกะปาสคาล ภายในเวลา 45–75 นาที เมื่อแรงดันอยู่ที่ 2 เมกกะปาสคาลแล้ว ให้รักษาแรงดัน 2±0.07 เมกกะปาสคาล ไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อเวลาครบกำหนดแล้วให้ปิดตัว heat supply ปล่อยให้แรงดันลดลงไปที่ 0.07 เมกกะปาสคาล ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นเปิดฝาหม้อต้ม autoclave นำตัวอย่างเพสต์แช่น้ำที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้จนอุณหภูมิน้ำลดลงเหลือ 23 องศาเซลเซียส รักษาอุณหภูมิไว้ 15 นาที แล้วนำตัวอย่างเพสต์ที่ทำการทดสอบขึ้นจากน้ำ แล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้าทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เพื่อหาค่าร้อยละของการขยายตัว การหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างเพสต์ เมื่อนำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส นำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน โดยสามารถหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างเพสต์ได้จากสมการ (3.1)

$$\Delta L = [(L_i - L_t)/L_s] \times 100 \qquad (3.1)$$

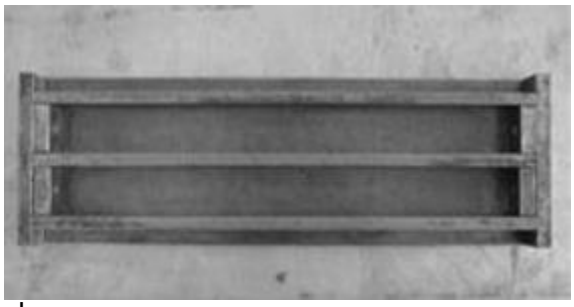
เมื่อ ΔL คือ ค่าการขยายตัวของเพสต์ (%)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของแท่งทดสอบเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานหลังจากบ่มในหม้อต้มออโตเคลฟ (มิลลิเมตร)

L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของแท่งทดสอบเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานก่อนบ่มในหม้อต้มออโตเคลฟ (มิลลิเมตร)

L_s คือ ความยาวมาตรฐานของแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน เท่ากับ 285 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความยาว (length comparator)



รูปที่ 3.5 แบบหล่อมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.6 หม้อนึ่ง autoclave

4. ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

การทดสอบค่าการไหล (flow table) ของมอร์ต้าร์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 230 โดยใช้แบบหล่อและแท่นทดลองการไหล (รูปที่ 3.7)

รูปที่ 3.7 แบบหล่อและแท่นทดลองการไหล

5. ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

การทดสอบค่าการยุบตัว (slump) ของคอนกรีต ด้วยกรวยทดสอบการยุบตัว กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 143 โดยรูปที่ 3.8 แสดงชุดอุปกรณ์ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (slump loss) ของคอนกรีต ด้วยกรวยทดสอบการยุบตัว กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 143 โดยรูปที่ 3.8 ด้วยชุดอุปกรณ์ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต หลังจากหาค่าการยุบตัวเริ่มต้นแล้ว ให้เทคอนกรีตกลับใส่โม่ผสมทิ้งไว้โดยปิดฝาโม่ไม่ให้น้ำระเหยออกแล้วมาหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต ที่เวลา 15 นาที และ 30 นาที

รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์ทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

6. กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน BS 1881 ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 อายุการทดสอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังอัดประลัยของคอนกรีตหลังจากที่ได้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอดออกจากแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำประปา/หรือน้ำทะเล ตลอดเวลาจนถึงอายุที่จะทดสอบ โดยทดสอบกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต ที่อายุ 1 7 28 และ 91 วัน ด้วยเครื่อง UTM (universal testing machine) แสดงดังรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 เครื่อง UTM (universal testing machine)

7. กำลังดึงc[ของคอนกรีต

ในการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตในครั้งนี้ ใช้การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก (splitting tensile test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 496 โดยการทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่เป็นรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน คือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อนตัวอย่างต่อ 1 สัดส่วนผสมต่อ 1 อายุการทดสอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังดึงของคอนกรีต หลังจากที่ได้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอดแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำประปา/หรือน้ำทะเล จนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน โดยการทดสอบแรงดึงคอนกรีต วางตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานในแนวนอนเครื่องทดสอบ แล้วกดด้วยแรงที่เป็นเส้น (line load) จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างแยกออกจากกันเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน แสดงดังรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 การทดสอบกำลังดึงโดยวิธีผ่าซีกของคอนกรีต (splitting tensile strength)

3.2.4 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์

ในการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (autogenous shrinkage) ประยุกต์ใช้จากมาตรฐานASTM C 490 โดยใช้แท่งทดสอบมอร์ต้าร์ ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25.4x25.4x285 มิลลิเมตร จำนวน 3 แท่งทดสอบต่อ 1 สัดส่วนผสม เพื่อหาค่าเฉลี่ยของการหดตัว โดยการหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ไม่มีการสูญเสียความชื้นออกสู่สิ่งแวดล้อม เมื่อหล่อแท่งทดสอบ 24 ชั่วโมง ให้ถอดแบบออกแล้วหุ้มด้วยพลาสติกใส 2 ชั้น และต่อด้วยฟรอยล์อีกชั้นหนึ่ง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักและวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของแท่งทดสอบในแต่ละสัดส่วนผสม จากนั้นเก็บแท่งทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1 3 5 7 14 28 38 และ 52 วัน พร้อมชั่งน้ำหนักของแท่งทดสอบทุกครั้ง เพื่อตรวจสอบว่าไม่มีการระเหยของน้ำออกไป แต่ละอายุการทดสอบจะมีแท่งทดสอบ จำนวน 3 แท่ง เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวที่อายุต่างๆ กัน

การคำนวณร้อยละของการหดตัวแบบออโตจีนัสนั้น โดยที่ค่าความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้นที่ได้จากการวัดครั้งแรก และค่าที่วัดได้ในช่วงอายุบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ นำไปคำนวณร้อยละของการหดตัวแบบออโตจีนัส ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$\Delta L = [(L_t - L_i)/L_g] \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ ΔL คือ ค่าการหดตัวของมอร์ต้าร์ (%)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของแท่งทดสอบมอร์ต้าร์ที่อายุต่างๆที่ต้องการวัดการหดตัว (มิลลิเมตร)

L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของแท่งทดสอบมอร์ต้าร์ (มิลลิเมตร)

L_g คือ ความยาวมาตรฐานของ gauge length หรือ 285 มิลลิเมตร

3.2.5 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ประยุกต์ใช้จากมาตรฐาน ASTM C 490 โดยใช้แท่งทดสอบมอร์ต้าร์ ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25.4x25.4x285 มิลลิเมตร จำนวน 3 แท่งทดสอบต่อ 1 สัดส่วนผสม เพื่อหาค่าเฉลี่ยของการหดตัว โดยหลังจากหล่อแท่งทดสอบแล้วให้ถอดออกจากแบบหล่อที่อายุ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำประปา/หรือน้ำทะเล เป็นเวลา 7 วันแล้วนำแท่งทดสอบทั้ง 3 แท่งของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ขึ้นจากน้ำ แล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า และทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวคงที่มาตรฐานด้วยเครื่องวัดความยาว ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนผสม แล้วนำชิ้น

ตัวอย่างบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30±2 องศาเซลเซียส โดยวางชิ้นตัวอย่างบนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุบ่มในอากาศ 1 3 7 14 28 38 และ 52 วัน แต่ละอายุการทดสอบจะมีตัวอย่างที่ทดสอบ จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวแบบแห้งที่อายุบ่มต่างๆ กัน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

1. สัดส่วนผสมของเพสต์

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้เป็นสัดส่วนผสมของเพสต์ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูนจะใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานโดยน้ำหนักที่ใช้ในการศึกษา ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ การก่อตัวของเพสต์ และการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย		ผงหินปูน	น้ำ	
			แม่เมาะ	BLCP		จืด	ทะเล
		PC	FM	FB	LP	T	S
1	TPC	1.00	-	-	-	ปริมาณที่ใช้ในการทดสอบการก่อตัวของเพสต์ใช้เท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม	ปริมาณที่ใช้ในการทดสอบการก่อตัวของเพสต์ใช้เท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม
2	TPC-20FM	0.80	0.20	-	-		
3	TPC-40FM	0.60	0.40	-	-		
4	TPC-20FB	0.80	-	0.20	-		
5	TPC-5LP	0.95	-	-	0.05		
6	TPC-10LP	0.90	-	-	0.10		
7	TPC-15FM-5LP	0.80	0.15	-	0.05		
8	TPC-15FB-5LP	0.80	-	0.15	0.05		
9	SPC	1.00	-	-	-		
10	SPC-20FM	0.80	0.20	-	-		
11	SPC-40FM	0.60	0.40	-	-		
12	SPC-20FB	0.80	-	0.20	-		
13	SPC-5LP	0.95	-	-	0.05		
14	SPC-10LP	0.90	-	-	0.10		
15	SPC-15FM-5LP	0.80	0.15	-	0.05		
16	SPC-15FB-5LP	0.80	-	0.15	0.05		

2. สัดส่วนผสมของคอนกรีต

สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีตผสมผสมน้ำประปาและน้ำทะเล โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.70 โดยน้ำหนัก ตลอดการศึกษา รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต ที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงของคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.70

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย		ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	
			แม่เมาะ	BLCP				จืด	ทะเล
		PC	FM	FB	LP			T	S
1	TCC-0.70	330	-	-	-	736	980	231	-
2	TCC-20FM-0.70	264	66	-	-	736	959	231	-
3	TCC-40FM-0.70	198	132	-	-	736	941	231	-
4	TCC-20FB-0.70	264	-	66	-	736	959	231	-
5	TCC-5LP-0.70	313	-	-	17	736	978	231	-
6	TCC-10LP-0.70	297	-	-	33	736	975	231	-
7	TCC-15FM-5LP-0.70	264	49	-	17	736	965	231	-
8	TCC-15FB-5LP-0.70	264	-	49	17	736	965	231	-
9	SMC-0.70	330	-	-	-	736	980	-	231
10	SMC-20FM-0.70	264	66	-	-	736	959	-	231
11	SMC-40FM-0.70	198	132	-	-	736	941	-	231
12	SMC-20FB-0.70	264	-	66	-	736	959	-	231
13	SMC-5LP-0.70	313	-	-	17	736	978	-	231
14	SMC-10LP-0.70	297	-	-	33	736	975	-	231
15	SMC-15FM-5LP-0.70	264	49	-	17	736	965	-	231
16	SMC-15FB-5LP-0.70	264	-	49	17	736	965	-	231

3. สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์

สำหรับสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ที่ใช้ในการทดสอบค่าการไหล การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมน้ำประปาและน้ำทะเล โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 และ 0.60 โดยน้ำหนัก ตลอดการศึกษา รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ที่ใช้ในการทดสอบค่าการไหล การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย		เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน	ทราย	น้ำ	
			แม่เมาะ	BLCP				จืด	ทะเล
		PC	FM	FB	BA	LP		T	S
1	TMC-0.50	1.00	-	-	-	-	2.75	0.50	-
2	TMC-20FM-0.50	0.80	0.20	-	-	-	2.75	0.50	-
3	TMC-40FM-0.50	0.60	0.40	-	-	-	2.75	0.50	-
4	TMC-20FB-0.50	0.80	-	0.20	-	-	2.75	0.50	-
5	TMC-20BA-0.50	0.80	-	-	0.20	-	2.75	0.50	-
6	TMC-5LP-0.50	0.95	-	-	-	0.05	2.75	0.50	-
7	TMC-10LP-0.50	0.90	-	-	-	0.10	2.75	0.50	-
8	TMC-15FM-5LP-0.50	0.90	0.15	-	-	0.05	2.75	0.50	-
9	TMC-15FB-5LP-0.50	0.80	-	0.15	-	0.05	2.75	0.50	-
10	TMC-15BA-5LP-0.50	0.80	-	-	0.15	0.05	2.75	0.50	-
11	SMC-0.50	1.00	-	-	-	-	2.75	-	0.50
12	SMC-20FM-0.50	0.80	0.20	-	-	-	2.75	-	0.50
13	SMC-40FM-0.50	0.60	0.40	-	-	-	2.75	-	0.50
14	SMC-20FB-0.50	0.80	-	0.20	-	-	2.75	-	0.50
15	SMC-20BA-0.50	0.80	-	-	0.20	-	2.75	-	0.50
16	SMC-5LP-0.50	0.95	-	-	-	0.05	2.75	-	0.50
17	SMC-10LP-0.50	0.90	-	-	-	0.10	2.75	-	0.50
18	SMC-15FM-5LP-0.50	0.80	0.15	-	-	0.05	2.75	-	0.50
19	SMC-15FB-5LP-0.50	0.80	-	0.15	-	0.05	2.75	-	0.50
20	SMC-15BA-5LP-0.50	0.80	-	-	0.15	0.05	2.75	-	0.50

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ที่ใช้ในการทดสอบค่าการไหล การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย		ผงหินปูน	ทราย	น้ำ	
			แม่เมาะ	BLCP			จืด	ทะเล
		PC	FM	FB	LP		T	S
1	TMC-0.60	1.00	-	-	-	2.75	0.60	-
2	TMC-20FM-0.60	0.80	0.20	-	-	2.75	0.60	-
3	TMC-20FB-0.60	0.80	-	0.20	-	2.75	0.60	-
4	TMC-5LP-0.60	0.95	-	-	0.05	2.75	0.60	-
5	SMC-0.60	1.00	-	-	-	2.75	-	0.60
6	SMC-20FM-0.60	0.80	0.20	-	-	2.75	-	0.60
7	SMC-20FB-0.60	0.80	-	0.20	-	2.75	-	0.60
8	SMC-5LP-0.60	0.95	-	-	0.05	2.75	-	0.60

หมายเหตุ

1. TPC หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ใช้อัตราส่วนน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม

2. TPC-20FM หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ร้อยละ 20 ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ใช้อัตราส่วนน้ำเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสม

3. TCC-10LP-0.70 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน ร้อยละ 5 ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70

4. SCC-15FB-5LP-0.70 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย BLPC ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 5 ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเล ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70

5. TMC-20FB-0.50 หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย BLPC ร้อยละ 20 ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

6. TMC-5LP-0.60 หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

สำหรับผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อสมบัติด้านซีเมนต์และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต ในครั้งนี้ได้ศึกษาสมบัติเบื้องต้น (ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของน้ำทะเล (ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณคลอไรด์ ปริมาณซัลเฟต) ศึกษาสมบัติด้านซีเมนต์ของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต (ได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ การขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์ ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ ค่าการยุบตัวของคอนกรีต การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต กำลังอัดประลัยและกำลังดึงของคอนกรีต) การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ และการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ โดยผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน

การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอย BLCP เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ซึ่งได้ศึกษาความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.10 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยแม่เมาะ มีค่าเท่ากับ 2.57 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย BLCP มีค่าเท่ากับ 2.17 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาบดละเอียด มีค่าเท่ากับ 2.63 และความถ่วงจำเพาะของผงหินปูนมีค่าเท่ากับ 2.87 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

4.1.2 ความละเอียดโดยวิธีเบลน

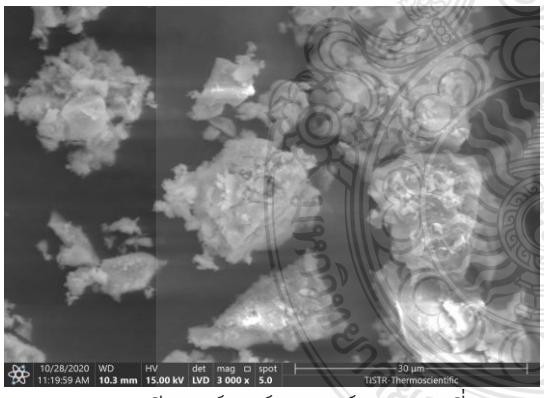
ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3,100 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ความละเอียดของเถ้าลอยแม่เมาะ มีค่าเท่ากับ 2,977 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ความละเอียดของเถ้าลอย BLCP มีค่าเท่ากับ 2,723 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ความละเอียดของผงหินปูน มีค่าเท่ากับ 5,210 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และความละเอียดของเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าเท่ากับ 3,403 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

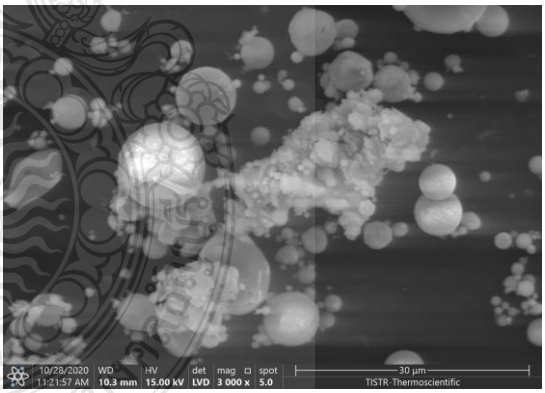
รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยแม่เมาะ	เถ้าลอย BLCP	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.10	2.57	2.17	2.65	2.87
ความละเอียดด้วยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,100	2,977	2,723	3,403	5,210

4.1.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

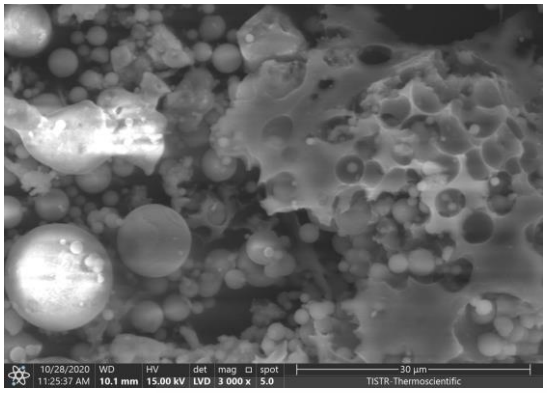
การถ่ายภาพขยายของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope : SEM ซึ่งขยาย 3,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ ก)) มีลักษณะรูปร่างขรุขระ มีขนาดไม่แน่นอนเป็นเหลี่ยมมุม เถ้าลอยแม่เมาะ (รูปที่ ข)) มีลักษณะรูปร่างกลมมนและตันมีขนาดไม่แน่นอน เถ้าลอย BLCP (รูปที่ ค)) มีลักษณะรูปร่างกลมมนและตัน เป็นโพรงมีรูพรุนมาก ขนาดไม่แน่นอน เถ้าก้นเตาบดละเอียด (รูปที่ ง)) มีลักษณะมีลักษณะเหลี่ยมคมผิวขรุขระขนาดไม่แน่นอนแตกกระจายอยู่ทั่วไป และผงหินปูน (รูปที่ จ)) มีลักษณะมีลักษณะเหลี่ยมคมผิวขรุขระขนาดไม่แน่นอนแตกกระจายอยู่ทั่วไป



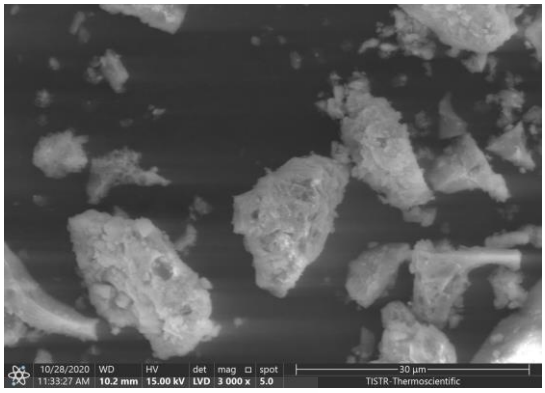
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



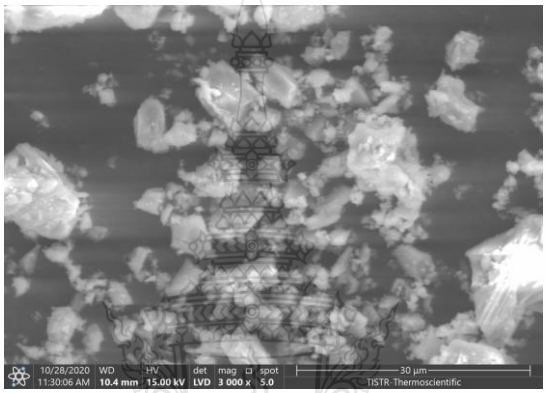
(ข) เถ้าลอยแม่เมาะ



(ค) เถ้าลอย BLCP



(ง) เถ้าก้นเตาบดละเอียด



(จ) ผงหินปูน

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,000 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน

4.1.4 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-Ray Fluorescence (XRF) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอย BLCP เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของเถ้าลอย BLCP มีค่าสูงกว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียด เถ้าลอยแม่เมาะ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละ 61.46 41.35 26.61 18.93 และ 0.45 ตามลำดับ ในขณะที่อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ของเถ้าลอย BLCP มีค่าสูงกว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียด เถ้าลอยแม่เมาะ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละ 20.27 20.11 13.60 5.51 และ 0.05 ตามลำดับ ส่วนเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ของเถ้าลอยแม่เมาะมีค่าสูงกว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียด เถ้าลอย BLCP ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าร้อยละ 18.34 13.24 5.56 3.31 และ 0.03 ตามลำดับ สำหรับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าสูงกว่าผง

หินปูน เถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าก้นเตาบดละเอียด และเถ้าลอย BLCP ตามลำดับ โดยมีค่า 65.53 55.20 24.97 16.65 และ 1.73 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

ออกไซด์ (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอยแม่เมาะ	เถ้าลอย BLCP	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน (8 μm)
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	18.93	26.61	61.46	41.35	0.45
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.51	13.60	20.27	20.11	0.05
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.31	18.34	5.56	13.24	0.03
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.53	24.97	1.73	16.65	55.20
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	2.33	0.96	2.37	0.34
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.88	8.53	0.38	2.68	<0.01
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	<0.01	1.75	0.73	0.29	<0.01
โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.31	1.77	1.36	2.51	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	2.24	0.53	5.38	-	43.12
แคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO)	1.00	3.93	0.03	-	-

4.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำทะเล

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟต และคลอไรด์ของน้ำทะเล จากหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี โดยเก็บตัวอย่างน้ำทะเล เป็นเวลา 3 เดือนติดต่อกัน พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟต และปริมาณคลอไรด์ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในรอบเวลา 3 เดือน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟตและคลอไรด์ของน้ำทะเล จากหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี

วันที่เก็บตัวอย่าง	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	ปริมาณซัลเฟต (ppm)	ปริมาณคลอไรด์ (ppm)
กันยายน พ.ศ. 2563	7.6	1,132	22,093
ตุลาคม พ.ศ. 2563	7.8	1,168	22,193
พฤศจิกายน พ.ศ. 2563	7.8	1,096	20,293

4.3 สมบัติด้านซีเมนต์ของ เพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต

4.3.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

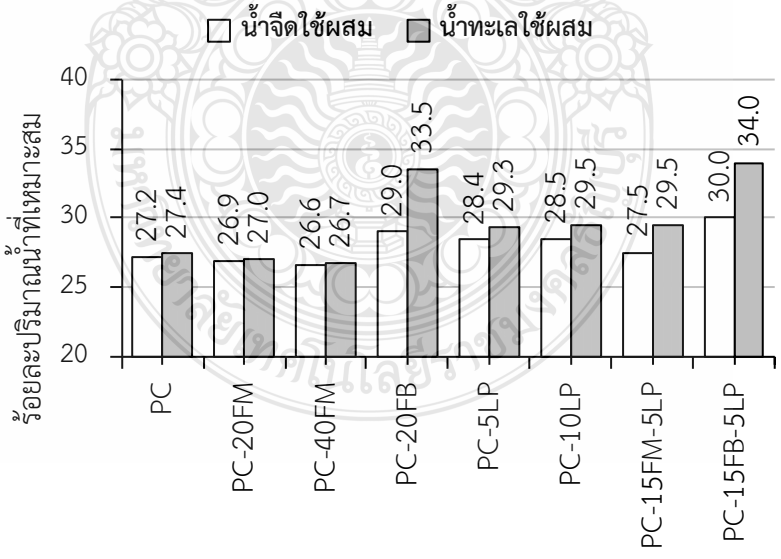
ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสม (normal consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอย เพสต์ผสมผงหินปูน และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบจากการใช้น้ำทะเลใช้ผสม มีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานทั้งที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20 และ 40 เพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20 เพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 พบว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) ทั้งที่น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยแม่เมาะมีลักษณะอนุภาคที่กลมมนผิวเรียบช่วยในการไหลลื่นได้ดี ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมน้อยลง สำหรับเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP (ร้อยละ 20) มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอย BLCP มีลักษณะเป็นโพรงและมีรูพรุนมากจึงมีความต้องการน้ำที่มากกว่า สำหรับเพสต์ผสมผงหินปูน (ทั้งร้อยละ 5 และ 10) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะผงหินปูนมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยที่ละเอียดกว่านั่นเอง ส่วนเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนก็ให้ผลในทิศทางเดียวกันตามการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน

