คุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

PROPERTIES OF CONCRETE MIXED WITH GROUND GRANULATED BLAST - FURNACE SLAG

เจต นาจารย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

เจต นาจารย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
ชื่อ – นามสกุล	นายเจต นาจารย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติศานต์ กร้ำมาตร, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

การนำเอากากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยเฉพาะในงานคอนกรีตเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม การนำตะกรันเตาถลุงเหล็กซึ่งเป็นกากอุตสาหกรรมใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต จึงเป็นการนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กมาใช้ให้เกิดประโยชน์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นและคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GGBF Slag) โดยแทนที่ GGBF Slag และผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)

ผลการศึกษาพบว่าค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสม GGBF Slag และผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสม GGBF Slag และผงหินปูน มีแนวโน้มให้ค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับของ OPC ล้วน และพบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสม GGBF Slag และผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสม GGBF Slag และผงหินปูนกลับมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ส่วนค่าความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตผสม GGBF Slag และผงหินปูนมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน และนอกจากนี้พบว่าในสารละลายซัลเฟตนั้น การขยายตัวของคอนกรีตผสม GGBF Slag และผสม GGBF Slag ร่วมกับผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า แต่ของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตผสม GGBF Slag และผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และสุดท้ายสามารถเลือกใช้ GGBF Slag ผสมในคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ : ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กำลังอัดประลัย การหดตัว คาร์บอเนชั่น คลอไรด์ ซัลเฟต

Thesis Title	Properties of Concrete Mixed with Ground Granulated Blast-Furnace Slag
Name - Surname	Mr.Jate Najarn
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

The residuals from industrial will be used beneficially, especially in concrete, resulting in reduction of environment problem. For blast-furnace slag, a waste from industrial, used as a binder with a Portland cement in concrete, ensure of blast-furnace slag utilization.

This thesis aims to study the basic and durability properties of concrete with ground granulated blast-furnace slag (GGBF slag). Portland cement type 1 (OPC) partially replaced with GGBF slag and limestone powder were considered.

The results showed that the GGBF slag and limestone powder concrete had smaller slump and slump loss when compared with OPC concrete specimens. While the compressive strength of concrete made from GGBF slag and limestone powder was likely to be less than or similar to that of OPC concrete. It was also found that the autogenous shrinkage and drying shrinkage of concrete with GGBF slag and limestone powder was less than that of OPC concrete specimens. While the carbonation depth of concrete made from GGBF slag and limestone powder had more than that of OPC concrete. In addition, concrete specimens made from OPC partially replaced with GGBF slag and limestone powder had superior resistance chloride penetration when compared with OPC concrete specimens. Furthermore, in the sulfate solution, the expansion of concrete with GGBF slag and limestone powder, except concrete with limestone powder, was less than that of Portland cement type 5 concrete specimens. In case of in magnesium sulfate solution, the weight loss of concrete with GGBF slag and limestone powder had more than that of Portland cement type 5 concrete specimens. Finally, the GGBF slag can be selected to use in appropriate concrete mix.

Keywords: GGBF slag, compressive strength, shrinkage, carbonation, chloride, sulfate

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยในการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา แขนงวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำแนะนำและกำลังใจในการศึกษาเป็นอย่างดียิ่ง ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต อาจารย์ ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.วรางคณา แสงสร้อย ผู้ทรงคุณวุฒิ พร้อมทั้งขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ว่าที่พันตรี อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช ที่ให้ความชี้แนะและช่วยเหลือ รวมทั้งอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์บางส่วนในงานวิจัย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณ คุณประจักษ์ เปรมจิตต์และน้องระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของผู้วิจัยที่สนับสนุนเรื่องการศึกษา และขอบคุณภรรยาของผู้วิจัย คุณนิรชา นาจารย์ ที่เป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

เจต นาจารย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
3 วิธีการศึกษา	42
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	42
3.2 ขั้นตอนการศึกษา	45
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์	58
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน	58
4.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์	62
4.3 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	76
4.4 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	81
4.5 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	85
4.6 การเกิดบอเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	89
4.7 ความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	93

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.8 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด........ 107

5 สรุปและข้อเสนอแนะ 108

5.1 สรุป 108

5.2 ข้อเสนอแนะ 109

รายการอ้างอิง 110

ภาคผนวก 115

ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ 116

ประวัติผู้เขียน 128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ	7
2.2	ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	8
2.3	องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา	16
2.4	ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดใน ASTM C989	16
2.5	ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้	20
2.6	ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ	24
2.7	สภาวะของซัลเฟต	27
3.1	สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะการก่อตัวของเพสต์	43
3.2	สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย การหดตัวแบบออโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ความต้านทานคาร์บอเนชั่นและความต้านทานซัลเฟตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55	44
4.1	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา	59
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา	62
4.3	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน	63
4.4	การก่อตัวของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน	65
4.5	ค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน	68
4.6	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน	72
4.7	ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ ASTM C 1202 (ASTM Volume 04.02,1996)	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.8 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต.. 86

4.9 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน.. 90

4.10 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดโดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน 107

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในคอนกรีต 25

2.2 ภาพจำลองแสดงสภาวะของความชื้นของโพรงในคอนกรีต 26

3.1 เครื่อง UTM (universal testing machine)…………………………….………….......... 47

3.2 แบบหล่อสำหรับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ขนาด 75 x 75 x 285 มิลลิเมตร.................. 48

3.3 เครื่องวัดความยาว (length comparator).. 49

3.4 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม.. 49

3.5 ชุดการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง.. 52

3.6 ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต 55

4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน.. 61

4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน.. 64

4.3 ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน 66

4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน 69

4.5 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที 69

4.6 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที 70

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด.. 73

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ5 74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 75

4.10 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 3 14 28 และ 56 วัน 76

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุ ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์แลนประเภที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์แลนประเภที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน 78

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุ ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์แลนประเภที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์แลนประเภที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด 78

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์แลนประเภที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 79

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์แลนประเภที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 80

4.15 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 7 14 28 และ 56 วัน 81

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุ ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน 82

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุ ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด 83

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุ ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุ ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 84

4.20 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 7 14 28 และ 56 วัน 85

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน 88

4.22 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน 89

4.23 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน 91

4.24 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 28 และ56 วัน 92

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 70 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 94

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 95

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 98

4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 70 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 99

4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 100

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 102

4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 103

4.33 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 4 สัปดาห์ 105

4.34 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 8 สัปดาห์ 105

4.35 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 13 สัปดาห์ 106

4.36 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 16 สัปดาห์ 106

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากถึง 0.5 ตันในทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น [1] หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ พลังงานที่ใช้ลำเลียงผลพลอยได้ไปทิ้งในบ่อกลบฝัง พลังงานที่ใช้ในการระเบิดภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

ในปัจจุบันการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast-Furnace Slag, GGBF slag) นอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสาน (Cementitious Material) ในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีต มีเหตุผลสองประการ คือ สามารถบด GGBF Slag ได้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และสามารถปรับส่วนผสมคอนกรีตที่มี GGBF Slag ให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้ง่าย สำหรับในประเทศไทยยังมีข้อมูลการศึกษาวิจัยการนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตนั้นนับว่าน้อยมาก หรืออาจกล่าวว่าแทบไม่มีก็ว่าได้ ส่วนผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้ [2] จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าวทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น

ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จะนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมาใช้เป็นวัสดุประสานและเป็นวัสดุประสานร่วมกับผงหินปูนแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของส่วนผสมในคอนกรีต ซึ่งเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ร่วมกัน โดยจะศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของการนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มาใช้ในงานคอนกรีตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคด้วยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) และองค์ประกอบทางเคมี

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.2.3 เพื่อศึกษาการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.2.4 เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.2.5 เพื่อศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.2.6 เพื่อศึกษาความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (สำหรับการศึกษาการต้านทานซัลเฟต) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (อนุภาคเฉลี่ย 14 ไมโครเมตร) และผงหินปูน (อนุภาคเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร) โดยใช้ส่วนผสมของวัสดุประสานดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

3) แทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

4) แทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5) แทนที่ผงหินปูนร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1.3.2 ทำการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

1.3.3 ทำการทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวของคอนกรีต การสูญเสียค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.3.4 ทำการทดสอบค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.3.5 ทำการทดสอบค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดด้วยวิธีการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Penetration Test, RCPT)

1.3.6 ทำการทดสอบค่าการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.3.7 ทำการทดสอบค่าความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ15 ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดนั้น ใช้การวัดการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ส่วนการสูญเสียน้ำหนักจะประเมินในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบค่าความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

1.4.2 ทราบปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.4.3 ทราบการหดตัวแบบแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.4.4 ทราบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.4.5 ทราบการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.4.6 ทราบความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

1.4.7 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ต่อไป

1.4.8 เป็นการนำสิ่งเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ช่วยแก้ปัญหาการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม รวมทั้งลดการใช้พลังงานและทรัพยากรธรรมชาติ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในครั้งนี้ ทำการศึกษาโดยแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยศึกษาทั้งคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูน ซึ่งได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี ศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การหดตัวแบบออโตจีนัส ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดคาร์บอเนชั่นและความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษาครั้งนี้ มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ได้จากการเผาส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยหินปูน (Calcareous) ดินเหนียวประเภท Argillaceous ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก แล้วนำมาบดเป็นผงละเอียด

1) ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่ C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, CaO และ MgO ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.1 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C 150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 15 ของไทยได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก และให้ความร้อนปานกลาง

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูงเพราะมี C_3S และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก ใช้ในการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานหรือถอดแบบเร็ว

4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำมากเพราะมีปริมาณ C_3S ต่ำ แต่มีปริมาณ C_2S ที่ค่อนข้างสูง ใช้ในงานคอนกรีตหลา เนื่องจากมีคุณสมบัติให้อุณหภูมิต่ำ

5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resisting Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ C_3A ต่ำมาก ดังนั้นจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลง ใช้ในงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต และบริเวณที่มีดินเค็ม

ตาราง**ที่ 2.1** ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ [3]

ชนิดของปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)						
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4$	CaO	MgO
Type I (Normal)	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
Type II (Modified)	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
Type III (High Early Strength)	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
Type IV (Low Heat)	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
Type V (Sulfate Resistance)	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

2) องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลัก และสารประกอบออกไซด์รอง ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

1. สารประกอบออกไซด์หลัก (Major Oxides)

สารประกอบออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันได้กว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2. สารประกอบออกไซด์รอง (Minor Oxides)

สารประกอบออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล ((Na_2O) และ(K_2O)) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [4]

สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ชื่อย่อ
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)	60.0 - 67.0	CaO
ซิลิกอนออกไซด์ (Silicon Oxide)	17.0 - 25.0	SiO_2
อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide)	3.0 - 8.0	Al_2O_3
ไอออนออกไซด์ (Ferric Oxide)	0.5 - 6.0	Fe_2O_3
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfer Trioxide)	1.0 - 3.0	SO_3
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)	0.1 - 0.4	MgO
อัลคาไลท์ (Alkalies)	0.2 - 1.3	Na_2O
ไททาเนียมออกไซด์ (Titanium Oxide)	0.2 - 1.3	K_2O

3) สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

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

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสีเทาแก่ คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

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

ไดแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูปแบบ โดยที่อุณภูมิปกติ C_2S จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต (βC_2S) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

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

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสีเทาอ่อน ทำปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ก่อตัวทันที (Flash Set) การพัฒนากำลังเร็วภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลัง

ค่อนข้างต่ำ ปริมาณมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S โดยปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7 ถึง 15

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

เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์อยู่ในสภาพสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

การคำนวณปริมาณสารประกอบทั้ง 4 ชนิด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถหาได้จากสูตรการคำนวณ Bogue's Equation โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1: $Al_2O_3 / Fe_2O_3 \geq 0.64$

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

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

$$C_3A = 2.650Al_2O_3 - 1.692Fe_2O \quad (2.3)$$

$$C_4AF = 3.043Fe_2O_3 \quad (2.4)$$

กรณีที่ 2: $Al_2O_3 / Fe_2O_3 \geq 0.64$

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

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

$$C_3A = 0 \quad (2.7)$$

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

4) ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3CaO.2SiO_2 3H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide : $Ca(OH_2)$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.9

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \tag{2.9}$$

2. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.10

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2 3H_2O + Ca(OH)_2 \tag{2.10}$$

3. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.11

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \tag{2.11}$$

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซั่มเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน(Clinker)โดยยิปซั่ม(Gypsum : $CaSO4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นบางๆของแอทริงไจท์ (Ettringite : $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.12

$$3CaO.Al_2O_3 + Ca.SO_4.2H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O \tag{2.12}$$

4. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม ดังสมการที่ 2.13

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

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

2.1.2 วัสดุปอซโซลาน

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

1) ชนิดของวัสดุปอซโซลานปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

1. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

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

2. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟูม (Silica Fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag)ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

2) ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.14 ถึง 2.15

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \qquad (2.14)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \rightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \qquad (2.15)$$

2.1.3 ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยปกติแล้วผงหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งหินย่อยนั้น โดยผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในระหว่าง 100 ถึง 1 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อตัวให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม และยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงแหล่งย่อยหินเหล่านั้น สำหรับผงหินปูนในประเทศไทยมีเหมืองที่ทำการผลิตอยู่ 2 แหล่งใหญ่ด้วยกันคือ เหมืองหินปูนโดโลมิติกจังหวัดสระบุรี และผงหินปูนจากเหมืองหินปูนชนิดโดโลไมท์ จังหวัดกาญจนบุรี โดยหินปูนชนิดโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) จัดอยู่ในจำพวกหินคาร์บอเนต (Carbonate Rock) โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบของแร่โดโลไมท์อยู่ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลมิติก ในขณะที่มีปริมาณของแร่โดโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลไมท์โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูนจะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material)และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

1) วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเองที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอ และหรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ดังสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17

$$CaCO_3 + H_2O + heat \rightarrow Ca\left(OH\right)_2 + CO_2 \qquad (2.16)$$

$$MgCO_3 + H_2O + heat \rightarrow Mg(OH)_2 + CO_2 \quad (2.17)$$

2) วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.18

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (2.18)$$

ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์

ดังนั้นการนำเอาผงหินปูนมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูนจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุดังกล่าวให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.1.4 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast-Furnace Slag) คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุง ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีข้อดีสองประการคือ สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และสามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้

องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหินโดโลไมต์ องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆ ที่ติดมา เช่น SO_3, Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดาใน ค.ศ. 1988 [10] แม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของ

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในตารางที่ 2.3 จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะแต่ละโรงงานจะพบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่มาก การที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ ASTM C989 ได้กำหนดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 80, 100, และ 120 ซึ่งแต่ละชั้นคุณภาพจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (Slag Activity Index) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีชั้นคุณภาพสูงจะค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันสูง โดย ค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันหาได้จาก

$$\text{ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)} = \left[SP/P\right] x100$$

เมื่อ SP = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ร้อย

P = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน

ข้อกำหนดที่ต้องการของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดของแต่ละชั้นคุณภาพที่แบ่งตาม ASTM C989 [11] ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 นอกจากค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันแล้ว มาตรฐาน ASTM ยังได้กำหนดคุณสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต้องมีปริมาณวัสดุที่ค้างบนตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (No. 325) ไม่เกินร้อยละ 20 ปริมาณฟองอากาศในมอร์ต้าร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุประสานล้วนไม่เกินร้อยละ 12 ปริมาณของกำมะถันจากซัลไฟด์ (Sulfide Sulfur) ไม่เกินร้อยละ 2.5 และปริมาณของซัลเฟต(SO_3)ไม่เกินร้อยละ 4.0 ในกรณีที่นำตะกรันเตาถลุงเหล็กมาใช้เป็นส่วนผสมหนึ่งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ASTM C595 [12] ได้แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่มีอยู่ในส่วนผสม คือ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงด้วยตะกรัน (Slag-Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมไม่เกินร้อยละ 25 และแบ่งออกเป็น Type IS ซึ่งใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป Type IS (MS) สำหรับต้านทานซัลเฟตระดับปานกลาง, Type IS (A) สำหรับคอนกรีตที่มีฟองอากาศ และ Type IS (MH) สำหรับคอนกรีตความร้อนปานกลาง

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Portland Blast-Furnace Slag Cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมร้อยละ 25 ถึง 70 ซึ่งยังแบ่งออกเป็น Type I(SM) ที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป, Type I(MS) สำหรับต้านทานซัลเฟตระดับปานกลาง, Type I(A) สำหรับคอนกรีตที่มีฟองอากาศ และ Type I(MH) สำหรับคอนกรีตความร้อนปานกลาง

3) ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag Cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมเท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือใช้ร่วมกับปูนขาวเพื่อใช้ในงานก่ออิฐหรือฉาบปูน

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา [5]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)
SiO_2	32 – 40
Al_2O_3	7 – 16
CaO	32 – 45
MgO	5 – 15
SO_3	0.7 – 2.2
Fe_2O_3	0.1 – 1.5
MnO	0.2 – 1.0

ตารางที่ 2.4 ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดใน ASTM C989 [6]

อายุและชั้นคุณภาพ	ค่าต่ำสุดของดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน(ร้อยละ)	
	ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบ 5 ตัวอย่างติดต่อกัน	ผลทดสอบแต่ละตัวอย่าง
ดัชนีของปฏิกิริยาตะกรันที่อายุ 7 วัน		
- ชั้นคุณภาพ 80	-	-
- ชั้นคุณภาพ 100	75	70
- ชั้นคุณภาพ 120	95	90
ดัชนีของปฏิกิริยาตะกรันที่อายุ 28 วัน		
- ชั้นคุณภาพ 80	75	70
- ชั้นคุณภาพ 100	95	90
- ชั้นคุณภาพ 120	115	110
ความละเอียดของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกิน(ร้อยละ)	-	20
ปริมาณฟองอากาศของมอร์ต้าที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสาน (ไม่เกินร้อยละ)	-	12

การทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำจะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือได้ C-S-H โดยในกรณี

ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะได้ C-S-H มาจาก C_3S เป็นส่วนมาก ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะได้ C-S-H มาจาก C_2S เป็นส่วนใหญ่ และ C-S-H ที่ได้จากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความหนาแน่นสูงกว่ากรณีที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับการแตกตัวและการละลายของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ไม่เป็นผลึก เมื่อสัมผัสกับอิออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งได้มาจากกระบวนการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะทำปฏิกิริยาทำให้ได้สาร C-S-H ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คอนกรีต นอกจากนี้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดยังสามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้อีกด้วย โดยเฉพาะในกรณีของอัลคาไลไฮดรอกไซด์พบว่าไฮเดรตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ได้มีความแข็งแรงสูงกว่าไฮเดรตที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ [13]

1. องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
2. ความเข้มข้นของด่างอัลคาไลในระหว่างทำปฏิกิริยา
3. ปริมาณที่ไม่เป็นผลึกของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
4. ความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
5. อุณหภูมิในขณะที่ทำปฏิกิริยา

ปัจจัยเหล่านี้มีผลซึ่งกันและกัน จึงเกิดความยุ่งยากในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนั้น ASTM C989 จึงแนะนำว่าควรใช้ค่าดัชนีของตะกรันเป็นดัชนีชี้ถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดควรได้รับการทดสอบก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติและคุณภาพตามต้องการ

2.1.5 การหดตัวแบบออโตจีนัส

การหดตัวแบบออโตจีนัสนั้นโดยพฤติกรรมแล้วเป็นผลของการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีตและการลดลงของปริมาตรเนื่องจากการสูญเสียความชื้นภายใน (Self-Ddesiccation) การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดจากปริมาตรของผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydrated Products) น้อยกว่าปริมาตรของวัสดุซีเมนต์และน้ำในช่วงเริ่มต้น การสูญสียความชื้นภายในเป็นการลดปริมาตรเนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในอันเนื่องมาจากการดึงน้ำไปใช้ในปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ยังเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชั่นไม่สมบูรณ์ (Unhydrated Cement) ซึ่งมีผลให้ความชื้นในช่องว่างคาปิลารี (Capillary Pores) ลดลงและจากนั้นสมดุลของความเค้นจะเกิดขึ้นโดยแรงดึงแบบคาปิลารี (Capillary Tension) ภายในช่องว่างคาปิลารีของน้ำและการอัดตัวในส่วนปริมาตรของผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ระบบของส่วน

ปริมาตรของผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะหดตัวลงเนื่องจากกำลังรับแรงอัดที่ได้รับ การหดตัวแบบออโตจีนัสได้ถูกอธิบายไว้ในปี 1930 ว่าเป็นปัจจัยสนับสนุนทำให้เกิดการหดตัวรวมทั้งหมด (Total Shrinkage) ในเวลานั้นการหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นการเกิดขึ้นในสภาวะที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าต่ำมากจนไม่สามารถที่จะนำไปใช้ผลิตคอนกรีตได้ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงจะมีช่องว่างคาปิลารีใหญ่กว่าและต่อเนื่องกันมากกว่า การบ่มทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในเนื้อคอนกรีต เป็นผลให้แรงดึงคาปิลารีต่ำและการหดตัวแบบออโตจีนัสมีค่าน้อยมาก แต่ด้วยการลดลงของน้ำและตัวแปรที่ส่งผลต่อการลดลงของน้ำจะมีผลอย่างมากเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าต่ำ ทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นสาเหตุที่ต้องศึกษา การแตกร้าวสามารถเกิดได้ในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากการผสมผสานกันระหว่างผลจากการหดตัวอย่างต่อเนื่องและการยึดรั้งจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นภายในเนื้อคอนกรีตที่มีค่าสูง เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสที่แกนกลางมีค่าสูงมากกว่าที่ผิวหน้า ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวอย่างต่อเนื่อง และเกิดการยึดรั้งภายในเนื่องจากมวลรวมและเหล็กเสริม สำหรับโครงสร้างแบบบางนั้นการผสมผสานกันของการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งสามารถทำให้เกิดการแตกร้าวที่มีรอยร้าวตัดขวางหน้าตัด

2.1.6 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) เกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำและเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเกิดการเปียกชื้นขึ้นมาใหม่

การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง มีกลไกการเกิดเช่นเดียวกับการเกิดรอยแตกร้าวแบบพลาสติก นั่นคือในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศมีความชื้นต่ำ ส่วนความชื้นในช่องคะปิลลารี (Capillary Pore) มาก จึงเกิดการหดตัวเนื่องจากสูญเสียน้ำอิสระ (Free Water) ไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคะปิลลารี ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลง หรือหดตัวลงเนื่องจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการหดตัวนี้ถูกยึดรั้ง ไม่ว่าด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียความชื้น รอยแตกร้าวก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยึดรั้งนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่าสูงกว่ากำลังแรงดึงของคอนกรีตในขณะนั้น การแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะแตกต่างกับการแตกร้าวแบบพลาสติกตรงที่ช่วงเวลาการเกิด การแตกร้าวแบบพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก ส่วนการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

1) บริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวและช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งมักจะเกิดขึ้นให้เห็นตรงบริเวณผิวคอนกรีตสัมผัสกับอากาศ บางครั้งถ้าเป็นผนังบางก็อาจมีรอยแตกข้ามไปถึงพื้นผิวอีกด้านหนึ่งได้ ในกรณีของผิวถนนก็มักจะเห็นรอยแตกตามขวางหรือตามยาว ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งมักจะเป็นช่วงเวลาที่หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเป็นต้นไป รอยแตกร้าวนี้อาจจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ แม้แต่อายุคอนกรีตจะมากจนเป็นปีแล้วก็ตาม แต่ส่วนมากแล้วจะเริ่มเกิดให้เห็นในช่วง 2-3 เดือนแรกหลังสิ้นสุดการบ่ม

2) ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง

ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีต จึงมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งทั้งสิ้น ปัจจัยดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงจะทำให้มีช่องว่างคะปิลลารีมาก ปริมาณน้ำอิสระก็จะมากไปด้วยการที่คอนกรีตมีช่องว่างคะปิลลารีมาก จะทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก

2. ปริมาณมวลรวม โดยปกติแล้วการหดตัวจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณเพสต์น้อยหรือ อีกนัยหนึ่งมีปริมาณมวลรวมมาก ก็ทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง

3. ชนิดและคุณภาพของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมมักจะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของปริมาตร ดังนั้นมวลรวมจึงมีคุณสมบัติที่จะช่วยต่อต้านการหดตัวในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามวลรวมมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง การแตะกันของมวลรวมเป็นกลไกหนึ่งของการต้านทานการหดตัวซึ่งเกิดจากซีเมนต์เพสต์ได้ มวลรวมที่มีการดูดซึมน้ำมาก ก็มักจะก่อให้เกิดการหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตมากตามไปด้วย ขนาดคละของมวลรวมที่ดี ก็จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้การหดตัวของคอนกรีตลดลง เนื่องจากทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลง

4. ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้ปอซโซลาน หรือวัสดุผงบางชนิด ก็มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น เถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต และเถ้าลอยบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อย ทำให้ชดเชยการหดตัวได้บางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้เนื่องจากช่วยเพิ่มความแน่นให้คอนกรีต การใช้ผงหินปูนก็อาจสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งด้วย

5. อุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น

6. มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็ว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ง่าย

2.1.7 การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้โดยอิออนของคลอไรด์ (Choloride Ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังจุดวิกฤตแล้วถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

1) แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตามได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อม) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่ากำหนดในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้

ลักษณะงานก่อสร้าง	ปริมาณคลอไรดรวมที่ละลายน้ำได้สูงสุดในคอนกรีต (ร้อยละของน้ำหนักวัสดุประสาน)
(ก) คอนกรีตอัดแรง	0.06
(ข) คอนกรีตเสริมเหล็กที่ขณะใช้งานมีการสัมผัส	0.15
กันกับคลอไรด์ เช่น กำแพงกันคลื่น (Sea-	
Retaining Walls)	1.00
(ค) คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสภาพแห้ง หรือขณะ	
ใช้งาน มีการป้องกันความชื้น	0.30
(ง) การก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น	

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

อย่างไรก็ตาม ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายในน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-Icing Salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

1. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction)
2. การแพร่ของอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions)จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต
3. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วๆ ไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานักความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุดมักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash Zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) และบริเวณน้ำขึ้น น้ำลง (Tidal Zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล(Submerged Zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมากในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างอิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อยถึงแม้ว่าจะมีปริมาณออกซิเจนมากในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัดโดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจนผ่านช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว(Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆและจะเข้าสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียก (Saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามากและภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของอิออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของอิออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพที่เปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณอิออนของ คลอไรด์ (Chloride Ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold Content Of Chloride Ions) ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

2) สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed Chloride) โดยกลไกดังต่อไปนี้

1. Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮโดรชั่น เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.l0H_2O$ (Fridel's Salt) หรือ $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.l0H_2O$ (Calcium Chloroferrite) หรือแม้แต่อยู่ในโครงสร้างของผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2. Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของผลิตผลไฮเดรชั่น เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยาเช่น มวลรวม หรือ ผงหินปูนได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ(Free Chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

3) การเพิ่มของความเข้มข้นของคลอไรด์

การเพิ่มขึ้นของความเข้นข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม คลอไรด์ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มขนของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความ

เข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

1. ในกรณีของสภาวะเปียกสลับกบแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ทิ้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียกน้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆ รอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2. ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้าเนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชั่น เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ดีในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ว่าในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดิน ซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมีมากขึ้นและในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบรเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้

การแทรกซึมของคลอไรด์อิออนเข้าสู่คอนกรีต โดยธรรมชาติเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นค่อนข้างช้า จึงมีความพยายามหาวิธีทดสอบที่ใช้ระยะเวลาในการทดสอบน้อย วิธีทดสอบที่นิยมใช้วิธีหนึ่ง คือการเร่งให้เกิดการแทรกซึมเร็วขึ้นด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเรียกว่า Migration Test ซึ่งการทดสอบหลายมาตรฐานใช้วิธีการทดสอบลักษณะดังกล่าว ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการทดสอบการต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน (ASTM C1201:Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้า

การทดสอบการต้านทานต่อการแทรกซึมผ่านคลอไรด์อิออน เป็นวิธีการทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออนให้เร็วขึ้น โดยให้ชิ้นตัวอย่างอยู่ภายในสนามไฟฟ้าด้วยการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงให้พัฒนาโดย Whiting ในปี ค.ศ.1981 มักเรียกวิธีการทดสอบนี้ในอีกชื่อ คือ Rapid Chloride Permeability Test ใช้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่าง เพื่อนำไปประเมินระดับการซึมผ่านได้ของคอนกรีตมาตรฐาน ASTM C 1202 ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ (ASTM C 1202)

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

2.1.8 การเกิดคาร์บอเนชั่น

คาร์บอเนชั่นเป็นขบวนการที่เปลี่ยนผลิตผลบางชนิดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งโดยปกติมักจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอเนต โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อต้องมีความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

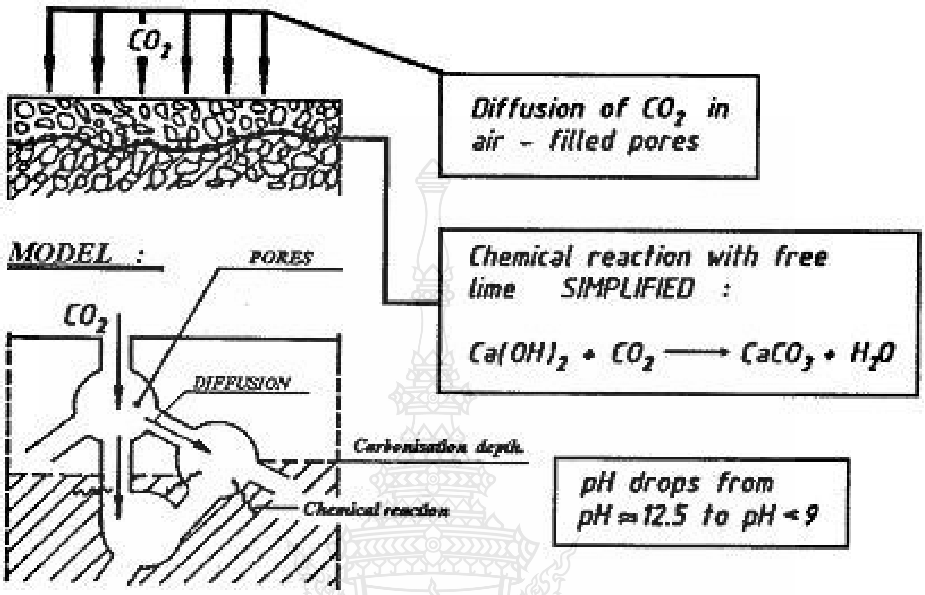
1) กลไกของการเกิดคาร์บอเนชั่น

คาร์บอเนชั่นเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หรือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) บริเวณผิวหน้าหรือใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ตามสมการที่ 2.19 ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \tag{2.19}$$

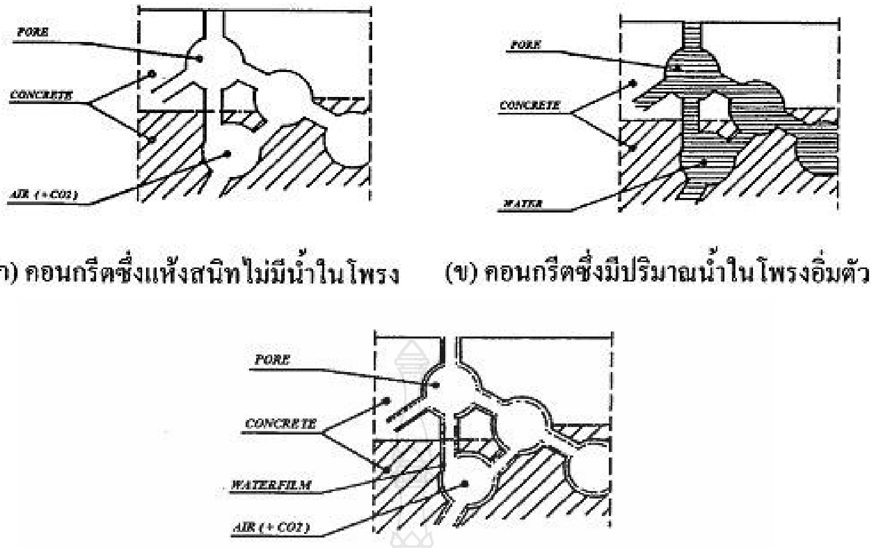
ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของสารละลายและคอนกรีตที่ถูกคาร์บอเนตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นจะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมผ่านเข้าไนในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ดังนั้นคาร์บอเนชั่นจะค่อยๆ คืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์จะต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอเนตไปแล้วซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปได้ยากขึ้น



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในคอนกรีต

ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิทจะไม่เกิดคาร์บอเนชั่น เนื่องจากในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทก็จะไม่มีน้ำในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ดังนั้น คาร์บอเนชั่นจะรุนแรงในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi - Dry) นั่นคือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาก



(ก) คอนกรีตซึ่งแห้งสนิทไม่มีน้ำในโพรง (ข) คอนกรีตซึ่งมีปริมาณน้ำในโพรงอิ่มตัว

(ค) คอนกรีตซึ่งมีปริมาณน้ำในโพรงพอเหมาะ

ภาพที่ 2.2 ภาพจำลองแสดงสภาวะของความชื้นของโพรงในคอนกรีต

2) ผลของคาร์บอเนชั่น

คาร์บอเนชั่นทำให้เกิดผลที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอเนชั่นต่ำลง

2. ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอเนชั่นต่ำลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ผลในประการแรกอาจจะเป็นผลดีต่อคอนกรีตในเรื่องของความคงทน แต่ผลประการหลังจะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอเนชั่นเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจน ใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤติ

3. ทำให้เกิดการหดตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ภายใต้หน่วยแรงอัด ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ในผลของคาร์บอเนชั่นทั้ง 3 ประการนี้ ประการที่ 2 คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่เป็นผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ดี ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คาร์บอเนชั่นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

3) การทดสอบคาร์บอเนชั่น

การทดสอบคาร์บอเนชั่นสามารถทำได้หลายวิธี แต่สำหรับการทดสอบครั้งนี้ใช้วิธีที่แนะนำโดย RILEM คือการใช้น้ำยาฟีนอฟทาลีนในอัลกอฮอล์ฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่แตกออกใหม่ๆ ที่ต้องการวัดระยะคาร์บอเนชั่น คอนกรีตที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่จะปรากฏเป็นสีชมพู ส่วนคอนกรีตที่เกิดคาร์บอเนชั่นจะไม่มีสี

2.1.9 การกัดกร่อนโดยซัลเฟต

สภาวะแวดล้อมที่มีสารซัลเฟตซึ่งอยู่ในรูปสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เนื่องจากสารละลายซัลเฟตสามารถซึมผ่านสู่ภายในเนื้อคอนกรีตเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ก่อให้เกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าว ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตไม่สามารถใช้งานตามที่ออกแบบไว้ ตัวอย่างของโครงสร้างที่มีโอกาสเสื่อมสภาพจากการทำลายโดยซัลเฟต เช่น โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเลหรือโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำเสีย โดยทั่วไปในสารละลายซัลเฟตที่พบในสิ่งแวดล้อมนั้นสามารถแบ่งประเภทได้ตามปริมาณซัลเฟตที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สภาวะของซัลเฟต [7]

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

1) การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

สำหรับกลไกการทำลายของซัลเฟตต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mechanisms of Sulfate Attack On Portland Cement) นั้น เนื่องจากเกลือซัลเฟต (SO_4^{-2}) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เป็นต้นเกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเลหรือในดินทั่วไป ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติเป็นต้น

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟตสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์หรือคอนกรีต ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตหรือแคลเซียมซัลเฟตแต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้

2) กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of Sodium Sulfate Attacks) [15]

กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 2.20 ถึง 2.23 เริ่มต้นเมื่อโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide: CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจากไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.20 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีความเป็นด่างสูงมาก (pH = 13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ Ettringite (C_6ASH_{32}) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลอื่นโดยที่สารยิปซัม ($C\underline{S}H_2$) ที่ได้จากสมการที่ 2.20 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\underline{S}H_{12}$) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังแสดงในสมการที่ 2.20 ถึง 2.23 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลปฏิกิริยาไฮเดรชั่นชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำละลายโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต

$$CH + NS + 2H \rightarrow CSH_2 + NH \qquad (2.20)$$

$$C_4AH_{13} + 3CSH_2 + 14H \rightarrow C_6ASH_{32} + CH \qquad (2.21)$$

$$C_4ASH_{12} + 2CSH_2 + 16H \rightarrow C_6ASH_{32} \qquad (2.22)$$

$$C_3A + 3CSH_2 + 26H \rightarrow C_6ASH_{32} \qquad (2.23)$$

โดยที่ $C = CaO$, $N = Na_2O$, $M = MgO$, $S = SiO_2, S = SO_3$ และ $H = H_2O$

3) กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต (Mechanisms Of Magnesium Sulfate Attacks) [15]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.24 ถึง 2.26 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่ไม่สูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettingite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.25 จากสมการที่ 2.24 และ 2.25 ทั้ง $C\underline{S}H_2$ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย $C\underline{S}H_2$ จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล (S_2H) ดังแสดงในสมการที่ 2.26 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการยึดประสานเลยดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม $C\underline{S}H_2$ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต

$$CH + MS + 2H \rightarrow CSH_2 + MH \tag{2.24}$$

$$C_X S_Y H_Z + xMS + \left(3x + 0.5y - z\right) \rightarrow HxCSH_2 + xMH + 0.5yS_2H \tag{2.25}$$

$$4MH + SH_{11} \rightarrow M_4SH_{8.5} + \left(n - 4.5\right)H \tag{2.26}$$

4) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต

1. สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต

2. ความทึบน้ำของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยากลดการทำลายขั้นรุนแรง

3. ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_3Sและ C_2S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

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

5) วิธีการป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

1. ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_3S ต่ำ นั่นคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

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

3. ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้นออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่มากเกินไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต

Tazawa และ Miyazawa [8] ทำการทดลองเพื่อค้นหาปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาตรของมวลรวม เพื่อใช้สร้างแบบจำลองทำนายการหดตัวของคอนกรีต เป็นที่ทราบกันดีว่าผลของมวลรวมต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตหลังอายุ 24 ชั่วโมง สามารถหาได้จากแบบจำลองของฮอปป์ (Hobbs' Model) สำหรับมอร์ต้าร์และคอนกรีตที่มีปริมาตรของมวลรวมต่างๆ กัน การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ เห็นได้ชัดว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง

Hanehara et al. [9] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัส โครงสร้างระดับจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วในระยะแรก การหดตัวแบบออโตจีนัสของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วนั้น มีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับความชื้นของซีเมนต์เพสต์ที่ลดลง แม้จะมีความต่างของเวลาระหว่างการหดตัวแบบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วในระยะแรก แต่ก็ไม่มีการเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสม w/c เท่ากับ 0.5 ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าไม่มีการลดลงของความชื้น การหดตัวแบบออโตจีนัสที่เกิดกับซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของ w/c เท่ากับ 0.25 นั้นเกิดจากการแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ตั้งแต่ร้อยละ 100 ถึง 80 จึงสามารถกล่าวได้ว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสนั้นเกิดขึ้นเพราะน้ำอิสระที่มีอยู่ในช่องว่างภายในระหว่างเจลขนาดเล็กที่เกิดจากการผลิต C-S-H ปริมาณมาก น้ำอิสระนั้นจะถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและความชื้นในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วลดลง ผลิตภัณฑ์และการเปลี่ยนภาพของผลจากปฏิกิริยาอะลูมิเนตไฮเดรต (Aluminate Hydrate) นั้นสัมพันธ์กับการเพิ่มการหดตัวแบบออโตจีนัส

Park et al. [10] ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยการค้นคว้าเกี่ยวกับผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่มีต่อปรากฏการณ์การหดตัวแบบออโตจีนัสและความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอัตราของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น การหดตัวแบบออโตจีนัสไม่สามารถอธิบายด้วยการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพียงอย่างเดียวได้ อีกนัยหนึ่งคือมีช่วงเวลาระหว่างที่การหดตัวแบบออโตจีนัสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เพิ่งเริ่มเกิดขึ้น ในช่วงเวลานี้จะเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสขึ้นเพราะเกิดความเค้นคาปิลารีเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำในพื้นที่ของซีโรเจล (Xerogel) และมีการลดลงของระยะระหว่างชั้น จากจุดนี้นั้นการหดตัวแบบออโตจีนัสมีกลไกอยู่ 2 แบบคือปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์และการเปลี่ยนแปลงช่องว่างของโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

Barcelo et al. [11] ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของลักษณะเฉพาะของปูนซีเมนต์ต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่ทำให้เกิดการหดตัวแบบออโตจีนัส ตัวแปร 2 ตัวที่เลือกมาประกอบไปด้วย (1) สำหรับปูนเม็ด คือปริมาณ C_3A และปูนขาวอิสระ (Free Lime) และอัตราส่วนของ SO_3/K_2O (2) สำหรับปูนซีเมนต์ คือความละเอียดปูนซีเมนต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบละเอียดจำนวน 16 ตัวอย่างที่ถูกเตรียมไว้ใช้ในการทดลอง โดยได้มีการใช้เทคนิคพิเศษเฉพาะตัวในการทดลองนี้ โดยอ้างอิงจากตัวแปรสำคัญๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางกายภาพ เช่น ระยะเวลาการก่อตัว ช่วงการเปลี่ยนแปลงระหว่างของแข็งและสารแขวนลอย ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทางจลศาสตร์โดยการวัดความร้อนและน้ำที่ไม่สามารถระเหยได้ การหดตัวทางเคมี ความชื้นสัมพัทธ์ ช่องว่างคาปิลารีและการหดตัวแบบออโตจีนัส ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ากลไกเหล่านี้มีความแตกต่างกัน แม้กระทั่งในระดับมหภาค ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการหดตัวแบบออโตจีนัสในขั้นแรกควรจะพิจารณาจากความสมดุลระหว่างช่วงการแห้งและช่วงการขยายตัว

Baroghel-Bouney et al. [12] ได้ทำการค้นคว้าผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ภายในช่วงการหดตัวแบบออโตจีนัสที่ 0.25 - 0.60 การหดตัวแบบแห้งและความสัมพันธ์ของการหดตัวแบบแห้งกับคุณสมบัติโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุ การวิเคราะห์ระดับจุลภาค-มหภาคได้มุ่งเน้นที่ค่าต่ำสุดของ w/c (มีค่าประมาณ 0.40) ณ ระดับมหภาค (ไม่เฉพาะกับการหดตัวแบบออโตจีนัสเท่านั้น แต่กับการหดตัวแบบแห้งและคุณสมบัติที่เกี่ยวกับความคงทนด้วย) และ ณ ระดับจุลภาค (คุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น ความพรุนแบบ MIP และขนาดการกระจายตัวของช่องว่างคาปิลารี เป็นต้น) ผลจากการค้นคว้า แสดงให้เห็นถึงขนาดของการหดตัวแบบออโตจีนัสแบบหนึ่งมิติจะเพิ่มขึ้นเป็นแนวเส้นตรงในขณะที่ค่า w/c ลดลงจาก 0.60 ถึง 0.25 จากผลของกระบวนการแห้งและ

โครงสร้างขยายตัว (และเป็นไปตามคุณสมบัติเฉพาะของโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุ) ในทางกลับกันขนาดของการหดตัวแบบแห้งอย่างแท้จริงนั้นจะลดลงเมื่อค่า w/c ลดลงจาก 0.60 จนถึง 0.25

Tazawa และ Miyazawa [13] ได้ทำการศึกษาการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตและความสำคัญของการหดตัวในเทคโนโลยีคอนกรีตโดยศึกษาจากผลของหลายตัวแปรและแบบจำลอง การหดตัวแบบออโตจีนัสของปูนซีเมนต์นั้นเกิดจากส่วนผสมที่เป็นแร่ธาตุต่างๆ ของปูนซีเมนต์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แบบจำลองได้จากการวิเคราะห์แบบย้อนกลับของการหดตัวแบบออโตจีนัส ในภาพฟังก์ชั่นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแร่ธาตุของปูนซีเมนต์แต่ละชนิด โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.3 เป็นที่ชัดเจนว่า C_3A และ C_4AF มีผลต่อการเกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสมาก

Justnes et al. [14] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของคุณลักษณะของปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อการหดตัวทางเคมี การหดตัวทางเคมีโดยรวมและภายนอก ได้ศึกษาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ต่างกัน 10 ชนิดที่มีแร่ธาตุหลายชนิดและมีความละเอียดต่างกัน ในส่วนของความแตกต่างทางด้านคุณสมบัติทางกายภาพและแร่ธาตุนั้นจะถูกเพิ่มความละเอียดและเพิ่มปริมาณของ C_3S และ C_3A เพื่อช่วยเร่งให้เกิดการหดตัวเร็วขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าการหดตัวทางเคมีนั้น ปฏิกิริยาของ C_3A เกิดขึ้นเร็วว่าปฏิกิริยาทางเคมีของ C_3S ประมาณ 5 เท่า

Sontaya [15] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต โดยจากผลการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่3 และประเภทที่ 5 จะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีอัตราการหดตัวแบบออโตจีนัสสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 มีอนุภาคที่มีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 จึงช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้สูงขึ้น และขนาดของช่องว่างคาปิลารี (Capillary Pores) ที่เล็กกว่าชนิดอื่นๆ ทำให้แรงดึงแบบคาปิลารี (Capillary Tension) สูงขึ้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้การหดตัวแบบออโตจีนัสสูงขึ้น

Sudsangium [16] ได้ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยแม่เมาะซึ่งมีปริมาณ SO_3 แตกต่างกันเพื่อหาวิธีลดการหดตัวแบบออโตจีนัสและเปรียบเทียบเถ้าลอยแม่เมาะกับเถ้าลอยจากฮ่องกง ผลของการหดตัวแบบออโตจีนัสในแง่ของกำลังรับแรงอัด กำลังต้านทานแรงดัดและการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยฮ่องกง ผลการทดลองสรุปได้ว่า หากอยู่ภายใต้สภาวะปิด สามารถใช้เถ้าลอยเพื่อลดการหดตัวแบบออโตจีนัสได้โดยเถ้าลอยมีอนุภาคทรงกลมซึ่งทำให้มีปริมาณน้ำอิสระ (Free Water) มากขึ้นและปริมาณ SO_3 ของเถ้าลอยแม่เมาะที่มากขึ้นจะทำ

ให้การหดตัวแบบออโตจีนัสลดลง เถ้าลอยแม่เมาะช่วยทำให้กำลังรับแรงอัดและกำลังต้านทานแรงดัดมีประสิทธิภาพดีขึ้น

Tangtermsirikul [17] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบทางเคมีหลายชนิด ขนาดของอนุภาค และร้อยละของการแทนที่ต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของเพสต์ผสมเถ้าลอย ได้มีการค้นพบว่า ผลของส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยกับปริมาณ SO_3 สูงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสลดลง ผลที่เกิดจากขนาดของอนุภาคนั้นยิ่งเพสต์ผสมเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์เท่าใด การหดตัวแบบออโตจีนัสก็เกิดขึ้นมาก ในขณะที่เพสต์และเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์จะทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดขึ้นน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ สำหรับผลของปริมาณเถ้าลอยนั้นเถ้าลอยที่มีการคัดขนาดและไม่มีการคัดขนาดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ เช่น การหดตัวแบบออโตจีนัสที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 มีค่ามากกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 เมื่อใช้เถ้าลอยที่ไม่มีการคัดขนาด หรืออาจกล่าวได้ว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 มีค่าน้อยกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 นั้นจะเกิดในกรณีที่เป็นเพสต์ผสมกับเถ้าลอยที่มีการคัดขนาดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์ จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่ใช่เพียงส่วนประกอบทางเคมีเท่านั้นที่มีผลต่ออัตราการแข็งตัวและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเพสต์ผสมเถ้าลอยแต่ขนาดของอนุภาคก็มีผลต่อช่องว่างในโครงสร้างของเพสต์ ก็ต้องถูกนำมาพิจาณาในการสร้างแบบจำลองการหดตัวแบบออโตจีนัสของเพสต์ผสมเถ้าลอย

Chan et al. [18] ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับผลของวัสดุปอซโซลานและอัตราส่วนเพสต์ต่อมวลรวมต่อการหดตัวแบบออโตจีนัส การผสมเถ้าลอยใน HPC นำไปสู่การหดตัวแบบออโตจีนัสน้อยลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น ในส่วนของ OPC ที่ใส่เถ้าลอยนั้น ปริมาณของวัสดุซีเมนต์ที่กำลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงและการดูดซึมน้ำในช่องว่างของโครงสร้างจึงลดลง จึงมีคำแนะนำว่าคอนกรีตที่มีสัดส่วน p/a สูงนั้นอาจทำให้เกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสมากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่คอนกรีตที่มีสัดส่วน p/a ที่น้อยไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการหดตัวมากนัก เนื่องจากแรงยึดรั้งระหว่างมวลรวมมีค่าสูง

Termkhajornkit et al. [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของเถ้าลอย (เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ) ที่มีต่อการหดตัวแบบออโตจีนัส ความเชื่อมโยงกันระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยนั้นหาได้ด้วยวิธีการเลือกทำละลาย (Selective Dissolution Method) อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 25 และ 50 โดยปริมาตร ตัวอย่างของเพสต์ผสมเถ้าลอยถูกเตรียมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ถูกเตรียมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.22 และ 0.30 โดยน้ำหนัก ผลที่ได้

แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่ผิวของเบลน (Blaine) เพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและการหดตัวแบบออโตจีนัสจะเพิ่มขึ้นโดยเชื่อมโยงกับการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย การหดตัวแบบออโตจีนัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 25 แต่หากการแทนที่สูงถึงร้อยละ 50 แล้วการหดตัวแบบออโตจีนัสจะลดลง ยิ่งไปกว่านั้นมีการพบว่าปริมาณทั้งหมดของ Al_2O_3 ในเพสต์ผสมเถ้าลอยมีผลให้เกิดการหดตัวแบบออโตจีนัสในช่วงอายุเริ่มต้นแต่ผลกระทบในระยะยาวนั้นถือว่าน้อยมาก

2.2.2 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

Fujiwara [20] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของส่วนผสมและการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าปริมาณน้ำมากจะทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากซึ่งเกิดในกรณีของปริมาณส่วนผสมที่มีความหนืดปานกลางและน้อย หากจะป้องกันการหดตัวแบบแห้งที่ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวตามมานั้นจำเป็นต้องลดปริมาณน้ำลงให้มากที่สุด โดยให้อยู่ในช่วงสัดส่วนผสมเหล่านี้ด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าส่วนผสมมีความหนืดมากจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าที่คาดไว้ทั้งๆ ที่น้ำมีปริมาณน้อย ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพสต์และการหดตัวแบบแห้งนั้นหาได้จากการค้นคว้าบางวิธี ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากยิ่งหมายถึงจะเกิดการหดตัวแบบแห้งมากเมื่อสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ ยกเว้นในส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยมากที่จะเกิดการหดตัวมาก

Hindy et al. [21] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวแบบแห้งที่เกิดในใต้คอนกรีตผสมเสร็จคุณภาพสูง (HPC) จากการศึกษาผลจากเวลาในการบ่ม สภาพการบ่ม ซิลิกาฟูม และสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ สามารถสรุปได้ว่าการหดตัวแบบแห้งจะลดลงเมื่อใช้เวลาในการบ่มนานขึ้น สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงจะทำให้การหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นและช่วยเร่งปฏิกิริยา และทำให้เกิดพื้นที่สำหรับการรวมตัวของน้ำอิสระ ซิลิฟูมทำให้การเกิดปริมาตรของผลิตผลไฮเดรชั่นเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้การระเหยของน้ำและการหดตัวแบบแห้งลดลง สำหรับผลของขนาดชิ้นทดสอบนั้นปรากฏว่ายิ่งสัดส่วนระหว่างปริมาตรต่อพื้นที่ผิวมีค่าสูงจะทำให้การหดตัวแบบแห้งเกิดขึ้นน้อย ณ คอนกรีตที่มีอายุเท่ากัน ดังนั้นผลจากการทดลองโดยทั่วไปที่ทดลองกับชิ้นทดสอบขนาดเล็กนั้นดูเหมือนจะประมาณการหดตัวของ HPC มากเกินไปสำหรับโครงสร้างจริง