ส่วนเมื่อพิจารณาผลกระทบจากการน้ำทะเลใช้ผสม พบว่าเพสต์ที่น้ำทะเลใช้ผสมทุกส่วนผสมมีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากกว่าเมื่อน้ำจืดใช้ผสม ทั้งนี้เพราะน้ำทะเลมีสารละลายอนินทรีย์ต่างๆ เจือปนมากกว่าน้ำจืด โดยเฉพาะปริมาณคลอไรด์ไรด์และซัลเฟต (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ร้อยละปริมาณน้ำที่เหมาะสม	
		น้ำจืด	น้ำทะเล
1	TPC	27.2	-
2	TPC-20FM	26.9	-
3	TPC-40FM	26.6	-
4	TPC-20FB	29.0	-
5	TPC-5LP	28.4	-
6	TPC-10LP	28.5	-
7	TPC-15FM-5LP	27.5	-
8	TPC-15FB-5LP	30.0	-
9	SPC	-	27.4
10	SPC-20FM	-	27.0
11	SPC-40FM	-	26.7
12	SPC-20FB	-	33.5
13	SPC-5LP	-	29.3
14	SPC-10LP	-	29.5
15	SPC-15FM-5LP	-	29.5
16	SPC-15FB-5LP	-	34.0



รูปที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

4.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

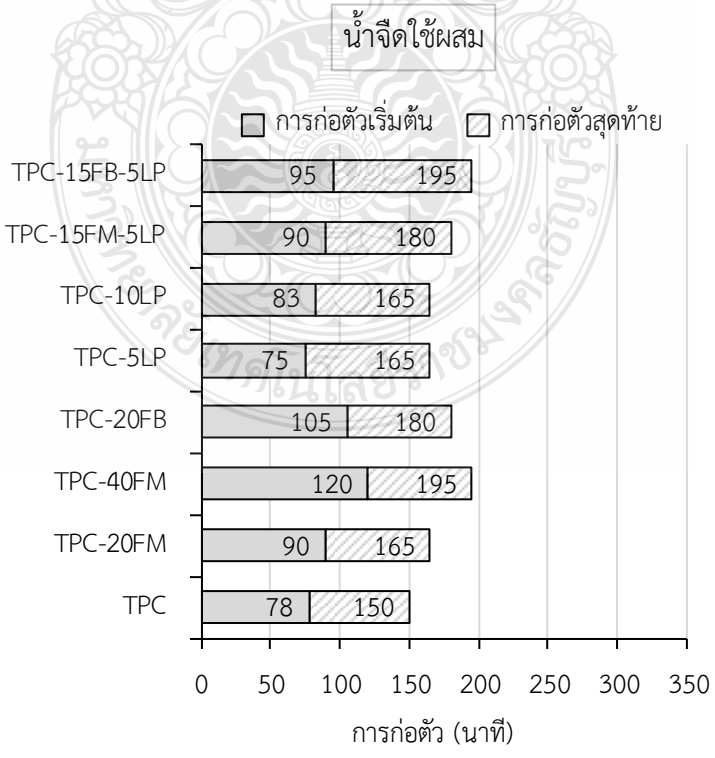
ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงระยะเวลาการก่อตัว (setting time) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอย เพสต์ผสมผงหินปูน และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบจากการน้ำทะเลใช้ผสม มีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานทั้งที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลในการผสม ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20 และ 40 เพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20 เพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 พบว่าเพสต์ผสมเถ้าลอย (ทั้งแม่เมาะและ BLCP) มีระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง การไฮเดรชั่นจึงเกิดได้น้อย และการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดชั่น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด ($Ca(OH)_2$) ในการทำปฏิกิริยาโดยที่แคลเซียมไฮดรอกไซดนั้นเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่วนเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีระยะเวลาการก่อตัวที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มที่เร็วกว่า อาจจะเพราะว่า ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์มีผลช่วยเร่งการก่อตัวของเพสต์ได้และขนาดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่เล็กลง เวลาในการก่อตัวของเพสต์ก็จะยิ่งลดลง ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าส่วนของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในผงหินปูนละลายออกมาร่วมและตกผลึกเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเร็วขึ้นในสภาวะที่มีไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) แต่เพสต์ผสมผงหินปูน ในอัตราแทนที่ร้อยละ 10 มีระยะเวลาการก่อตัวที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มที่ช้ากว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงมีผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยลงไปด้วย และสำหรับเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร่วมกับผงหินปูน และเพสต์ผสมเถ้าลอย BLPC ร่วมกับผงหินปูน ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกันตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน

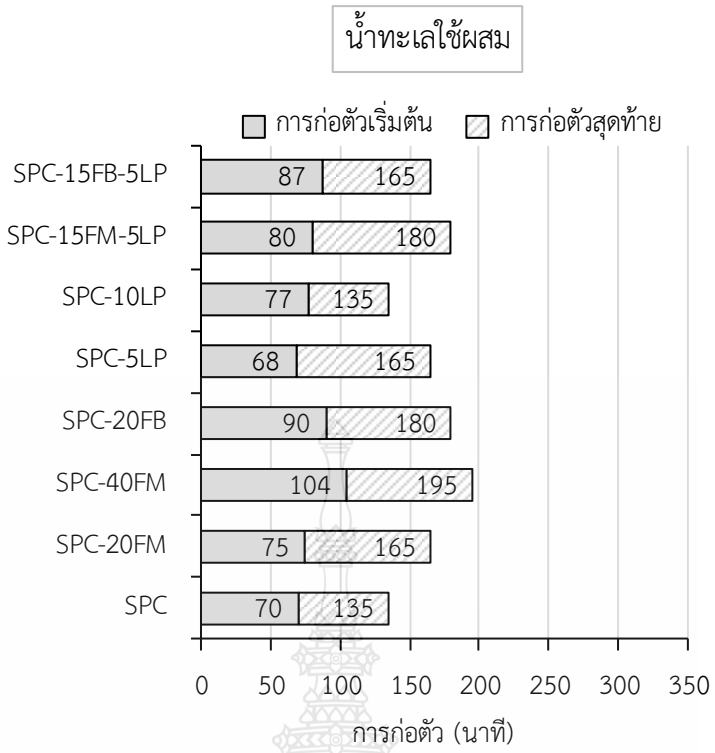
ส่วนเมื่อพิจารณาผลกระทบจากการน้ำทะเลใช้ผสม พบว่าเพสต์ที่น้ำทะเลใช้ผสมมีระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายเร็วกว่าเพสต์ที่น้ำจืดใช้ผสมในทุกส่วนผสม ทั้งนี้เพราะว่าในน้ำทะเลมีสารละลายอนินทรีย์ต่างๆ เจือปน โดยเฉพาะคลอไรด์ ซึ่งช่วยเร่งการก่อตัวให้เร็วขึ้น

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	น้ำจืดใช้ผสม		น้ำทะเลใช้ผสม	
		การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
1	TPC	78	150	-	-
2	TPC-20FM	90	165	-	-
3	TPC-40FM	120	195	-	-
4	TPC-20FB	105	180	-	-
5	TPC-5LP	75	165	-	-
6	TPC-10LP	83	165	-	-
7	TPC-15FM-5LP	90	185	-	-
8	TPC-15FB-5LP	95	195	-	-
9	SPC	-	-	70	135
10	SPC-20FM	-	-	75	165
11	SPC-40FM	-	-	104	195
12	SPC-20FB	-	-	90	180
13	SPC-5LP	-	-	68	165
14	SPC-10LP	-	-	77	135
15	SPC-15FM-5LP	-	-	80	180
16	SPC-15FB-5LP	-	-	87	165

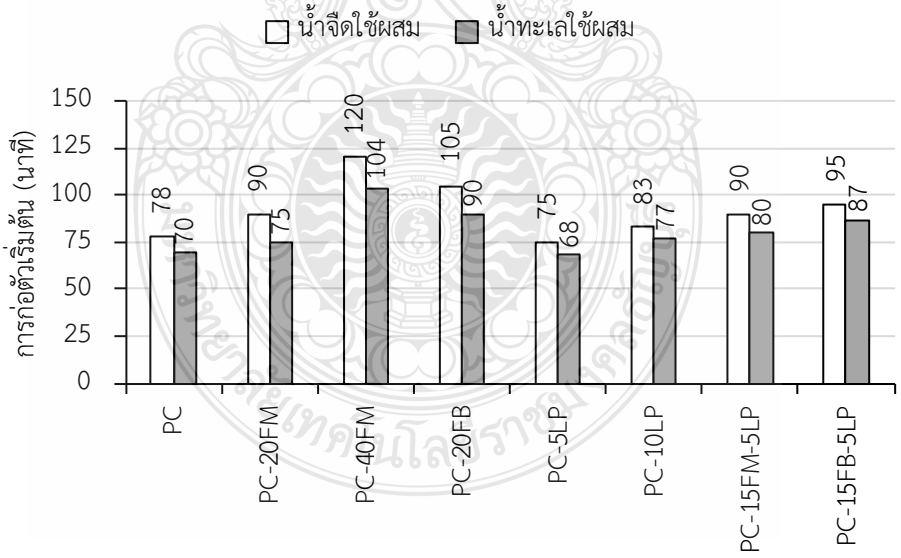


ก) การก่อตัวของเพสต์ใช้น้ำจืดผสม



ข) การก่อตัวของเพสต์น้ำทะเลใช้ผสม

รูปที่ 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์เมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม

4.3.3 การขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 แสดงการขยายตัวแบบออโตเคลฟ (autoclave expansion) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอย เพสต์ผสมผงหินปูน และเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม มีรายละเอียดดังนี้

สำหรับผลกระทบที่มีต่อการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์นั้น ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสม โดยเพสต์ที่ศึกษานั้น น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม ประกอบด้วยเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20 และ 40 เพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20 เพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 พบว่ากรณีของเพสต์เมื่อน้ำจืดใช้ผสมนั้น การขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ทั้งแม่เมาะและ BLCP) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์ผสมผงหินปูนมีค่ามากกกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น ส่วนการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีทิศทางเป็นไปตามการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน ส่วนกรณีเพสต์น้ำทะเลใช้ผสมนั้น พบว่าการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยและเพสต์ผสมผงหินปูน มีค่ามากกกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

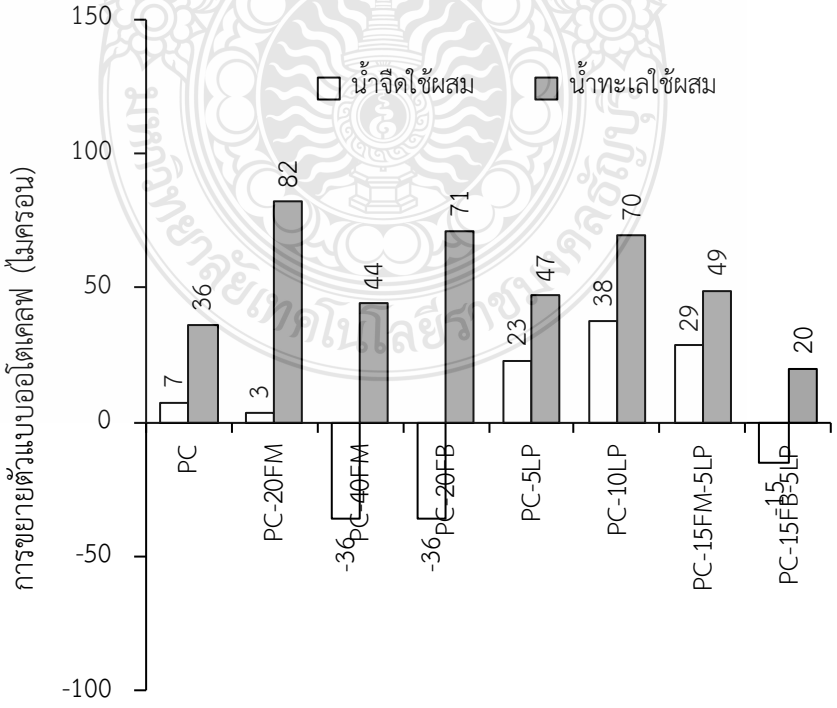
ส่วนเมื่อพิจารณาผลกระทบจากการน้ำทะเลใช้ผสม พบว่าการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์ที่น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกกว่าของเพสต์น้ำจืดใช้ผสม

อย่างไรก็ตามการขยายตัวแบบออโตเคลฟ ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ผสมเถ้าลอย เพสต์ผสมผงหินปูน เพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ทั้งที่น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าร้อยละ 0.8 ซึ่งไม่เกินค่าตามมาตรฐาน ASTM C 618 (โดยพิจารณาจากการขยายตัวแบบออโตเคลฟที่มีค่ามากที่สุด คือ 0.082 มิลลิเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.029)

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ค่าการขยายตัวแบบออโตเคลฟ (ไมครอน)	
		น้ำจืดใช้ผสม	น้ำทะเลใช้ผสม
1	TPC	7	-
2	TPC-20FM	3	-
3	TPC-40FM	-36	-
4	TPC-20FB	-36	-
5	TPC-5LP	23	-
6	TPC-10LP	38	-
7	TPC-15FM-5LP	29	-
8	TPC-15FB-5LP	-15	-
9	SPC	-	36
10	SPC-20FM	-	82
11	SPC-40FM	-	44
12	SPC-20FB	-	71
13	SPC-5LP	-	47
14	SPC-10LP	-	70
15	SPC-15FM-5LP	-	49
16	SPC-15FB-5LP	-	20

หมายเหตุ ค่าติดลบ หมายถึง การหดตัว



รูปที่ 4.5 การขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์

4.3.4 ค่าการยุบตัวและการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 แสดงค่าการยุบตัว (slump) และการสูญเสียค่าการยุบตัว (slump loss) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม มีรายละเอียดดังนี้

โดยพิจารณาผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานที่มีต่อค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต พบว่าทั้งคอนกรีตน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมนั้น ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีแนวโน้มที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะอนุภาคที่กลมของเถ้าลอยช่วยให้การลื่นไหลได้ดี ในขณะที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย BLCP มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะเถ้าลอย BLCP มีลักษณะเป็นโพรงและมีรูพรุนมากจึงมีความต้องการน้ำที่มากกว่าเมื่อใช้ปริมาณน้ำที่เท่ากันจึงทำให้มีค่าการยุบตัวที่น้อยกว่า ส่วนคอนกรีตผสมผงหินปูนนั้น มีค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงหรือแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะความละเอียดของผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงต้องการน้ำที่มากกว่า ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนเป็นไปตามการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน อย่างไรก็ตามค่าการยุบตัวของคอนกรีตจะให้ผลที่ผกผันกับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มีค่ามากค่าการก่อตัวของคอนกรีตจะมีค่าน้อยและถ้าค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มีค่าน้อยค่าการยุบตัวของคอนกรีตจะมีค่ามาก

ส่วนผลกระทบเมื่อน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตนั้น พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมให้ค่าการยุบตัวให้ค่าการยุบตัวที่น้อยกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมทั้งนี้เพราะน้ำทะเลมีสารละลายอนินทรีย์ต่างๆเจือปนมากกว่าของน้ำจืด โดยเฉพาะคลอไรด์และซัลเฟต (ตารางที่ 4.3) ส่งผลให้ของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมมีค่าการยุบตัวที่น้อยกว่า

รูปที่ 4.9 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตทั้งใช้น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที พบว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีแนวโน้มน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นได้น้อยกว่า

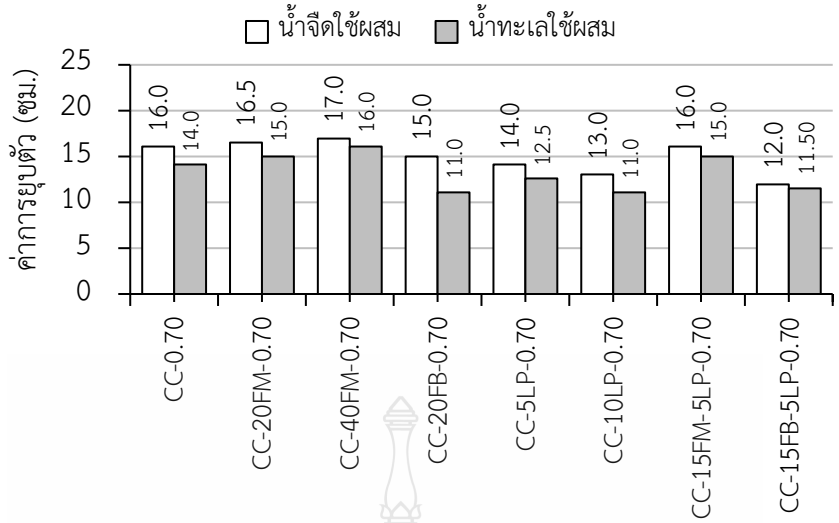
ปฏิกิริยาไฮรเดรชั่นยิ่งเกิดขึ้นได้น้อยส่งผลให้การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อยลง ในขณะที่การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย BLCP มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอย BLCP มีความขรุขระ และมีความพรุนที่สูง ส่งผลให้มีความต้องการน้ำที่มากกว่า ส่วนของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วนทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคของผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าของปูนซ๊เมนต์ จึงสามารถเข้าไปแทรกระหว่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์กระจายตัวและทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ดีกว่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมผงหินปูนจึง

เกิดขึ้นมากกว่า สำหรับของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่ามีค่าเป็นไปตามการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูนนอกจากนี้พบว่าค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมให้ค่าการยุบตัวที่มากกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสม

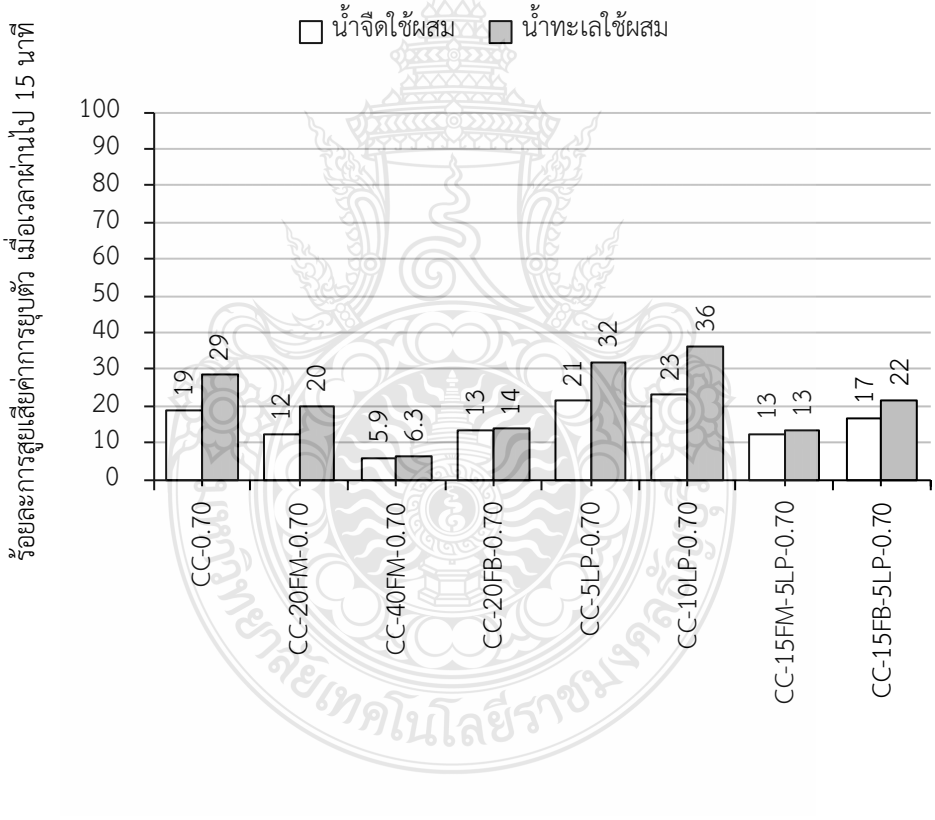
รูปที่ 4.7 แสดงการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตทั้งที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลผสม เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับกรณีเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที

ตารางที่ 4.7 ค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต

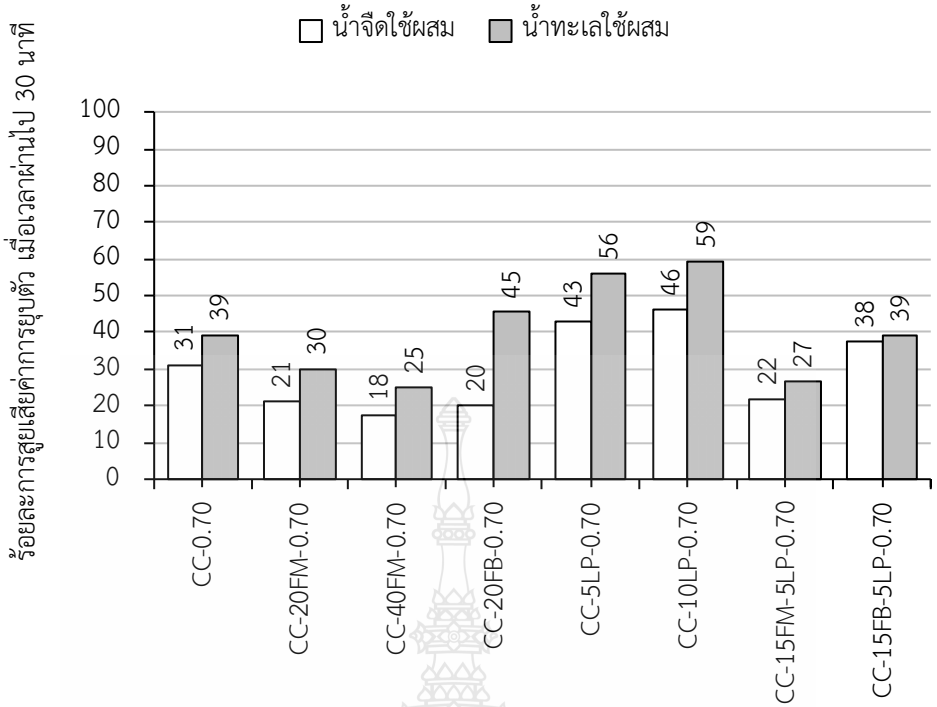
ลำดับ	สัดส่วนผสม	ค่าการยุบตัว (ซม.)		
		เมื่อเวลาเริ่มแรก	เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที	เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที
1	TCC-0.70	16.0	13.0	11.0
2	TCC-20FM-0.70	16.5	14.5	13.0
3	TCC-40FM-0.70	17.0	16.0	14.0
4	TCC-20FB-0.70	15.0	13.0	12.0
5	TCC-5LP-0.70	14.0	11.0	8.0
6	TCC-10LP-0.70	13.0	10.0	7.0
7	TPC-15FM-5LP-0.70	16.0	14.0	12.5
8	TCC-15FB-5LP-0.70	12.0	10.0	7.5
9	SCC-0.70	14.0	10.0	8.5
10	SCC-20FM-0.70	15.0	12.0	10.5
11	SCC-40FM-0.70	16.0	15.0	12.0
12	SCC-20FB-0.70	11.0	9.5	6.0
13	SCC-5LP-0.70	12.5	8.5	5.5
14	SCC-10LP-0.70	11.0	7.0	4.5
15	SCC-15FM-5LP-0.70	15.0	13.0	11.0
16	SCC-15FB-5LP-0.70	11.5	9.0	7.0



รูปที่ 4.6 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต



รูปที่ 4.7 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที



รูปที่ 4.8 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

4.3.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงค่ากำลังอัดประลัย (compressive strength) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 1 7 28 และ 91 วัน คอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบจากการน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม มีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

การพิจารณาผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 คอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 และน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม พบว่าคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่มนั้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปูนซีเมนต์ลงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยลง แต่เมื่ออายุมากขึ้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีการพัฒนากำลังใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องมาจากผล

ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย ส่วนคอนกรีตผสมผงหินปูนนั้น พบว่ามีค่ากำลังอัดประลัยที่ไม่แตกต่างหรือมีแนวโน้มที่มากกว่าที่อายุเริ่มแรก (7 วัน) แต่เมื่ออายุมากขึ้น (28 และ 91 วัน) มีแนวโน้มที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้แม้ว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนเป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง แต่ผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ละเอียดกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงสามารถเข้าไปเติมเต็ม (Filler) ช่องว่างของเพสต์เป็นการลดปริมาณช่องว่างภายในคอนกรีตทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น แต่เมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้นผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่น้อยกว่าส่งผลให้มีกำลังที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้น พบว่ามีค่าเป็นไปตามการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน

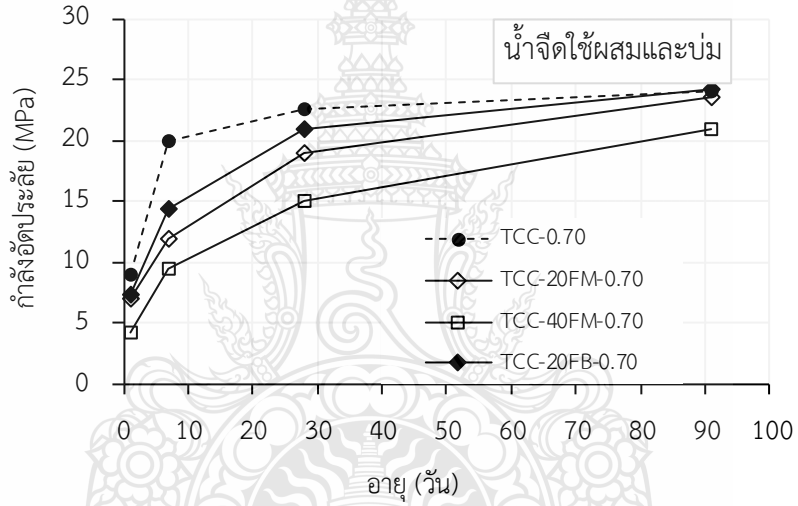
ส่วนในกรณีคอนกรีตเมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตในช่วงอายุต้น (น้อยกว่า 28 วัน) ให้ค่าที่มีแนวโน้มเดียวกันกับกรณีเมื่อน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม กล่าวคือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูนให้ค่าที่ใกล้เคียงหรือแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่ออายุมากขึ้น (91 วัน) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มทุกๆสัดส่วน (ที่ศึกษา) มีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งอาจเป็นเพราะการตกผลึกของเกลือที่แฝงมากับน้ำทะเล ซึ่งสอดคล้องการศึกษาของ Falah M. Wegian [1]

ตารางที่ 4.8 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70

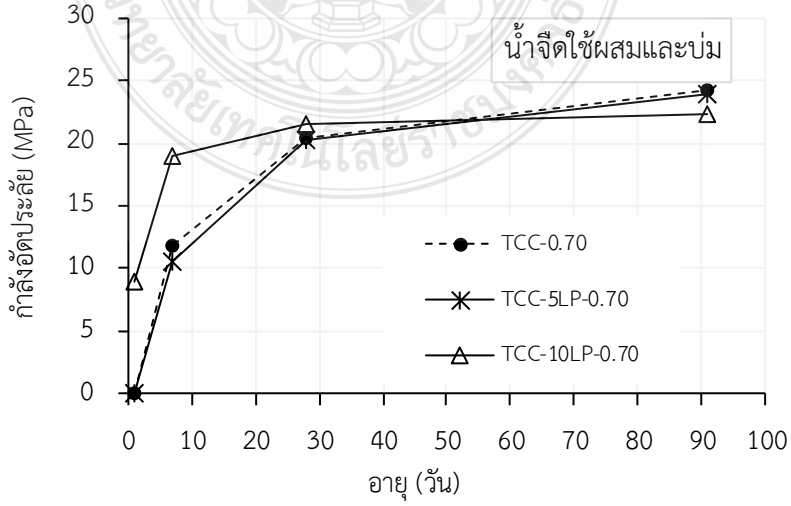
ลำดับ	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (MPa)			
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	91 วัน
1	TCC-0.70	9.00	20.00	22.65	24.00
2	TCC-20FM-0.70	7.00	12.00	19.00	23.50
3	TCC-40FM-0.70	4.33	9.50	15.00	21.00
4	TCC-20FB-0.70	7.33	14.33	21.00	24.29
5	TCC-5LP-0.70	9.35	20.13	22.00	23.32
6	TCC-10LP-0.70	9.00	19.00	21.50	21.29
7	TPC-15FM-5LP-0.70	8.00	15.50	21.00	23.00
8	TCC-15FB-5LP-0.70	7.83	15.83	20.67	23.50
9	SCC-0.70	11.90	20.40	24.20	23.10
10	SCC-20FM-0.70	9.50	16.33	20.50	20.00

ตารางที่ 4.8 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 (ต่อ)

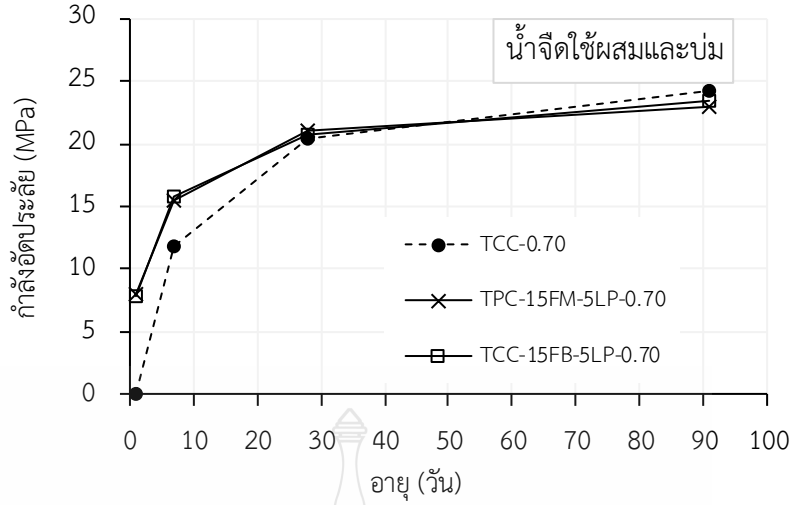
ลำดับ	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (MPa)			
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	91 วัน
11	SCC-40FM-0.70	6.83	14.17	19.00	18.50
12	SCC-20FB-0.70	9.83	17.17	22.83	22.19
13	SCC-5LP-0.70	10.50	20.20	23.90	22.90
14	SCC-10LP-0.70	10.00	19.70	22.20	22.00
15	SCC-15FM-5LP-0.70	9.00	18.00	22.50	21.50
16	SCC-15FB-5LP-0.70	9.17	18.50	21.17	21.00



ก) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและ BLCP

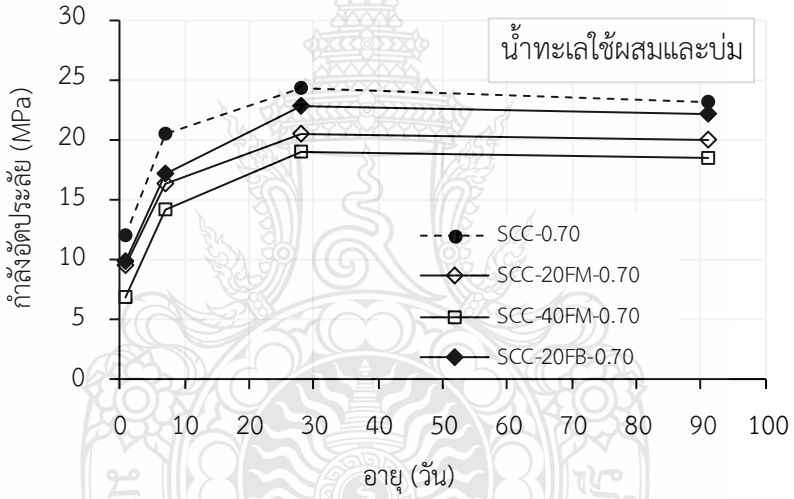


ข) ผสมผงหินปูน

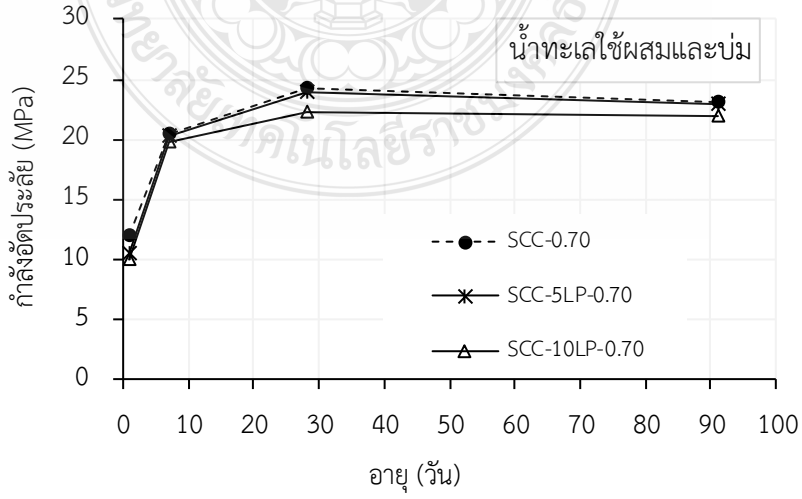


ค) ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

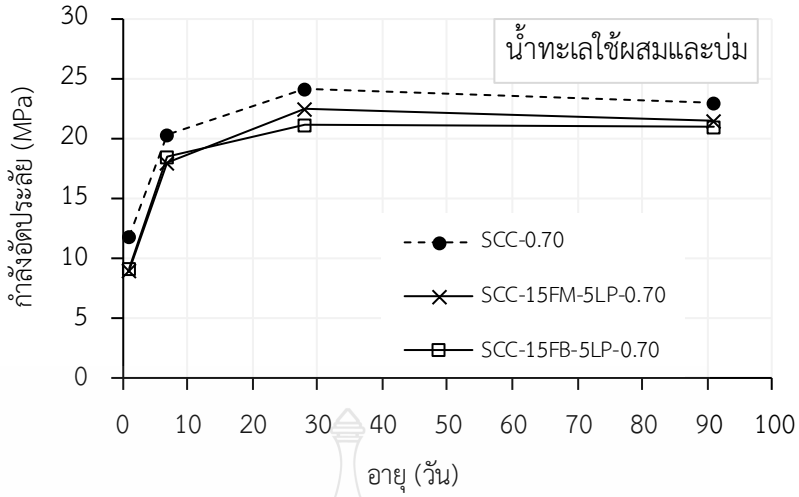
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตเมื่อน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70



ง) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและ BLCP



จ) ผสมผงหินปูน

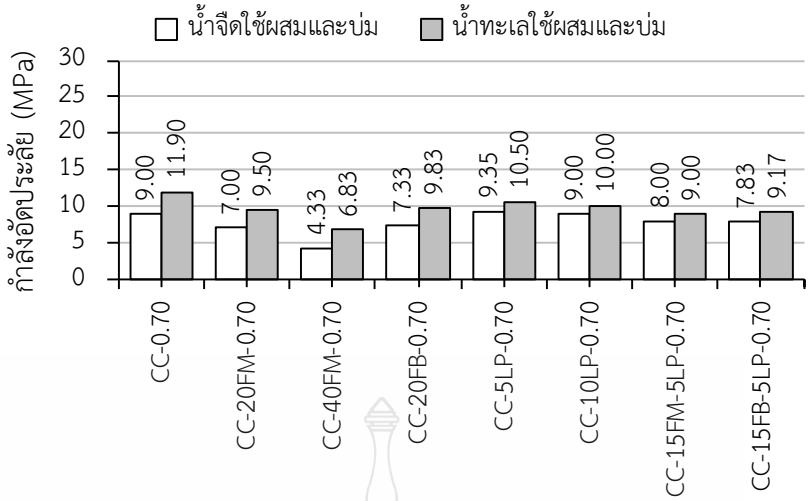


ฉ) เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ผสมและบ่มคอนกรีตด้วยน้ำทะเล

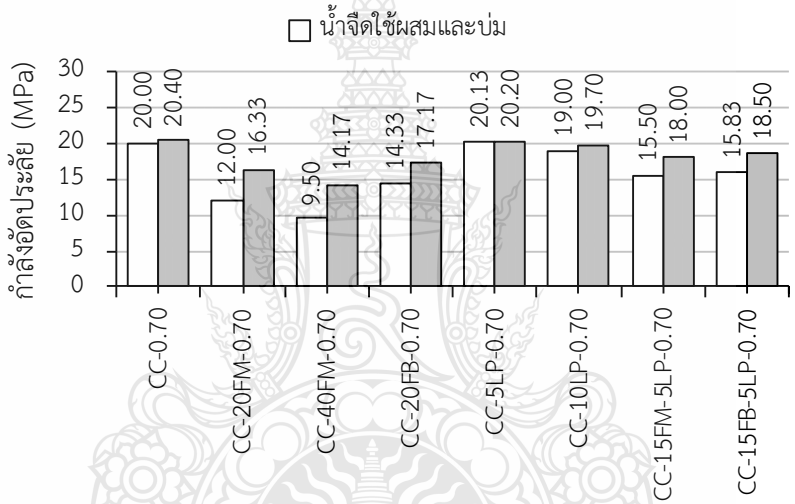
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตเมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70

2) ผลกระทบจากน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม

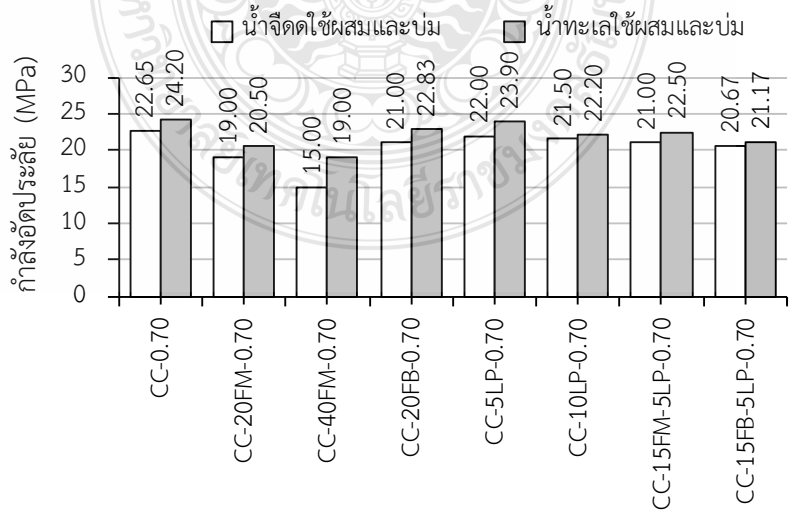
การพิจารณาผลกระทบจากการน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (รูปที่ 4.11) พบว่า ในช่วงอายุของคอนกรีต 28 วันนั้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น มีค่ามากกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม ส่วนในช่วงอายุของคอนกรีตที่ 91 วัน กำลังอัดประลัยของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น กลับให้ค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในน้ำทะเลมีสารละลายอนินทรีย์ต่างๆเจือปน โดยเฉพาะคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งจะเพิ่มกำลังในระยะแรกแต่ในระยะยาวคอนกรีตจะมีกำลังลดลงเพราะเกลือซัลเฟตจะทำให้เกิดการตกผลึกของเกลือ ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Falah M. Wegian [1]



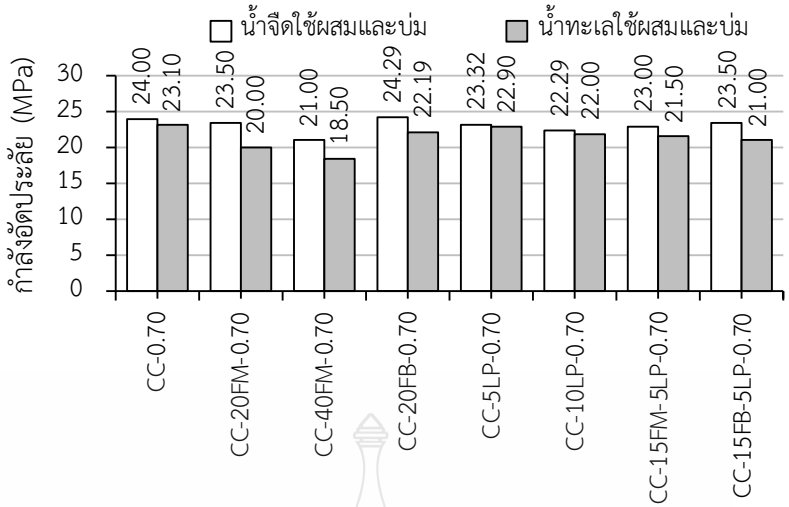
ก) อายุ 1 วัน



ข) อายุ 7 วัน



ค) อายุ 28 วัน



ง) อายุ 91 วัน

รูปที่ 4.11 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 1 7 28 และ 91 วัน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70

4.3.6 กำลังดึงแยกของคอนกรีต

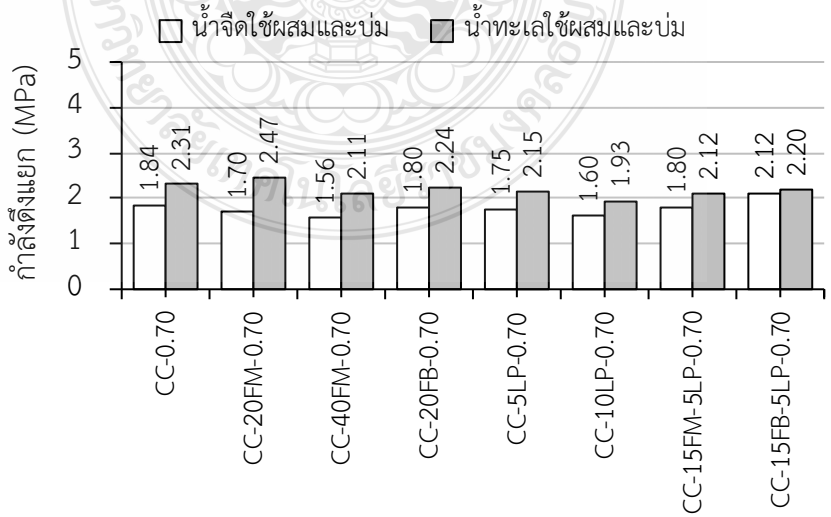
ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.12 แสดงค่ากำลังดึงแยก (splitting tensile strength) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอย และผสมผงหินปูน โดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 28 และ 91 วัน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบจากการใช้น้ำทะเลผสมและบ่มที่มีต่อกำลังดึงแยกของคอนกรีต มีรายละเอียดดังนี้

พิจารณาผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน พบว่าให้ผลไปในแนวโน้มเดียวกันกับกรณีของกำลังอัดประลัย กล่าวคือ คอนกรีตทั้งน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น กำลังดึงแยกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น และคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่ากำลังดึงแยกที่ไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนกำลังดึงแยกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนให้ค่าเป็นไปตามการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน ซึ่งเช่นเดียวกันในกรณีคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น เมื่ออายุมากขึ้นกำลังดึงแยกของคอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

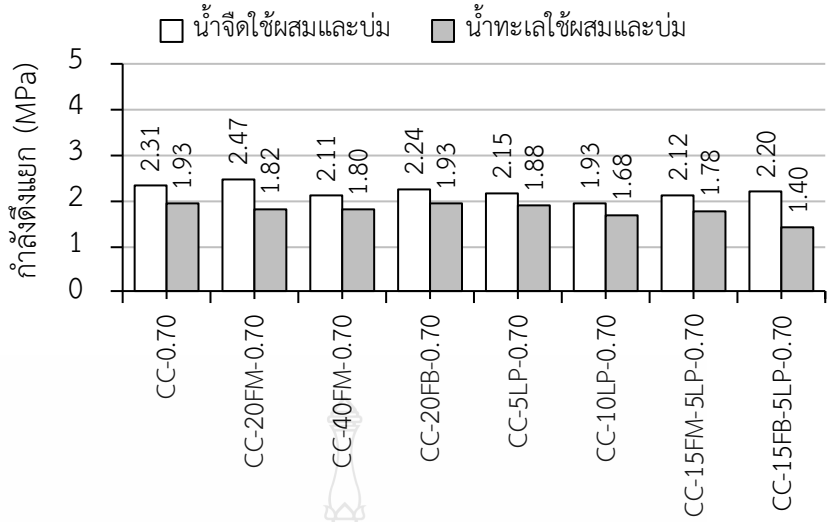
พิจารณาผลกระทบจากการน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม พบว่าผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มคอนกรีตต่อกำลังดึงแยกของคอนกรีต ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกับของกำลังอัดประลัยกล่าวคือ กำลังดึงแยกของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น มีค่ามากกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม ส่วนเมื่ออายุมากขึ้นกำลังดึงแยกของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น กลับให้ค่าที่ลดลงและมีค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

ตารางที่ 4.9 กำลังดึงแยกของคอนกรีตโดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 28 และ 91 วันและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70

ลำดับ	สัดส่วนผสม	กำลังดึงแยก (กก./ตร.ซม.)	
		อายุ 28 วัน	อายุ 91 วัน
1	TCC-0.70	1.84	2.31
2	TCC-20FM-0.70	1.70	2.47
3	TCC-40FM-0.70	1.56	2.11
4	TCC-20FB-0.70	1.80	2.24
5	TCC-5LP-0.70	1.75	2.15
6	TCC-10LP-0.70	1.60	1.93
7	TPC-15FM-5LP-0.70	1.80	2.12
8	TCC-15FB-5LP-0.70	2.12	2.20
9	SCC-0.70	2.26	1.93
10	SCC-20FM-0.70	1.95	1.82
11	SCC-40FM-0.70	1.91	1.80
12	SCC-20FB-0.70	2.20	1.93
13	SCC-5LP-0.70	2.12	1.88
14	SCC-10LP-0.70	1.98	1.68
15	SCC-15FM-5LP-0.70	2.05	1.78
16	SCC-15FB-5LP-0.70	2.16	1.40



ก) อายุ 28 วัน



ข) อายุ 91 วัน

รูปที่ 4.12 กำลังดึงแยกของคอนกรีตโดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ที่อายุ 28 และ 91 วัน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.70

4.3.7 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

ตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.13 แสดงค่าการไหลแผ่ (flow value) ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย มอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน โดยน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 มีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาจากผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ทั้งที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20 และ 40 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20 มอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 พบว่าค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ทั้งเมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและทั้งเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 จะให้ค่าการไหลแผ่ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยแม่เมาะในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอยที่กลมมนและผิวเรียบ จึงช่วยในการไหลลื่นทำให้ค่าการไหลแผ่ที่มากกว่า ในขณะที่ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย BLCP มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอย BLCP มีความขรุขระ และมีความพรุนที่สูง ส่งผลให้มีความต้องการน้ำที่มากกว่า ส่วนค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่

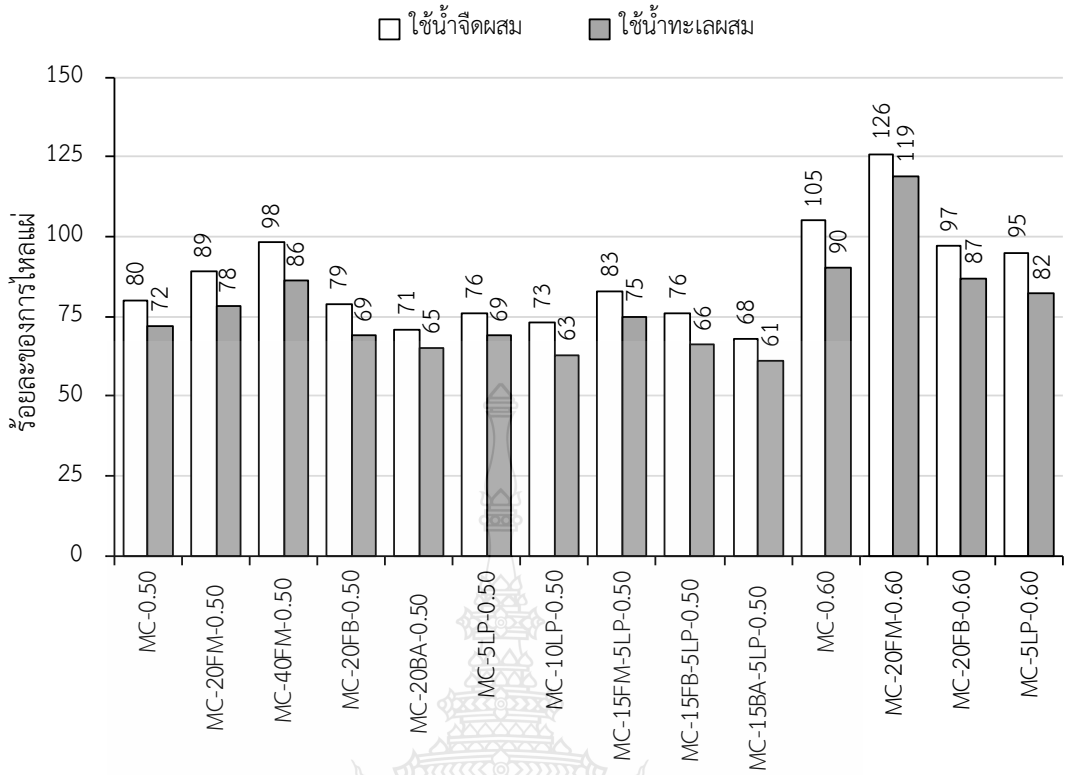
1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะผงหินปูนมีความละเอียดที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททที่ 1 จึงมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้น จึงต้องการน้ำไปเคลือบผิวที่มากกว่า ส่วนของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีความละเอียดที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททที่ 1 จึงมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า จึงต้องการน้ำไปเคลือบผิวที่มากขึ้น