Bissonnette et al. [22] ทำการวัดผลของตัวแปรสำคัญที่ต่างๆ กัน นั่นคือ ความชื้นสัมพัทธ์ ขนาดของชิ้นทดสอบ สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาตรเพสต์ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างร้อยละ 48 ถึง 100 ค่าการหดตัวของซีเมนต์เพสต์จะเป็นสัดส่วนผกผันกับ

ความชื้นสัมพัทธ์ ผลที่ได้ยังแสดงว่าการหดตัวสูงสุดของเพสต์และมอร์ต้าร์ของชิ้นทดสอบขนาด 50 x 50 x 400 มิลลิเมตร ไม่ต่างจากการหดตัวจริงที่วัดได้กับชิ้นทดสอบขนาด 4 x 8 x 32 มิลลิเมตร มากนัก ดังนั้นการทดสอบกับชิ้นทดสอบในการทดลองนี้จะเห็นว่าความชื้นที่กระจายอยู่โดยรอบไม่มีผลต่อความเครียดสูงสุดในการหดตัว ผลของสัดส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ภายในช่วงที่ทำการทดสอบ (0.35-0.50) มีความสัมพันธ์กันน้อยมาก ในทางกลับกันปริมาตรเพสต์กลับมีผลกระทบสูง

Rao [23] ได้ศึกษาผลของซิลิกาฟูมและขนาดของมวลรวมต่อการหดตัวแบบแห้งระยะยาวของมอร์ต้าร์ ซิลิกาฟูมถูกใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ขนาดมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดคือ 1.18 และ 2.36 มิลลิเมตร สัดส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานและสัดส่วนของวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 0.50 และ 1:3 ตามลำดับ การหดตัวแบบแห้งสูงสุดนั้นจะวัดได้เมื่อมีอายุ 1,095 วัน จากผลของการทดลองปรากฏว่าการเพิ่มซิลิกาฟูมมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ระยะเริ่มต้นอย่างเห็นได้ชัด การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมซิลิกาฟูมปริมาณมากนั้นมากกว่ามอร์ต้าร์ที่ไม่ผสมซิลิกาฟูม 7 ถึง 10 เท่าในช่วงวันแรกๆ ไม่มีการพบว่าซิลิกาฟูมมีผลต่อการเกิดการหดตัวแบบแห้งระยะยาวของมอร์ต้าร์อย่างชัดเจน ยิ่งกว่านั้นยังพบว่าการหดตัวแบบแห้งระยะยาวของมอร์ต้าร์จะลดลงเมื่อขนาดของมวลรวมละเอียดเพิ่มขึ้น

Pacheerat [24] ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยต่อความยาวที่เปลี่ยนไป รวมไปถึงการเปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลงความยาวของมอร์ต้าร์และคอนกรีต ในการศึกษาใช้การแทนที่ของเถ้าลอยร้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์เรียงลำดับตามอัตราส่วนน้ำต่อวัตถุประสานที่มีค่า 0.35, 0.50 และ 0.65 จากผลของการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตให้ค่าที่มีแนวโน้มเหมือนกันกับมอร์ต้าร์ เพียงแต่ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวจะน้อยกว่าในทุกๆ ส่วนผสม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานขึ้นจะพบว่าจะเกิดการกระจายตัวและเพิ่มขึ้นของการหดตัวแบบแห้งในขณะที่การหดตัวแบบออโตจีนัสลดลง เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยแล้ว จะมีการเปลี่ยนแปลงความยาวทั้งหมดลดลง

Juenger และ Jennings [25] ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการผันกลับและไม่ผันกลับของการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ เพื่อทำความเข้าใจกลไกเกี่ยวกับส่วนของการหดตัวแบบแห้งให้ดีขึ้นจึงได้มีการเปรียบเทียบในเชิงปริมาณระหว่างค่าการหดตัวและคุณสมบัติของโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ การหดตัวแบบแห้ง พื้นที่ผิว และปริมาตรของช่องว่างที่เปลี่ยนไป โดยใช้การบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิ (2, 20 และ 40 ^{o}C) และสารเคมีผสมเพิ่ม เห็นได้ว่าการหดตัวแบบแห้งทั้งหมดและแบบไม่ผกผันจะเพิ่มขึ้นไปพร้อมกับพื้นที่ผิวและปริมาตรช่องว่างที่วัดค่าด้วยไนโตรเจน (ช่วงรัศมีของ

ช่องว่างเป็น 1-40 นาโนเมตร) เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมถูกทำให้คงที่ (0.55 และ 0.45 ตามลำดับ) ผลที่ได้แสดงว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูง (40 °C) ไม่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับการบ่มที่อุณหภูมิปกติ (20 °C) และการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ (2 °C) ทำให้เพิ่มการหดตัวแบบแห้งทั้งหมดและแบบไม่ผกผัน

Barr et al. [26] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติที่มีต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่เสริมและไม่เสริมใยเหล็ก การผสมผสานกันระหว่างการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ การเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูม (SF) และการลดสัดส่วนของน้ำต่อวัสดุผสมนั้นทำเพื่อหาช่วงกว้าง (C30-C70) ของกำลังรับแรงของคอนกรีต ในการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบกับความเครียดหดตัวที่ได้จากแบบจำลอง ACI 2009 ผลที่ได้คือผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาตินั้นมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งและแบบออโตจีนัส อย่างจำกัดเท่านั้น การเพิ่มใยเหล็กขึ้นร้อยละ 2 นั้นแทบจะไม่มีผลต่อการหดตัวที่กำลังรับแรงต่ำสุด (C30) แต่แรงดึงรั้งที่มีต่อการหดตัวที่กำลังเกิดขึ้นนั้นช่วยเสริมกำลังของคอนกรีต การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและค่าความเครียดหดตัวที่คาดไว้ไม่เหมาะกับคอนกรีตกำลังสูง ถึงแม้จะพบความสัมพันธ์ที่น่าพอใจที่กำลังรับแรงต่ำก็ตาม

Kim และ Lee [27] ได้ทำการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในของชิ้นงานคอนกรีตแห้งในระยะเริ่มต้น ความแตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์นั้นเกิดจากมีการวัดค่าการแห้งของชิ้นทดสอบในสภาวะแวดล้อมปิด จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของความชื้นในคอนกรีตกำลังต่ำที่มีสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงมักจะเกิดการแพร่เนื่องจากการสัมผัสกับอากาศมากกว่าการแห้งตัว (Self-desiccation) ในทางกลับกันในคอนกรีตกำลังสูงที่มีสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ การแห้งตัวจะมีผลต่อการกระจายตัวของความชื้น

Rico [28] นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของการถ่ายเทความชื้น เนื่องจากความยากลำบากในการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีต จึงได้มีการวัดค่าสากลของน้ำหนักที่สูญเสียขึ้น แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์สามมิติในภาพความชื้นสัมพัทธ์ในช่องว่างได้ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาสมการ Nonlinear Diffusion น้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบได้รับการคำนวณโดยใช้เส้นแบ่งการเปลี่ยนสถานะ (Desorption Isotherm) ที่สัมพันธ์กับความชื้นในช่องว่าง พัฒนาการของน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นงานทดสอบมอร์ต้าร์ถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองที่นำไปสู่การยอมรับโดยสากล

Ayano et al. [29] คิดค้นวิธีการใหม่ในการหาการแพร่แบบ Hygral และสัมประสิทธิ์ Film การกระจายตัวของความชื้นสัมพัทธ์ในระบบช่องว่างของคอนกรีต ณ เวลาใดๆระหว่างการสัมผัส

อากาศหาได้ด้วยการทดลองนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบ Hygral สามารถเขียนได้ทั้งในภาพของฟังก์ชั่นความชื้นและฟังก์ชั่นของความชื้นสัมพัทธ์

Wong et al. [30] ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของน้ำในคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ล้วน มีการทำการทดลองเกี่ยวกับการแพร่ของน้ำและการดูดซึมพร้อมๆ กับการทดลองการเร่งอัตราเร็วของความ สามารถในการดูดซึมน้ำ ซึ่งทำให้ทราบผลของความชื้นในช่องว่าง อุณหภูมิโดยรอบ ความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม การกระจายตัวของแรงดันน้ำ และสัดส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ การศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำมีความหมายต่อการคาดการณ์การถ่ายเทและกระจายตัวของสารเคมีในคอนกรีต เช่นเดียวกับการประเมินทั้งด้านปริมาณและคุณภาพของโครงสร้างของคอนกรีตที่เปิดสู่สภาพอากาศและสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน

Subsomboon [31] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของเถ้าลอยแม่เมาะที่มีต่อการหดตัวและการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ ชิ้นทดสอบถูกควบคุมโดยการใช้ร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยที่ 0, 30 และ 50 ผลที่ได้คือการหดตัวแบบแห้งจะลดลงด้วยการเพิ่มร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอย

Choojan และ Kitireanglarp [32] ได้ค้นคว้าเกี่ยวกับผลจากวิธีการบ่ม จำนวนผิวสัมผัส สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และร้อยละของการแทนที่เถ้าลอยต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่ามากทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมาก เถ้าลอยสามารถลดการเกิดการหดตัวแบบแห้งได้หากผ่านกระบวนการบ่มที่เหมาะสม การหดตัวแบบแห้งนั้นจะเกิดที่ผิวหน้ามากกว่าใจกลางของคอนกรีต ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่มีหน้าตัด 4 ด้านเปิดโล่งที่แนวโน้มที่จะเกิดการหดตัวทั้งกับแกนกลางและผิวหน้าได้มากกว่าชิ้นทดสอบที่มีผิวหน้าเพียง 2 ด้าน ยิ่งใช้เวลาในการบ่มนานยิ่งทำให้การเกิดการหดตัวแบบแห้งทั้งที่แกนกลางและผิวหน้าน้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่ชุ่มน้ำ และยิ่งไปกว่านั้นสัดส่วนของเพสต์ต่อปริมาตรช่องว่าง ทำให้การหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และสุดท้าย การหดตัวแบบแห้งจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของผิวหน้าต่อปริมาตรของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้น

Chindaprasit et al. [33] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของเถ้าลอยที่มีต่อการใส่น้ำ และคุณสมบัติบางประการของมอร์ต้าร์ที่แข็งตัวแล้ว ในกรณีของเถ้าลอยดั้งเดิม (OFA) กับเถ้าลอยที่มีความละเอียด 5 ค่าที่ต่างกันซึ่งได้จากการร่อนและการใช้เครื่องแยกโดยอากาศ ในการทดลองจะใช้เถ้าลอยผสมร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุผสมเพิ่ม ผลการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยชนิดละเอียดจะดีกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยดั้งเดิม ไม่ว่าเวลาจะผ่านไปนานเท่าใดและเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากจะยิ่งให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด จากการใช้เถ้าลอยทุกความละเอียดแล้วพบว่าการหดตัวแบบแห้งมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด เถ้าลอยหยาบให้ผลไม่ดี ค่าความละเอียดของเถ้าลอยที่

ลดลงจะมีความต้านทานการขยายตัวของซัลเฟตมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดยกเว้นเถ้าลอยหยาบที่พบการขยายตัวที่มากขึ้น มีข้อแนะนำว่าเถ้าลอยที่มีการทำปฏิกิริยามากกว่าสามารถเพิ่มความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์และทำให้คุณสมบัติทางกลของมอร์ต้าร์ดีขึ้น

Akkaya et al. [34] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และคอนกรีตที่มีวัสดุผสมสองและสามชนิด คอนกรีตที่มีวัสดุผสมสองและสามชนิดนั้นได้จากการแทนที่ส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย เถ้าลอยที่มีความละเอียดมาก และซิลิกาฟูม การทดสอบการหดตัวแบบยึดรั้งนั้นก็สามารถปฏิบัติเพื่อทดสอบผลของชนิดของวัสดุผสมที่มีต่อการแตกร้าวในระยะแรก หลังจากการแตกร้าวของวงแหวนยึดรั้งตัวอย่างแล้ว ทำการวัดรอยกว้างของรอยแตกร้าวแล้วเปรียบเทียบกับผลของ R-Curve ตามแบบจำลองที่ใช้การยืดหยุ่นของจุดสูงสุดและการคืบของความเครียด มีการพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากจะลดความเครียดของการหดตัวแบบออโตจีนัสแต่เพิ่มความเครียดของการหดตัวแบบแห้ง เนื่องจากความเครียดของการหดตัวทั้งหมดของคอนกรีตที่มีวัสดุผสมสองชนิดและสามชนิดนั้นมีค่าคล้ายคลึงกัน การพัฒนากำลังกลายมาเป็นปัจจัยสำคัญของการแตกร้าว คอนกรีตกำลังน้อยที่มีวัสดุผสมสามชนิดนั้นทำให้เกิดการแตกร้าวง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีวัสดุผสมสองชนิด คอนกรีตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะแตกเร็วสุดและมีความกว้างของรอยแตกร้าวมากที่สุด การวัดรอยแตกร้าวนั้นทำเพื่อนำมาคำนวณและหาความสัมพันธ์กับแบบจำลอง R-Curve

Nader et al. [35] ได้ทำการศึกษาผลของคอนกรีตผสมเถ้าหนักที่ได้จากถ่านหินลิกไนต์ จากการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าหนักมีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตที่ผสมทรายธรรมชาติ เนื่องจากต้องใส่น้ำในการผสมเพิ่มขึ้นเพื่อให้คอนกรีตมีความเข้มข้นเท่ากัน เมื่อใส่เถ้าหนักในปริมาณน้อยแล้ว การหดตัวเฉลี่ยในช่วงแรกของคอนกรีตที่ใส่เถ้าหนักจะมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ไม่ใส่เถ้าหนัก แต่เมื่อใส่เถ้าหนักในปริมาณมากค่าการหดตัวแบบพลาสติกจะเพิ่มขึ้นแต่ไม่สูงเท่ากับของคอนกรีตควบคุม

Kou Shi-Cong และ Poon Chi-Sun [36] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ประกอบด้วย หินบดละเอียด (CFS) เถ้าหนัก (FBA) และ มวลรวมละเอียดที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (FRA) นำมาแทนที่มวลรวมละเอียด การศึกษานี้ประกอบไปด้วยการทดลองกำลังรับแรงอัด การหดตัวแบบแห้ง และความทนทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ ค่ากำลังรับแรงอัดและการหดตัวแบบแห้งจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าหนัก (FBA) ในขณะที่มวลรวมละเอียดที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (FRA) จะทำให้กำลังแรงอัดลดลงและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการออกแบบส่วนผสม

โดยให้ค่าการยุบตัว (Slump) คงที่ แล้วใช้เถ้าหนัก (FBA) แทนมวลรวมละเอียดแล้วคอนกรีตจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น การหดตัวแบบแห้งลดลง และมีความทนทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น

Ratchayut และ Somnuk [37] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตไหลเข้าแบบด้วยตัวเอง (SCC) โดยใช้เถ้าหนักแทนการผสมมวลรวมละเอียด จากผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าหนักทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงและทำให้ความพรุนของคอนกรีตแข็งตัวแล้วเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามหากผสมเถ้าหนักจำนวนร้อยละ 10 แทนมวลรวมละเอียด จะมีผลให้ค่ากำลังแรงอัดเมื่อคอนกรีตมีอายุ 56 วันดีขึ้น ในแง่ของความทนทาน การซึมผ่านของคลอไรด์ ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น และการหดตัวแบบแห้งของชิ้นงานคอนกรีตไหลเข้าแบบด้วยตัวเอง (SCC) ที่ผสมเถ้าหนักโดยส่วนมากยกเว้นที่ผสมเถ้าหนักร้อยละ 10 นั้นมีค่าสูงกว่าชิ้นงานคอนกรีตไหลเข้าแบบด้วยตัวเอง (SCC) เนื่องจากมีความพรุนสูงกว่า

Bai et al. [38] ได้ศึกษาผลของกำลังรับแรงอัดและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ผสมเถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียด โดยคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ มีสัดส่วนผสมของเถ้าหนัก (FBA) ที่แทนที่ทรายตามธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0, 30, 50, 70 และ 100 โดยมวล โดยให้ค่า w/c และช่วงค่าการยุบตัวคงที่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่แล้ว ค่ากำลังรับแรงอัดและการหดตัวแบบแห้งจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าหนัก (FBA) แต่เมื่อกำหนดให้ความสามารถในการทำงานคงที่แล้ว ค่ากำลังรับแรงอัดก็มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม ในขณะที่การหดตัวแบบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ เถ้าหนัก (FBA) เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 30 และสามารถใช้เถ้าหนัก (FBA) แทนที่ทรายธรรมชาติได้ถึงร้อยละ 30 เพื่อผลิตคอนกรีตที่มีค่ากำลังแรงอัดในช่วง 40 ถึง 60 N/mm^2 โดยไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

2.2.3 ความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2550) [39]ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนและเถ้าลอยบางส่วนโดยการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต จากการศึกษาพบว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตการขยายตัวของมอร์ต้าร์แทนที่ผงหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 68 สัปดาห์ ทุกส่วนผสมยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก ในขณะที่การแช่

ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน แต่ในกรณีมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน

P.Pipilikaki, M.Katsioti และ J.L.Gallias (2008) [40] ได้ศึกษาความสามารถการต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสภาวะที่สารละลายซัลเฟตมีความเข้มข้นสูง โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่มีขนาดความละเอียดเบลน (Blaine) 2550 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนทีมีขนาดความละเอียดเบลน 3990 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ในปริมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 3โดยหล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 4×4×16 เซนติเมตร ตามมาตรฐานยุโรป (European Standard EN 196-1) ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิห้อง 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1.5 ปี และทำการวัดค่าการเสื่อมสภาพของตัวอย่างมอร์ต้าร์จนครบอายุ 500 วัน โดยทำการวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์และวัดการสูญเสียกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุต่างๆ จากการศึกษาพบว่าการขยายตัวแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักนั้นมีค่าการขยายตัวมากกว่าแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนโดยเริ่มมีการขยายตัวมากกว่าอย่างชัดเจนหลังจาก 250 วันเป็นต้นไป นับจากวันแช่ตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และเริ่มเห็นรอยแตกร้าวที่อายุที่อายุ 6 เดือน ส่วนการสูญเสียกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์นั้นพบว่ามีความสอดคล้องกันกับกล่าวคือ การสูญเสียกำลังอัดประลัยของตัวแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก นั้นมีค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยมากกว่าแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยผงหินปูนถึงร้อยละ 35 นั้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงและอาจเป็นปริมาณที่ไม่เหมาะสมมีผลทำให้เกิดความโพรงมากเป็นเหตุให้สารลายซัลเฟตเข้าไปทำลายตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักได้มากขึ้น มีผลทำให้การเกิด Ettringite มีมากตามไปด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงเป็นที่ชัดเจนว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูน (การศึกษาครั้งนี้) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตรส่วนที่ไม่เหมาะสมนำไปสู่การมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน กับความสามารถในการต้านทานซัลเฟตที่สภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงๆ

Kamile Tosun, Burak Felekoglu, Bulent Baradan และ I.Akin Altun (2009) [41] ได้ศึกษาผล กระทบของอัตราการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับการต้านทานซัลเฟตที่ความเข้มข้นของสารละลายที่สูงโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนในปริมาณร้อยละ 5, 10, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูนในปริมาณร้อยละ 5, 10, 20 และ 40 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนผสม ซีเมนต์ / ทราย / น้ำ เท่ากับ 1/3/0.5 ตามมาตรฐาน BSEN 197 [1] โดยหล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร และแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25×25×285 มิลลิเมตร ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างมอร์ต้าร์ดังกล่าวแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่อุณหภูมิ ห้อง 5° และ 20°องศาเซลเซียส กับแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่อุณหภูมิห้อง 5°องศาเซลเซียส ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูง (200 กรัมต่อลิตร) ที่ระยะเวลา 1 ปี โดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดประลัยและการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนการแทนผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ที่ปริมาณสูงๆ (ร้อยละ 40) ที่อุณหภูมิต่ำๆ (5°องศาเซลเซียส) นั้นมีผลเสียต่อความต้านทานซัลเฟตในด้านกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ไม่ว่าจะเป็นการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแต่อย่างไรก็ตามในกรณีแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นให้ค่าการสูญเสียกำลังอัดประลัยมากที่สุด ส่วนค่าการขยายตัวนั้นพบว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ที่ปริมาณสูงๆ (ร้อยละ 40) มีความสอดคล้องกันกับการสูญเสียกำลังอัดประลัย คือมีค่าการขยายตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ล้วนไม่ว่าเป็นการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่อุณหภูมิห้อง 5 และ 20°องศาเซลเซียส กับแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ก็ตาม

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดครั้งนี้ วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผงหินปูน ทราย หิน น้ำ สารโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 80 – 2517

3.1.2 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดโดยมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 14 ไมโครเมตร

3.1.3 ผงหินปูน ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิตมีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมหลายๆประเภท โดยมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8 ไมโครเมตร

3.1.4 ทราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนออกจนสะอาด นำไปทำการอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated-Surface Dry, SSD)

3.1.5 หินเบอร์ 2 นำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปทำการอบ และปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

3.1.6 น้ำ ใช้น้ำประปามีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในช่วง 7 ถึง 8

3.1.7 สารโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีสัดส่วนผสมดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

3) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 30 , 50 และ70 โดยน้ำหนัก

4) ผงหินปูน จะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

5) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

6) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 45 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

7) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 65 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

8) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ20 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

9) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

10) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะใช้แทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 60 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน ที่ใช้ในการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะการก่อตัวของเพสต์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (C)	ผงหินปูน (LP)	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด (SL)
1	C1	100	-	-
2	C1-5LP	95	5	-
3	C1-10LP	90	10	-
4	C1-30SL	70	-	30
5	C1-50SL	50	-	50
6	C1-70SL	30	-	70
7	C1-5LP-25SL	70	5	25
8	C1-5LP-45SL	50	5	45
9	C1-5LP-65SL	30	5	65
10	C1-10LP-20SL	70	10	20
11	C1-10LP-40SL	50	10	40
12	C1-10LP-60SL	30	10	60

หมายเหตุ

1. C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2. C1-xLP หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก

3. C1-xSL หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก

4. C1-xLP-ySL หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก และมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ y โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย การหดตัวแบบออโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดคาร์บอเนชั่น และความต้านทานซัลเฟตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

ลำดับที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีต ต่อ 1 ลบ.ม. โดยน้ำหนัก (กก.) w/b = 0.55					
		ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (C)	ผงหินปูน (LP)	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (SL)	ทราย	หิน	น้ำ
1	C1	332	0	0	790	1,080	215.8
2	C5	332	0	0	790	1,080	215.8
3	C1-5LP	316	16	0	790	1,080	215.8
4	C1-10LP	299	33	0	790	1,080	215.8
5	C1-30SL	233	0	99	790	1,080	215.8
6	C1-50SL	166	0	166	790	1,080	215.8
7	C1-70SL	100	0	232	790	1,080	215.8
8	C1-5LP-25SL	233	16	83	790	1,080	215.8
9	C1-5LP-45SL	167	16	149	790	1,080	215.8
10	C1-5LP-65SL	100	16	216	790	1,080	215.8
11	C1-10LP-20SL	233	33	66	790	1,080	215.8
12	C1-10LP-40SL	167	33	132	790	1,080	215.8
13	C1-10LP-60SL	180	33	119	790	1,080	215.8

หมายเหตุ

1. สัดส่วนผสมของคอนกรีต C5 ใช้สำหรับการทดสอบความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เท่านั้น

2. การศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ทำการศึกษาเฉพาะสัดส่วนผสมของคอนกรีต C1 , C1-10LP , C1-30SL , C1-50SL , C1-10LP-20SL และ C1-10LP-40SL เท่านั้น

3.2 ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในครั้งนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ซึ่งได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี ส่วนการศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต นอกจากนี้ได้ศึกษาถึงการหดตัวแบบออโตจีนัสการหดตัวแบบแห้ง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดคาร์บอเนชั่นและการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาดังนี้

3.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน (ยกเว้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5) จะทำการศึกษา ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

1) การทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188 - 95

2) การทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ทดสอบโดยวิธีเบลน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 204 – 00 ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน (Air Permeability Apparatus)

3) การทดสอบลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน โดยวิธีภาพถ่ายขยายกำลังสูง (Scanning Electric Microscope : SEM)

4) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนนั้น ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X - Ray F Luorescence (XRF)

3.2.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในครั้งนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

1) การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency)ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C187-98 โดยที่สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.1

2) การทดสอบเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ซึ่งทำการทดสอบหาเวลาการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) และเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 191-91 ทดสอบด้วยเครื่องมือไวแคท โดยที่สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.1

3) ค่าการยุบตัว (Slump) และค่าการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 143 ด้วยกรวยทดสอบการยุบตัว โดยที่สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.2

4) การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ทำการทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่

ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ประยุกต์ใช้มาตรฐานอังกฤษ BS 1881-116 ทดสอบด้วยเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) ดังภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1 เครื่อง UTM (Universal Testing Machine)

1. การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม โดยที่สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.2

2. อายุการบ่มและอายุการทดสอบ

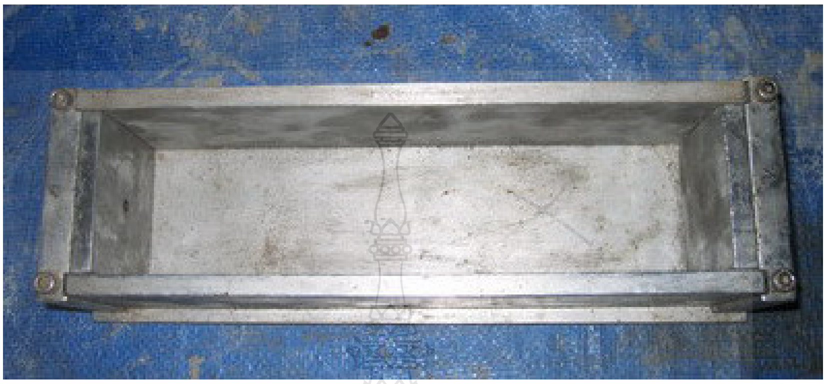
การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีต โดยถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำไปบ่มในน้ำและทำการทดสอบที่อายุ 3, 14, 28 และ 56 วัน

3.2.3 การทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

การทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 157 โดยที่สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

1) การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ใช้แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด $75 \times 75 \times 285$ มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.2 โดยใช้จำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม

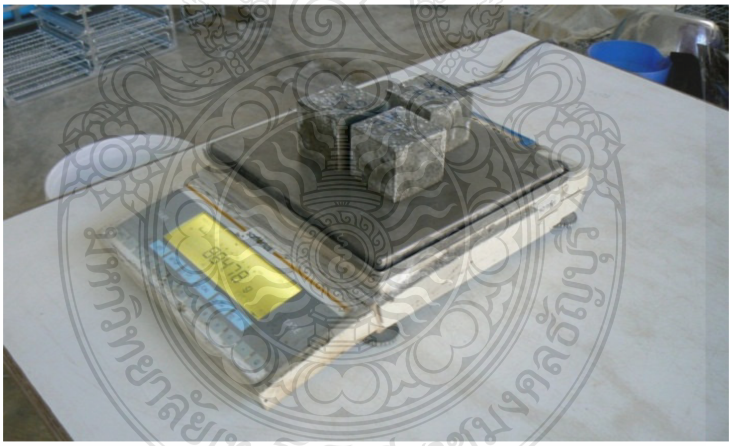


ภาพที่ 3.2 แบบหล่อสำหรับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ขนาด $75 \times 75 \times 285$ มิลลิเมตร

2) อายุการบ่มและการทดสอบ

หลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตเสร็จ คลุมตัวอย่างคอนกรีตด้วยพลาสติกทันทีเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และถอดแบบเมื่ออายุครบ 1 วัน จากนั้นห่อตัวอย่างคอนกรีตชั้นแรกด้วยแผ่นพลาสติกใสและห่อทับอีกชั้นด้วยแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ทำการวัดความยาวตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานของเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) ดังแสดงตามภาพที่ 3.3 ซึ่งค่าที่วัดได้ ณ ขณะนั้นจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้น หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างคอนกรีตไว้ในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิคงที่ 21±2°C และทำการวัดความยาวตัวอย่างคอนกรีต ที่อายุ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 42, 56 และ 91 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวแบบออโตจีนัสที่อายุต่างๆ การวัดตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัส จะทำการวัดค่าความยาวและชั่งน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม ดังภาพที่ 3.4 ซึ่งตัวอย่างคอนกรีตที่มีค่าคงที่สัมพัทธ์ (Relative Constant) น้อยกว่าร้อยละ 0.05 เมื่อครบ 91 วัน แสดงว่าการห่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยแผ่นพลาสติกใสและแผ่นอะลูมิเนียมนั้นเพียงพอแล้วในการป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างคอนกรีต

ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความยาว (Length Comparator)



ภาพที่ 3.4 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม

3) การคำนวณร้อยละของการหดตัวแบบออโตจีนัส

ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานของเครื่องวัดความยาว ที่ได้จากการวัดครั้งแรกและค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตที่วัดได้ในช่วงอายุต่างๆ จะนำไปคำนวณค่าร้อยละของการหดตัวแบบออโตจีนัส ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3.1

$$\Delta L_{autogenous} = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \tag{3.1}$$

โดยที่ $\Delta L_{autogenous}$ คือ ค่าการหดตัวแบบออโตจีนัส (ร้อยละ)

L_x คือ ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุต่างๆ (มิลลิเมตร)

L_i คือ ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มิลลิเมตร

3.2.4 การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กระทำตามมาตรฐาน ASTM C596 – 96 โดยที่สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

1) การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างคอนกรีตใช้แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด $75 \times 75 \times 285$ มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.2 โดยใช้จำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม

2) อายุการบ่มและการทดสอบ

หลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีต และถอดแบบเมื่ออายุครบ 1 วัน แล้วนำไปบ่มในน้ำอีก 7 วัน อุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ $30 \pm 2°C$ เมื่อบ่มจนครบกำหนดแล้วจึงนำตัวอย่างคอนกรีตขึ้นจากน้ำและเช็ดผิวตัวอย่างคอนกรีตให้แห้งด้วยผ้าสะอาด หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานของเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) ซึ่งค่าที่วัดได้ ณ ขณะนั้นจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวแล้วจึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย $30 \pm 2°C$ โดยวางชิ้นตัวอย่างบนโต๊ะให้มีระยะห่างกันไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ที่อายุ 1,3,5,7,14,21,28,42 และ 91 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวแบบแห้งที่อายุต่างๆ

3) การคำนวณร้อยละของการหดตัวแบบแห้ง

ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น ที่ได้จากการวัดครั้งแรกหลังจากบ่มในน้ำ 7 วันและค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่ง

โลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่วัดได้ในช่วงอายุการบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ จะนำไปคำนวณค่าร้อยละของการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3.2

$$\Delta L_{drying} = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \qquad (3.2)$$

โดย ΔL_{drying} คือ ค่าการหดตัวแบบแห้ง (ร้อยละ)

L_x คือ ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุต่างๆ (มิลลิเมตร)

L_i คือ ค่าความยาวของตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มิลลิเมตร

3.2.5 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride Penetration Resistance) ของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 – 97 ด้วยชุดทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน ดังภาพที่ 3.5 โดยที่สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

(ก) เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า

(ข) เซลล์ทดสอบ

ภาพที่ 3.5 ชุดการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

1) การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมขึ้นโดยใช้แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีต 2 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม เพื่อใช้ทำการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วันและ 56 วัน

2) อายุการบ่ม

หลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตเสร็จ หุ้มตัวอย่างคอนกรีตด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำสู่สภาวะแวดล้อมและถอดแบบเมื่ออายุครบ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำอีก 28 วันและ 56 วัน อุณหภูมิระหว่างการบ่ม $30 \pm 2°C$ เพื่อทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่อายุ 28 วันและ 56 วัน ตามลำดับ

3) การเตรียมสารละลาย

สารละลายที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ สำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เตรียมโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ในสารละลาย 1 ลิตรเพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เตรียมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัม ละลายในน้ำกลั่นบริสุทธ์ 1,000 กรัม เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์

4) การหาค่าการแทรกซึมคลอไรด์

เมื่อบ่มตัวอย่างคอนกรีตครบกำหนดอายุ 28 และ56 วัน ตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตออกเป็น 3 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นมีความหนา 5 เซ็นติเมตร เช็ดชิ้นตัวอย่างคอนกรีตด้วยผ้าสะอาดแล้วนำชิ้นตัวอย่างมาประกอบเข้ากับ cell โดยทำการเคลือบรอบๆผิวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตด้วยกาวโพลียูริเทน เมื่อกาวแห้งจึงเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ลงในด้านขั้วลบและเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงใน cell ด้านขั้วบวก เมื่อเติมสารละลายเสร็จนำประกอบเข้ากับชุดทดสอบ หลังจากนั้นปล่อยแรงดันไฟฟ้าขนาด 60 ± 0.1 โวลท์ผ่านชิ้นตัวอย่างคอนกรีต เครื่องมือจะทำการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างทดสอบของแต่ละ cell และบันทึกค่าโดยอัตโนมัติทุกๆ 30 นาที ซึ่งจะแสดงผลการทดสอบเป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างทดสอบ (Total Charge Passed) มีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulombs) โดยใช้เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง

3.2.6 การทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

การทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 856 โดยที่สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

1) การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10×10×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีต 2 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม เพื่อใช้ทำการทดสอบการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 วันและ 56 วัน

2) อายุการบ่มและการทดสอบ

หลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีต และถอดแบบเมื่ออายุครบ 1 วัน จึงนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) จนครบอายุ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปอบในตู้อบคาร์บอเนชั่น โดยใช้ระยะเวลาในการอบ 28 วันและ 56วัน ภายในตู้อบคาร์บอเนชั่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) จะถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50-55% เมื่อครบอายุที่กำหนด จึงนำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชั่น

3) การหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชั่น

เมื่อครบกำหนดระยะเวลาของการอบในตู้อบคาร์บอเนชั่น (28 วันและ56วัน) จึงนำตัวอย่างคอนกรีตออกจากตู้อบคาร์บอเนชั่น กดก้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่อง UTM ให้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตแตกออกเป็น 2 ซีก จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน(Phenolphthalein) ลงบนตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วง และปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 30 นาที จึงวัดค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชั่น (บริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง)

3.2.7 การทดสอบความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

การทดสอบความต้านทานซัลเฟต (Sulfate Resistance) ของคอนกรีต จะใช้วิธีการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัว (Expansion) ของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ส่วนการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างคอนกรีต จะแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยที่สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

1) การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต ใช้แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 75×75×285 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.2 โดยใช้จำนวนตัวอย่าง 4 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม เพื่อทดสอบหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต จำนวน 2 ตัวอย่างและทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จำนวน 2 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต ใช้แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100×100×100 มิลลิเมตร โดยใช้จำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสม

โดยหลังจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตเสร็จ หุ้มตัวอย่างคอนกรีตด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ถอดแบบเมื่อครบ 1 วัน แล้วจึงแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายซัลเฟตที่เตรียมไว้เพื่อทำการทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต โดยที่สารละลายซัลเฟตจะเปลี่ยนที่อายุ 1, 2 เดือนและทุกๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่างคอนกรีต

ภาพที่ 3.6 ถังสำหรับแช่ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต

1. การทดสอบตัวอย่าง

ก. การวัดการขยายตัว

การวัดการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยหลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด $75\times75\times285$ มิลลิเมตร)ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 ต่อจากนั้นนำตัวอย่างแยกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในถังสำหรับแช่ตัวอย่างคอนกรีต ดังภาพที่ 3.6 แล้วทำการวัดความยาวของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 2, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นให้ทำการวัดตัวอย่างคอนกรีตทุกๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต คำนวณจากสมการ (3.3)

$$\text{การขยายตัว (ร้อยละ)} = \left[\left(L_t - L_i\right) / L_i\right]\times 100 \qquad (3.3)$$

โดยที่ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของชิ้นตัวอย่าง ณ เวลาที่ต้องการวัดการขยายตัวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตแล้ว (มิลลิเมตร)

ข. การวัดการสูญเสียน้ำหนัก

การวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟต โดยหลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 100×100×100 มิลลิเมตร)ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน แล้วทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก ต่อจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลายแมกนีเซียม แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 2, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นให้ทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตทุกๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตคำนวณจากสมการที่ 3.4

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ)} = \left[\left(W_i - W_t\right) / \left(W_i\right)\right]\times 100 \qquad (3.4)$$

โดยที่ W_i คือ น้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (กรัม)

W_t คือ น้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต ณ เวลาที่ต้องการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก หลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตแล้ว (กรัม)

ค. การเตรียมสารละลายซัลเฟต

- สำหรับสารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สารละลายซัลเฟต 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยมีรายละเอียดดังนี้
- สารละลายโซเดียมซัลเฟต ใช้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เท่ากับ 150 กรัม (SO_4^{2-} เท่ากับ 101,400 ppm) ในสารละลาย 1 ลิตร
- สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเพื่อให้ปริมาณของ SO_4^{2-} เท่ากับ 101,400 ppm ดังนั้นจึงใช้แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เท่ากับ 211.8 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร

การเตรียมสารละลายซัลเฟตให้เตรียมไว้ล่วงหน้า 1 วัน ที่อุณภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ก่อนแช่ตัวอย่างคอนกรีต และอัตราส่วนของปริมาตรสารละลายซัลเฟตต่อปริมาตรตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ ใช้ในอัตราส่วนประมาณ 1 ต่อ 3

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

สำหรับผลการศึกษาและวิเคราะห์การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในครั้งนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยดังกล่าว จึงได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ซึ่งได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี ศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต นอกจากนี้ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติด้านความคงทน ซึ่งได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การหดตัวแบบออโตจีนัส ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ การเกิดคาร์บอเนชั่นและการต้านทานซัลเฟตของของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน

การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ซึ่งได้ศึกษา ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะ(Specific Gravity) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน พบว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.12 และประเภทที่ 5 มีค่าเท่ากับ 3.18 ส่วนของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน มีค่าเท่ากับ 2.96 และ 2.69 ตามลำดับ

4.1.2 ความละเอียดโดยวิธีเบลน

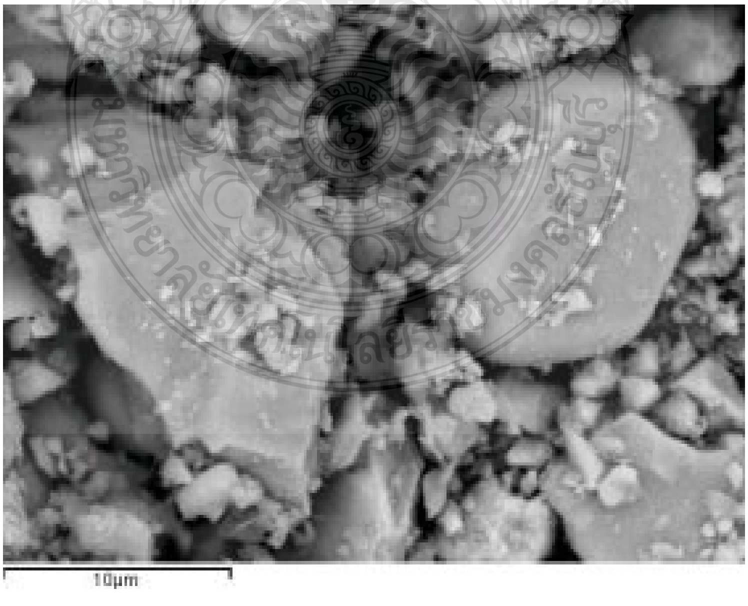
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้นั้น เท่ากับ 3,250 3,727 4,600 และ 5,210 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

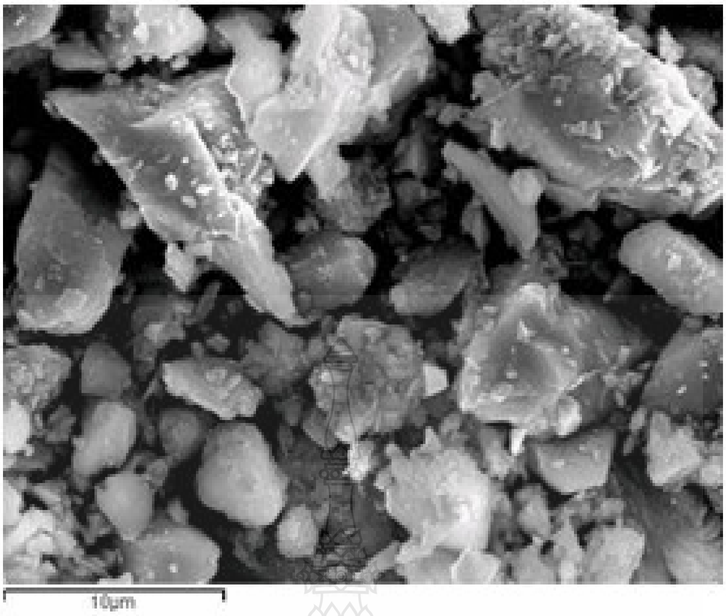
รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	3.18	2.96	2.69
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ ก.)	3,250	3,727	4,600	5,210
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	17	16	14	8

4.1.3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค

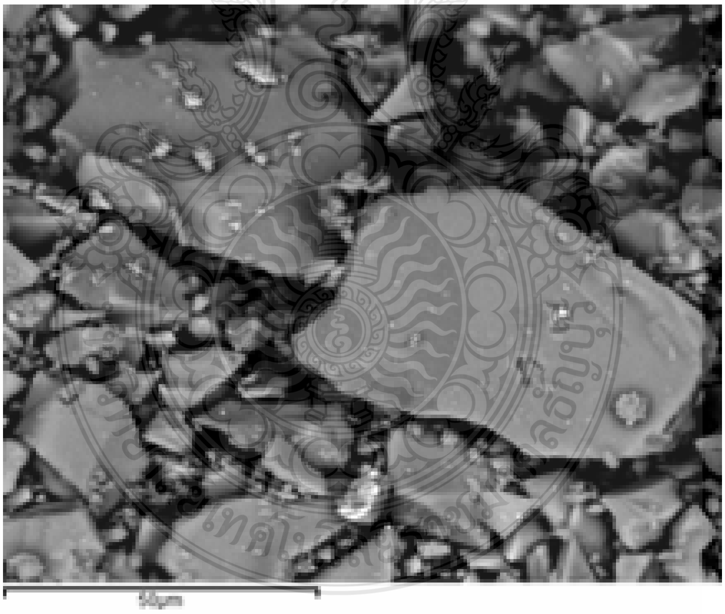
ภาพที่ 4.1 (ก – ง) แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของวัสดุประสานทั้ง สามชนิดนั้นมีลักษณะรูปร่างของอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว



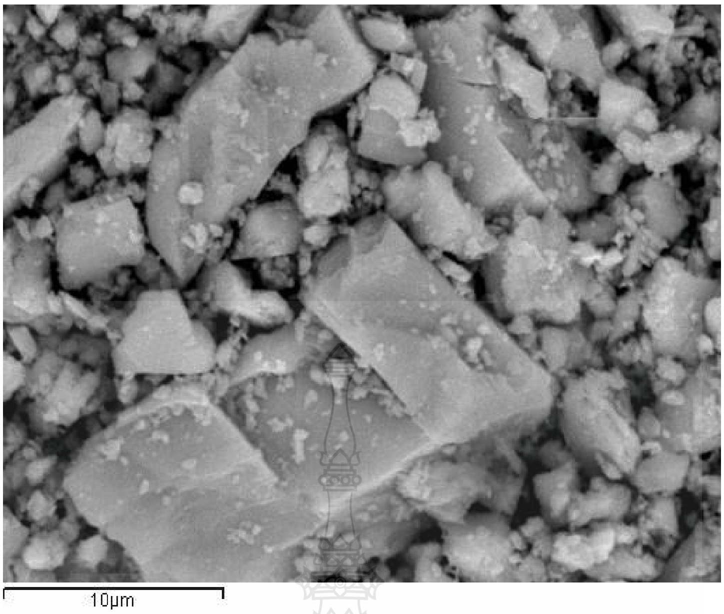
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



(ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



(ง) ผงหินปูน

ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน

4.1.4 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าค่อนข้างสูงคือเท่ากับร้อยละ 34.06 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.50 และ20.97 ตามลำดับ ในขณะที่ของผงหินปูนมี SiO_2 น้อยมาก คือร้อยละ 0.45 ส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าเท่ากับร้อยละ 16.27 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูนเท่ากับร้อยละ 4.97 3.49 และ 0.05 ตามลำดับ และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) นั้นพบว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าเท่ากับร้อยละ 36.05 ซึ่งน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูน ซึ่งเท่ากับร้อยละ 65.38 63.86 และ 55.20 ตามลำดับ และพบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) ของตะกันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ร้อยละ 1.44) มีค่าไม่แตกต่างจากของ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 2.27) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ร้อยละ 1.21) ในขณะที่ของผงหินปูนมีค่าค่อนข้างสูงคือร้อยละ 43.12

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

ออกไซด์ (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (14 μm)	ผงหินปูน (8 μm)
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	19.50	20.97	34.06	0.45
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	4.97	3.49	16.27	0.05
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.78	4.34	1.70	0.03
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.38	63.86	36.05	55.20
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.08	3.33	7.38	0.34
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.16	2.12	2.16	< 0.01
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.22	0.12	0.21	< 0.01
โปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.47	0.47	1.09	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	2.27	1.21	1.44	43.12
แคลเซียมออกไซด์อิสระ(fCaO)	1.00	1.01	-	-

4.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์

คุณสมบัติด้านซีเมนต์ที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ซึ่งสามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

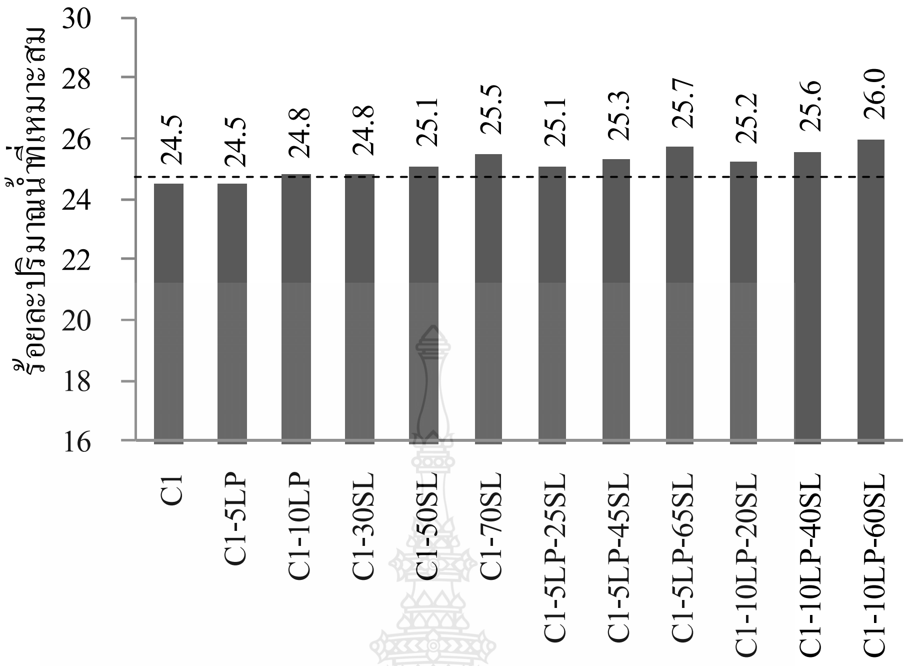
4.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

ผลการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ (Normal Consistency) แสดงดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.2 ซึ่งพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 24.8 ซึ่งใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (ร้อยละ 24.5) ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้นคือ ร้อยละ 50

และ 70 พบว่ามีค่าเท่ากับ ร้อยละ 25.1 และ 25.5 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มากกว่า มีพื้นที่ผิวที่มากกว่า ส่งผลให้มีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น สำหรับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ผงหินปูน ร้อยละ 5 และ10 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 24.5 และ 24.8 ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มีแนวโน้มว่าเมื่อปริมาณผงหินปูนมากขึ้น จะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะผงหินปูนมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยที่ละเอียดกว่านั่นเอง ส่วนเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กร่วมกับผงหินปูน ก็จะให้ผลในทิศทางเดียวกันคือถ้าปริมาณการแทนที่ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมากขึ้น ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ก็จะสูงขึ้นตาม

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ)
1	C1	24.5
2	C1-5LP	24.5
3	C1-10LP	24.8
4	C1-30SL	24.8
5	C1-50SL	25.1
6	C1-70SL	25.5
7	C1-5LP-25SL	25.1
8	C1-5LP-45SL	25.3
9	C1-5LP-65SL	25.7
10	C1-10LP-20SL	25.2
11	C1-10LP-40SL	25.6
12	C1-10LP-60SL	26



ภาพที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

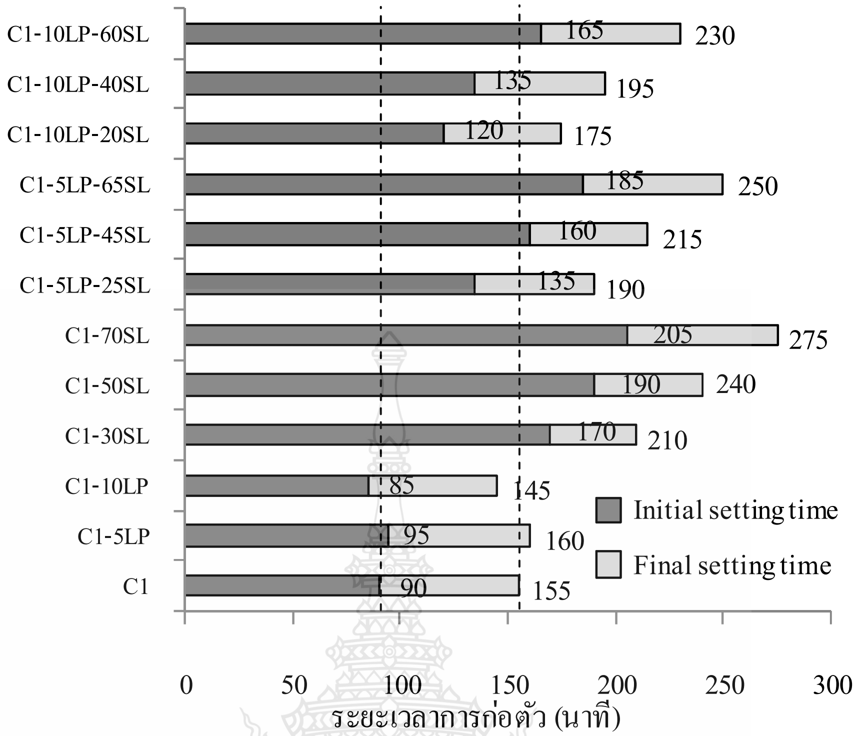
4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

ตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.3 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ พบว่าระยะเวลาการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าเท่ากับ 90 นาทีและ 115 นาทีตามลำดับ ส่วนการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 95 นาทีและ 160 นาทีตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มว่ามากกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 การก่อตัวของเพสต์มีแนวโน้มเร็วกว่า ทั้งที่เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งมีผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูน (8 ไมโครเมตร) ซึ่งมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (16 ไมโครเมตร) สามารถไปแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์เป็นผลให้พื้นที่ผิวของอนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำมากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้มากขึ้น การก่อตัวจึงมีแนวโน้มว่าจะเร็วขึ้น(ปริมาณร้อยละ 10 อาจเป็นปริมาณที่มากเพียงพอ) ส่วนระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นการไปลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงทำให้

เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง รวมทั้งตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่า โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวก็จะช้ามากขึ้น และเมื่อมีการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งเป็นไปตามการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากขึ้น จะมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวช้ายิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.4 การก่อตัวของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	การก่อตัวระยะต้น (นาที)	การก่อตัวระยะปลาย (นาที)
1	C1	90	155
2	C1-5LP	95	160
3	C1-10LP	85	145
4	C1-30SL	170	210
5	C1-50SL	190	240
6	C1-70SL	205	275
7	C1-5LP-25SL	135	190
8	C1-5LP-45SL	160	215
9	C1-5LP-65SL	185	250
10	C1-10LP-20SL	120	175
11	C1-10LP-40SL	135	195
12	C1-10LP-60SL	165	230