เมื่อพิจารณาจากผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ทั้งที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน พบว่าค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อย ทั้งนี้เพราะเมื่อผสมน้ำในปริมาณที่มากน้ำจะช่วยให้วัสดุประสานไหลลื่นได้มากกว่า ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ที่มากกว่า

เมื่อพิจารณาจากผลกระทบน้ำทะเลใช้ผสมต่อค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ พบว่าทั้งมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 นั้น ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่าที่น้อยกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม ทั้งนี้เพราะว่าน้ำทะเลมีสารหรือแร่ธาตุต่างๆ เจือปน ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ดังกล่าวทีค่าที่ลดลง อย่างไรก็ตามสังเกตว่า ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์จะให้ค่าเป็นไปตามค่าการยุบตัวของคอนกรีต กล่าวคือถ้าค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่ามากค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ก็จะมีค่ามากเช่นกัน

ตารางที่ 4.10 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ร้อยละค่าการไหลแผ่	
		น้ำจืด	น้ำทะเล
1	TMC-0.50	80	-
2	TMC-20FM-0.50	89	-
3	TMC-40FM-0.50	98	-
4	TMC-20FB-0.50	79	-
5	TMC-20BA-0.50	71	-
6	TMC-5LP-0.50	76	-
7	TMC-10LP-0.50	73	-
8	TMC-15FM-5LP-0.50	83	-
9	TMC-15FB-5LP-0.50	76	-
10	TMC-15BA-5LP-0.50	68	-
11	SMC-0.50	-	72
12	SMC-20FM-0.50	-	78
13	SMC-40FM-0.50	-	86
14	SMC-20FB-0.50	-	69
15	SMC-20BA-0.50	-	65
16	SMC-5LP-0.50	-	69
17	SMC-10LP-0.50	-	63
18	SMC-15FM-5LP-0.50	-	75
19	SMC-15FB-5LP-0.50	-	66
20	SMC-15BA-5LP-0.50	-	61
21	TMC-0.60	105	-
22	TMC-20FM-0.60	126	-
23	TMC-20FB-0.60	97	-
24	TMC-5LP-0.60	95	-
25	SMC-0.60	-	90
26	SMC-20FM-0.60	-	119
27	SMC-20FB-0.60	-	87
28	SMC-5LP-0.60	-	82



รูปที่ 4.13 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

4.4 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์

การหดตัวแบบออโตจีนัส (autogenous shrinkage) คือการสูญเสียน้ำภายในโพรงเนื้อของเพสต์ให้กับปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยไม่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียน้ำออกจากเนื้อเพสต์ทำให้ภายในโพรงมีความดันติดลบจึงเกิดการหดตัวหรืออาจจะเรียกว่าการสูญเสียน้ำด้วยตัวเพสต์เอง (self-desiccation) ปัจจัยที่ผลต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสคือ ปริมาณน้ำ ลักษณะเฉพาะของโพรง และเนื้อเพสต์

สำหรับการศึกษาการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ในครั้งนี้ประกอบด้วย มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20 และ 40 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 มอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม โดยได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการหดตัวแบบออโตจีนัส คือ 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ 3) ผลกระทบจากการใช้น้ำทะเลผสม มีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

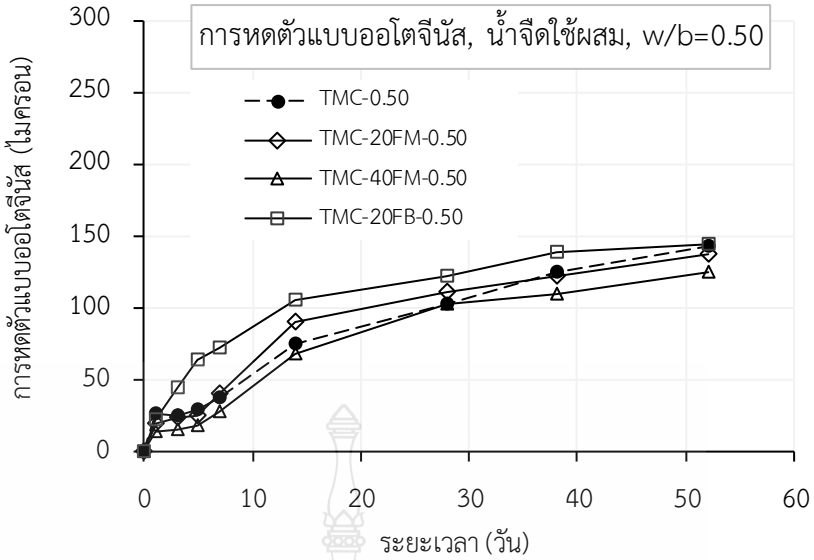
- น้ำจืดใช้ผสม

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.4 ก) นั้นการหดตัวแบบออโตจีนัสของเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (ทั้งร้อละ 20 และ 40) มีค่าไม่แตกต่างหรือเมื่ออายุมากขึ้นมีแนวโน้มว่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงการสูญเสียน้ำในช่องวางคาปิลลารี่จึงลดลงตามไปด้วย และเถ้าลอยยังช่วยเพิ่มปริมาณน้ำอิสระให้แก่ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์มากขึ้น ซึ่งการหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นผลจากการใช้น้ำในกระบวนการ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหมายความว่าหากมีปริมาณน้ำอิสระมากจะสามารถลดการหดตัวได้มากขึ้น ส่วนการหดตัวแบบออโตจีนัสของเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP กลับมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอย BLCP มีความต้องการน้ำมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้มีน้ำอิสระลดลง ส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีนัสมากขึ้น

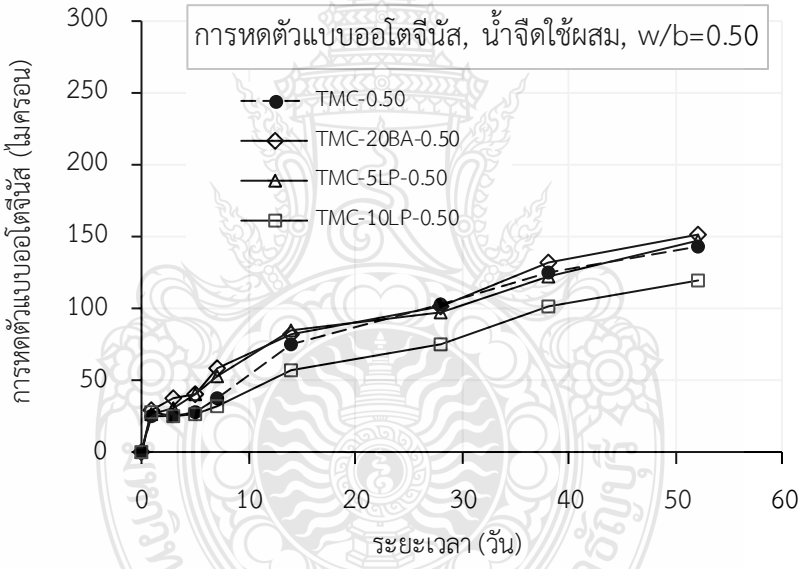
สำหรับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด (รูปที่ 4.14 ข)) พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ส่วนมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 4.14 ข)) พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้แม้ว่าผงหินปูนจะมีความต้องการน้ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่การแทนที่ผงหินปูน เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ส่งผลให้น้ำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยลง ส่วนเมื่อแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 กลับพบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสมีค่าที่น้อยลงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการแทนที่ร้อยละ 10 นั้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงไปมากส่งผลให้การนำน้ำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงมาก การหดตัวแบบออโตจีนัสจึงลดลง

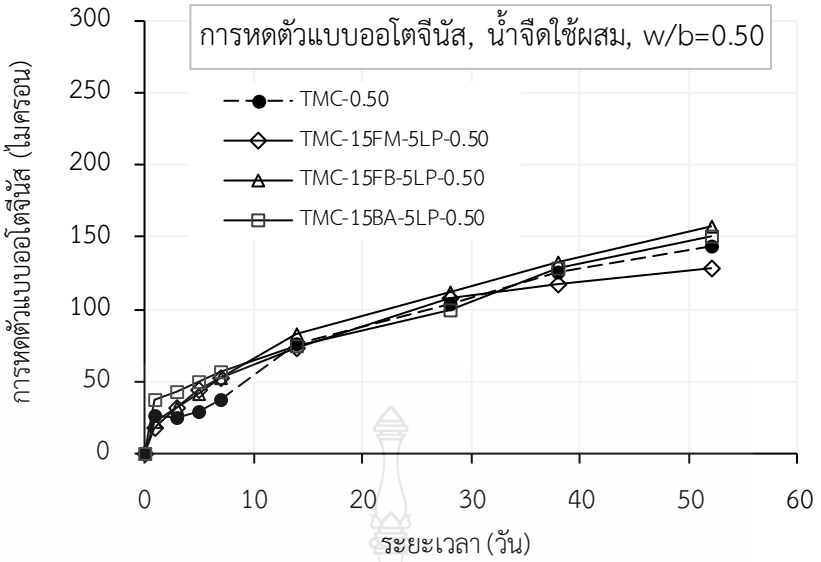
ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอย



ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผสมผงหินปูน



ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมเถ้าก้นเตาร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

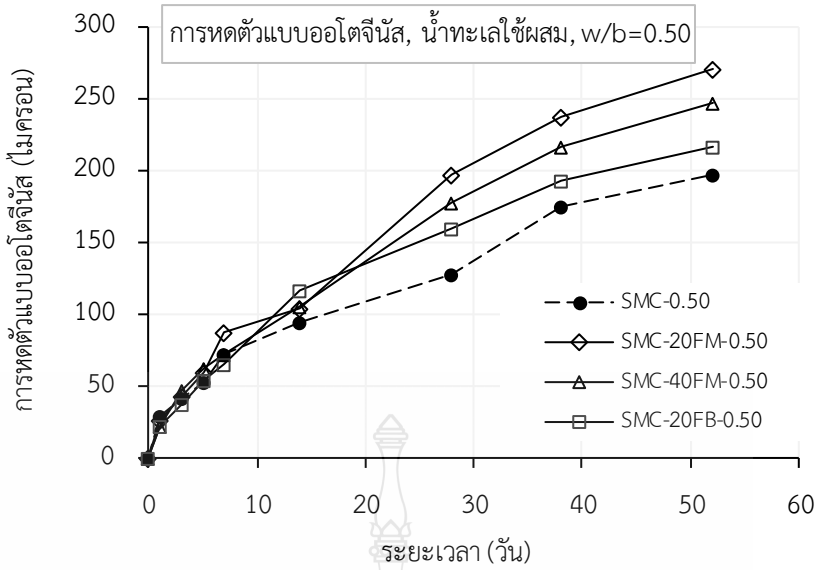
- <u>น้ำทะเลใช้ผสม</u>

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าในกรณีมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (รูปที่ 4.15 ก)) นั้นการหดตัวแบบออโตจีนัสของเพสต์ผสมเถ้าลอย มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เห็นได้ชัดเจนโดยเฉพาะเมื่ออายุของมอร์ต้าร์มากขึ้น ทั้งนี้เพราะเป็นไปได้ว่าผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

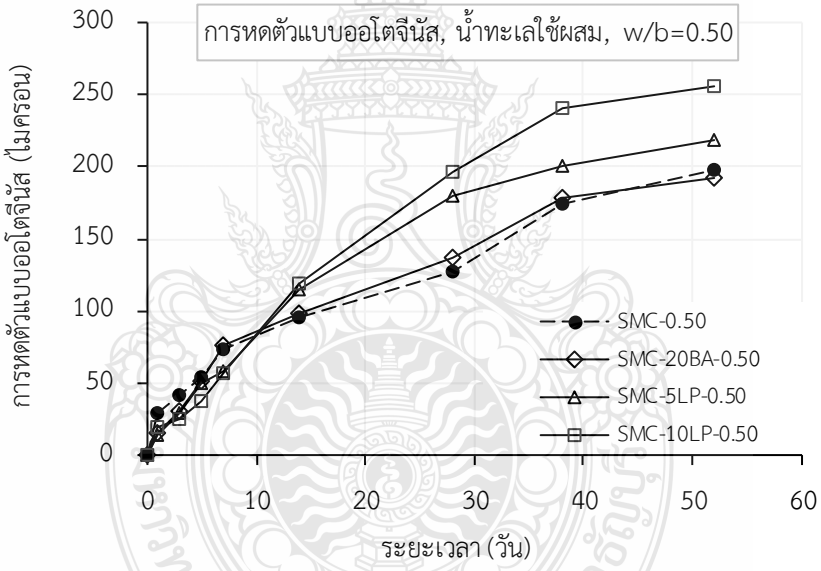
สำหรับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด (รูปที่ 4.15 ข)) พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของเพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าที่ไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ส่วนมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 4.15 ข)) พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของเพสต์ผสมผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น (ร้อยละ 10) ทั้งนี้อาจเป็นได้ว่าผงหินปูนมีความต้องการน้ำมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ลดปริมาณน้ำอิสระลงส่งผลให้การหดตัวมากขึ้น

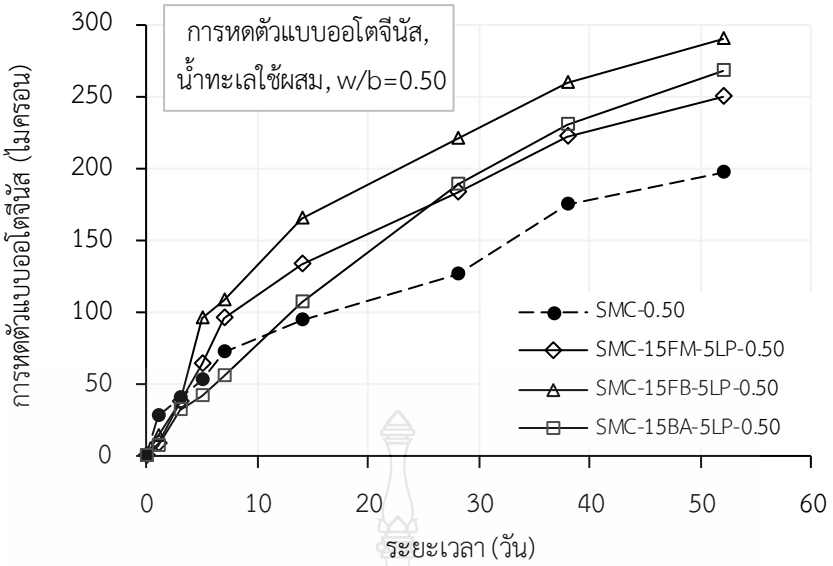
ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 4.15 ค)) พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาร่วมกับผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เห็นได้ชัดเจนทั้งนี้ก็เป็นไปตามการแทนที่ของเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอย



ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และผสมผงหินปูน



ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

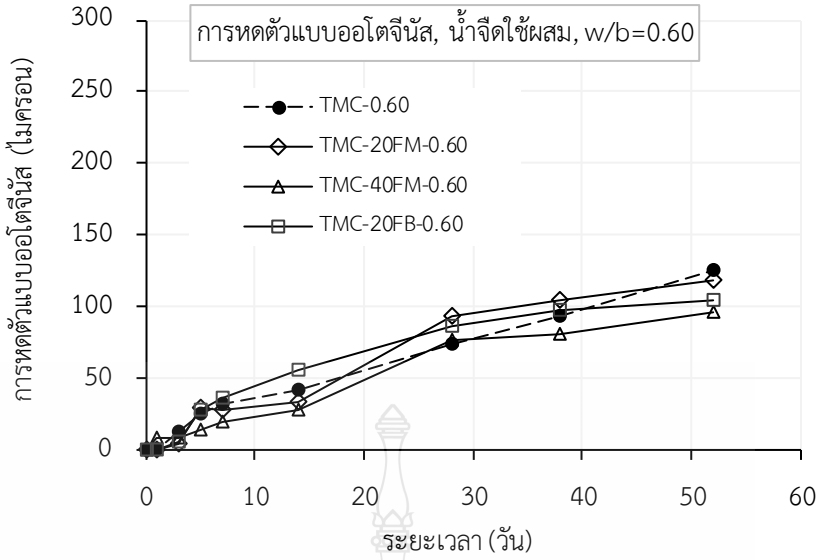
ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

- <u>น้ำจืดใช้ผสม</u>

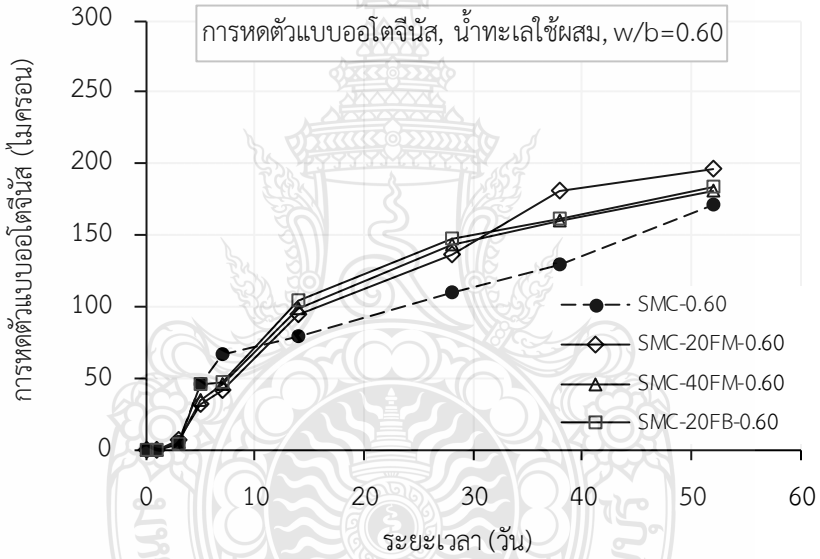
รูปที่ 4.16 ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของมอร์ต้าร์มากขึ้นการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

- <u>น้ำทะเลใช้ผสม</u>

รูปที่ 4.16 ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เห็นได้ชัดเจน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



ก) น้ำจืดใช้ผสม



ข) น้ำทะเลใช้ผสม

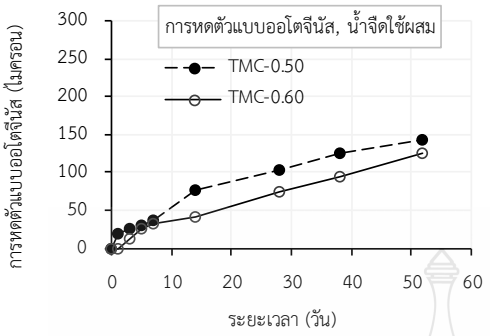
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

2) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

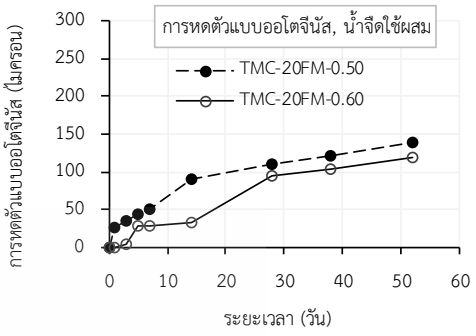
- <u>น้ำจืดใช้ผสม</u>

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์เมื่อน้ำจืดใช้ใช้ผสม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า (W/B 0.50) มีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่า (W/B 0.60) ทั้งนี้เพราะการใช้ปริมาณน้ำที่มากทำให้ปริมาณน้ำ

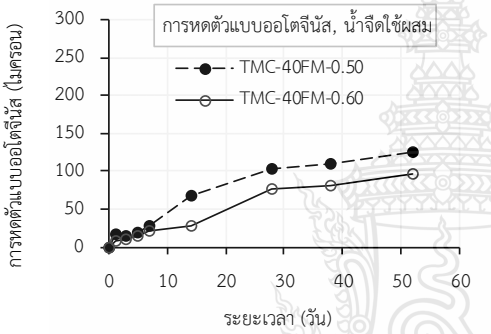
อิสระในมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นมอร์ต้าร์จึงมีน้ำเพียงพอในการทำทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีนัสลดลง



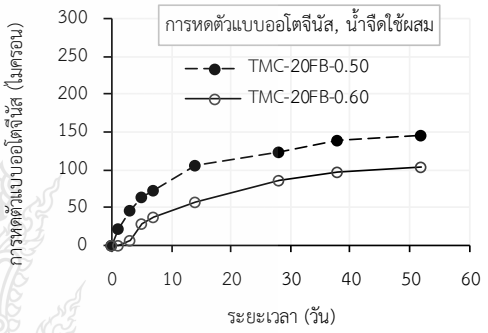
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ข) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20



ค) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40

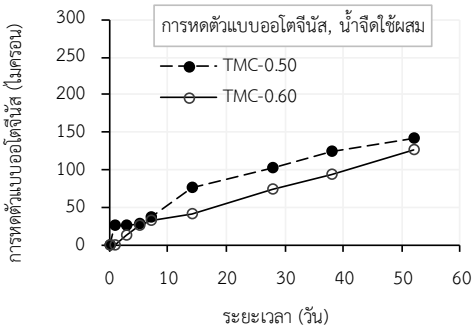


ง) ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20

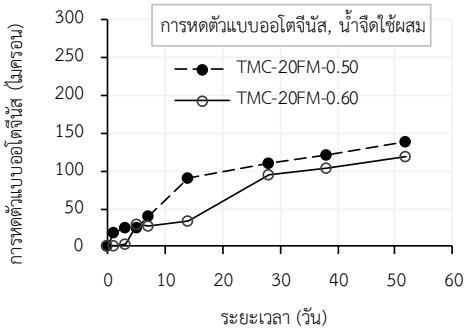
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสม

- <u>น้ำทะเลใช้ผสม</u>

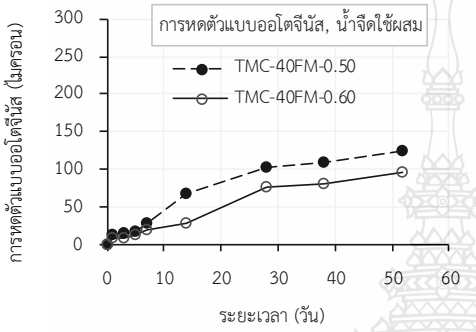
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า (W/B 0.50) มีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่า (W/B 0.60) ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



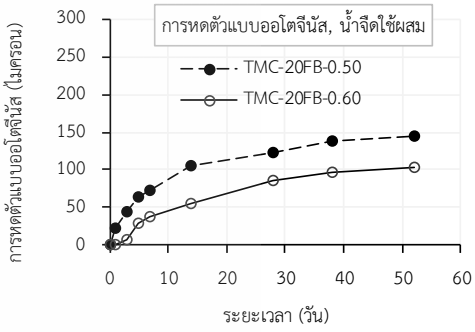
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ข) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20



ค) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40



ง) ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20

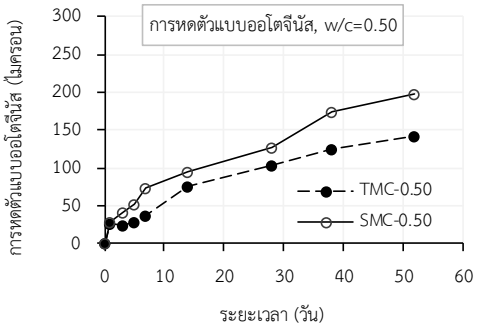
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสม

3) ผลกระทบจากการน้ำทะเลใช้ผสม

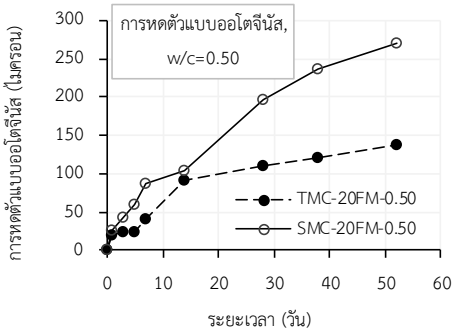
ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เปรียบเทียบระหว่างเมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสมค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เพราะมอร์ต้าร์ที่ผสมน้ำทะเลนั้น น้ำทะเลจะเร่งการทำปฏิกิริยาทั้งไฮเดรชั่นและปอซโซลานทำให้ต้องการน้ำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาดังกล่าว ส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีนัสจึงมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Morteza Khatib และคณะ [6]