ภาพที่ 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน

4.2.3 ค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

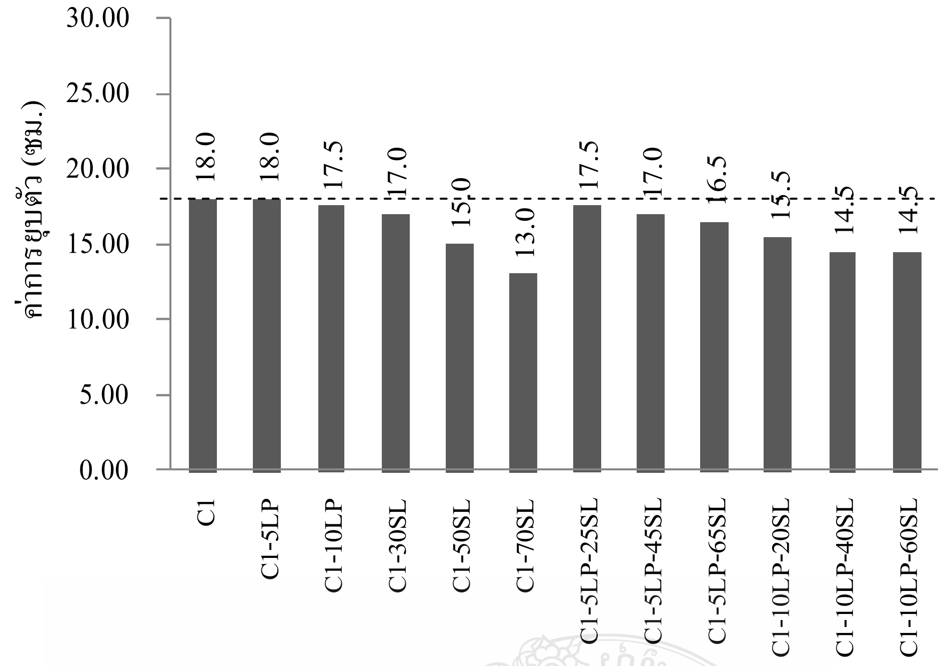
ตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.4 แสดงค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (18 ซม.) และโดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากขึ้น จะมีผลให้ค่าการยุบตัวมีแนวโน้มต่ำลง (คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30,50 และ 70 มีค่าเท่ากับ 17,15 และ 13 ซม. ตามลำดับ) ส่วนในกรณีของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ค่าการยุบตัวจะมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีแนวโน้มต่ำลง เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตจะมีค่าแปรผกผันตาม ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากจะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อย

ภาพที่ 4.5 แสดงค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีต เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที พบว่าค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน มีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนในปริมาณร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคของผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าของปูนซีเมนต์ เข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์กระจายตัวและทำปฏิกิริยาไฮรเดรชันได้ดีกว่า การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตจึงเกิดขึ้นมากกว่า ในขณะที่การแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนในปริมาณมากๆ (ร้อยละ 70) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งลดปริมาณปูนซีเมนต์ ทำให้ปฏิกิริยาไฮรเดรชันเกิดได้น้อยกว่า และโดยเฉพาะเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มมากขึ้น ปฏิกิริยาไฮรเดรชันยิ่งเกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อยลง สำหรับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คือเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มมากขึ้น ค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าลดลง ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

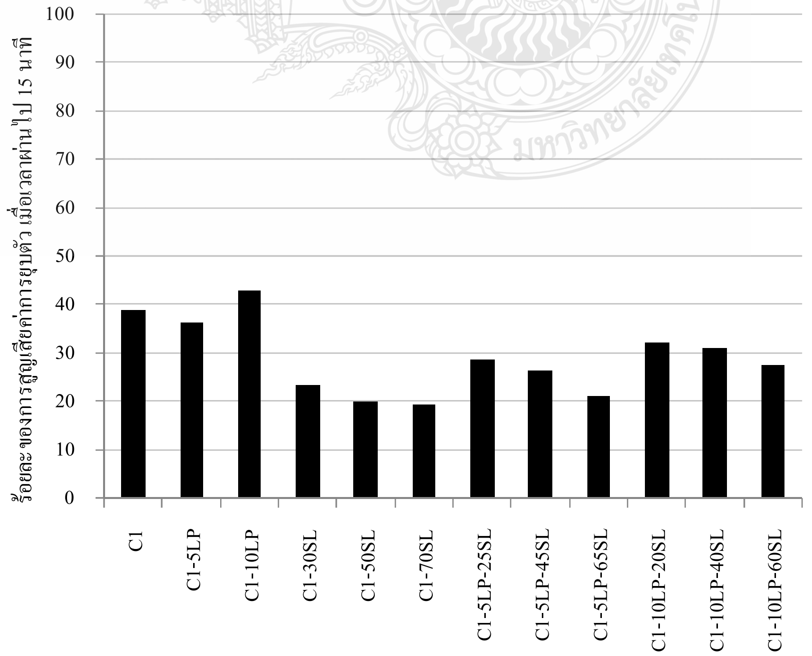
ภาพที่ 4.6 แสดงค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที พบว่าค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้ม เป็นเช่นเดียวกับกรณีเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที

ตารางที่ 4.5 ค่าการยุบตัวและค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

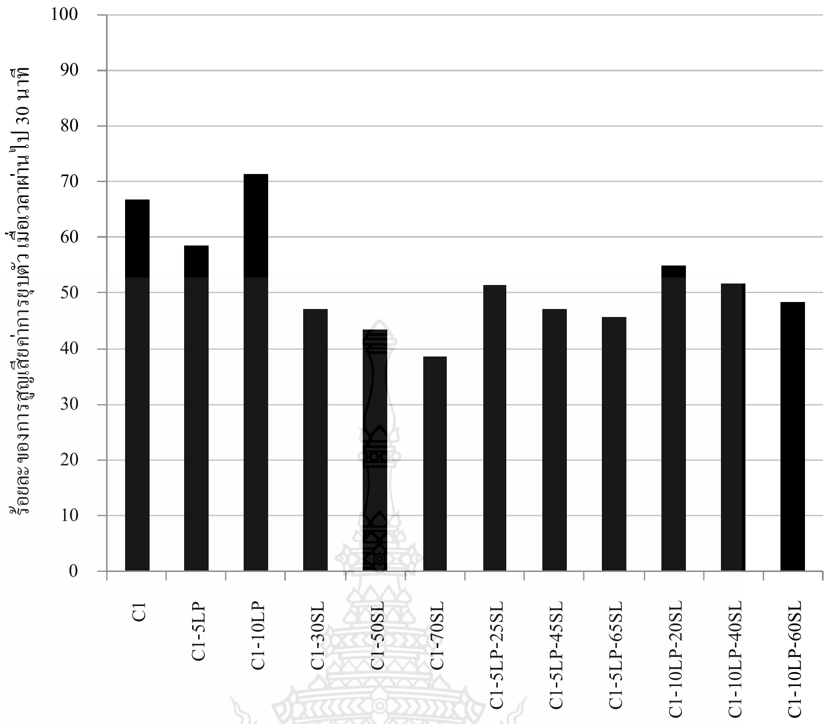
ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ค่าการยุบตัว (ซม.)		
		เมื่อเวลาเริ่มแรก	เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที	เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที
1	C1	18.0	11.0	6.0
2	C1 – 5LP	18.0	11.5	7.5
3	C1 – 10LP	17.5	10.0	5.0
4	C1 – 30SL	17.0	13.0	9.0
5	C1 – 50SL	15.0	12.0	8.5
6	C1 – 70SL	13.0	10.5	8.0
7	C1 – 5LP – 25SL	17.5	12.5	8.5
8	C1 – 5LP – 45SL	17.0	12.5	9.0
9	C1 – 5LP – 65SL	16.5	13.0	9.0
10	C1 – 10LP – 20SL	15.5	10.5	7.0
11	C1 – 10LP – 40SL	14.5	10.0	7.0
12	C1 – 10LP – 60SL	14.5	10.5	7.5



ภาพที่ 4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน



ภาพที่ 4.5 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที



ภาพที่ 4.6 การสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

4.2.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

ตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดงค่ากำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน โดยศึกษาตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 3 14 28 และ 56วัน

จากการศึกษาพบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ10 มีค่าสูงกว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้แม้ว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนเป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ลดลง แต่อาจเพราะผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ค่อนข้างละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนเท่ากับ 16 และ 8 ไมโครเมตร ตามลำดับ) จึงสามารถเข้าไปเติมเต็ม (Filler) ช่องว่างของเพสต์ เป็น

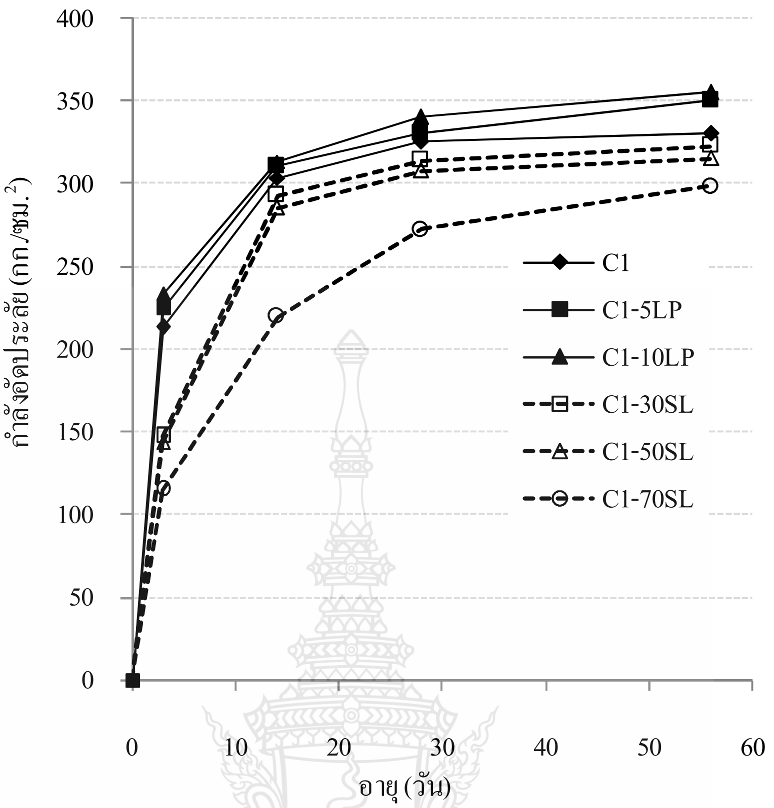
การลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น คอนกรีตจึงมีกำลังอัดประลัยสูงขึ้น และพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีแนวโน้มมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 5 แสดงว่าการแทนที่ผงหินปูนในปริมาณร้อยละ 10 ซึ่งน่าจะเป็นปริมาณที่เหมาะสมกว่า

ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดนั้น กลับให้ค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น จะให้ค่ากำลังอัดประลัยยิ่งต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดประลัยลดลง โดยเฉพาะในช่วงอายุต้นๆ แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีอัตราการพัฒนาเพิ่มที่สูงขึ้น ดังภาพที่ 4.5 และ 4.7 ในกรณีของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน (ภาพที่ 4.6 และ 4.7) พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตดังกล่าวจะให้ผลมีแนวโน้มเหมือนกับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและการแทนที่ด้วยผงหินปูน กล่าวคือเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังอัดประลัยจะมีแนวโน้มลดลง

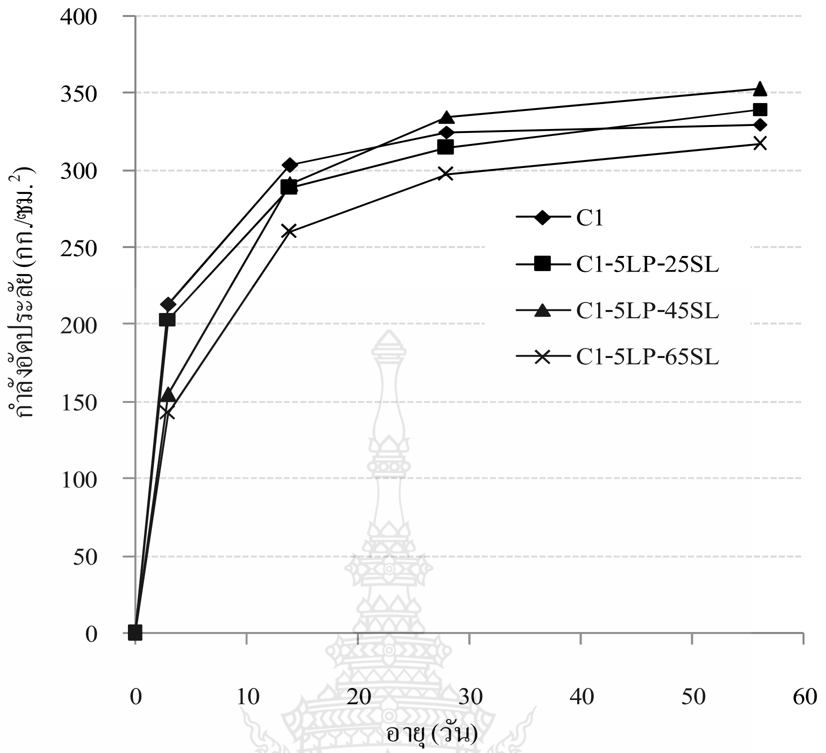
ตารางที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	กำลังอัดประลัย (กก./ซม^2)			
		3 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
1	C1	213.50	303.67	325.00	330.00
2	C1 – 5LP	224.50	310.33	330.00	350.00
3	C1 – 10LP	234.00	313.50	340.00	355.00
4	C1 – 30SL	147.50	293.00	314.00	322.50
5	C1 – 50SL	143.50	285.67	308.00	315.00
6	C1 – 70SL	114.67	219.33	272.00	298.33
7	C1 – 5LP – 25SL	204.00	288.50	315.00	340.00
8	C1 – 5LP – 45SL	155.00	291.50	335.00	353.33
9	C1 – 5LP – 65SL	143.00	260.00	297.50	317.50
10	C1 – 10LP – 20SL	184.67	284.33	340.00	350.00
11	C1 – 10LP – 40SL	146.67	273.00	348.33	357.50
12	C1 – 10LP – 60SL	159.00	277.00	315.00	325.00

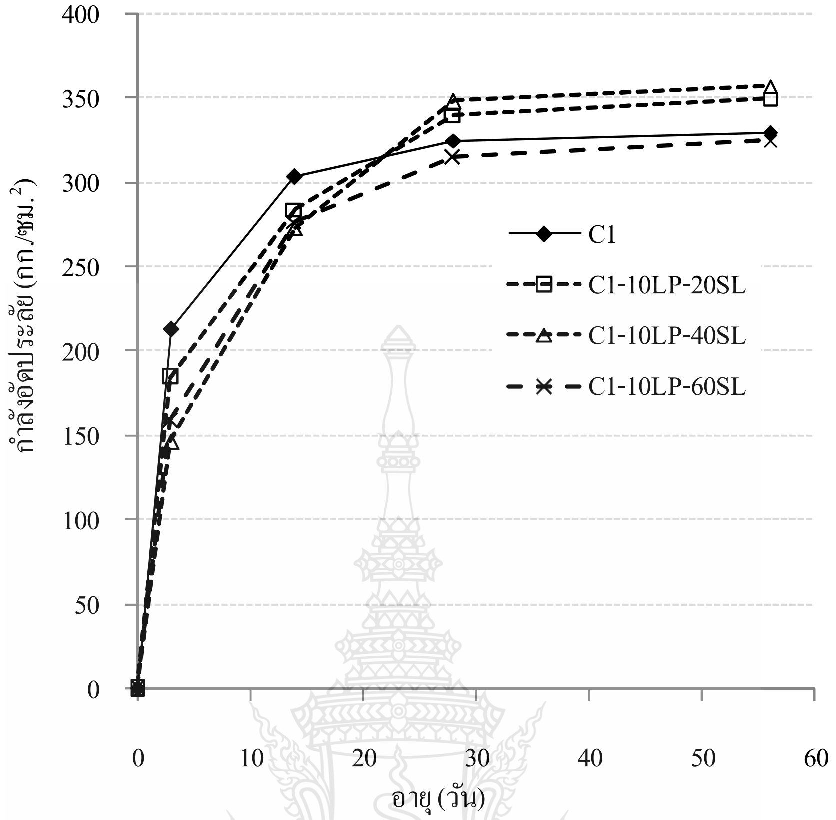
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



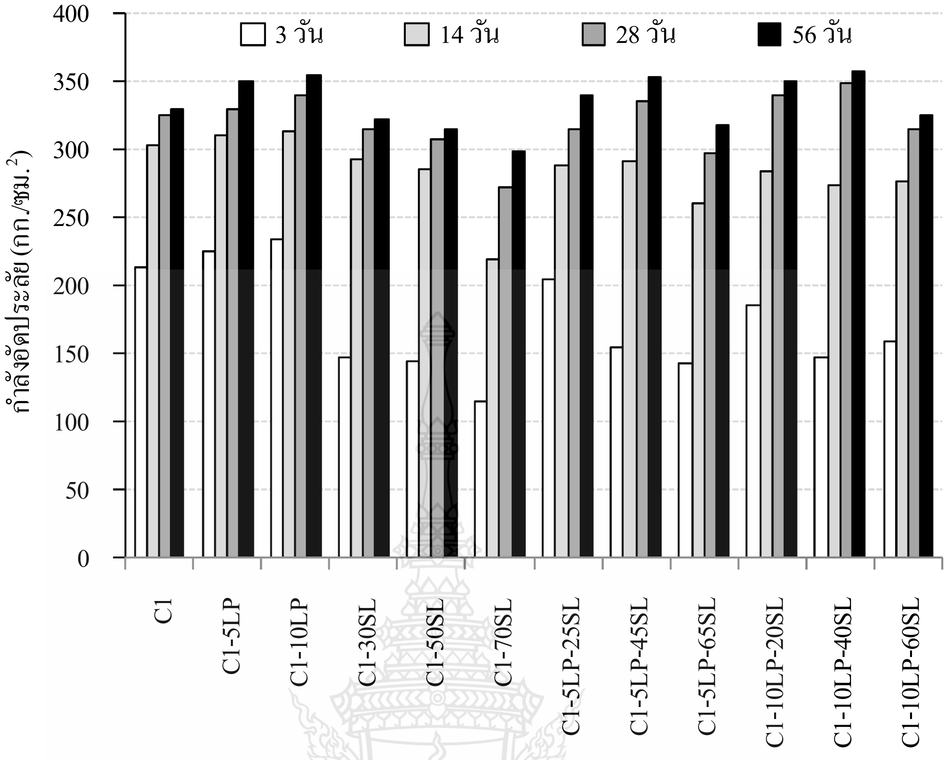
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



ภาพที่ 4.10 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 3 14 28 และ 56 วัน

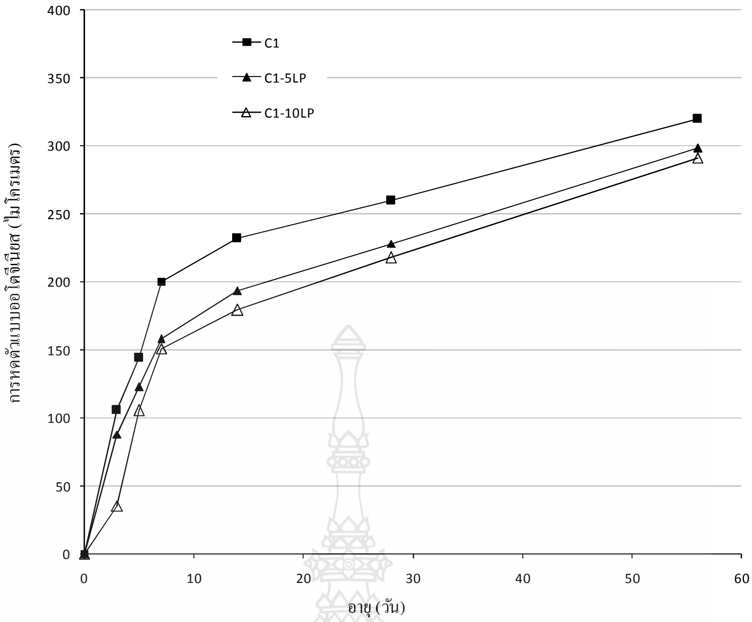
4.3 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

การหดตัวแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 ผลการศึกษาค่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 4.11 ถึง 4.15

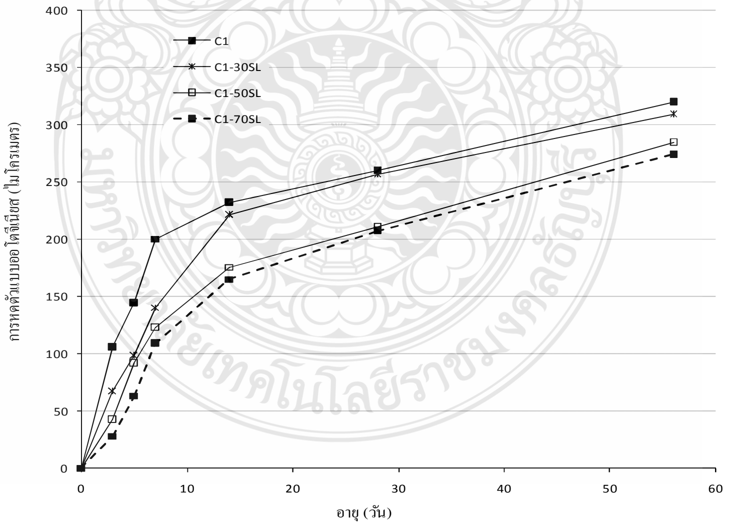
ภาพที่ 4.11 และ 4.12 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์แลนประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์แลนประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 5 และ10 และแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30 50 และ 70 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 5 และ 10 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท

ที่ 1 ล้วน และพบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตแทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 มีค่าน้อยกว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 5 เพราะผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อย ดังนั้นจึงทำให้มีความเสถียรของปริมาตรโดยรวมมากกว่าปูนซีเมนต์ล้วน ประกอบกับผลที่มาจากการเติมเต็มช่องว่างของผงหินปูนทำให้ซีเมนต์เพสต์หนาแน่นขึ้น และในส่วนผสมที่มีปริมาณผงหินปูนมากกว่าจะลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมซึ่งมีผลให้การหดตัวแบบออโตจีนัสลดลงได้มากกว่า

การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30 50 และ 70 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และพบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตแทนที่ด้วยแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 70 มีค่าน้อยกว่าการแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30 และ 50 ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นจะลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณน้ำอิสระให้แก่ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์มากขึ้น เนื่องจากการหดตัวแบบออโตจีนัสเป็นผลจากการใช้น้ำในกระบวนการของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งหมายความว่าหากมีปริมาณน้ำอิสระมากจะสามารถลดการหดตัวได้ ยิ่งไปกว่านั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะช้าว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดนั้นจะลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมซึ่งจะสามารถลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาในส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์และตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดได้ ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดในระยะยาว แต่ซีเมนต์เพสต์ก็มีความแข็งแรงมากขึ้นในระยะยาวซึ่งทนต่อการหดตัว ดังนั้นการหดตัวแบบออโตจีนัสจึงเกิดขึ้นน้อย

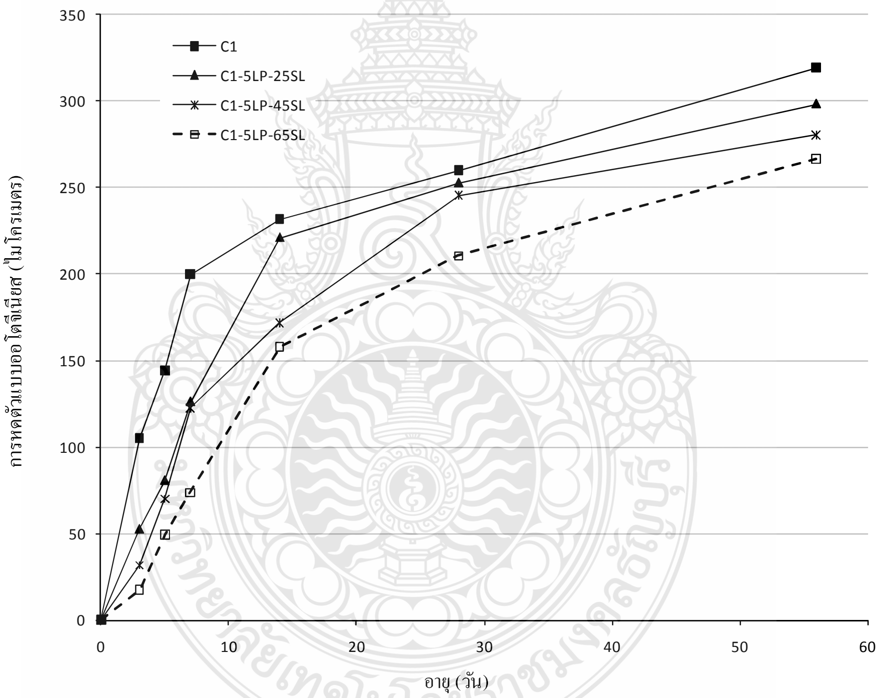


ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ต-แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน



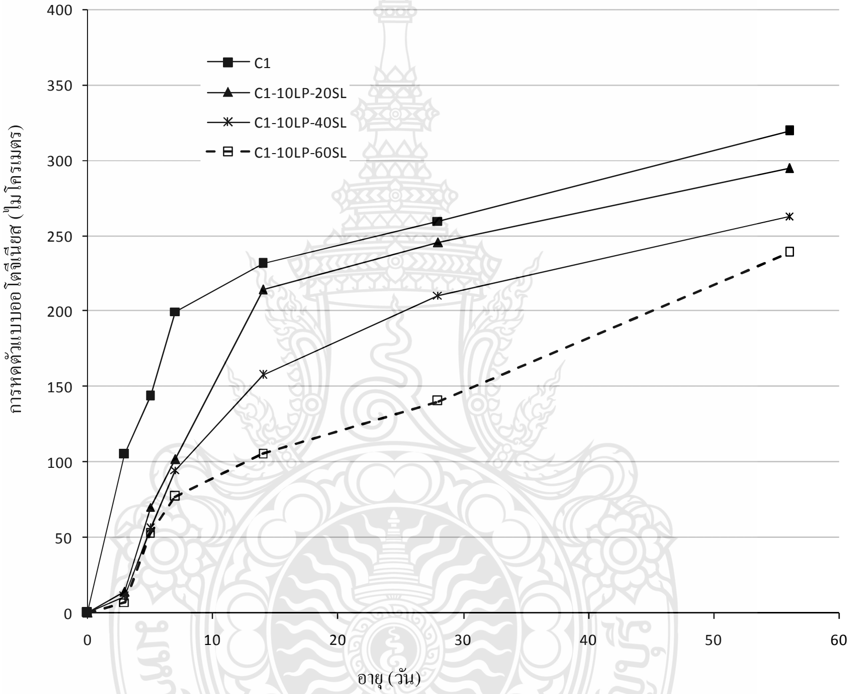
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุ ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ต-แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

ภาพที่ 4.13 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ผลการศึกษาพบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และพบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าน้อยกว่าการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 และ 45 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 การแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

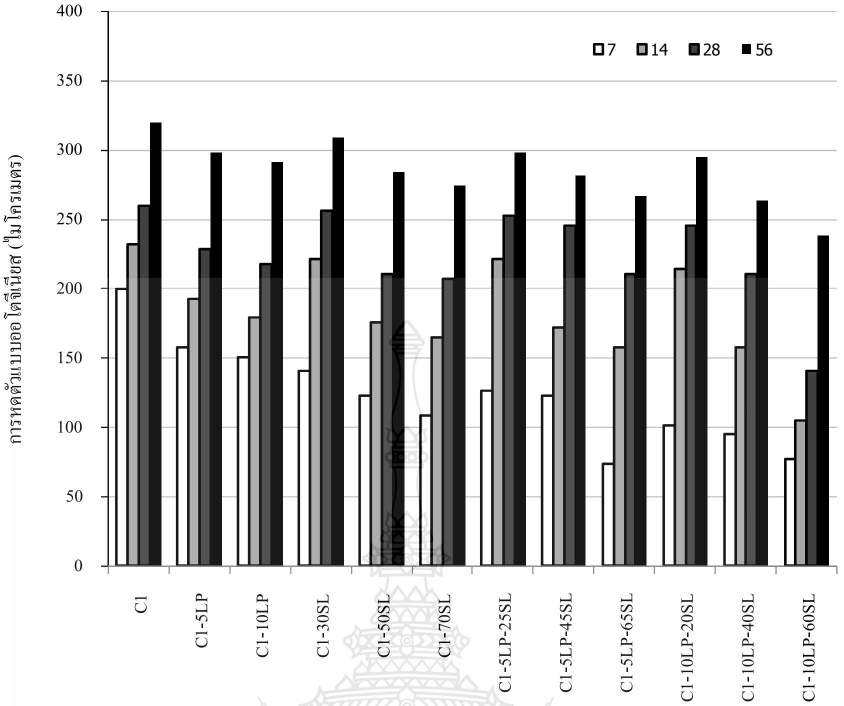


ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ต-แลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

ภาพที่ 4.14 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ผลการศึกษาพบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ต-แลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



ภาพที่ 4.15 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 7 14 28 และ 56 วัน

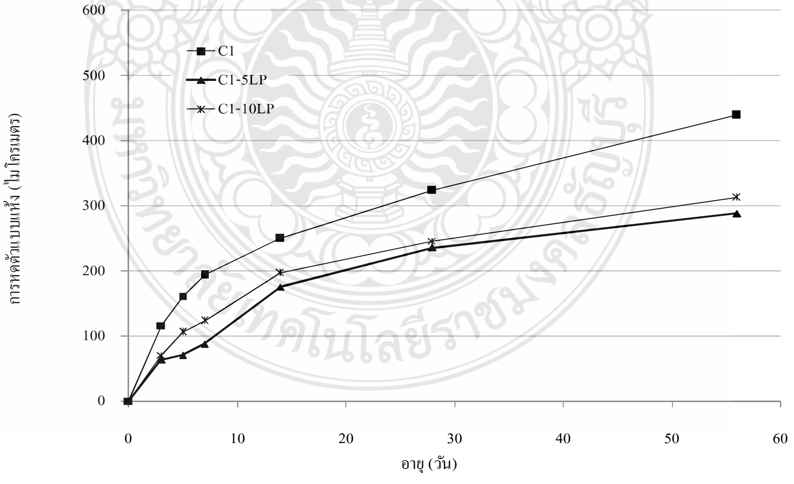
4.4 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 ผลการศึกษาค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 4.16 ถึง 4.20

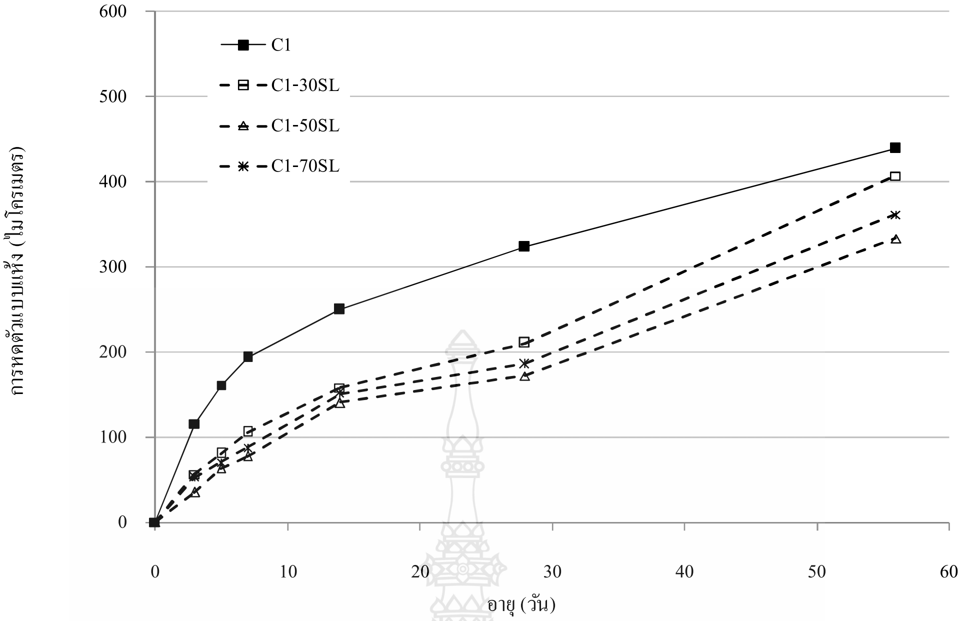
ภาพที่ 4.16 และ 4.17 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุ ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยผงหินปูน ร้อยละ 5 และ 10 และแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30 50 และ 70 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 5 และ 10 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย

(Inert Material) ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เป็นแต่เพียงการเพิ่มมวลรวมละเอียด เป็นการไปเพิ่มปริมาตรของมวลรวม ทำให้ปริมาณของซีเมนต์เพสต์น้อยลง และลดการหดตัวได้ อีกทั้งผงหินปูนซึ่งมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงสามารถดูดซับน้ำไว้ที่ผิวของอนุภาคได้มาก ทำให้เหลือน้ำอิสระน้อยลง คอนกรีตจึงมีช่องว่างลดลง ส่งผลให้การสูญเสียความชื้นยากขึ้น จึงช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้ และยังพบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 มีแนวโน้มน้อยกว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ10 แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีตได้ดีกว่า จึงช่วยให้การหดตัวแบบแห้งลดลงได้มากกว่า

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30,50 และ70 ให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยผงหินปูน ซึ่งการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 50 มีแนวโน้มน้อยกว่าเมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 30 และ70 ซึ่งเหตุผลเพราะตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ดีกว่า และการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 อาจเป็นปริมาณที่เหมาะสม ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้โพรงในคอนกรีตเล็กลงจึงสูญเสียความชื้นยากขึ้น



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน

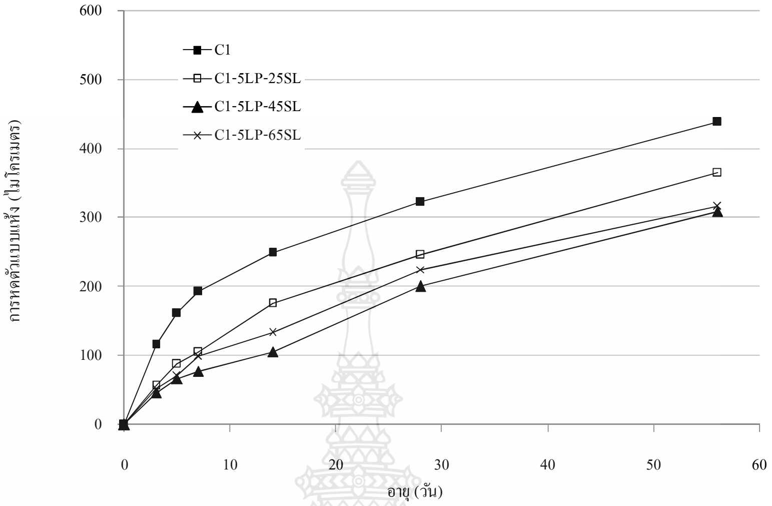


ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

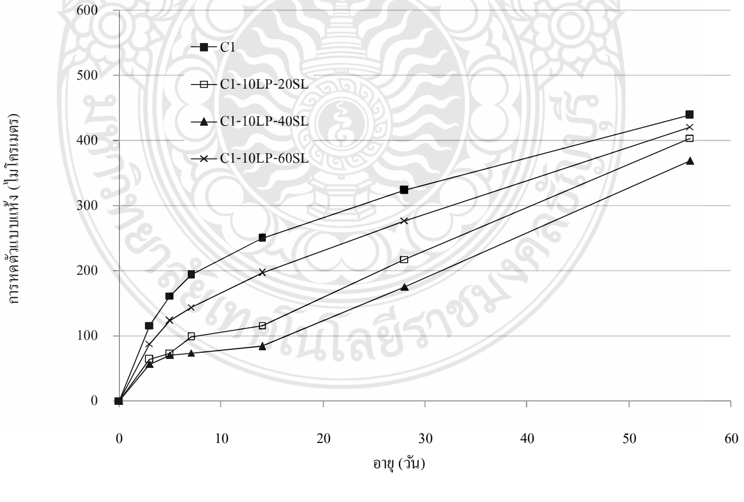
ภาพที่ 4.18 และภาพที่ 4.19 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ผลการศึกษาพบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และพบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 45 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 5 มีค่าน้อยกว่าการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่ามีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และแนวโน้มการหดตัวแบบแห้งเป็นเช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ซึ่งอธิบายได้ว่า

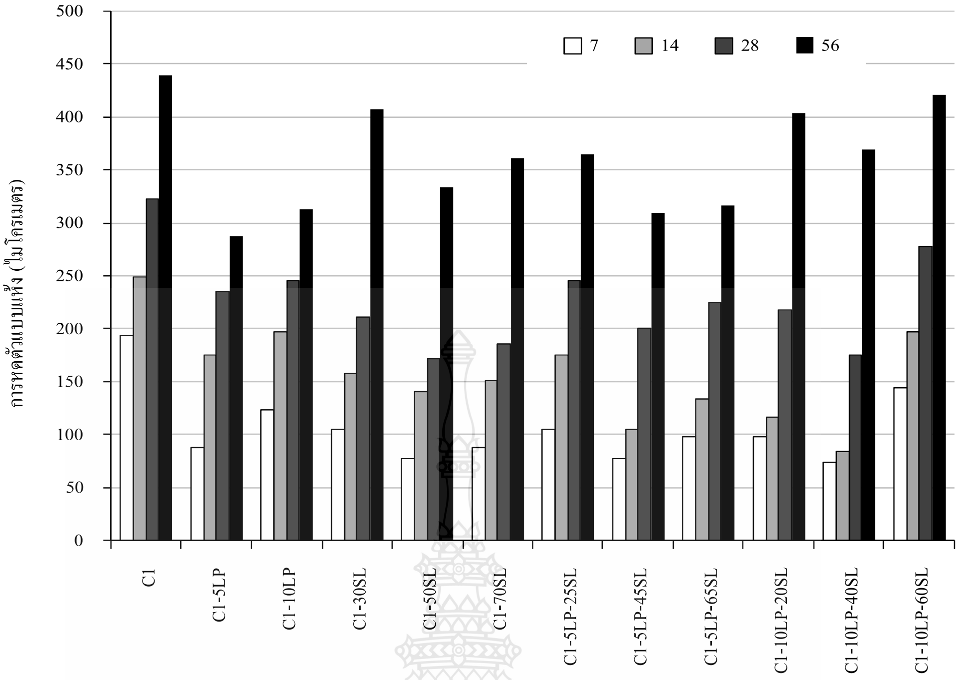
ปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีผลโดยตรงต่อการลดการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



ภาพที่ 4.20 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 7 14 28 และ 56 วัน

4.5 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

ผลการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยศึกษาที่อายุการบ่ม 28 และ 56 วัน ซึ่งสามารถอธิบายผลการศึกษาได้ดังนี้

การศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ครั้งนี้ ประเมินความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ โดยวัดปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของคลอไรด์และปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ใช้การประเมินค่าการซึมผ่านของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ซึ่งกำหนดระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ตามจำนวนประจุที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่างคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4.7 และผลการทดสอบปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างคอนกรีตในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ ASTM C 1202 (ASTM Volume 04.02,1996)

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

ตารางที่ 4.8 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	ตัวอย่างคอนกรีต	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต (คูลอมบ์)	
		อายุบ่ม 28 วัน	อายุบ่ม 56 วัน
1	C1	3,531	3,366
2	C1 – 10LP	4,598	4,021
3	C1 – 30SL	1,309	657
4	C1 – 50SL	801	523
5	C1 – 10LP – 20SL	2,789	2,283
6	C1 – 10LP – 40SL	1,034	960

การศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ครั้งนี้ ใช้วิธีศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid Chloride Penetration Test, RCPT) จากภาพที่ 4.21 และ 4.22 พบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างน้อยกว่า 4,000 คูลอมบ์ บ่งชี้ว่าการแทรกซึมของคลอไรด์ได้อยู่ในระดับปานกลาง โดยเฉพาะเมื่ออายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าของประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านมากกว่า 4,000 คูลอมบ์ (ตารางที่ 4.8) ซึ่งบ่งชี้ถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในระดับที่สูง (ตารางที่ 4.7) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคอนกรีตผสมผงหินปูนขาดคุณสมบัติในการยึดประสาน ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงมีไม่มากพอที่จะขยายเข้าไปอุดโพรงในเนื้อ

คอนกรีต แม้ว่าผงหินปูนเป็นวัสดุอุดโพรงช่องว่าง (Filler) ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นก็ตาม คลอไรด์จึงสามารถแทรกผ่านเนื้อคอนกรีตได้ง่าย และพบว่าเมื่ออายุ 56 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตยังมีค่ามากกว่า 4,000 คูลอมป์ ทั้งนี้เพราะผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ อายุการบ่มจึงไม่ส่งผลต่อการเพิ่มความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์มากนัก

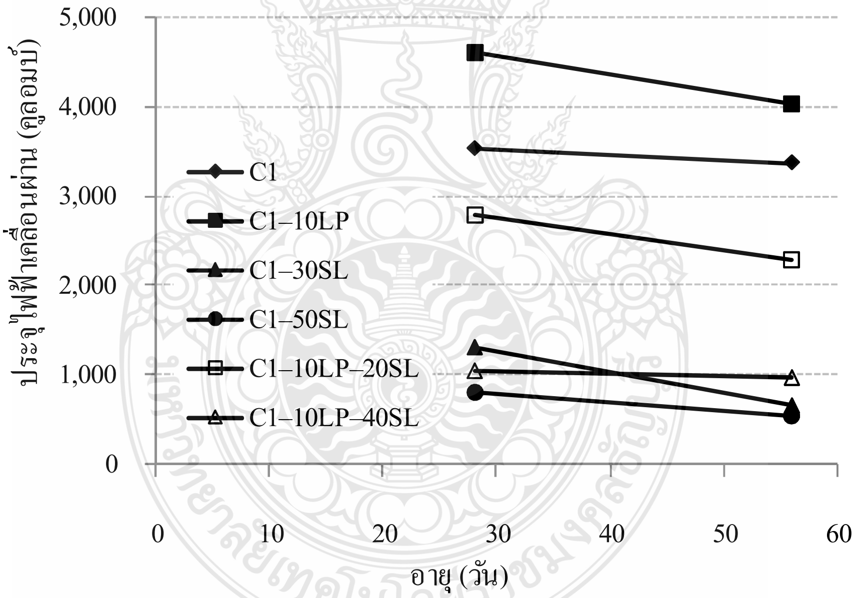
เมื่อพิจารณาคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 ที่อายุ 28 วัน มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างน้อยกว่า 2,000 คูลอมป์ ซึ่งบ่งชี้ถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในระดับที่ต่ำ (ตารางที่ 4.7) และมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่ออายุ 56 วัน คอนกรีตที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างน้อยกว่า 1,000 คูลอมป์ ซึ่งบ่งชี้ถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในระดับที่ต่ำมาก (ตารางที่ 4.7) ทั้งนี้เมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น คลอไรด์จึงสามารถแทรกผ่านเนื้อคอนกรีตได้ยากยิ่งขึ้น

สำหรับกรณีคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ที่อายุ 28 วัน มีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างน้อยกว่า 1,000 คูลอมป์ ซึ่งบ่งชี้ถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในระดับที่ต่ำมาก (ตารางที่ 4.7) และเมื่ออายุ 56 วัน ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมีแนวโน้มต่ำลงอีก ดังที่กล่าวแล้วคือปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น คลอไรด์จึงสามารถแทรกผ่านเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้นนั่นเอง แสดงให้เห็นว่าปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมีแนวโน้มต่ำลง อีกทั้งเมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ยังมีผลทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างมีแนวโน้มต่ำลงเช่นกัน

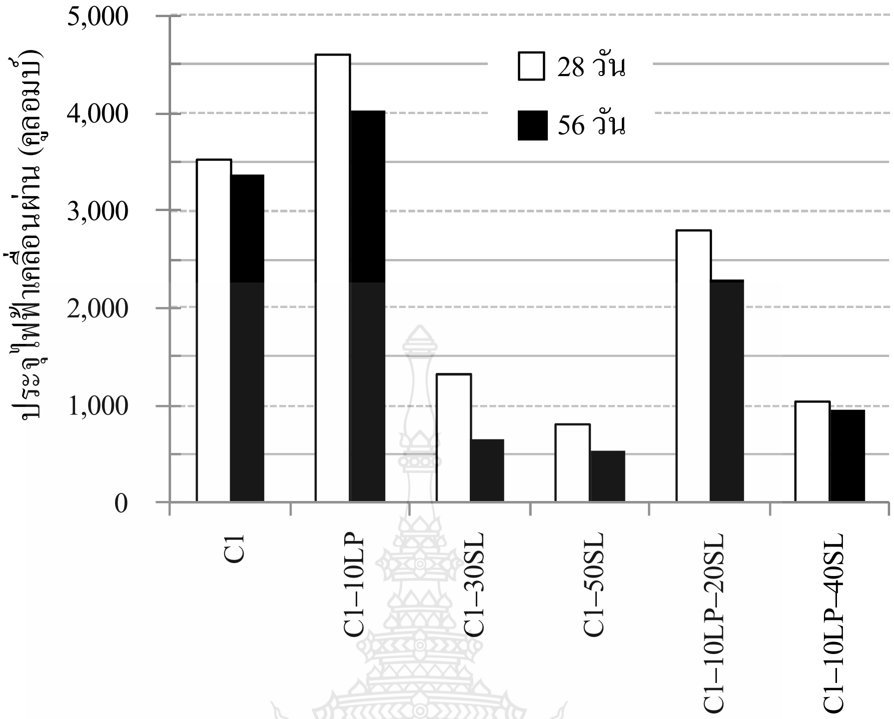
สำหรับกรณีของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 นั้น ที่อายุ 28 วันพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่ามากกว่า 2,000 คูลอมป์ บ่งชี้ถึงระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่ออายุมากขึ้นพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำลง เหตุผลดังที่ได้กล่าวแล้วคือปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเกิดที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ช่วยเพิ่มความ

ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ โดยเฉพาะเมื่อการแทนที่ด้วยปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีแนวโน้ม

ในขณะที่คอนกรีตที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10 นั้น ที่อายุ 28 วันพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่ามากกว่า 1,000 คูลอมบ์เล็กน้อย บ่งชี้ถึงระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับต่ำ และเมื่ออายุมากขึ้นพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่าน้อยกว่า 1,000 คูลอมบ์ บ่งชี้ถึงระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับต่ำมาก ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับในกรณีของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่พบว่าปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีผลโดยตรงกับปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต คือถ้าปริมาณการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากขึ้นจะทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่าลดลง



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน



ภาพที่ 4.22 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน

4.6 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

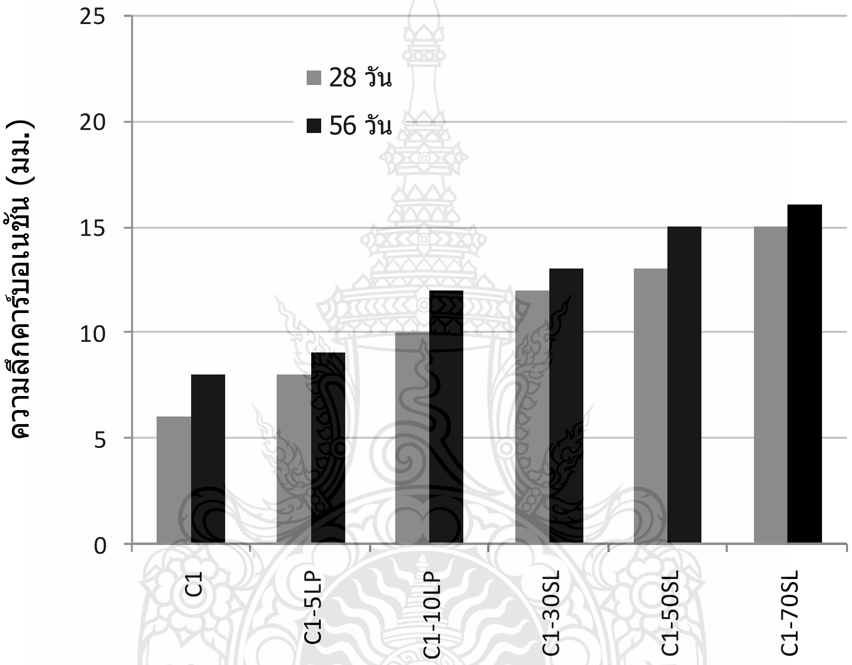
การศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน โดยศึกษาการเกิดคาร์บอเนชั่น ที่อายุ 28 วันและ 56 วัน การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

ลำดับที่	ตัวอย่างคอนกรีต	การเกิดคาร์บอเนชั่น (มม.)	
		28 วัน	56 วัน
1	C1	6	8
2	C1 – 5LP	8	9
3	C1 – 10LP	10	12
4	C1 – 30SL	12	13
5	C1 – 50SL	13	15
6	C1 – 70SL	15	16
7	C1 – 5LP – 25SL	11	14
8	C1 – 5LP – 45SL	14	17
9	C1 – 5LP – 65SL	15	18
10	C1 – 10LP – 20SL	14	16
11	C1 – 10LP – 40SL	17	18
12	C1 – 10LP – 60SL	19	21

ภาพที่ 4.23 แสดงการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนที่อายุ 28 วันและ 56 วัน พบว่าการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ10 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งอายุ 28 วันและ 56 วัน โดยการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคอนกรีตผสมผงหินปูนขาดคุณสมบัติในการยึดประสาน ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงมีไม่มากพอที่จะขยายเข้าไปอุดโพรงในเนื้อคอนกรีต แม้ว่าผงหินปูนเป็นวัสดุอุดโพรงช่องว่างทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นก็ตาม คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จึงเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 70 พบว่ามีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งอายุ 28 วันและ 56 วัน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณมากขึ้น การเกิดคาร์บอเนชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยาปอซโซลานได้ลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จึงทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นเร็วขึ้น

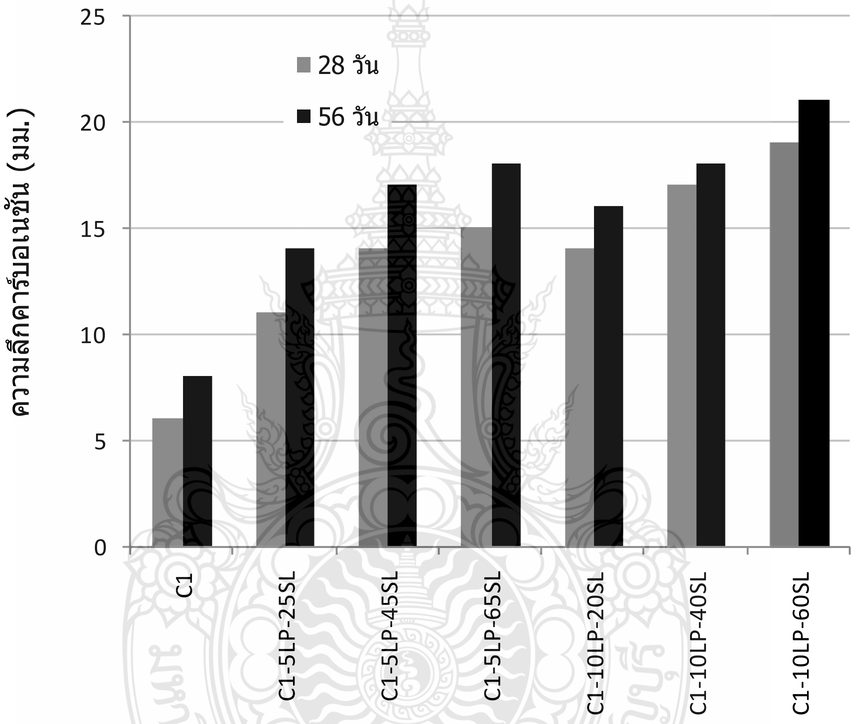


ภาพที่ 4.23 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 28 และ56 วัน

ภาพที่ 4.24 แสดงการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน พบว่าการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ล้วน ทั้งอายุ 28 วันและ 56 วัน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณมากขึ้น การเกิดคาร์บอเนชั่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งอายุ 28 วันและ 56 วัน โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5



ภาพที่ 4.24 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน

4.7 ความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

การศึกษาความต้านทานซัลเฟต ทำการศึกษาโดยวัดค่าการขยายตัว (Expansion) ของตัวอย่างคอนกรีตขนาด 7.5×7.5×28.5 เซนติเมตร ที่แช่ในสารละลายโซดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 15 และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 15 และทำการศึกษาโดยวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10×10×10 เซนติเมตร ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 15 โดยศึกษาคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