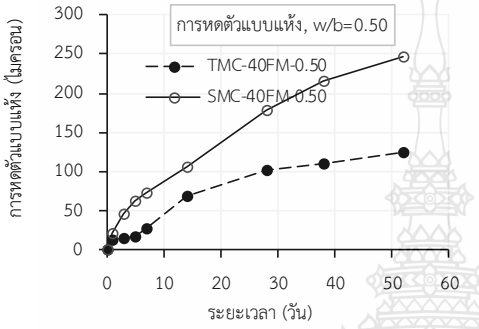
ส่วนรูปที่ 4.20 แสดงการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จะเห็นได้ชัดเจนของการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมนั้นมีค่าที่มากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม ได้อย่างชัดเจน



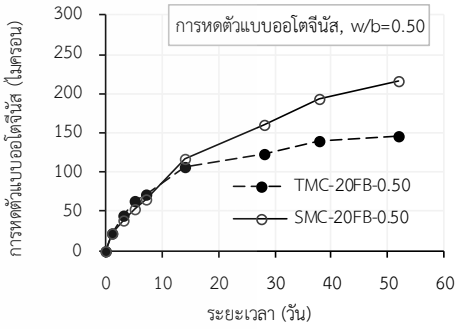
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



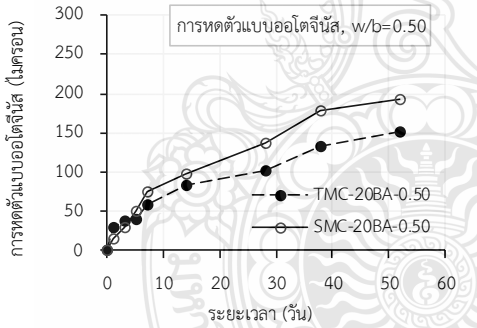
ข) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20



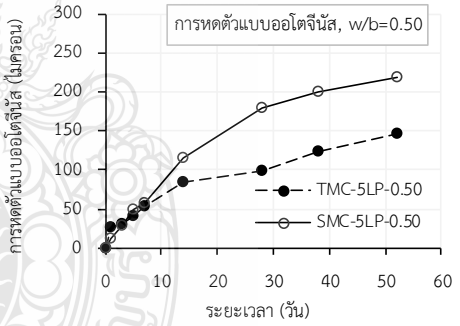
ค) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40



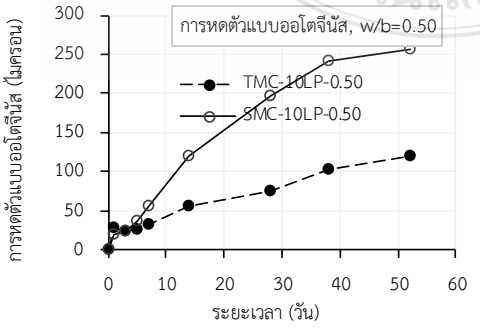
ง) ผสมเถ้าลอยแม่ BLPC ร้อยละ 20



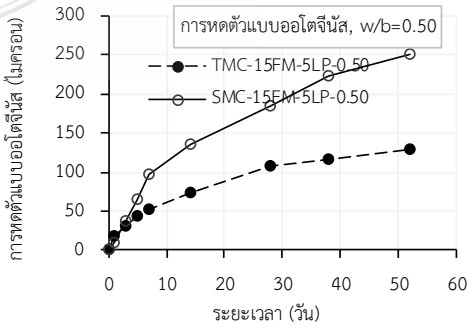
จ) ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20



ฉ) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5

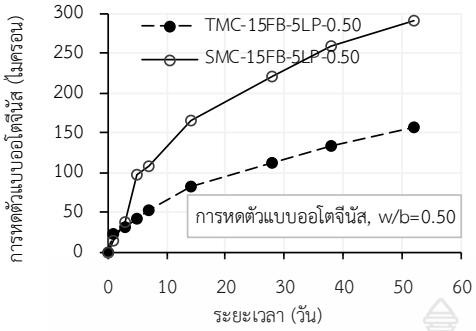


ช) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10

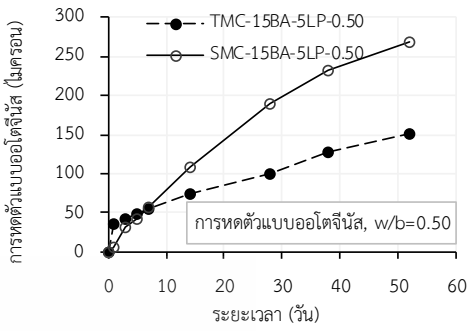


ซ) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15

ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

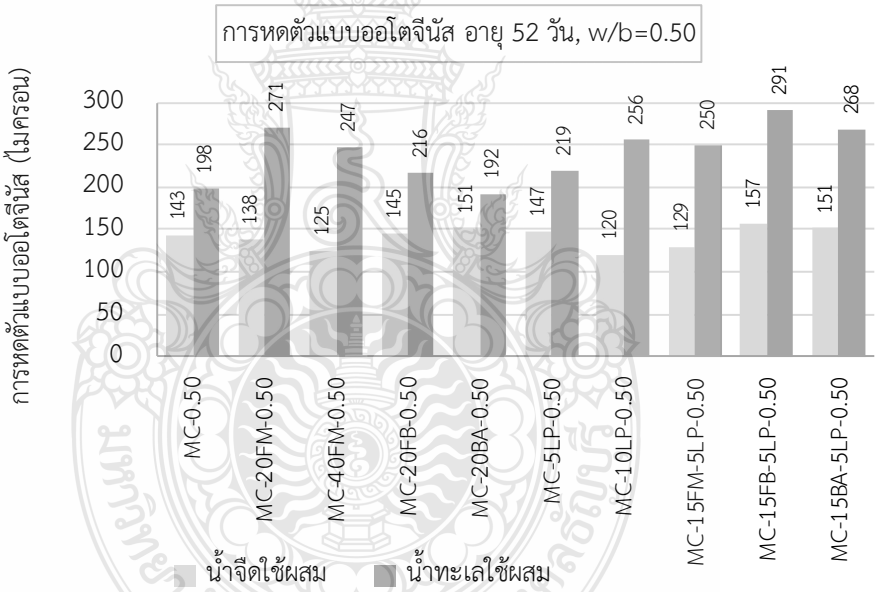


ฌ) ผสมเถ้าลอย BLPC ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5



ญ) ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

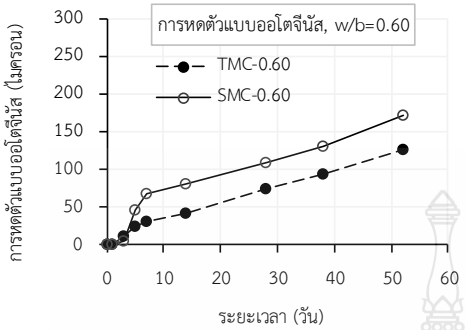


รูปที่ 4.20 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

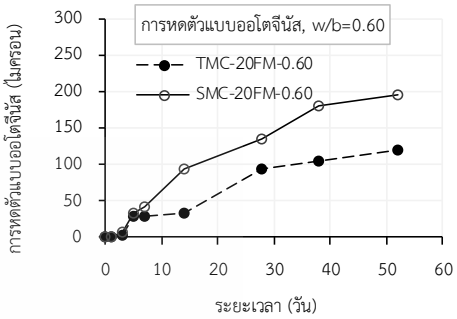
ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เปรียบเมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมโดยมอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม ค่อนข้างชัดเจนเช่นกัน ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

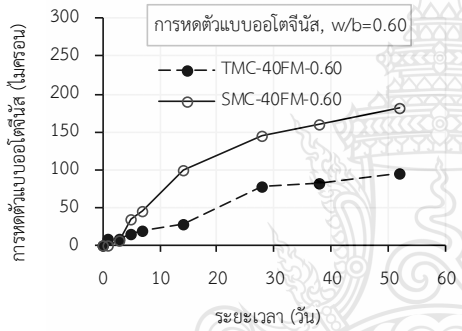
ส่วนรูปที่ 2.22 แสดงการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จะเห็นได้ชัดเจนเช่นกันว่า การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์เมื่อน้ำจืดใช้ผสม



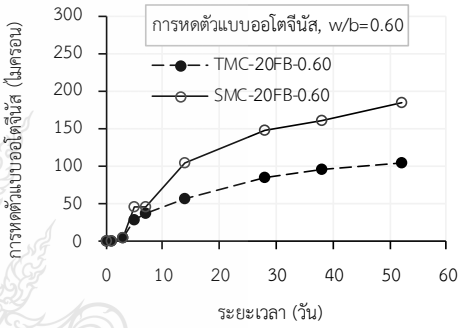
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ข) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20

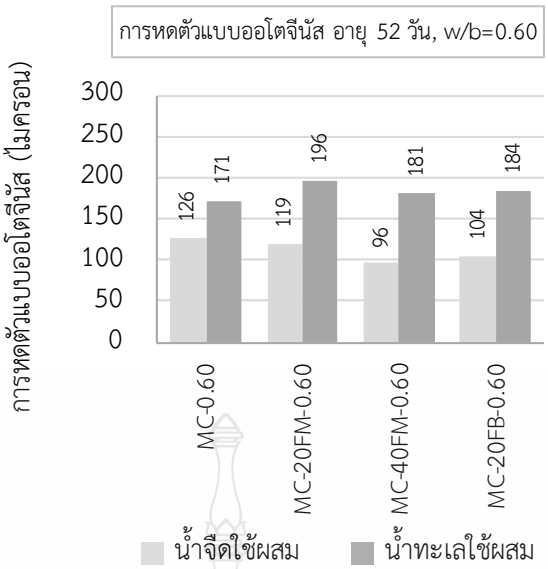


ค) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40



ง) ผสมเถ้าลอย BLPC ร้อยละ 20

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.60



รูปที่ 4.22 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

4.5 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

การหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) เกิดขึ้นจากการสูญเสียน้ำ (water) หรือความชื้น (moisture) จากภายในเนื้อมอร์ต้าร์ให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งมีความชื้นที่ต่ำกว่า

สำหรับการศึกษาการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ในครั้งนี้ประกอบด้วย มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20 และ 40 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 มอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 น้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสม โดยได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์คือ 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ 3) ผลกระทบจากการน้ำทะเลใช้ผสม มีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

- <u>น้ำจืดใช้ผสม</u>

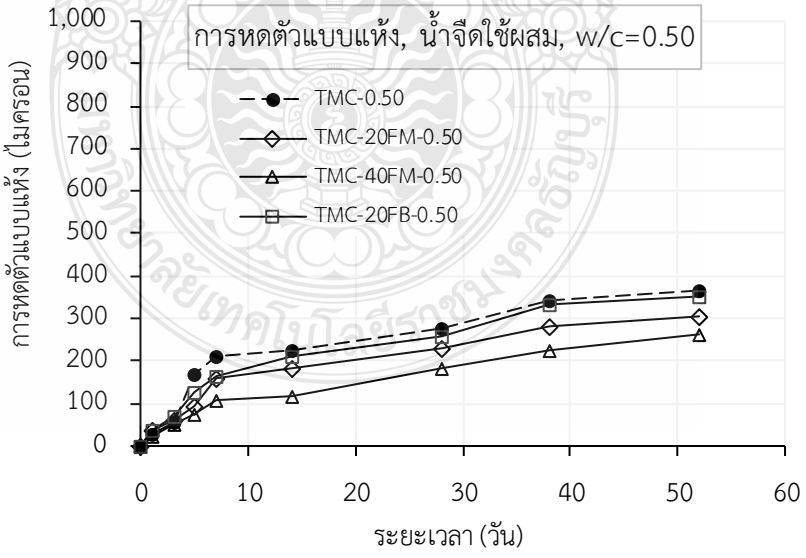
รูปที่ 4.23 ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสม และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยจะมีส่วนทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยาโดยเถ้าลอยที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

ก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ซึ่ง CSH ช่วยอุดช่องวางซีเมนต์เพสต์ให้มีความหนาแน่นขึ้น ส่วนเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่เหมือน micro aggregates ในการช่วยลดช่องว่างของมอร์ต้าร์ทำให้มอร์ต้าร์มีความหนาแน่นขึ้นทำให้น้ำในช่องว่างคาปิลลารี่ระเหยได้ยากขึ้น และความแข็งแรงของเพสต์มากขึ้น สามารถต้านทานการหดตัวได้โดยที่การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

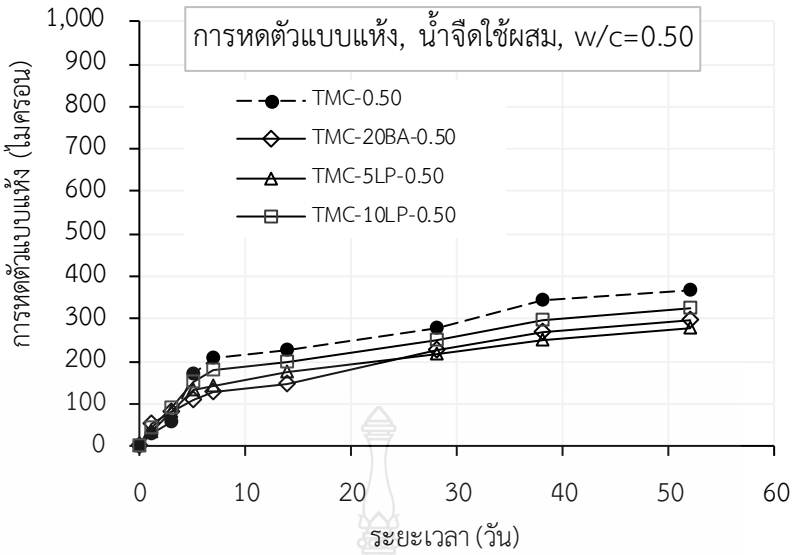
สำหรับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด (รูปที่ 4.23 ข)) พบว่าการหดตัวแบบแห้งของเพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เหตุผลเช่นเดียวกับกรณีของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

ส่วนมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 4.23 ข)) พบว่าการหดตัวแบบแห้งของเพสต์ผสมผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เช่นกัน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (inert material) ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เป็นการเพิ่มมวลรวมละเอียด ซึ่งโดยทั่วไปการเพิ่มปริมาตรของมวลรวมทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลงและลดการหดตัวได้ ประกอบกับผงหินปูนมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ จึงสามารถดูดซับน้ำไว้ที่ผิวของอนุภาคได้มาก ทำให้น้ำอิสระน้อยลง เนื้อมอร์ต้าจึงมีช่องว่างลดลง และด้วยอนุภาคที่เล็กของผงหินปูน ช่วยเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ ส่งผลให้การสูญเสียความชื้นได้ยากขึ้น

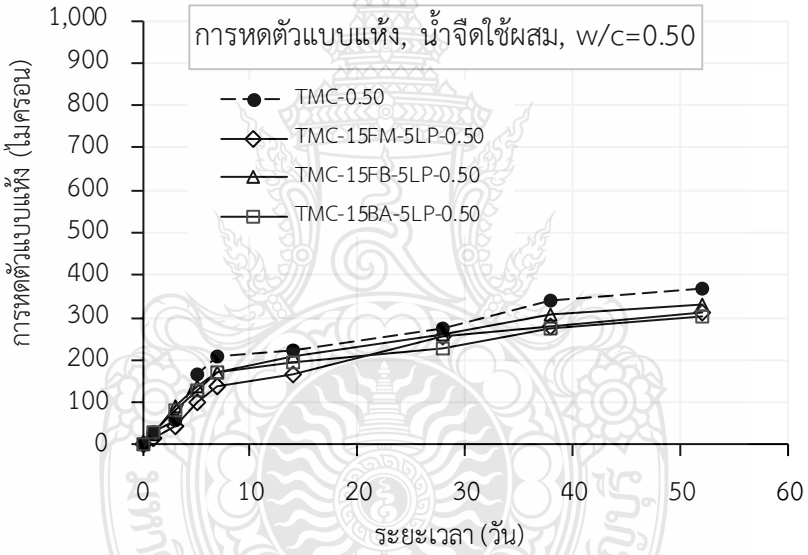
ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (ทั้งแม่เมาะและ BLCP) ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และเพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าเป็นไปตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอย



ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ล้วน เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผสมผงหินปูน



ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมผงหินปูน

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

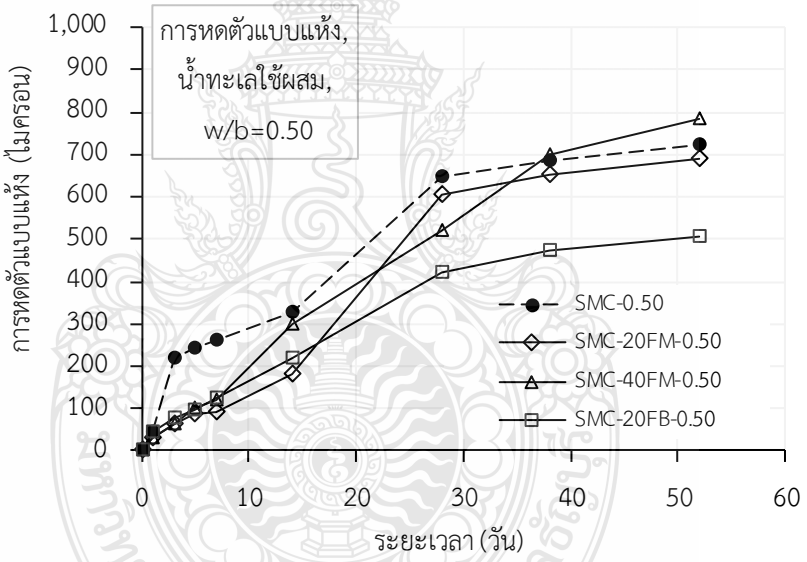
- <u>น้ำทะเลใช้ผสม</u>

รูปที่ 4.24 ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (ทั้งแม่เมาะและ BLCP) มีแนวโน้มน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เหตุผลเช่นเดียวกับกรณีเมื่อน้ำจืดใช้ผสม

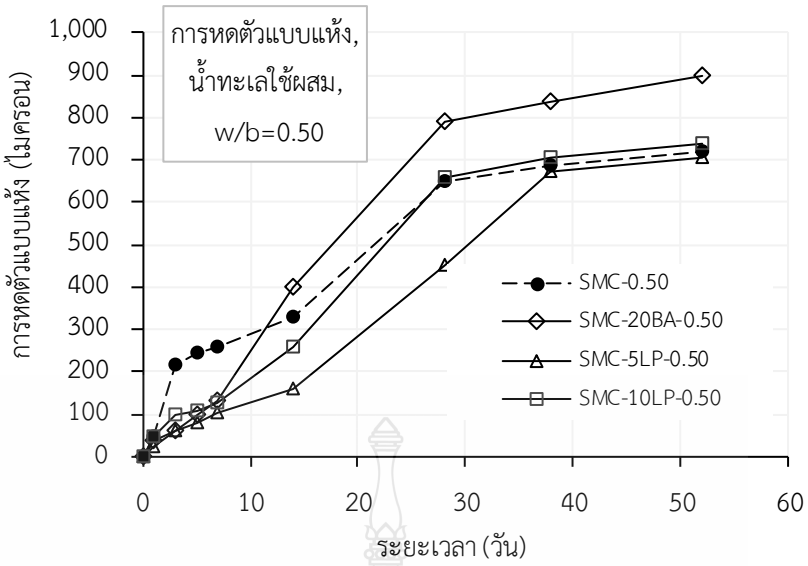
สำหรับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด (รูปที่ 4.24 ข)) พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ส่วนมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 4.24 ข)) พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าน้อยกว่าในขณะที่ของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 กลับมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไปจึงส่งผลให้เกิดช่องว่างในมอร์ต้าร์เพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงมากทำให้โครงสร้างเพสต์ลดกำลังลง จึงส่งผลทำให้การหดตัวแบบแห้งจึงเกิดขึ้นมาก

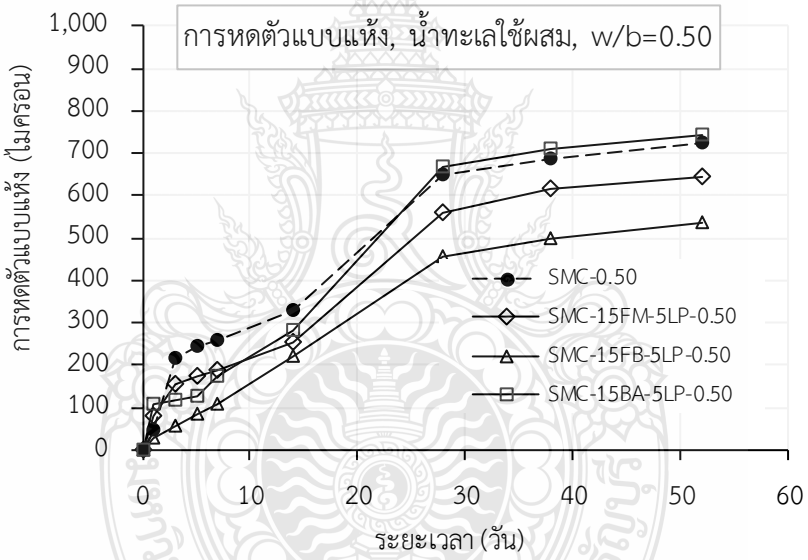
ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 (รูปที่ 4.24 ค)) พบว่าการหดตัวแบบแห้งของเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนและเพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าเป็นไปตามปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอย



ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และผสมผงหินปูน



ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

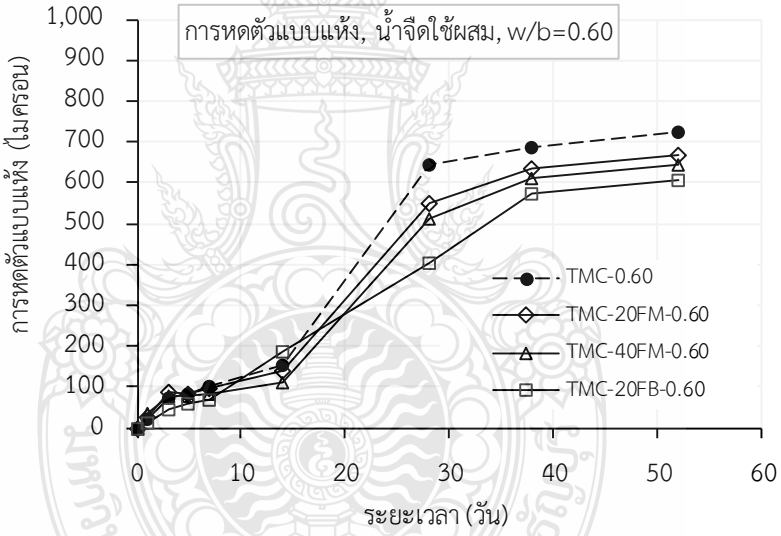
ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

- น้ำจืดใช้ผสม

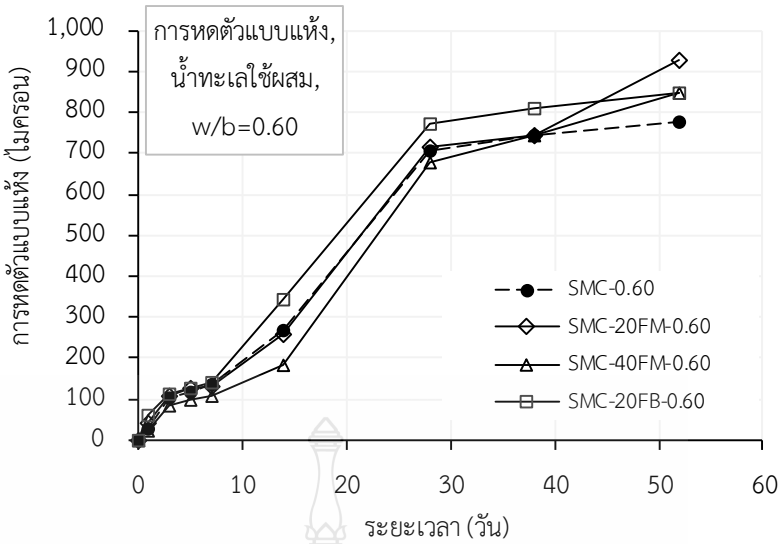
รูปที่ 4.25 ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (ทั้งแม่เมาะและ BLCP) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งไปในทิศทางเดียวกับของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

- น้ำทะเลใช้ผสม

รูปที่ 4.25 ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย (ทั้งแม่เมาะและ BLCP) มีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