4.7.1 การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

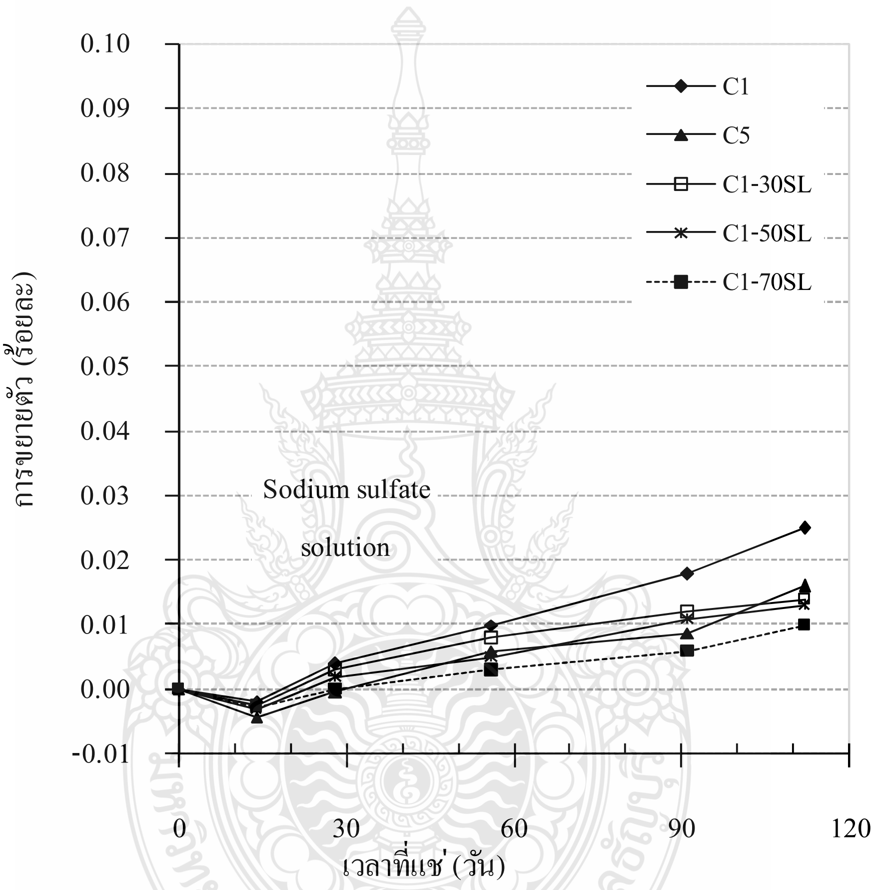
ในการประเมินความต้านทานซัลเฟต โดยการวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตขนาด 7.5×7.5×28.5 เซนติเมตร ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ที่มีต่อการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

1) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 70 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งพบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะปริมาณของ C_3A ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีมากกว่าทำให้เกิด Ettringite มากกว่า การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างจึงมากกว่า

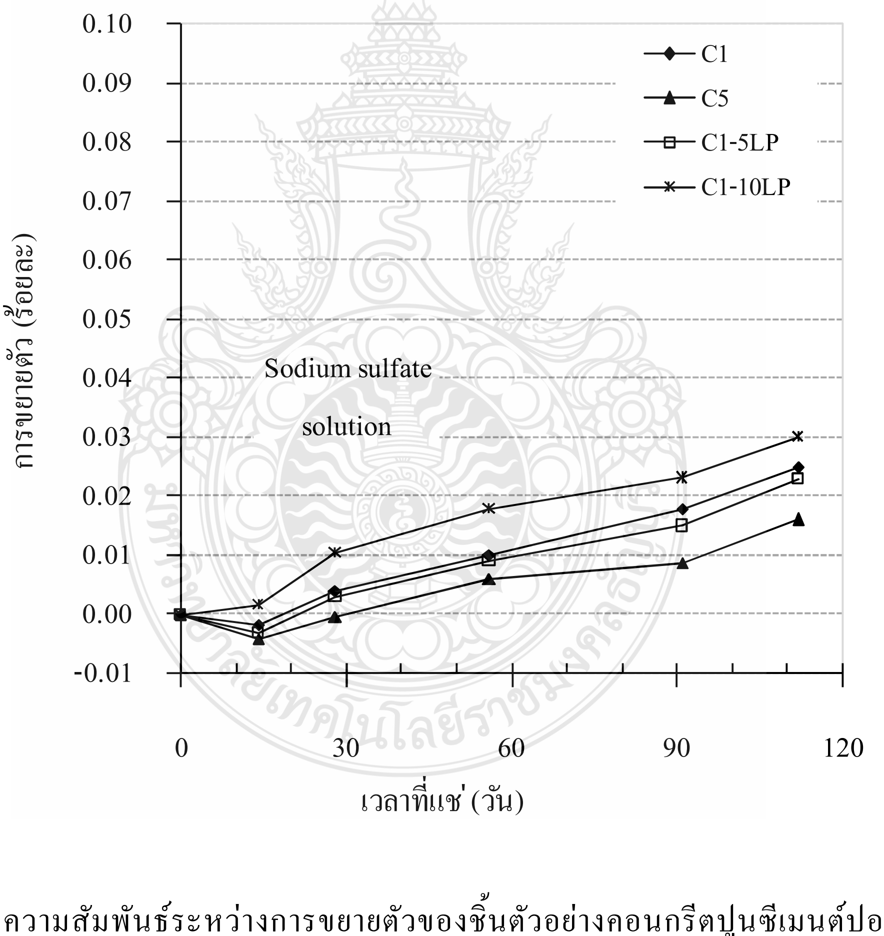
สำหรับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 70 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดซึ่งเป็นสารปอซโซลานไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำให้เกิดยิปซั่มและ Ettringite น้อยลงส่งผลให้การขยายตัวเกิดน้อยลง และพบว่าการขยายตัวของ

คอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 70 มีแนวโน้มน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่มาก เพราะแทนที่มาก ก็ลดปูนซีเมนต์มาก ลด C_3A มาก และลด $Ca(OH)_2$ ทั้งจากการลดปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงเป็นผลให้เกิด Ettringite น้อยกว่า ดังนั้นการขยายตัวของคอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณมากจึงมีค่าน้อยกว่า



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 70 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

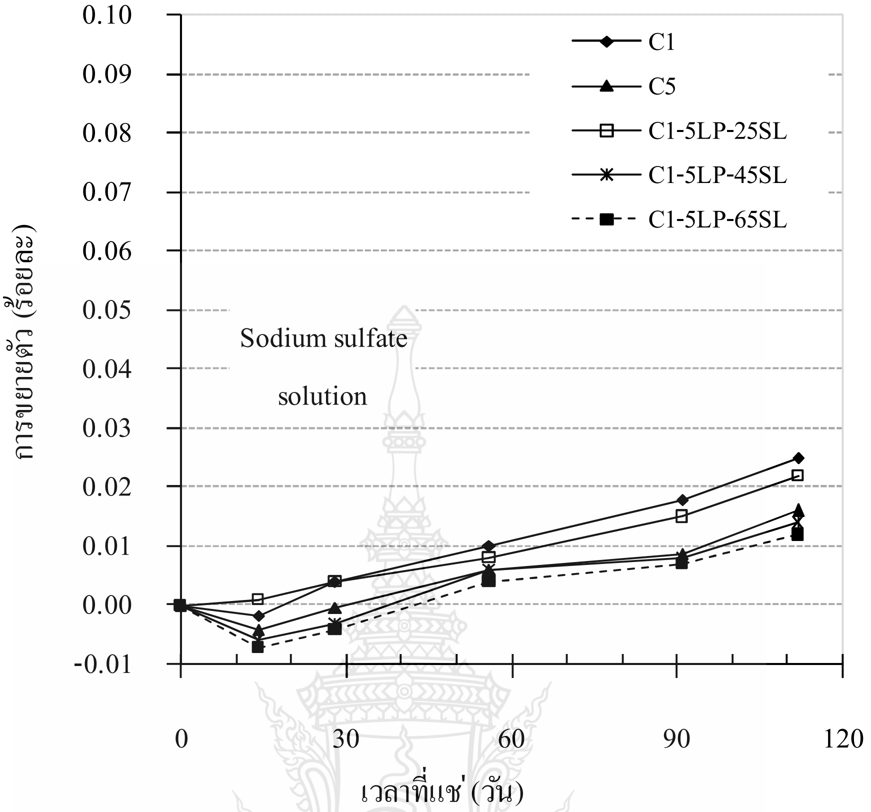
ภาพที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งพบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กลับมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 นั้นเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีต ทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าทำลายได้ยากขึ้น ในขณะที่การแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไป ทำให้มีความพรุนสูงขึ้น ดังนั้นการเข้าทำลายของสารละลายซัลเฟตจึงทำได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ5 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดซึ่งเป็นสารปอซโซลานไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำให้เกิดยิปซั่มและ Ettringite น้อยลง อีกทั้งผงหินปูนยังช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น สารละลายซัลเฟจึงเข้าทำลายได้ยากขึ้น การขยายตัวของคอนกรีตจึงเกิดน้อยกว่า

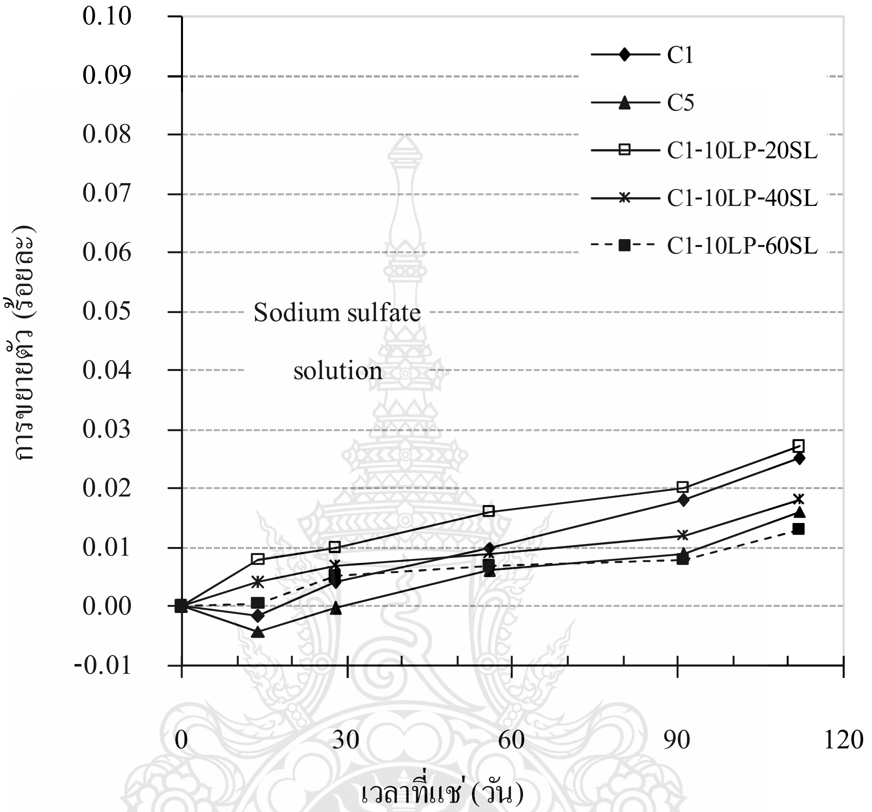
การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ5 การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่การแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กลับมีค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมี CaO สูง (ร้อยละ 36.05) เมื่อแทนในปริมาณน้อยๆ จะมีค่าการขยายตัวมาก แต่เมื่อแทนในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้การขยายตัวน้อยลง [1]



ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ10 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่คอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างกลับมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้วคือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมี CaO สูง เมื่อแทนในปริมาณน้อยๆ จะมีค่าการขยายตัวมาก แต่เมื่อแทนในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้

การขยายตัวน้อยลง อีกทั้งการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไป ทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูงขึ้น ดังนั้นการเข้าทำลายของสารละลายซัลเฟตจึงทำได้ง่ายขึ้น

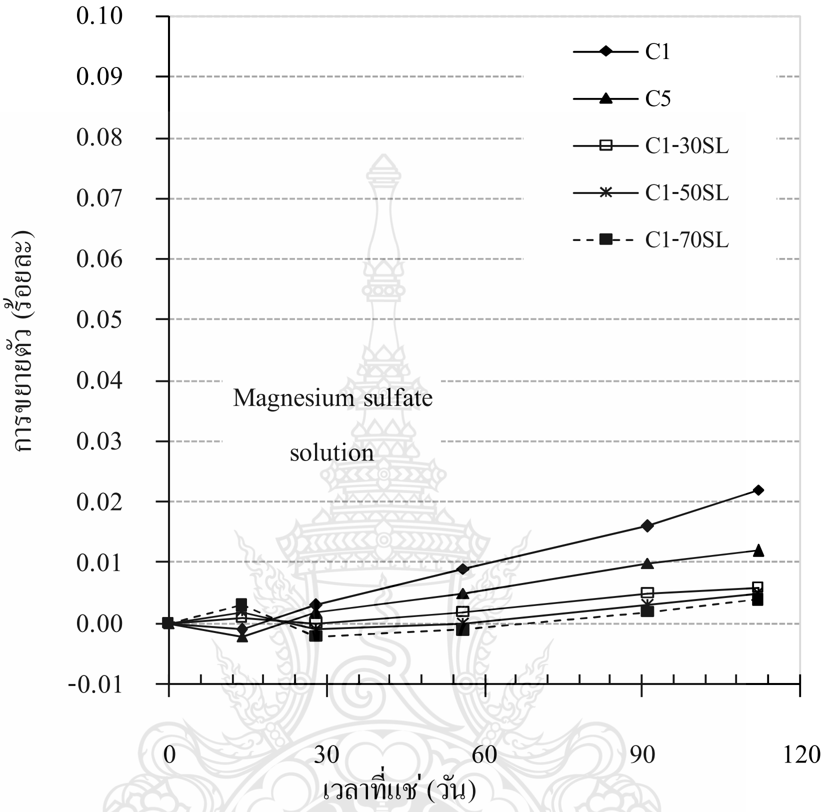


ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

2) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 70 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าน้อย

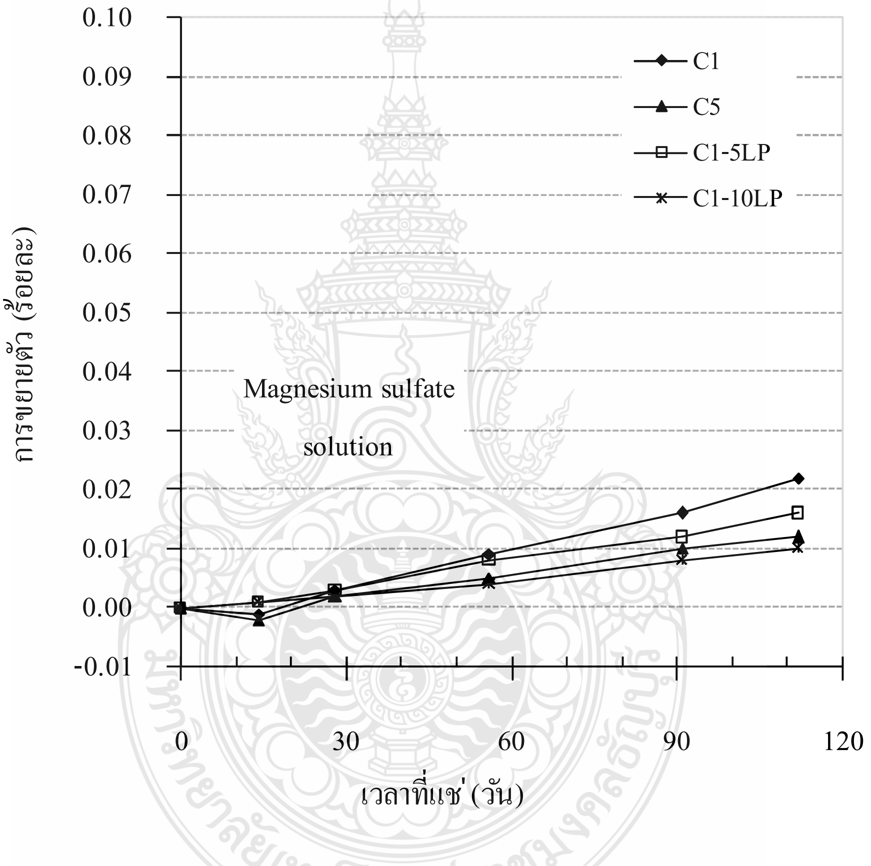
กว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้ซึ่งก็เป็นในทิศทางเดียวกันกับของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 70 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน อย่างไรก็ตามการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้งสองมีค่าแตกต่างเห็นได้ไม่ชัดเจน

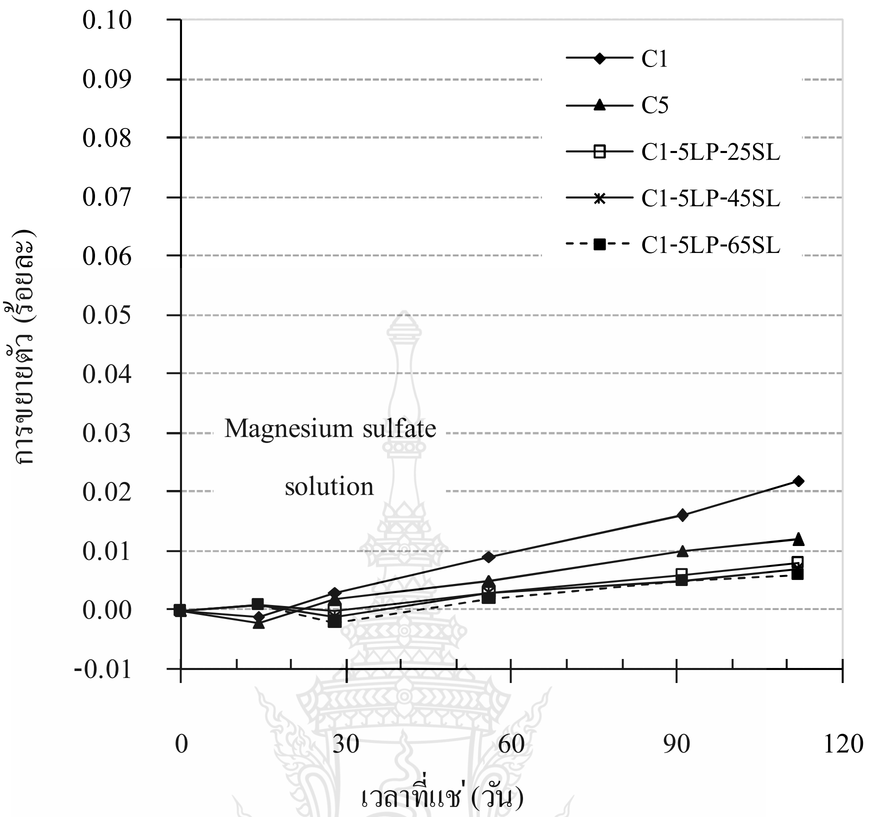
เหมือนกับในกรณีของในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ทั้งนี้เพราะในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น Ettringite เกิดน้อยมากหรือไม่มากเท่าในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำให้ความเป็นด่างในมอร์ต้าร์ลดลง ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในคอนกรีต นอกจากนี้กลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเข้าไปเปลี่ยนผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน



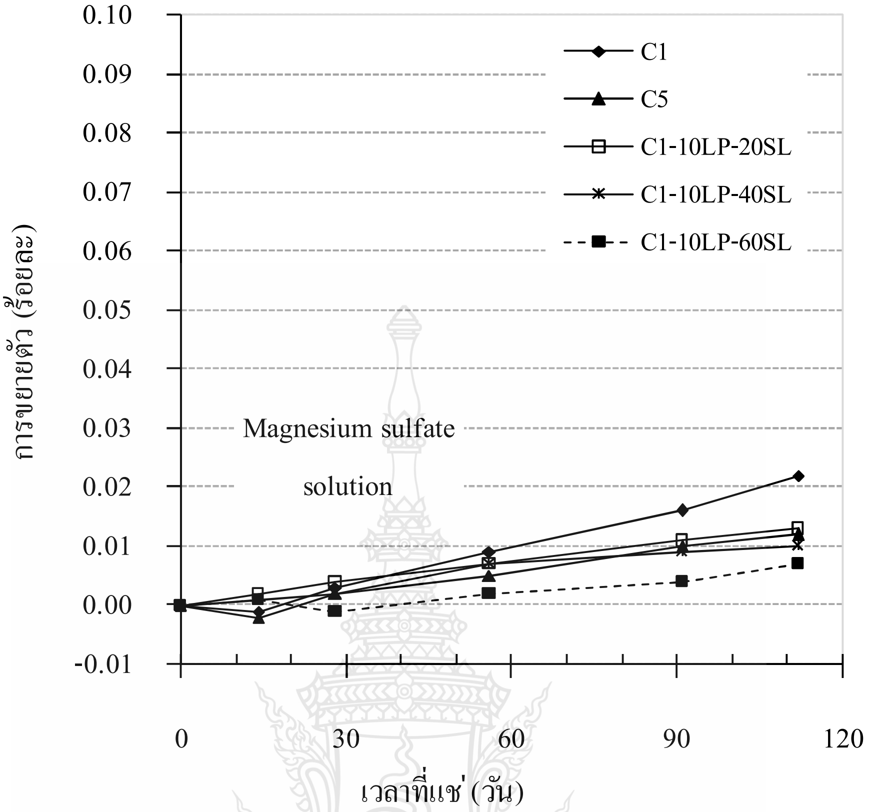
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้ซึ่งก็เป็นในทิศทางเดียวกันกับของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

ภาพที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตพบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วยด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่คอนกรีตแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน เหตุผลดังที่กล่าวแล้วคือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมี CaO สูง เมื่อแทนในปริมาณน้อยๆ จะมีค่าการขยายตัวมาก แต่เมื่อแทนในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้การขยายตัวน้อยลง



ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 45 และ 65 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ5 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 20 40 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

4.7.2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ในการประเมินความต้านทานซัลเฟต โดยการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10×10×10 เซนติเมตร ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

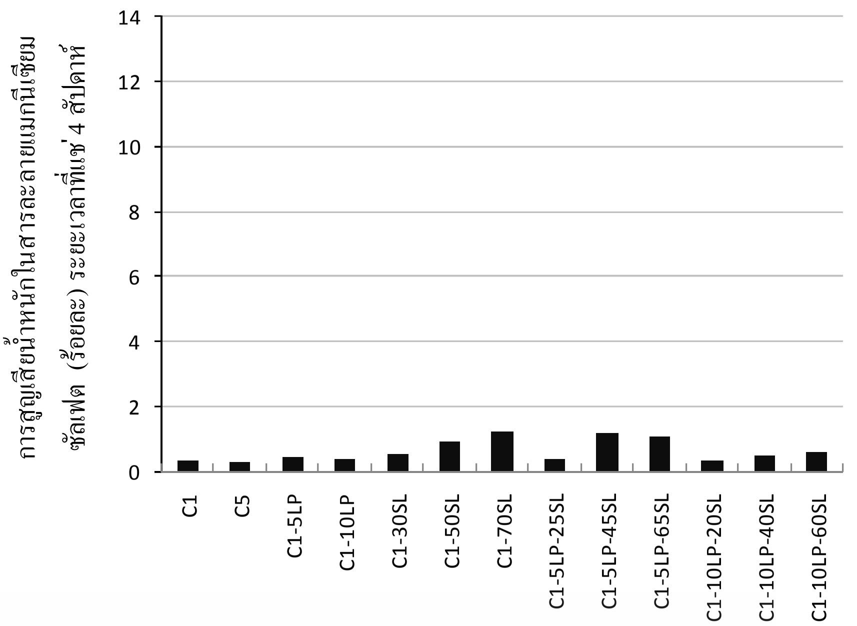
ภาพที่ 4.33 ถึง 4.36 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 4 8 13 และ 16 สัปดาห์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ได้ดังต่อไปนี้

ภาพที่4.36 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 16 สัปดาห์ พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วนทั้งนี้เพราะปริมาณ C_3A ที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

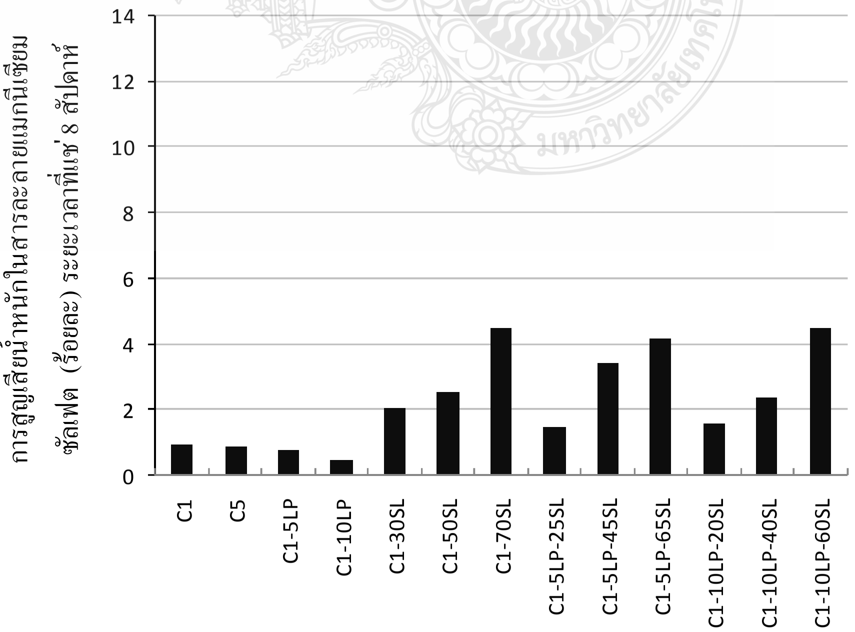
การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะผงหินปูนเข้าไปช่วยในการเติมเต็มในซีเมนต์เพสต์ทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าทำลายได้ยากขึ้น จึงทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า แต่การแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วน เพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เป็นปริมาณที่มากเกินไป ทำให้มีความพรุนสูงขึ้น ดังนั้นการเข้าทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจึงทำได้ง่ายขึ้น

การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ทั้งร้อยละ 30 50 และ 70 จะเห็นได้ชัดเจนว่า การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมากกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วน และที่แทนที่ด้วยผงหินปูน (ทั้งร้อยละ 5 และ 10) ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เป็นการลดความเป็นด่างในคอนกรีต (ลด $Ca(OH)_2$) จึงทำให้ไม่มีความเสถียรภาพในคอนกรีตทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน จึงทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักในตัวอย่างมีมาก