ก) น้ำจืดใช้ผสม



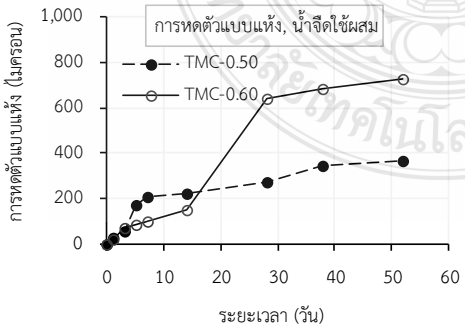
ข) น้ำทะเลใช้ผสม

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

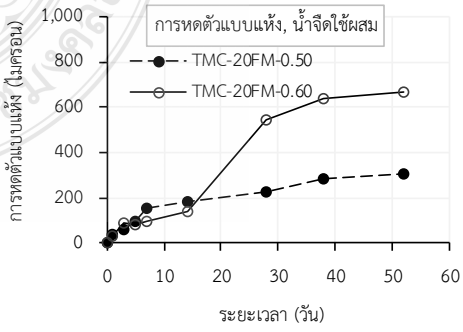
2) ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

- <u>น้ำจืดใช้ผสม</u>

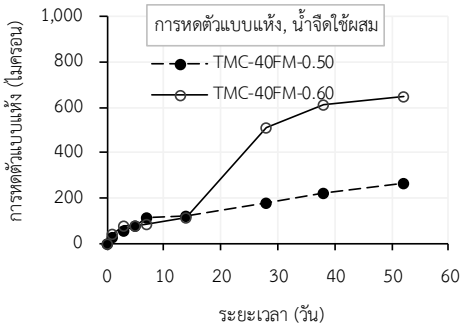
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า (W/B 0.50) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มากกว่า (W/B 0.60) ทั้งนี้เพราะมีปริมาณน้ำให้มีการสูญเสียน้ำสู่ภายนอกที่มากกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่น้อย ทำให้ปริมาณน้ำอิสระในมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์มีค่าที่มากตามไปด้วย



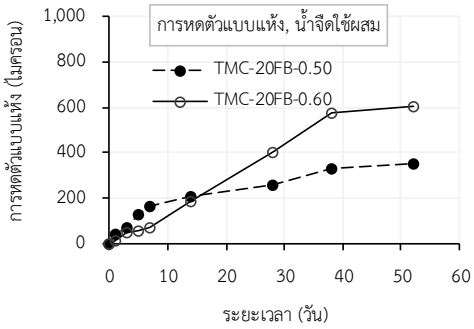
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ข) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20



ค) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40

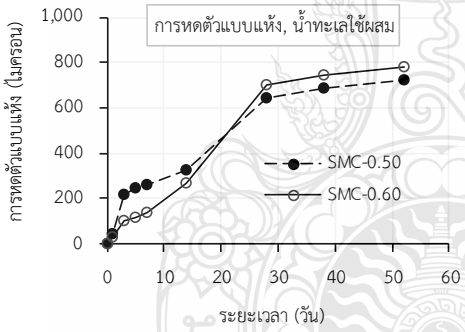


ค) ผสมเถ้าลอยระยองร้อยละ 20

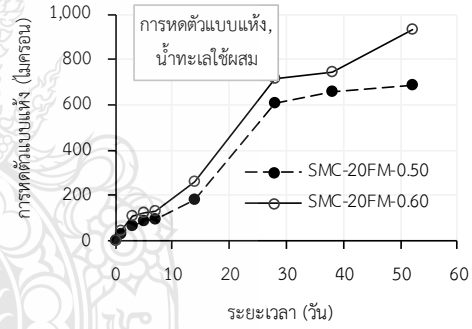
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดใช้ผสม

- <u>น้ำทะเลใช้ผสม</u>

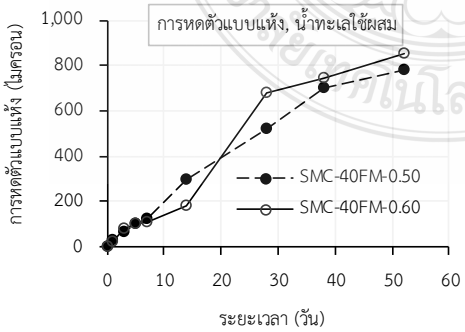
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่า (W/B 0.50) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากกว่า (W/B 0.60) ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



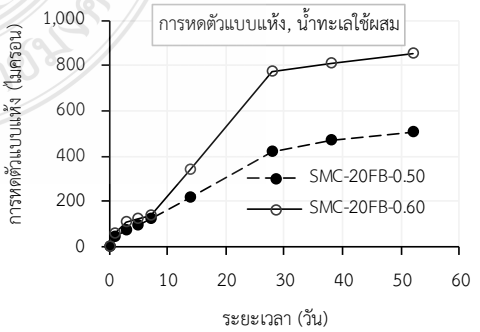
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



ข) เถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20



ค) เถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40



ง) เถ้าลอย BLPC ร้อยละ 20

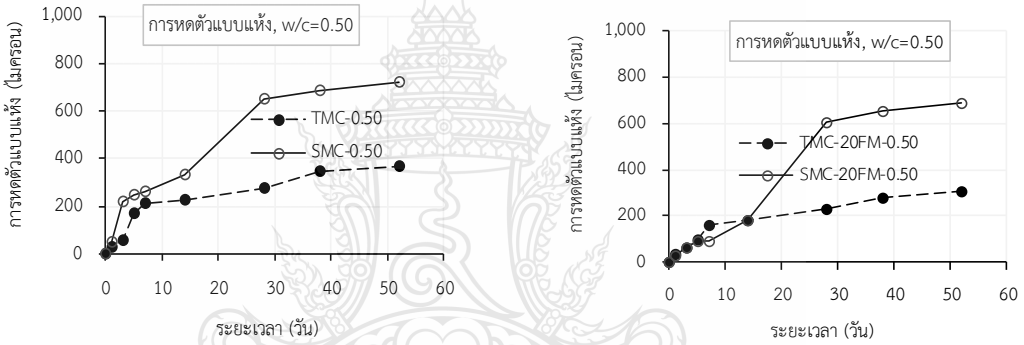
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำทะเลใช้ผสม

3) ผลกระทบจากการใช้น้ำทะเลใช้ผสม

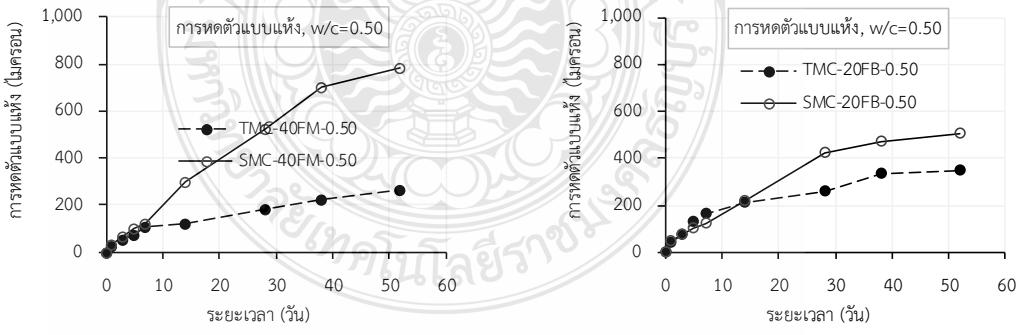
ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เปรียบเทียบระหว่างเมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมโดยมอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสมเป็นไปได้ว่าจากการที่น้ำทะเลเร่งให้เกิปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือปฏิกิริยาปอซโซลานจะทำให้เกิดช่องว่างเล็กๆจำนวนมากในเพรสต์ แต่เมื่อรวมช่องว่าง (ความพรุน) ทั้งหมดแล้วมีค่ามากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการหดตัวแบบแห้งที่มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Morteza Khatib และคณะ [6]

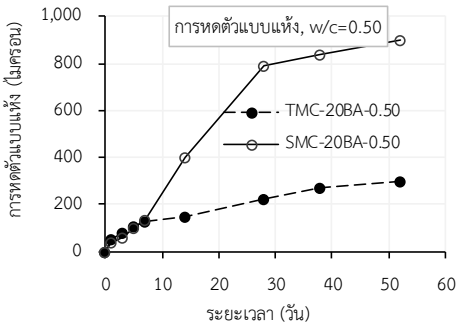
ส่วนรูปที่ 4.29 แสดงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 จะเห็นได้ชัดเจนเช่นกันว่า การหดตัวแบบแห้งมอร์ต้าร์เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์เมื่อน้ำจืดใช้ผสม



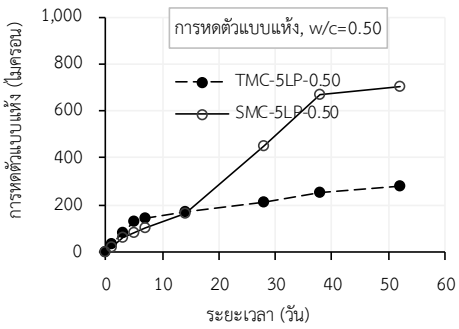
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ข) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20



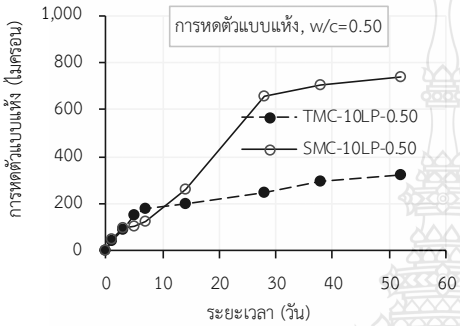
ค) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40 ง) ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20



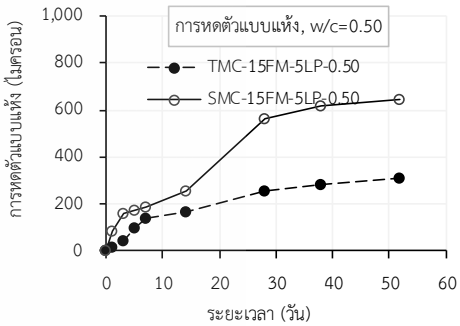
จ) ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด



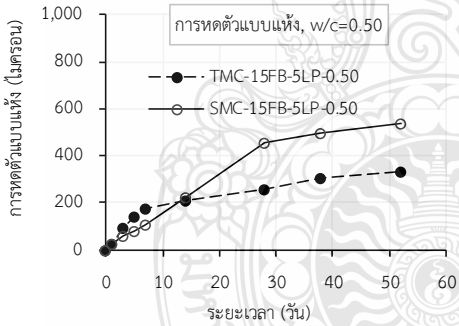
ฉ) ผสมผงหินปูนร้อยละ 5



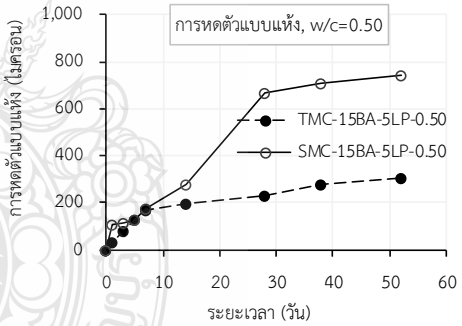
ช) ผสมผงหินปูนร้อยละ 10



ซ) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

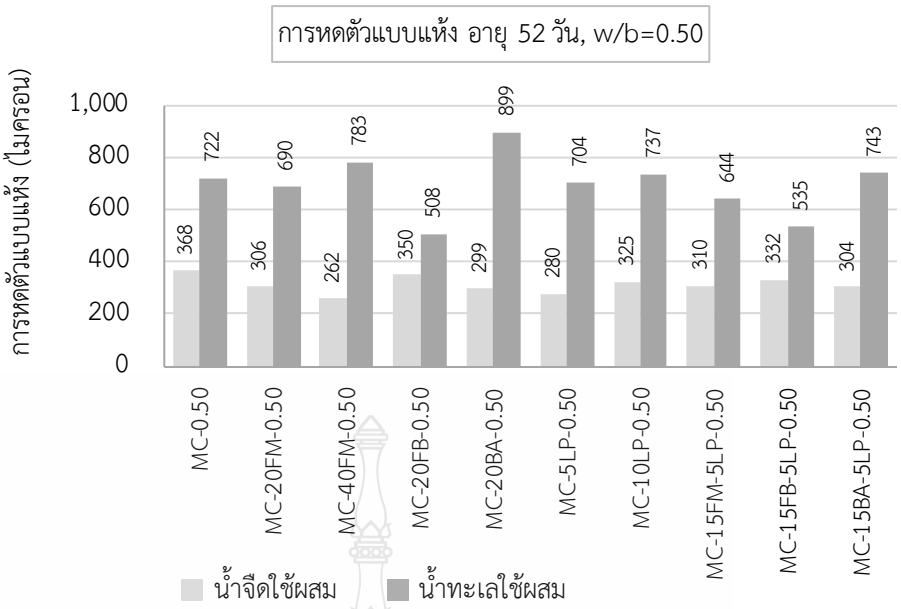


ฌ) ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5



ญ) ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

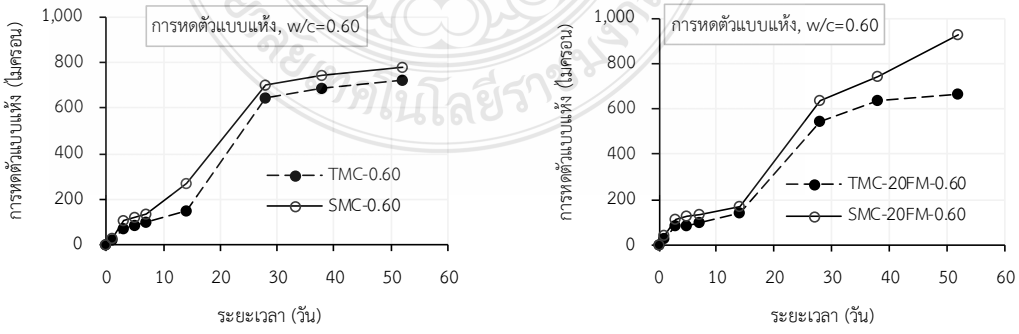


รูปที่ 4.29 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50

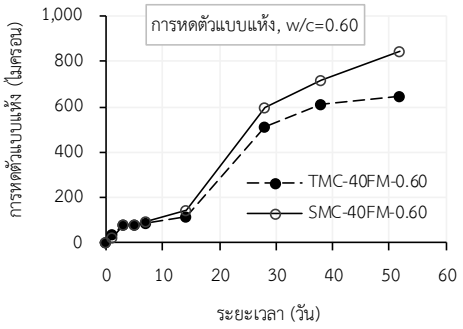
ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม ค่อนข้างชัดเจนเช่นกัน ทั้งนี้เหตุผลดังที่กล่าวแล้วข้างต้น

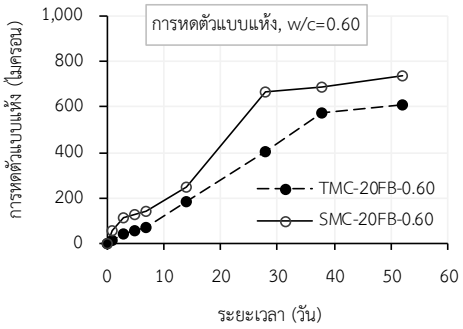
ส่วนรูปที่ 4.31 แสดงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 จะเห็นชัดเจนเช่นกันว่าค่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์เมื่อน้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอรีต้าร์เมื่อน้ำจืดใช้ผสม



ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ข) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 20

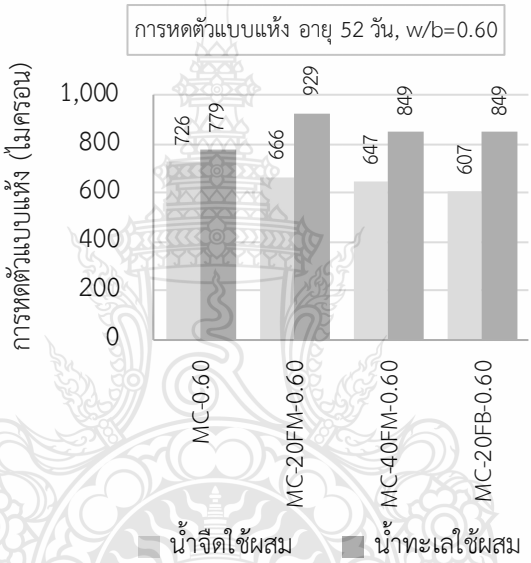


ค) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 40



ง) ผสมเถ้าลอย BLCP ร้อยละ 20

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ต้าร์ เปรียบเทียบเมื่อน้ำจืดและน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60



รูปที่ 4.31 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่อายุ 52 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60

4.6 เปรียบเทียบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อสมบัติด้านซีเมนต์ของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ และการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์

จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปเปรียบเทียบผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต ดังนี้

- ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ใช้น้ำทะเลผสมมากกว่าของเพสต์น้ำจืดใช้ผสม
- ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของเพสต์น้ำทะเลใช้ผสมเร็วกว่าของเพสต์น้ำจืดใช้ผสม
- การขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์น้ำทะเลใช้ผสมมากกว่าของเพสต์น้ำจืดใช้ผสม
- ค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมน้อยกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสม
- กำลังอัดประลัยที่ 1 7 และ 28 วัน ของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มมากกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม
- กำลังอัดประลัยที่ 91 วันของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มน้อยกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม
- กำลังดึงแยกที่ 28 วัน ของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มมากกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม
- กำลังดึงแยกที่ 91 วัน ของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มน้อยกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม
- การไหล่แผ่ของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมน้อยกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม
- การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม
- การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมต่อสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งของเพสต์/มอร์ต้าร์/คอนกรีต สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่าน้อยกว่า (โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก) ในขณะที่ของเพสต์ผสมเถ้าลอย BLCP มีค่ามากกว่า และของเพสต์ผสมผงหินปูนมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเพสต์น้ำทะเลใช้ผสมให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากกว่าของเพสต์น้ำจืดใช้ผสม

2) ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยนานกว่า ในขณะที่ของเพสต์ผสมผงหินปูนใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มที่เร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเพสต์น้ำทะเลใช้ผสมมีระยะเวลาการก่อตัวเร็วกว่าของเพสต์ที่น้ำจืดใช้ผสม

3) เพสต์น้ำจืดใช้ผสมนั้น การขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าในขณะที่ของเพสต์ผสมผงหินปูนมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเพสต์น้ำทะเลผสมนั้น การขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์ผสมเถ้าลอยและของเพสต์ผสมผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับการขยายตัวแบบออโตเคลฟของเพสต์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกกว่าของเพสต์น้ำจืดใช้ผสม

4) ค่าการไหลของมอร์ต้าร์และค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีค่ามากกว่า (โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก) ในขณะที่ของมอร์ต้าร์/คอนกรีตผสมเถ้าลอย BLCP มีค่าน้อยกว่า และของมอร์ต้าร์/คอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนค่าการไหลของมอร์ต้าร์และค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์/คอนกรีตน้ำจืดใช้ผสม

5) คอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่มนั้น กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่า (โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก) ในขณะที่ของคอนกรีตผสมผงหินปูนไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตในช่วงอายุต้น (น้อยกว่า 28 วัน) ให้ค่าที่มีแนวโน้มเดียวกันกับกรณีเมื่อน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม แต่เมื่ออายุมากขึ้น (91 วัน) กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม มีแนวโน้มที่ลดลง

6) กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่ม ในช่วงอายุ 28 วัน นั้น มีค่ามากกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม แต่เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น (ที่ 91 วัน) นั้น กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตน้ำทะเลใช้ผสมและบ่มนั้น กลับให้ค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตน้ำจืดใช้ผสมและบ่ม

7) มอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสมนั้น การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีแนวโน้มที่น้อยกว่า ในขณะของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย BLCP มีค่ามากกว่า โดยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างหรือแนวโน้มที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมนั้น การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และผสมผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มาก และการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม

8) มอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสมนั้น การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่มอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมนั้น การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และผสมผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อย และการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าร์น้ำทะเลใช้ผสมมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์น้ำจืดใช้ผสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะดังนี้

1) ควรศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลต่อสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว เช่น การคืบ ความทนทาน เป็นต้น

2) ควรศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลต่อมวลรวมเพิ่มเติมเพราะว่ามวลรวมมีสภาพเป็นกรดหากน้ำทะเลมีคลอไรด์และแมกนีเซียมในปริมาณที่มากอาจจะทำปฏิกิริยากับมวลรวมได้

บรรณานุกรม

[1] Falah M. Wegian, “Effect of seawater for mixing and curing on structural Concrete,” The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering Vol. 3, No. 4, November 2010, pp. 235-243.

[2] Qingyong Guo, Lei Chen, Huijian Zhao, Jorge Admilson, and Wensong Zhang.(2018) The Effect of Mixing and Curing Sea Water on Concrete Strength at Different Ages. MATEC Web of Conferences.

[3] S. O. Osuji and E. Nwankwo. “Marine Water Effect on Compressive Strength of Concrete: A Case Study of Escravos Area of Nigerian Delta,” Nigerian Journal of Technology Vol.34 No. 2, April 2015, pp. 240 – 244.

[4] B.Sathish kumar, P.Samuthirapandiyan, K.Sabari rajan and A.Subalakshmi. “Effect of Sea Water and Strength of Concrete,” International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 05 Issue: 04, Apr 2018, pp.1195-1199.

[5] Adiwijaya, Daisuke Yamamoto, Amry Dasar, Hidenori Hamada and Yasutaka Sagawa (2013). “Effects of Seawater Mixing and Curing on Strength and Carbonation of Fly Ash Concrete,” Jurnal of Structure and Materials in Civil Engineering, Number 29, 2013. pp 97-103.

[6] M. Khatibmasjedi, S. Ramanthan, P. Suraneni, and A. Nanni.(2019). ”Shrinkage Behavior of Cementitious Mortars Mixed with Seawater,” Advances in Civil Engineering Materials 8, no. 2,2019, pp 64-78.

[7] ปิติศานต์ กร้ำมาตร, “คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน,” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.

[8] ยงยุทธ วัฒนกุล, “คุณสมบัติดานซีเมนตและความตานทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน,”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[9] อรรถสิทธิ์ แสงระยับ, “ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อสมบัติของเพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2560.

[10] บวร มณีรัตน,”ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2559.

[11] สุรสิทธิ์ เพาะบุญ, ”ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2562.

[12] ปริญญา จินดาประเสริฐ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, (2556), ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต ,พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

[13] น้ำทะเล. (15 เมษายน 2564).[ออนไลน์]. สืบค้นจาก : https://th.wikipedia.org/wiki/น้ำทะเล

[14] American Society for Testing and Materials , ASTM C618-00 , Standard Specification for CoalFly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete ,Annual Book of ASTM Standards , 2001 , Vol. 04.02 , Philadelphia , 310-313.

[15] สหลาภ หอมวุฒิวงศ์, ดิลก ครัตนเวช และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, “การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อเถ้าถ่านหิน,” การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการน้าเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจุลจอมเกล้าธนบุรี.

[16] กระทรวงอุตสาหกรรม, “กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต,” มาตรฐาน มอก.2135-2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546.

[17] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ความคงทนของคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1, สิงหาคม 2543.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ANNUAL CONCRETE CONFERENCE 16
(ACC16)
Development of Infrastructures for Structural Performance Enhancement and Environmental Friendliness
TCA
สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
Thailand Concrete Association
March 31
-
April 2 2021
ThongsomboonClub
Nakornratchasrima

- การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 16 -
การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อการเพิ่มสมรรถนะ
ของโครงสร้างและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
---------- จัดโดย ----------
สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
ร่วมกับ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
TCA
สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
Thailand Concrete Association
มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ
ระหว่างวันที่ 31 มีนาคม ถึง 2 เมษายน พ.ศ.2564
ณ ไร่ทองสมบูรณ์ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

คณะกรรมการปรึกษา (Advisory Board)

รองศาสตราจารย์ ดร. พิชัย	นิมิตยงสกุล	ศาสตราจารย์ ดร. สมนึก	ตั้งเติมสิริกุล
ศาสตราจารย์ ดร. ชัย	จาตุรพิทักษ์กุล	ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์	ลิ้มสุวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร. ปริญญา	จินดาประเสริฐ	คุณสุวัฒน์	เชาว์ปรีชา
คุณสรณีย์	ดีพันธุ์พงษ์	คุณวรัช	กุศลมโนมัย
คุณสมชาย	เมธวัฒน์ธรากุล	คุณปริญญา	ยมะสมิต
คุณชัยรัตน์	อมาตยกุล	ดร. ณรงค์	ทัศนนิพันธ์
ศาสตราจารย์ ดร. เป็นหนึ่ง	วานิชชัย	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ	วีระศิริ
รองศาสตราจารย์ ดร. การุญ	จันทรางศุ	คุณมณฑล	สุดประเสริฐ
คุณสืบศักดิ์	พรหมบุญ	คุณอังสุรัสมิ์	อารีกุล

คณะกรรมการประจำ (Steering Committee)

นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ ดร. ธนากร พีระพันธุ์	นายกสมาคม
คุณอนุชิต เจริญศุภกุล	อุปนายก ฝ่ายวิชาชีพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูชัย สุจิวรกุล	อุปนายก ฝ่ายวิชาการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ มกระธัช	เลขาธิการ
คุณบุญรอด คุปติทัฬหิ	เหรัญญิก
ดร. ยุทธ ปณิธานวงศ์	ปฏิคมและประชาสัมพันธ์
นาวาอากาศเอก ณัชฐ์ ลิ้มสุวรรณ์	นายทะเบียน
คุณสรรกมล คงสวัสดิ์วรกุล	กรรมการกลาง
ดร. นนท์พัฒน นิมิตยงสกุล	กรรมการกลาง
คุณรัฐธนินท์ พฤกษ์สุวรรณ	กรรมการกลาง
คุณสุวัฒชัย ภูวพัฒนชาติ	กรรมการกลาง
ดร. ประวีณ ชมปรีดา	ประธานฯ สาขาโครงสร้างคอนกรีต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ประธานฯ สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง
ศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ยอดสุดใจ	ประธานฯ สาขาบำรุงรักษาซ่อมแซมและสาราณียากร

คณะกรรมการดำเนินงาน (Organizing Committee)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	ที่ปรึกษา
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดแวดล้อม	ที่ปรึกษา
นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ ดร. ธนากร พีระพันธุ์	ที่ปรึกษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ มกระธัช	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. สุนิติ สุภาพ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร. ศุภชัย สินถาวร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุดนิรันดร์ เพชรัตน์	กรรมการ
อาจารย์ ดร. เสฏฐา ศาสนนันทน์	กรรมการ
อาจารย์ ดร. อัฐสิทธิ์ ศิริวชิราภรณ์	กรรมการ
อาจารย์ ดร. ธีรพจน์ ศิริไพโรจน์	กรรมการ
อาจารย์ ดร. ปรารถนา ประชานุรักษ์	กรรมการ
อาจารย์ ดร. ปิยนุช ใจแก้ว	กรรมการ
นางสาวญานิกา ฤกษมหาลิขิต	กรรมการ
นางสาวจิรชา คุ้งตระกูล	กรรมการ
นายรุ่งโรจน์ ฤกษ์หร่าย	กรรมการ
นายนิวัตร์ หลิมสกุล	กรรมการ
อาจารย์ ดร. สุธิดา ทีปรักษพันธุ์	กรรมการและเลขานุการ
นายพีรพล เกลียวทอง	ผู้ช่วยเลขานุการ

คณะกรรมการวิชาการผู้ทรงคุณวุฒิ (Academic Committee) ประจำหมวดหัวเรื่อง

ศาสตราจารย์ ดร. ต่อกุล กาญจนาลัย	การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างคอนกรีต (STR)
ศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล	เทคโนโลยีคอนกรีตและวัสดุ เทคโนโลยีการก่อสร้าง การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน (MAT)
ศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ยอดสุดใจ	การบำรุงรักษา ซ่อมแซม และเสริมกำลังคอนกรีต (REP)
ศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล	คอนกรีตเพื่อสิ่งแวดล้อม และการอนุรักษ์พลังงาน (ENV)
ศาสตราจารย์ ดร. ปิติ สุคนธสุขกุล	ผลงานและนวัตกรรมของผู้ประกอบการ (ICM)
ศาสตราจารย์ ดร. สุวิมล สัจจวาณิชย์	เทคโนโลยีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานคอนกรีต (RCT)

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.)
Thailand Concrete Association (TCA)
ชั้น 3 อาคารสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย 487 ราม คำแหง 39 (ซอยเทพลีลา)
ถนนรามคำแหง แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310
โทร : 0-2136-2331, โทรสาร : 0-2935-6538Email : thaitca@gmail.com http://www.thaitca.or.th

ที่ สคท.069/2564 3 มีนาคม 2564

เรื่อง **ตอบรับบทความฉบับสมบูรณ์**

เรียน **คุณทศพร พรมวงค์**
คุณปิติศานต์ กร้ำมาตร
คุณสุคม ลิปิเลิศ

ตามที่สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย ได้กำหนดจัดงานประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 16 (Annual Concrete Conference 16) ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ในหัวข้อ *"คอนกรีตท่ามกลางความท้าทายต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศไทยเพื่อการเพิ่มสมรรถนะของโครงสร้างและความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม"* ระหว่างวันที่ 31 มีนาคม – 2 เมษายน 2564 รูปแบบ Interactive Online Conference ผ่านโปรแกรม GoToWebinar

ซึ่งจากการที่ท่านได้ให้ความสนใจส่งบทความวิชาการ ***รหัส*** MAT-003 เรื่อง ***"ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแยกของคอนกรีต"*** เพื่อเข้าร่วมเสนอบทความในการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 16 นั้น ซึ่งคณะกรรมการจัดการประชุม ได้พิจารณาแล้วเห็นสมควรให้นำเสนอบทความวิจัยของท่านเข้าร่วมในการประชุมวิชาการครั้งนี้ ทั้งนี้ท่านสามารถดูรายละเอียดกำหนดการจัดงานได้ทาง Website ของสมาคมฯ www.thaitca.or.th

จึงเรียนมาเพื่อทราบ และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

ธนากร พีระพันธุ์

นาวาอากาศเอก

(รองศาสตราจารย์ ธนากร พีระพันธุ์)
นายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

กำหนดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 16

The 16th Annual Concrete Conference (ACC16)

"Development of Infrastructures for Structural Performance Enhancement and Environmental Friendliness"

(Interactive Online with GoToWebinar)

Thailand Concrete Association

in collaboration with

Department of Civil and Environmental Engineering

Faculty of Engineering

SRINAKHARINWIROT UNIVERSITY

31 March - 2 April 2021

31 March 2021

09.00 – 09.30 น.	กล่าวต้อนรับผู้เข้าร่วมการประชุมและกล่าวขอบคุณผู้สนับสนุนการจัดการประชุม *โดย นายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย* พิธีเปิดการประชุมและกล่าวขอบคุณผู้สนับสนุน *โดย คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์*
09.45 น. เป็นต้นไป	**การบรรยายพิเศษ (Keynote Speaker)** **"Development of Infrastructures for Structural Performance Enhancement and Environmental Friendliness: Part 1"**
09.45 – 10.15 น.	**ICCC 1** By Prof. Karen Scrivener, *International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)*
10.15 – 10.45 น.	**ACI Ambassador** By Mr. G. Terry Harris, *American Concrete Institute (ACI)*
10.45 – 11.15 น.	**Sustainability and the ACI Building Code: Plans for the 2025 Edition of ACI318** By Dr. Andrew W. Taylor, *American Concrete Institute (ACI)*
11.15 – 11.45 น.	**High levels of replacement** By Mr. Kevin MacDonald, *American Concrete Institute (ACI)*
11.45 – 13.00 น.	**พักรับประทานอาหารเที่ยง (Lunch Time)**

09.30 – 10.00 น. **Hot issues in concrete aggregates**

By Prof. Dr. Suvimol sujjavanich, *Kasetsart University*

10.00 – 10.30 น. **Structural performance assessment by digital twin approach**

By Ing. Radomir Pukl, *Cervenka Consulting, Czech Republic*

10.30 – 11.00 น. **คอนกรีตขยายตัวสำหรับแก้ปัญหาการแตกร้าวจากการหดตัว**

By Prof. Dr. Somnuk Tangtermsirikul, *Thammasat University*

11.00 – 11.30 น. **"HYDRAULIC CEMENT": Environmentally Friendly Cement for a Sustainable Construction**

By Thai Cement Manufacturers Association (TCMA)

11.30 – 13.30 น. **พักรับประทานอาหารเที่ยง (Lunch Time)**

13.30 – 14.30 น. ICCC2

By Prof. Caijun Shi, *International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)*

14.30 – 18.00 น. การนำเสนอบทความวิจัย

Chair: รองศาสตราจารย์ ว่าที่ พ.ต.ดร.อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ (ASSOC. PROF. ACTING MAJ. ITTIPORN SIRISAWAT (PH.D.))

Co-Chair: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด (Asst.Prof.Panuwat Joyklad, Ph.D.)

STR-001	Strengthening of Square Concrete-Filled Steel Tube Column with Steel Bars Under Uni-Axial Load *Pirunluck Khamphay, Jaksada Thumrongvut, Numchai Joesoongnern, Weeraphan Jiammeepreecha, Komkorn Chaidachatorn*
STR-002	Axial Load Capacity of Circular Concrete-Filled Steel Tube Column with Hybrid Cement *Namchai Joysoongnern, Jaksada Thumrongvut, Pirunluck Khamphay, Cherdsak Suksiripattanapong, Chayakrit Phetchuay*
STR-003	Experimental Behavior of High-Strength Square Concrete-Filled Steel Tube Columns under Various Load Application *Namchai Joysoongnern, Jaksada Thumrongvut, Thanapon Sawang-Ngam, Satakhun Detphan, Jeerasuk Supromwan*
STR-004	Strengthening of Flexural Member by Using Post-Tensioning CFRP Strip System *ชูชัย สุจิวรกุล, ชัยพล คณะพันธ์, สมภพ อัมรนันท์*
STR-005	CRACK DETECTION ON CONCRETE SURFACE BY DEEP LEARNING FROM VGG16 ARCHITECTURE *Phisutwat Kalpiyapun, Krisada Chaiyasarn*

MAT-014	Comparative Study using Palm Oil Fuel Ash and Clay Residue as a Promoter in High-Calcium Fly Ash Geopolymer: Workability and Compressive Strength *Todsaporn Srikhamma, Chattarika Phiangphimai, Akaraphol Wachum, Khattiya Chompoovong, Chudapak Detphan, Satakhun Detphan*
MAT-015	USE OF GROUND RICE HUSK ASH TO IMPROVE THE PROPERTIES OF GEOPOLYMER WITH AND WITHOUT RECYCLED EPS FOAM *วิทยา นาระวิน, รัฐพล สมนา, เกียรติสุดา สมนา, ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, จีรศักดิ์ สุพรมวัน*

Chair: รองศาสตราจารย์.ดร.วิทิต ปานสุข (Assoc. Prof. Dr. Withit Pansuk)

Co-Chair: อ.ดร.ปัญญาวุธ จิรดิลก (Dr.Punyawut JIRADILOK)

MAT-016	COMPRESSIVE STRENGTH OF HOLLOW NON-LOAD-BEARING MASONRY UNIT FROM CALCIUM CARBIDE RESIDUE AND FLY ASH ACTIVATED WITH SODIUM HYDROXIDE SOLUTION *จักรพงศ์ ชานประโคน, รัฐพล สมนา, เกียรติสุดา สมนา*
MAT-017	EFFECT OF CALCINED CLAY ON CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE *Aunchana Kijjanon, Taweechai Sumranwanich, Arnon Wongkaew, Thidaporn Chuosavasdi*
MAT-018	Comparative study of properties of concrete made of hydraulic cement (TIS 2594) and ordinary Portland *Aaquib Rasul Mazumdar, Thanakorn Pheeraphan*
MAT-019	Use of Modified Andreasen Model for Low Cement Concrete of Medium Strength *Aaquib Rasul Mazumdar, Thanakorn Pheeraphan*
MAT-020	EFFECT OF POLYMER ADMIXTURES ON MECHANICAL PROPERTIES OF PREPLACED AGGREGATE CONCRETE *Mohamed Aslah Mohamed Minsar, Thanakorn Pheeraphan*

2 April 2021

09.00 เป็นต้นไป **Special Topic: International Conference**
"Challenges of Concrete and Construction Materials to Develop Infrastructures in Asia-Pacific"

09.00 – 09.30 น. **Fatigue damage and life time prediction of concrete bridge deck slabs**
By Prof. Yasuhiko Sato, *Waseda University*

10.30 – 11.00 น. **ACI Ambassador**

By Prof. Jason Weiss, *American Concrete Institute (ACI)*

11.00 – 11.30 น. **Development of the reactive silane-based surface impregnating material for preventing deterioration of reinforced concretes structures in consideration of Thailand climate & for the contribution of structure resilience and environmental friendliness**

By Mr. Norimasa Mimura, SHO-BOND CORPORATION, JAPAN

11.30 – 13.00 น. พักรับประทานอาหารเที่ยง (Lunch Time)

ช่วงสาธิตผลิตภัณฑ์ (Present product from ACC16 sponsors)

13.00 – 13.20 น. **สาเหตุและวิธีการแก้ไขปัญหาที่พบได้บ่อยในงานพื้นโรงงาน (Root cause and Solution of common problems in Industrial floor)**

By คุณปกรณ์ สุทธิวารี, บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

13.20 – 13.40 น. **คอนกรีตความร้อนต่ำกำลังอัดสูง 600 ksc โครงการ One Bangkok(Low-Heat High-Strength Concrete (600ksc) for One Bangkok Project)**

By คุณศักรินทร์ เหลืองกำจร, บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด

13.40 – 14.00 น. **นวัตกรรมในงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะและกำแพงกันดินขนาดใหญ่ (Innovation in construction of large-diameter bored pile and diaphragm wall)**

By ดร. ธยานันท์ บุณยรักษ์, บริษัท ซีฟโก้ จำกัด(มหาชน)

14.30 – 18.30 น. การนำเสนอบทความวิจัย

Chair: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ ร.ต.ดร.ศุภชัย สินถาวร (Assit. Prof. Acting Sub LT. Suppachai Sinthaworn, D.Eng.)

Co-Chair: นาวาอากาศโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินิศ รัตนปรมากุล(Wing Commander Asst Prof. Pinit Ruttanaporamakul (Ph.D.))

MAT-010	Case study physical, mechanical, and dynamical properties for concrete mixes crumb rubber alternate coarse aggregate *Suphakorn Prapassorn*
MAT-011	COMPRESSIVE STRENGTH AND ACID RESISTANCE OF GEOPOLYMER USED CALCITE AS FINE AGGREGATE *วิทวัส พะเนาไธสง, ภิเษก จำปารัตน์, อนุรักษ์ แมลงผึ้ง, ชาญชัย เจาะปก, เกียรติสุดา สมนา*
MAT-012	GEOPOLYMER CONCRETE PAVEMENT BLOCK FROM FLY ASH *Jakrin Poochamchote, Rattapon Somna, Kiatsuda Somna*
MAT-013	Properties of Coconut Fiber Mixed with Rice Husk Ash Mortar *สิทธิศักดิ์ คำชาย, จตุพล ตั้งปภาศิต*

MAT-003	EFFECT OF SEAWATER AS MIXING WATER ON SLUMP, COMPRESSIVE STRENGTH AND SPLITTING TENSILE STRENGTH OF CONCRETE *Todsapom Promwong, Pitisan Krammart, Sukhom Lipiloet*
MAT-004	A STUDY THE COMPRESSIVE STRENGTH OF MORTARS USED DUST OF CRUSHED STONE IN MIXING *Attaphol Bubpi, Yongyuth Sirisriphet, Chongsin Sookoomjariyapong, Sommai Songbang, Nutthapong kedsanchai, Nitaya Surachak, Pawinee Pantura, Peam Thachoo*
MAT-005	EFFECT OF SEAWATER AS MIXING WATER ON CARBONATION AND CHLORIDE PENETRATION RESISTANCE OF CONCERETE *Niwat Chimplee, Pitisan Krammart, Sukhom Lipiloet*
MAT-007	DURABILITY OF MARGINAL LATERITIC SOIL IMPROVED BY FLY ASH GEOPOLYMER FOR RAILWAY EMBANKMENT *Chokchai Khomobklang, Kitti Sangnet, Cherdsak Suksiripattanapong, Chayakrit Phetchuay, Sermsak Tiyasangthong, Ratchanon Sakdinakorn, Kampanat Taysongnoen*
MAT-008	Mechanical Properties of Mortar Mixed with Coconut Fiber and Polypropylene Fiber *Chokchai Khomobklang, Cherdsak Suksiripattanapong, Chayakrit Phetchuay, Jaksada Thumrongvut, Sermsak Tiyusangthong*
MAT-009	Effective of Recycled Aggregates on The Basic Properties of Recycled Concrete *Tawatchai Tho-In, Walailuk Chanthaphon, Orathai Saenkanha, Suban Phonkasi, Thoetkait Wichaiyo, Pakaphorn Yodsiri*

1 April 2021

09.00 น. เป็นต้นไป **Special Topic: International Conference "Development of Infrastructures for Structural Performance Enhancement and Environmental Friendliness: Part 2"**

09.00 – 09.30 น. **3D Printed Concrete: Research, Challenges and Future Opportunities**
By Prof. Mahmoud Reda Taha, *American Concrete Institute (ACI)*

09.30 – 10.00 น. **Meeting Design Goals with Architectural Concrete**
By Mr. Larry Rowland, *American Concrete Institute (ACI)*

10.00 – 10.30 น. **Towards Carbon-Neutral Civil Infrastructure with Sensors, Cyber-Physical Networks and AI**
By Prof. Banthia Nemkumar, *American Concrete Institute (ACI)*

13.00 – 14.00 น.	นำเสนอผลงาน **TCA Concrete Practice Awards (Gold Medal)** โครงการ The Commuter Train System (Red Line) Project Bang Sue-Rangsit Section: Contract 1 โดย Unique Engineering and Construction PCL
14.00 – 14.30 น.	**Reactivity tests for supplementary cementitious materials** By Asst. Prof. Prannoy Suraneni, *American Concrete Institute (ACI)*
14.30 – 15.00 น.	**Load and resistance factors for concrete bridges.** By Prof. Andrzej S. Nowak, *American Concrete Institute (ACI)*
15.00 เป็นต้นไป	**Special Topic from Mortar Group** **"Challenges of Mortar and Construction Materials to Develop Infrastructures in Thailand"**
15.00 – 15.20 น.	**มาตรฐานของคอนกรีตทางทะเล** By คุณจุฑารัตน์ ทรัพย์ปฐวี, บริษัท ยูบาว(ประเทศไทย) จำกัด
15.20 - 15.40 น.	**Waterproofing Shotcrete** By Mr.Iljoon Choi, WACKER CHEMICALS
15.40 - 16.00	**The First On-site 3D Printing SCG Co-working space in Thailand** By คุณเฉลิมวุฒิ สงวนญาติ, บริษัท เอสซีจี ซิเมนต์ จำกัด
16.00 - 16.20	**Wall & Floor solutions for sustainable construction** By Dr.Yothin Ungkoon /Mr.Sirirot Phimankam, บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)
16.20 - 16.40	**วัสดุติดยึดและซ่อมแซม ชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต (Concrete Segmental - Adhesive and Repair)** By คุณสุวิชา พารักษา, บริษัท ซิก้า(ประเทศไทย) จำกัด
16.40 - 17.00	**นวัตกรรมซ่อมผิวพื้นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม** By คุณธิติ ศรีรัตนา, บริษัท จระเข้คอร์ปอเรชั่น จำกัด
17.00 - 17.20	**SEADMA** By Mr.Ferdinand Leopolder, South East Asia Drymix Mortar Association (SEADMA)
17.30 – 19.30 น.	การนำเสนอบทความวิจัย

Chair: รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ (Assoc.Prof. Suniti Suparp, Ph.Eng.)

Co-Chair: อาจารย์ ดร.สุธิดา ทีปรักษพันธุ์ (AJ.Suthida Theepharaksapan, Ph.D.)

MAT-002	MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE USING AGREGATES IN BURIRAM PROVINCE *จิรวัฒน์ วิมุตติสุขวิริยา*

STR-006	Flexural Behavior Of Reinforce Concrete Beam Concrete Beam Using Fiber Optic Sensing Technology *Patanayu Phuphasuwan, Krisada Chaiyasarn*
STR-007	DEVELOPMENT OF BRIDGE WEIGH-IN-MOTION SYSTEM USING STRAIN RESPONSES OF SHORT-SPAN CONCRETE BRIDGE *Jiradate Akkaraphon, Pattarapong Asanachinda*
STR-008	Bending Property and Behavior of Thin Plate Made from Polypropylene Fiber Reinforced Concrete *จันทิมา พุ่มจันทร์, ชูชัย สุจิวรกุล*
STR-009	Finite Element Analysis of Phra Prang Watchaiwattanaram based on Terrestrial Laser Scanning Data *Peerapat Pinyopojanee, Chainarong Athisakul, Peerasit Mahasuwanchai, Sutat Leelataviwat*

ปิดการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 16

หมายเหตุ : กำหนดการนี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม

ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแยกของคอนกรีต

EFFECT OF SEAWATER AS MIXING WATER ON SLUMP, COMPRESSIVE STRENGTH AND SPLITTING TENSILE STRENGTH OF CONCRETE

ทศพร พรมวงค์ (Todsaporn Promwong)[1]
ปิติศานต์ กร้ำมาตร (Pitisan Krammart)[2]
สุคม ลิปิเลิศ (Sukhom Lipiloet)[3]

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี
todsaporn_p@mail.rmutt.ac.th
[2]*รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี*
pitisan.k@en.rmutt.ac.th
[3]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี
sukhom.l@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ : บทความนี้ศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแยกของคอนกรีต โดยแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตเท่ากับ 0.70 ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตทั้งที่ใช้น้ำทะเลและน้ำจืดผสมนั้น ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าที่มากกว่า ส่วนคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมให้ค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสม นอกจากนี้คอนกรีตทั้งที่ใช้น้ำทะเลและน้ำจืดผสมและบ่มนั้น กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าในขณะที่กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าที่ไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่ออายุมากขึ้นกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่มนั้น มีแนวโน้มจะลดลง สุดท้ายกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่มในช่วง 28 วัน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสมและบ่ม แต่เมื่ออายุที่ 91 วันนั้น กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่ม กลับให้ค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสมและบ่ม

ABSTRACT: This paper is to study the effect of seawater as mixing water on slump, compressive strength and splitting tensile strength of concrete, partially replaced in Ordinary Portland Cement (OPC) with fly ash and limestone powder. The water to binder ratio of concrete was equal to 0.70. The study found that both concrete using fresh water and seawater as mixing water, the slump of fly ash concrete was greater, while the slump of limestone powder concrete was similar when compared to that of OPC concrete. The slump of concrete using seawater as mixing water was lower than that of fresh water concrete. Additionally, in both concrete using fresh water and seawater as mixing water and curing, the compressive strength and the splitting tensile strength of fly ash concrete were less than, while the compressive strength and the splitting tensile strength of limestone powder concrete had no different when compared to those of OPC concrete. In long period, the compressive strength and the splitting tensile strength of concrete using seawater as mixing water and curing tended to go down. Finally, the compressive strength and the splitting tensile strength of concrete using seawater as mixing water and curing during 28 days were higher than those of fresh water mixed and cured concrete. Then at the age of 91 days, the compressive strength and the splitting tensile strength of concrete using seawater as mixing water and curing were lower than those of fresh water conctere.

KEYWORDS: Seawater, Slump, Compressive strength, Splitting tensile strength, Concrete

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีการขยายตัวมากขึ้น สืบเนื่องมาจากความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างต่างๆ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการผลิตปูนซีเมนต์สูงขึ้น โดยในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจาก

กระบวนการเผาเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ ปัญหาด้านเสียงและฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิต และปัญหาต้นทุนทางด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาด้านทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง โดยวัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) หรือซิลิกาและอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก

การเติบโตอย่างรวดเร็วของประชากรโลกส่งผลกระทบต่อทรัพยากรทั่วโลก ตัวอย่างเช่น น้ำจืดอาจจะขาดแคลนและหาได้ยากมากในบางภูมิภาคในโลก ตามรายงานขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (WMO) ประชากรมากกว่าครึ่งหนึ่งของโลกจะไม่สามารถได้รับน้ำดื่มเพียงพอภายในปี พ.ศ.2568 [1] ในอุตสาหกรรมคอนกรีตมีการใช้น้ำจืดหลายพันล้านตันต่อปี เพื่อเป็นการประหยัดน้ำจืด และประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานบริเวณชายฝั่งทะเล มีความจำเป็นในการศึกษา เพื่อให้การใช้น้ำทะเลในอุตสาหกรรมคอนกรีตได้รับการยอมรับ

ถึงแม้ว่าน้ำทะเลไม่อนุญาตให้ใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากเกลือคลอไรด์ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ แต่สามารถใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีตบางประเภทที่ไม่ต้องใช้เหล็กเสริม เช่น พลาสติกเสริมใยแก้ว GFRP (Glass Fiber Reinforce Polymer) ถนนเสริมไม้ไผ่ ผลิตภัณฑ์คอนกรีตล้วน งานคอนกรีตดาดคลอง เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยที่มีการนำน้ำทะเลมาใช้ผสมคอนกรีตและบ่มในคอนกรีตที่ผ่านมานั้น Falah M. Wegian [2] พบว่า คอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลมีกำลังประลัย กำลังดึงแยก กำลังดัดและแรงยึดเหนี่ยว ของคอนกรีตที่สูงกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ในช่วงอายุ 7 และ 14 วัน เมื่ออายุ 28 วันจนถึงอายุ 90 วัน กำลังประลัย กำลังดึงแยก กำลังดัดและแรงยึดเหนี่ยว ของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืดจะมีค่าที่ดีกว่า ส่วน Qingyong Guo และคณะ [3] พบว่า คอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลกำลังอัดประลัยลดลงประมาณร้อยละ 15 เมื่อเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืดที่อายุ 90 วัน และ S. O. Osuji and E. Nwankwo [4] พบว่า คอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลให้กำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ประมาณร้อยละ 15 ที่อายุ 28 วัน ส่วนคอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำทะเลแต่บ่มด้วยน้ำจืดให้กำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ประมาณร้อยละ 10 ที่อายุ 28 วัน ในขณะที่ B.Sathish kumar และคณะ [5] พบว่าคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำทะเลให้ กำลังอัดประลัย กำลังดัดและกำลังดึงแยกต่ำกว่าของคอนกรีตที่ผสมและบ่มด้วยน้ำจืด ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

อย่างไรก็ตามจากผลการวิจัยที่ผ่านมายังมีข้อมูลที่ไม่ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งอาจจะเกิดจากเงื่อนไขในการศึกษาที่ต่างกัน เช่น วัสดุที่ใช้ต่างกัน สภาพน้ำทะเลต่างกัน เป็นต้น เพื่อให้ได้มีข้อมูลที่หลากหลายมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแยกของคอนกรีต โดยใช้น้ำทะเลผสมและบ่มเปรียบเทียบกับการใช้น้ำจืดผสมและบ่มคอนกรีต เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำทะเลมาใช้ในงานคอนกรีต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้นั้นวัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C 150 [6] เถ้าลอย (จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง) ผงหินปูน (ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิต) ทราย (ทรายน้ำจืดที่สะอาดไม่มีดินและสิ่งเจือปน) หิน (ไม่มีสิ่งเจือปน นำมาล้างด้วยน้ำสะอาด) น้ำจืด (ใช้น้ำประปามีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในช่วง 7 ถึง 8) และน้ำทะเล (จากหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี)

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.2.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน

ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [7] ความละเอียดโดยวิธีเบลน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 [8] ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค โดยวิธี Scanning Electric Microscope (SEM) และองค์ประกอบทางเคมี โดยวิธีวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

2.2.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำทะเล

โดยวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (pH) (วัดด้วยเครื่องมือ พี เอช มิเตอร์ (pH meter)) ปริมาณซัลเฟต (วิเคราะห์ด้วยวิธีแกรวิเมทรี (Gravimetric Analysis)) และปริมาณคลอไรด์ (วิเคราะห์ด้วยวิธีซิลเวอร์ไนเตรต (Argentometric Method))

2.2.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143 [9]

2.2.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 ใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม คอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/c) เท่ากับ 0.70 โดยใช้น้ำจืดและน้ำทะเลแยกกันทั้งผสมและบ่มตัวอย่าง แล้วทดสอบกำลังอัดประลัยที่อายุ 1 7 14 28 และ 91 วัน

2.2.5 กำลังดึงแยกของคอนกรีต

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 496 [10]

2.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแยกของคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.70 แสดงดังตารางที่ 1

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 สมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน

3.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 2 แสดงความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

3.1.2 ความละเอียดโดยวิธีเบลน

ตารางที่ 2 แสดงความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตในปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.70

สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กิโลกรัม)						
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	
						จืด	ทะเล
TCC-0.70	330	-	-	736	980	231	-
TCC-20FA-0.70	264	66	-	736	959	231	-
TCC-40FA-0.70	198	132	-	736	941	231	-
TCC-5LP-0.70	313	-	17	736	978	231	-
TCC-10LP-0.70	297	-	33	736	978	231	-
TCC-15FA-5LP-0.70	264	49	17	736	978	231	-
SCC-0.70	330	-	-	736	980	-	231
SCC-20FA-0.70	264	66	-	736	959	-	231
SCC-40FA-0.70	198	132	-	736	941	-	231
SCC-5LP-0.70	313	-	17	736	978	-	231
SCC-10LP-0.70	297	-	33	736	978	-	231
SCC-15FA-5LP-0.70	264	49	17	736	978	-	231

หมายเหตุ TCC-0.70 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยผสมและบ่มน้ำจืดใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70, TCC-20FA-0.70 หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยผสมและบ่มน้ำจืดใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70, SCC-10LP-0.70 หมายถึง คอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 โดยผสมและบ่มน้ำจืดใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70, SCC-15FA-5LP-0.70 หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 โดยผสมและบ่มน้ำจืดใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70

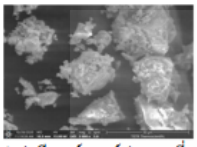
ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน (8 μm)
ความถ่วงจำเพาะ	3.10	2.57	2.87
ความละเอียดด้วยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,100	2,977	5,210

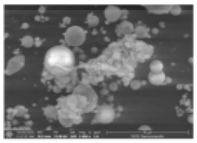
3.1.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

ภาพที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ภาพที่ 1 ก)) มีลักษณะเหลี่ยมคมผิวขรุขระขนาดไม่แน่นอน

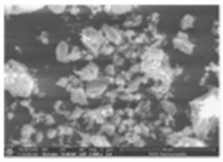
แตกกระจายอยู่ทั่วไป เถ้าลอย (ภาพที่ 1 ข)) มีลักษณะรูปร่างกลมมนและตันมีขนาดต่างๆกันกระจ่ายอยู่ทั่วไป และผงหินปูน (ภาพที่ 1 ค)) มีลักษณะเหลี่ยมคมผิวขรุขระขนาดไม่แน่นอนแตกกระจายอยู่ทั่วไป



ก) ปูนซีเมนต์แลนด์ประเภทที่ 1



ข) เถ้าลอย



ค) ผงหินปูน

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,000 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน

3.1.4 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน

ออกไซด์ (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผงหินปูน (8 μm)
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	18.93	26.61	0.45
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.51	13.60	0.05
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.31	18.34	0.03
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.53	24.97	55.20
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.24	2.33	0.34
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.88	8.53	<0.01
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	<0.01	1.75	<0.01
โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.31	1.77	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	2.24	0.53	43.12
แคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO)	1.00	3.93	N/A

N/A หมายถึง ไม่มีข้อมูล (Not Applicable)

3.2 สมบัติเบื้องต้นของน้ำทะเล

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟต และคลอไรด์ของน้ำทะเล ซึ่งนำมาจากบริเวณหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี

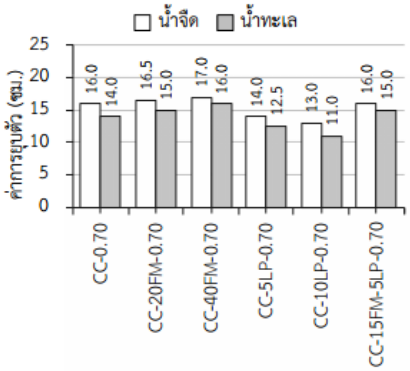
ตารางที่ 4 ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณซัลเฟต และคลอไรด์ของน้ำทะเล

วันที่เก็บตัวอย่าง	ความเป็นกรดด่าง (pH)	ปริมาณซัลเฟต (ppm)	ปริมาณคลอไรด์ (ppm)
กันยายน พ.ศ.2563	7.6	1,132	22,093
ตุลาคม พ.ศ. 2563	7.8	1,168	2,2193
พฤศจิกายน พ.ศ. 2563	7.8	1,096	2,0293

3.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ภาพที่ 2 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยใช้น้ำจืดและน้ำทะเลผสมคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดในการผสมนั้น ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะอนุภาคที่กลมของเถ้าลอยช่วยให้การลื่นไหลได้ดี ส่วนคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงหรือแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะความละเอียดของผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงต้องการน้ำที่มากกว่า ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนเป็นไปตามการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน ส่วนคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลในการผสม พบว่าให้ค่าการยุบตัวที่มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสม กล่าวคือค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่คอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าการยุบตัวที่ใกล้เคียงหรือแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว นอกจากนี้พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมให้ค่าการยุบตัวที่น้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสม ทั้งนี้เพราะในน้ำทะเลมีสารละลายอนินทรีย์ต่างๆเจือปน

มากกว่าน้ำจืด โดยเฉพาะคลอไรด์และซัลเฟต (ตารางที่ 4) ส่งผลให้มีค่าการยุบตัวที่น้อยกว่า



ภาพที่ 2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

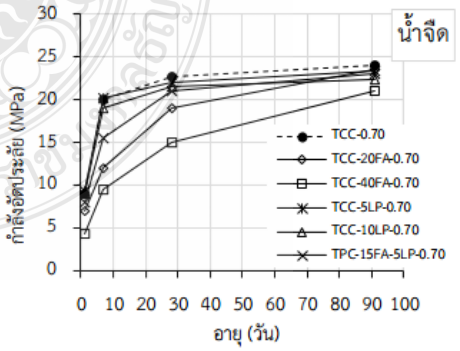
3.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

จากการศึกษากำลังอัดประลัยของคอนกรีตในครั้งนี้ ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบจากการใช้น้ำทะเลผสมและบ่มคอนกรีต มีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

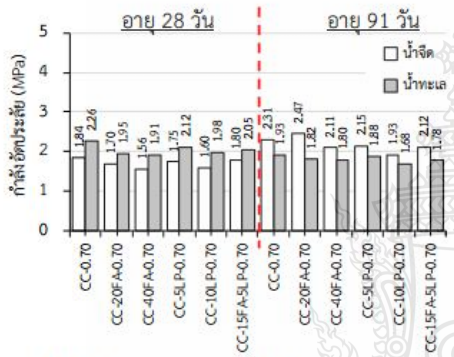
ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 และใช้น้ำจืดและน้ำทะเลแยกกันผสมและบ่มคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดในการผสมและบ่ม (ภาพที่ 3 ก)) นั้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปูนซีเมนต์ลงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยลง แต่เมื่ออายุมากขึ้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีการพัฒนากำลังใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องมาจากผลปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย ส่วนคอนกรีตผสมผงหินปูนนั้น พบว่ามีค่ากำลังอัดประลัยที่ไม่แตกต่างหรือมีแนวโน้มที่มากกว่าที่อายุเริ่มแรก แต่เมื่ออายุมากขึ้นมีแนวโน้มที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้แม้ว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนเป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง แต่ผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ละเอียดกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงสามารถเข้าไปเติมเต็ม (Filler) ช่องว่างของเพสต์เป็นการลดปริมาณช่องว่างภายในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น แต่เมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้นผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่น้อยกว่า ส่งผลให้มีกำลังที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้น พบว่ามีค่าเป็นไปตามการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน

ส่วนในกรณีเมื่อใช้น้ำทะเลผสมและบ่มคอนกรีต (ภาพที่ 3ข)) พบว่า ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตในช่วงอายุต้น (น้อยกว่า 28 วัน) ให้ค่าที่มีแนวโน้มเดียวกันกับกรณีเมื่อใช้น้ำจืดผสมและบ่มคอนกรีต กล่าวคือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูนให้ค่าที่ใกล้เคียงหรือแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่ออายุมากขึ้น (91 วัน) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้น้ำทะเลผสมและบ่มทุกๆสัดส่วน (ที่ศึกษา) มีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งอาจเป็นเพราะการตกผลึกของเกลือที่แฝงมากับน้ำทะเล ซึ่งสอดคล้องการศึกษาของ Falah M. Wegian [2]



ทะเลผสมและบ่มคอนกรีต เมื่ออายุมากขึ้นกำลังดึงแยกของคอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

ส่วนผลกระทบของการใช้น้ำทะเลผสมและบ่มคอนกรีตต่อกำลังดึงแยกของคอนกรีต ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกับของกำลังอัดประลัย กล่าวคือกำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่มนั้น มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสมและบ่ม ส่วนเมื่ออายุมากขึ้นกำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่มนั้น กลับให้ค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสมและบ่ม ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวแล้ว



ภาพที่ 5 กำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลผสมและบ่มคอนกรีต ที่อายุ 28 และ 91 วัน

4.สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตทั้งที่ใช้น้ำทะเลและน้ำจืดผสมนั้น ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า ส่วนคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียง เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมให้ค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสม

2. คอนกรีตทั้งที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลผสมและบ่มนั้น กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตผสมผงหินปูนนั้นมีค่าที่ไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่ออายุมากขึ้นกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่มนั้นมีแนวโน้มจะลดลง

3. กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่ม ในช่วง 28 วัน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสมและบ่ม แต่เมื่ออายุของคอนกรีตที่ 91 วัน กำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่ม กลับให้ค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสมและบ่ม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Mahmoud ABU-ZEID, 2004. Water resources as a challenge of the twenty-first century. World Meteorological Organization. WMO - No. 959.

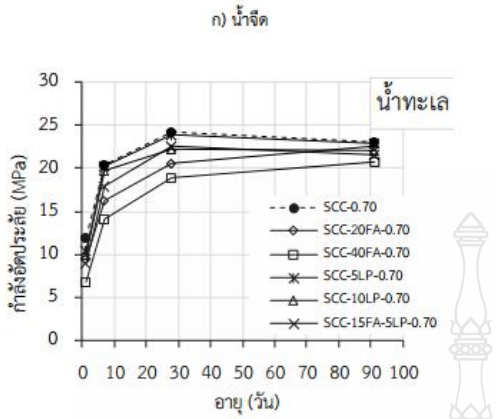
[2] Falah M. Wegian, 2010. Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering Vol. 3, No. 4, November 2010, pp.235–243.

[3] Qingyong Guo, Lei Chen, Huijian Zhao, Jorge Admilson, and Wensong Zhang, 2017. The Effect of Mixing and Curing Sea Water on Concrete Strength at Different Ages. MATEC Web of Conferences 142, 02004 (2018).

[4] S. O. Osuji and E. Nwankwo, 2015. MARINE WATER EFFECT ON COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE: A CASE STUDY OF ESCRAVOS AREA OF NIGERIAN DELTA. Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH) Vol.34 No. 2, April 2015, pp. 240 – 244

[5] B.Sathish kumar , P.Samuthirapandiyan, K.Sabari rajan and A.Subalakshmi, 2018. EFFECT OF SEA WATER AND STRENGTH OF CONCRETE. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 05 Issue: 04, Apr-2018.

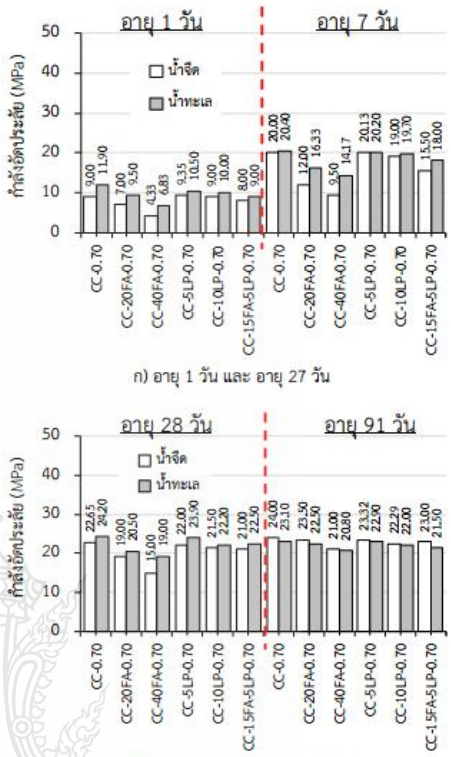
[6] ASTM C 150-00, 2000. Standard Test Method for Portland Cement, Annual Book of ASTM Standard.



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุของคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.70

2) ผลกระทบของการใช้น้ำทะเลผสมและบ่มคอนกรีต

ภาพที่ 3 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลผสมและบ่มคอนกรีต ที่อายุ 1 7 28 และ 91 วัน พบว่าในช่วงอายุของคอนกรีต 28 วันนั้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่มนั้น มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสมและบ่ม ส่วนในช่วงอายุของคอนกรีตที่ 91 วัน กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้น้ำทะเลผสมและบ่มนั้น กลับให้ค่าที่น้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดผสมและบ่ม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในน้ำทะเลมีสารละลายอนินทรีย์ต่างๆเจือปน โดยเฉพาะคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งจะเพิ่มกำลังในระยะแรกแต่ในระยะยาวคอนกรีตจะมีกำลังลดลงเพราะเกลือซัลเฟตจะทำให้เกิดการตกผลึกของเกลือ ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Falah M. Wegian [2]



ภาพที่ 4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลผสมและบ่มคอนกรีต ที่อายุ 1 7 28 และ 91 วัน

3.5 กำลังดึงแยกของคอนกรีต

จากการศึกษากำลังดึงแยกของคอนกรีต พบว่าให้ผลไปในแนวโน้มเดียวกันกับกรณีของกำลังอัดประลัย กล่าวคือ คอนกรีตทั้งที่ใช้น้ำจืดและน้ำทะเลในการผสมและบ่มนั้น กำลังดึงแยกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น และคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่ากำลังดึงแยกที่ไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนกำลังดึงแยกของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนให้ค่าเป็นไปตามการแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูน ซึ่งเช่นเดียวกันในการณีคอนกรีตที่ใช้น้ำ

[7] ASTM C 188-95, 1995. Standard Test Method for Density of Hydralic Cement, Annual Book of ASTM Standard.

[8] ASTM C 204-00, 2000. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, Annual Book of ASTM Standards.

[9] ASTM C 496-96, 1996. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylinder Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standard.

[10] ASTM C 204-00, 2000. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, Annual Book of ASTM Standards.

[11 ASTM C157/C157M-17, 2017. Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydrolic-Cement Mortar and Concrete. ASTM international: West Conshohocken, PA

[12] ASTM C 596 – 18, 2007. Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards.

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
Thailand Concrete Association

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ขอมอบประกาศนียบัตรฉบับนี้ไว้แก่

คุณทศพร พรมวงค์

ในโอกาสนำเสนอบทความเรื่อง

"ผลกระทบของน้ำทะเลใช้ผสมคอนกรีตต่อค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และกำลังดึงแยกของคอนกรีต"

ภายในงาน

"การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 16 Annual Concrete Conference (ACC16)"

วันที่ 31 มีนาคม - 2 เมษายน 2564

ให้ไว้ ณ วันที่ 2 เมษายน 2564

ธนากร พีระพันธุ์

นาวาอากาศเอก

(รองศาสตราจารย์ ธนากร พีระพันธุ์)

นายกสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้ง

ตารางผนวกที่ ข1 การหดตัวแบบออโตจีนัส ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50

ลำดับ	สัดส่วน	การหดตัวแบบออโตจีนัส (ไมครอน)							
		1	3	5	7	14	28	38	52
1	TMC-0.50	19	25	29	37	76	103	126	143
2	TMC-20FM-0.50	25	36	45	51	90	111	122	138
3	TMC-40FM-0.50	16	15	18	28	68	103	110	125
4	TMC-20FB-0.50	22	45	64	72	106	123	139	145
5	TMC-20BA-0.50	28	33	34	47	83	102	133	151
6	TMC-5LP-0.50	27	32	40	54	85	98	123	147
7	TMC-10LP-0.50	28	25	27	32	57	75	102	120
8	TMC-15FM-5LP-0.50	18	31	44	52	74	107	117	129
9	TMC-15FB-5LP-0.50	22	31	41	52	83	112	133	157
10	TMC-15BA-5LP-0.50	37	43	49	56	74	100	128	151
11	SMC-0.50	29	42	53	73	95	128	175	198
12	SMC-20FM-0.50	26	43	60	87	104	197	237	271
13	SMC-40FM-0.50	22	47	62	73	106	178	216	247
14	SMC-20FB-0.50	23	38	54	66	117	160	193	216
15	SMC-20BA-0.50	15	31	51	76	98	137	179	192
16	SMC-5LP-0.50	13	29	50	58	114	180	201	219
17	SMC-10LP-0.50	19	24	37	57	119	196	241	256
18	SMC-15FM-5LP-0.50	9	38	65	97	135	184	223	250
19	SMC-15FB-5LP-0.50	14	38	97	109	166	222	260	291
20	SMC-15BA-5LP-0.50	7	32	42	56	108	189	232	268

ตารางผนวกที่ ข2 การหดตัวแบบออโตจีนัส ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.60

ลำดับ	สัดส่วน	การหดตัวแบบออโตจีนัส (ไมครอน)							
		1	3	5	7	14	28	38	52
1	TMC-0.50	0	12	25	32	42	74	94	126
2	TMC-20FM-0.50	0	4	29	28	34	94	104	119
3	TMC-40FM-0.50	8	9	14	20	28	77	81	96
4	TMC-20FB-0.50	0	6	28	37	56	86	97	104
5	SMC-0.50	0	6	46	67	80	110	130	171
6	SMC-20FM-0.50	0	7	32	42	94	136	181	196
7	SMC-40FM-0.50	0	6	35	46	99	144	160	181
8	SMC-20FB-0.50	0	4	46	47	105	147	162	184

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ตารางผนวกที่ ข4 การหดตัวแบบแห้ง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.60

ลำดับ	สัดส่วน	การหดตัวแบบแห้ง (ไมครอน)							
		1	3	5	7	14	28	38	52
1	TMC-0.50	30	58	169	209	224	276	343	368
2	TMC-20FM-0.50	37	60	96	157	184	230	282	306
3	TMC-40FM-0.50	24	53	74	110	119	181	223	262
4	TMC-20FB-0.50	39	71	127	164	210	258	332	350
5	TMC-20BA-0.50	54	78	108	128	146	226	270	299
6	TMC-5LP-0.50	32	79	131	142	173	215	251	280
7	TMC-10LP-0.50	42	90	149	179	197	248	297	325
8	TMC-15FM-5LP-0.50	14	46	99	137	166	256	281	310
9	TMC-15FB-5LP-0.50	25	94	139	173	209	261	309	332
10	TMC-15BA-5LP-0.50	29	81	127	172	197	229	275	304
11	SMC-0.50	46	218	244	259	328	648	685	722
12	SMC-20FM-0.50	28	62	89	93	182	607	654	690
13	SMC-40FM-0.50	31	65	101	121	297	521	699	783
14	SMC-20FB-0.50	45	76	98	125	218	423	471	508
15	SMC-20BA-0.50	39	61	99	131	398	791	836	899
16	SMC-5LP-0.50	23	61	81	101	161	450	673	704
17	SMC-10LP-0.50	47	100	107	124	258	660	706	737
18	SMC-15FM-5LP-0.50	81	156	173	185	254	560	617	644
19	SMC-15FB-5LP-0.50	28	56	83	105	222	458	497	535
20	SMC-15BA-5LP-0.50	108	115	125	174	280	669	710	743

ตารางผนวกที่ ข4 การหดตัวแบบแห้ง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.60

ลำดับ	สัดส่วน	การหดตัวแบบออโตจีนัส (ไมครอน)							
		1	3	5	7	14	28	38	52
1	TMC-0.50	20	72	83	101	152	645	688	726
2	TMC-20FM-0.50	28	87	85	99	137	548	636	666
3	TMC-40FM-0.50	37	77	77	84	112	512	611	647
4	TMC-20FB-0.50	10	45	58	70	185	405	574	607
5	SMC-0.50	28	102	119	135	267	705	744	779
6	SMC-20FM-0.50	41	110	125	133	169	640	742	929
7	SMC-40FM-0.50	24	83	81	91	142	600	716	849
8	SMC-20FB-0.50	58	110	126	139	247	664	686	737

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ–สกุล	นายทศพร พรมวงค์
วัน เดือน ปีเกิด	22 มีนาคม 2522
ที่อยู่	53/152 ซอยเลียบคลองภาษีเจริญฝั่งเหนือ 20/2 แขวงหนองแขม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	วิศวกรสำนักงาน บริษัท อาร์ตเทคโฮม จำกัด ตั้งแต่ พ.ศ.2551 – ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-9558-4948
อีเมล์	todsaporn_p@mail.rmutt.ac.th