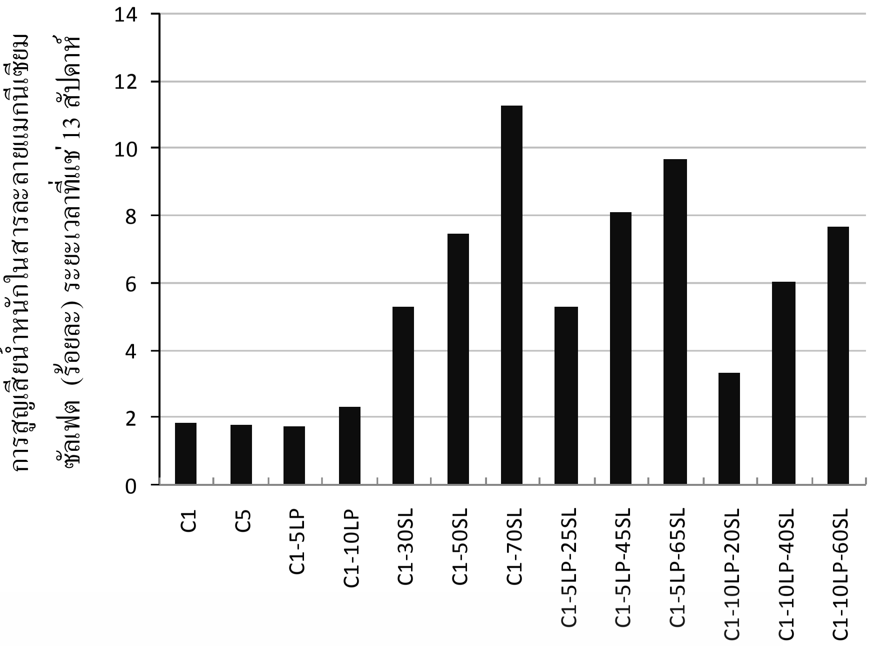
ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนทุกสัดส่วน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมากกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วนและที่แทนที่ด้วยผงหินปูน ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



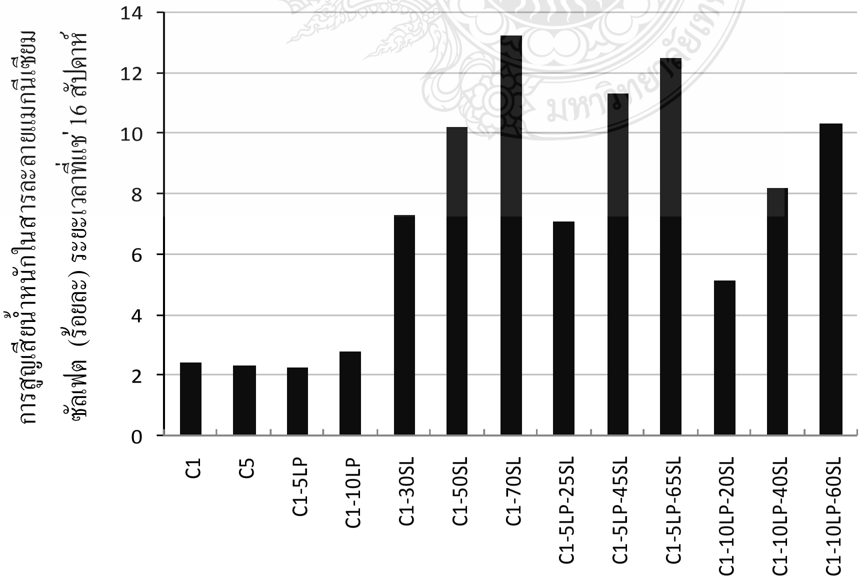
ภาพที่ 4.33 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 4 สัปดาห์



ภาพที่ 4.34 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 8 สัปดาห์



ภาพที่ 4.35 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 13 สัปดาห์



ภาพที่ 4.36 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต กับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 16 สัปดาห์

4.8 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปผลการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งประกอบไปด้วยคุณสมบัติด้านกำลังอัดประลัย การหดตัวแบบออโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และการเกิดคาร์บอเนชั่นโดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในกรณีของความต้านทานซัลเฟตจะเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดโดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (ยกเว้นความต้านทานซัลเฟตจะเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน)

ลำดับที่	สัดส่วนผสม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย		
		ผงหินปูน	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน
1	กำลังอัดประลัย	✓	X	O
2	การหดตัวแบบออโตจีนัส	✓	✓	✓
3	การหดตัวแบบแห้ง	✓	✓	✓
4	ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์	X	✓	✓
5	การเกิดคาร์บอเนชั่น	X	X	X
6	ความต้านทานซัลเฟต			
6.1	การขยายตัว -ในสารละลาย Na_2SO_4 - ในสารละลาย $MgSO_4$	 X X	 ✓ ✓	 ✓ ✓
6.2	การสูญเสียน้ำหนัก - ในสารละลาย $MgSO_4$	 O	 X	 X

หมายเหตุ 1) X = แย่กว่า O = เทียบเท่า ✓ = ดีกว่า

2) สรุปผลกระทบของสัดส่วนผสมของวัสดุประสานต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วนนั้น ใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในปริมาณที่เหมาะสมในการเปรียบเทียบและเป็นสัดส่วนผสมที่ศึกษาในครั้งนี้เท่านั้น

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มเร็วกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่เพสต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และเพสต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าแปรผกผันตามปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากจะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อย สำหรับค่าการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1แทนที่ด้วยผงหินปูนมีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดให้ค่ากำลังอัดประลัยน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนนั้น พบว่าที่อายุต้นๆ ให้ค่ากำลังอัดประลัยที่น้อยกว่าแต่เมื่ออายุมากขึ้นค่ากำลังอัดประลัยมีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.4 การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.5 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.6 ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน จะให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน กลับให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณมากขึ้น

5.1.7 การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.8 ความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีความต้านทานซัลเฟตดีกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เมื่อพิจารณาด้านการขยายตัว แต่มีความต้านทานซัลเฟตแย่กว่าถ้าพิจารณาด้านการสูญเสียน้ำหนัก สำหรับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีความต้านทานซัลเฟตแย่กว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เมื่อพิจารณาในด้านการขยายตัว ส่วนด้านการสูญเสียน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน โดยเพิ่มตัวแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและขนาดของผงหินปูน เพื่อศึกษาผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ดังนี้

5.2.1 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ ได้แก่

1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสม และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์
2) ค่าการยุบตัว การสูญเสียค่าการยุบตัว และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

5.2.2 คุณสมบัติด้านความคงทน ได้แก่

1) การหดตัวแบบออโตจีนัสและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต
2) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต
3) การเกิดคาร์บอร์เนชั่นของคอนกรีตและความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

รายการอ้างอิง

[1] Pitisan Krammart, “Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ash and calcium carbide waste, and sulfate resistance of fly ash concrete,” Ph. D. Thesis, Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University, 2005.

[2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, “ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด,” วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ฉบับที่ 12 , เมษายน 2554.

[3] American Society for Testing and Material, Annual Book of ASTM Standard, V 04,02, Easton, Md., USA., 1996.

[4] Neville, A.M., Properties of Concrete. Pittmen Book Limited, London, 1981

[5] American Concrete Institute, ACI 233 R-95: Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Michigan, 2000.

[6] American Society for Testing and Materials, ASTM C989-99: Standard specification for ground granulated blast-furnace slag for use in concrete and mortars, Annual Book of ASTM Standards, 2001, Vol. 04.02, Philadelphia, 518-522.

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

[8] Tazawa, E., and Miyazawa, S., 1998. Effect of Constituents and Curing Condition on Autogenous Shrinkage of Concrete. Proceeding of the International Workshop Organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 269-280.

[9] Hanehara, S., Hirao, H., and Uchikawa, H., 1998. Relationships between Autogenous Shrinkage, and the Microstructure and Humidity Changes at Inner Part of Hardened Cement Paste at Early Age. Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 93-104.

[10] Park, K.B., Noguchi, T., and Tomosawa, F., 1998. A Study on the Hydration Ratio and Autogenous Shrinkage of Cement Paste. Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 299-308.

[11] Barcelo, L., Moranville, M., and Clavaud, B., 2005. Autogenous shrinkage of concrete: a balance between Autogenous swelling and self-desiccation. Cement and Concrete Research 35: 117-183.

[12] Baroghel-Bouny, V., Mounanga, P., Khelidj, A., Loukili, A., and Rafai, N., 2006. Autogenous deformations of cement pastes Part II. W/C effects, micro–macro correlations, and threshold values. Cement and Concrete Research 36: 123-136.

[13] Tazawa, E., and Miyazawa, S., 1993., Autogenous Shrinkage of Concrete and Its Importance in Concrete Technology. Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium, Barcelona, Spain, 189-168.

[14] Justnes, H., Sellevold, E.J., Reyniers, B., Van Loo, D., Van Gemert, A., Verboven, F., and Van Gemert, D., 1998. The Influence of Cement Characteristics on Chemical Shrinkage. Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 71-80.

[15] Sontaya Tongaroonsri. 2009. Prediction of Autogenous Shrinkage, Drying Shrinkage and Shrinkage Cracking in Concrete. Ph.D. Thesis., Sirindhorn International Institute of Technology and Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathumthani, Thailand.

[16] Sudsangium, T., 1993. Utilization of Mae-Moh Fly Ash as Cement Replacement Material to Reduce Autogenous Shrinkage. Master Thesis., AIT, Bangkok, Thailand.

[17] Tangtermsirikul, S., 1998. Effect of Chemical Composition and Particle Size of Fly Ash on Autogenous Shrinkage of Paste. Proceeding of the International Workshop organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 175-186.

[18] Chan, Y.W., Liu, C.Y., and Lu, Y.S., 1998. Effects of Slag and Fly Ash on the Autogenous Shrinkage of High Performance Concrete. Proceeding of the International Workshop Organized by JCI (Japan Concrete Institute) on Autogenous Shrinkage of Concrete, Hiroshima, Japan, 221-228.

[19] Termkhajornki, P., Nawa, T., Nakai, M., and Saito, T., 2005. Effect of fly ash on autogenous shrinkage. Cement and Concrete Research 35: 473-482.

[20] Fujiwara, T., 1989. Relation between mix proportion and drying shrinkage of hardened cement paste, mortar and concrete. Concrete Libibrary of JSCE, 13, June.

[21] Hindy, E.E., Miao, B., Chaallal, O., and Aitcin, P.C., 1994. Drying shrinkage of ready-mixed high performance concrete. ACI Material Journal 91(3): 300-305.

[22] Bissonnette, B., Pierre, P., and Pigeon, M., 1999. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious material. Cement and Concrete Research 29: 1655-1662.

[23] Rao, G.A., 2001. Long-term drying shrinkage of mortar influence of silica fume and size of fine aggregate. Cement and Concrete Research 31: 171-175.

[24] Pacheerat, N., 2001. Shrinkage of mortar and concrete with fly ash. M.Eng. Thesis, Kasetsart University, Bangkok.

[25] Juenger, M.C.G., and Jennings, H.M., 2002. Examining the relationship between the microstructure of calcium silicate hydrate and dryinf shrinkage of cement paste. Cement and Concrete Research 32: 289-296.

[26] Barr, B., Hoseinian, S.B., and Beygi, M.A., 2003. Shrinkage of concrete stored in natural environments. Cement and Concrete Composites 25: 19-29.

[27] Kim J.K., and Lee, C.S., 1999. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages. Cement and Concrete Research 29: 1921-1927.

[28] Rico, J.R., 2000. Effect of Superplasticizers on The Behavior of Concrete in The Fresh and Hardened States: Implication for High Performance Concretes. Doctoral Thesis, Universitat Politechnica de Catalunya, Barcelona, June.

[29] Ayano, T., Sakata, K., and Wittmann, F.H., 2000. Moisture distribution, diffusion coefficient, and shrinkage of cement-based materials. Concrete Library of JSCE 36: 207-225.

[30] Wong, S.F., Wee, T.H. Sawaddiwudhipong, S., and Lee, S.L., 2001. Study of Water Movement in Concrete. Magazine of Concrete Research 53(3): 205-220.

[31] Subsomboon, K., 1995. Utilization of Mae-Moh fly ash as cement replacement material to reduce autogenous shrinkage. M.Eng. Thesis, AIT., Bangkok.

[32] Choojan, T.C., and Kitireanglarp, S., 2003. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. Journal of American Ceramic Society 41: 1-6.

[33] Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Sirivivatnanon, V., 2004. Influence of fly ash finess on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. Cement and Concrete Research 34: 1087-1092.

[34] Akkaya, Y., Ouyang, C., and Shah, S.P., 2007. Effect of supplementary cementitious material on shrinkage and crack development in concrete. Cement and Concrete Composites 29: 117-123.

[35] Nader, G., and Jeffrey, B., 1996. Investigation of Lignite-based bottom ash for structural concrete. Journal of Materials in Civil Engineering: 128-137.

[36] Kou, S.C., Poon C.S., 2009. Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. Construction and Building Materials 23: 2877–2886.

[37] Ratchayut, K., and Somnuk T., 2008. Properties of Self-Compacting Concrete in Corporating Bottom Ash as a Partial Replacement of Fine Aggregate. ScienceAsia Research 34: 87-95.

[38] Y. Bai, F. Darcy, P.A.M. Basheer, 2005. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. Construction and Building Materials 19: 691–697.

[39] ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, “การต้านทานซัลแฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน,” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.

[40] P.Pipilikaki, M.Katsioti, J.L.Gallias, 2008. Performance of limestone cement mortars in a high sulfates environment. Construction and Building Materials

[41] KamileTosun, BurakFelekoglu, BülentBaradan, I.AkınAltun, 2009. Effects of limestone replacement ratio on the sulfateresistance of Portland limestone cemen tmortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations. Construction and Building Materials.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

(A Study of Properties of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag)

เจต นาจารย์[1] และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2]

[1,2] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

E-mail: [1] n_jetta@hotmail.com, [2] pitisan.k@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ผลการศึกษาพบว่าความต้องการน้ำของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีแนวโน้มให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้พบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และสุดท้ายพบว่าคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

คำสำคัญ : ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผงหินปูน กำลังอัดประลัย การหดตัวแบบแห้ง การแทรกซึมของคลอไรด์

Abstract

This paper presents the study of properties of concrete with ground granulated blast-furnace slag (GGBF slag). The Portland cement type 1 replaced partially with the GGBF slag and limestone powder was considered.

The results showed that the normal consistency of paste made with Portland cement type 1 replaced partially with the GGBF slag and limestone powder was smaller than that of Portland cement type 1 paste. A paste made from Portland cement type 1 replaced partially with the GGBF slag and limestone powder had delay of setting time when compared with Portland cement type 1 paste. In addition, the GGBF slag and limestone powder concrete had smaller slump when compared with Portland cement type 1 concrete specimens. While the compressive strength of concrete made from GGBF slag and limestone powder was slightly to be less than that of Portland cement type 1 concrete. It was also found that the drying shrinkage of concrete with GGBF slag and limestone powder was less than that of Portland cement type 1 concrete specimens. Finally, it was found that concrete specimens made from Portland cement type 1 partially replaced with GGBF slag and limestone powder had superior resistance chloride penetration when compared with Portland cement type 1 concrete specimens.

Keywords: ground granulated blast-furnace slag, limestone powder, compressive strength, drying shrinkage, chloride penetration

1. คำนำ

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากถึง 0.5 ตันในทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น [1] หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ พลังงานที่ใช้ลำเลียงผลพลอยได้ไปทิ้งในบ่อกลบฝัง พลังงานที่ใช้ในการระเบิดภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

ในปัจจุบันการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ground granulated blast-furnace slag, GGBF slag) นอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสาน (cementitious material) ในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีต มีเหตุผล 2 ประการ คือ 1) สามารถบด GGBF slag ได้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และ 2) สามารถปรับส่วนผสมคอนกรีตที่มี GGBF slag ให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้ง่าย[2] สำหรับในประเทศไทยยังมีข้อมูลการศึกษาวิจัยการนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตนั้นนับว่าน้อยมาก หรืออาจกล่าวว่าแทบไม่มีก็ว่าได้ ส่วนผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้ [3-7] จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าวทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้เป็นนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดใช้เป็นวัสดุประสาน และเป็นวัสดุประสานร่วมกับผงหินปูนแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของส่วนผสมในคอนกรีต ซึ่งเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ร่วมกัน โดยได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตดังกล่าว

2. ระเบียบวิธีศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15

2. ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 14 ไมโครเมตร

3. ผงหินปูน ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิตมีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8 ไมโครเมตร

4. ทราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (saturated-surface dry, SSD)

5. หินเบอร์ 2 นำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปอบ และปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

6. น้ำ ใช้น้ำประปามีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในช่วง 7 ถึง 8

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กในครั้งนี้ ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติพื้นฐาน (ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี) และคุณสมบัติด้านซีเมนต์ (ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต) ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน) นอกจากนี้ได้ศึกษาการหดตัวแบบแห้งและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ศึกษาประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188-95 ความละเอียดโดยวิธีเบลน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C204-00 และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค ใช้วิธี scanning electronic microscope (SEM) ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานนั้นใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

2.2.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ซึ่งได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C187-98 และ ASTM C191-99 ตามลำดับ และค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยกำลังอัดประลัยของคอนกรีตใช้แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 10 ซ.ม. × 10 ซ.ม. × 10 ซ.ม. โดยหล่อ 3 ชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 3, 14, 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดประลัยประยุกต์ใช้มาตรฐานอังกฤษ BS 1881-116

2.2.3 การทดสอบการหดหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C157 ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบการหดตัวแบบไม่ยึดรั้ง ใช้แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 75 ม.ม. × 75 ม.ม. × 285 ม.ม. โดยหล่อ 3 ชิ้นตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลาอีก 7 วัน แล้วจึงนำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้งแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศอีก 1 ชั่วโมง จึงชั่งน้ำหนักและวัดค่าความยาวด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) และทำการวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงที่อายุ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 42 และ 56 วัน โดยวางแท่งตัวอย่างให้มีระยะห่างไม่น้อยกว่า 1 นิ้วในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิคงที่ 21±2°C ตลอดการทดสอบ

2.2.4 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ใช้ชิ้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 50 มิลลิเมตร โดยหลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนถึงอายุที่จะทำการทดสอบ ซึ่งทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน โดยทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (rapid chloride penetrability test , RCPT) ซึ่งใช้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่าง เพื่อนำไปประเมินความสามารถแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ตามมาตรฐานASTM C1202 โดยตารางที่ 1 แสดงความสามารถแทรกซึมคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ ตามมาตรฐานของ ASTM C 1202

ตารางที่ 1 ความสามารถแทรกซึมคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ (ASTM C 1202)

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

2.3 สัดส่วนผสมของเพสต์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สัดส่วนผสมของเพสต์และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน แสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของวัสดุประสาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงหินปูน	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
C1[*]	100	-	-
C1-5LP[**]	95	5	-
C1-10LP	90	10	-
C1-30SL[***]	70	-	30
C1-50SL	50	-	50
C1-70SL	30	-	70
C1-5LP-25SL[****]	70	5	25
C1-5LP-45SL	50	5	45
C1-5LP-65SL	30	5	65
C1-10LP-20SL	70	10	20
C1-10LP-40SL	50	10	40
C1-10LP-60SL	30	10	60

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม) ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบแห้ง และความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงหินปูน	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ทราย	หิน	น้ำ
C1[*]	332	0	0	790	1080	215.8
C1-5LP[**]	316	16	0	790	1080	215.8
C1-10LP	299	33	0	790	1080	215.8
C1-30SL[***]	233	0	99	790	1080	215.8
C1-50SL	166	0	166	790	1080	215.8
C1-70SL	100	0	232	790	1080	215.8
C1-5LP-25SL[****]	233	16	83	790	1080	215.8
C1-5LP-45SL	167	16	149	790	1080	215.8
C1-5LP-65SL	100	16	216	790	1080	215.8
C1-10LP-20SL	233	33	66	790	1080	215.8
C1-10LP-40SL	167	33	132	790	1080	215.8
C1-10LP-60SL	180	33	119	790	1080	215.8

หมายเหตุ

[*]C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

[**]C1-xLP หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูน โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก

[***]C1-xSL หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

[****]C1-xLP-ySL หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก และมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ y โดยน้ำหนัก

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

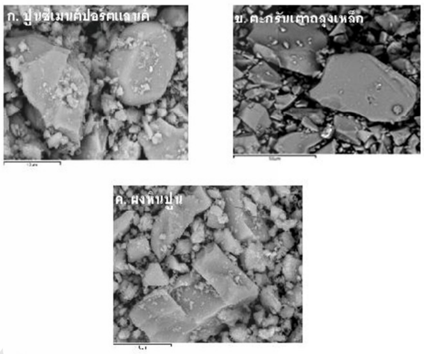
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน

ตารางที่ 4 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน พบว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.12 ส่วนของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่าเท่ากับ 2.96 และ 2.69 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 3,250 4,600 และ 5,210 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.96	2.69
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,250	4,600	5,210
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	16	14	8

ส่วนรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน (ที่ใช้ในการศึกษา) โดยวิธี scanning electronic microscope (SEM) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของวัสดุประสานทั้ง สามชนิดนั้นมีลักษณะรูปร่างของอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว



รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน

องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน (ตารางที่ 5) พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าค่อนข้างสูงคือเท่ากับร้อยละ 34.06 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.50 ในขณะที่ผงหินปูนมี SiO_2 น้อยมาก คือร้อยละ 0.45 ส่วนอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าเท่ากับร้อยละ 16.27 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนเท่ากับร้อยละ 4.97 และ 0.05 ตามลำดับ และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) นั้นพบว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าเท่ากับร้อยละ 36.05 ซึ่งน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนซึ่งเท่ากับร้อยละ 65.38 และ 55.20 ตามลำดับ และพบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition, LOI) ของตะกันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ร้อยละ 1.44) มีค่าไม่

แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 2.27) ในขณะที่ของผงหินปูนมีค่าค่อนข้างสูงคือร้อยละ 43.12

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

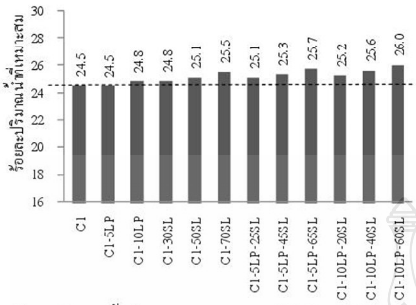
ออกไซด์ (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ผงหินปูน
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	19.50	34.06	0.45
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	4.97	16.27	0.05
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.78	1.70	0.03
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.38	36.05	55.20
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.08	7.38	0.34
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.16	2.16	< 0.01
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	< 0.01	0.21	< 0.01
โปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.47	1.09	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	2.27	1.44	43.12
แคลเซียมออกไซด์อิสระ(fCaO)	1.00	-	-
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง	0.28	-	-

3.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์

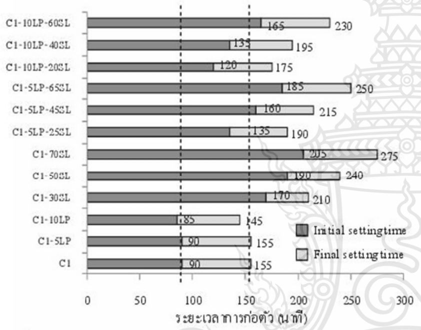
3.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

ผลการศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ (normal consistency) แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีแนวโน้มสูงกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มากกว่า มีพื้นที่ผิวที่มากกว่า ส่งผลให้มีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น (โดยเฉพาะเมื่อแทนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้น) ซึ่งเช่นเดียวกับความต้องการน้ำของเพสต์แทนที่ด้วยผงหินปูน มีแนวโน้มให้ค่าที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยที่ละเอียดกว่า ส่วนเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กร่วมกับผงหินปูน ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกันคือ หากปริมาณการแทนที่มากขึ้นปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ก็สูงขึ้น

รูปที่ 3 แสดงระยะเวลาการก่อตัว พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้น (initial setting time) และระยะเวลาการก่อตัวระยะปลาย (final setting time) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่าไม่แตกต่าง ในขณะที่เพสต์แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีแนวโน้มเร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งที่เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ซึ่งมีผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูน (8 ไมโครเมตร) ซึ่งมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (16 ไมโครเมตร) สามารถไปแทรกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์เป็นผลให้พื้นที่ผิวของอนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำมากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้มากขึ้น การก่อตัวจึงมีแนวโน้มเร็วขึ้น ส่วนระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นการ ไปลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง รวมทั้งตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่า โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวก็ช้ามากขึ้น และเมื่อมีการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวมีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งเป็นไปตามการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยเฉพาะเมื่อปริมาณการแทนที่มากขึ้น



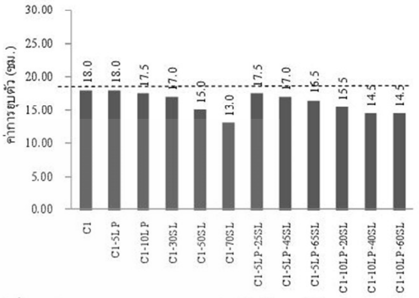
รูปที่ 2 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน



รูปที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและผงหินปูน

3.2.2 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงค่าการยุบตัว (slump) ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งก็จะมีค่าแปรผกผันตามปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากจะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อย

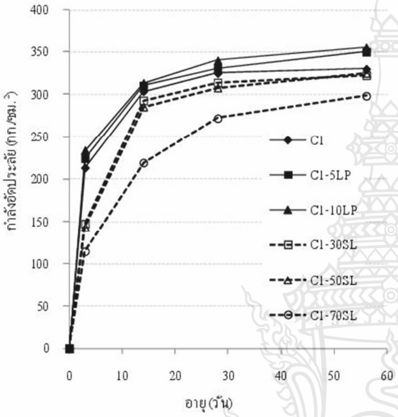


รูปที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

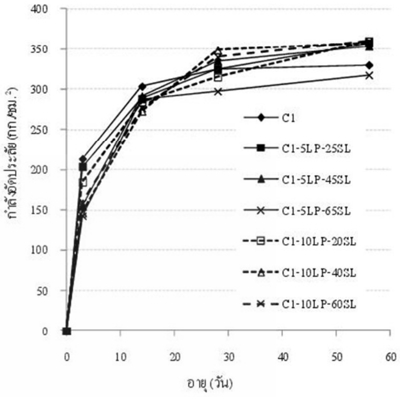
3.2.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

รูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 แสดงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้ พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (การแทนที่ร้อยละ 10 มีแนวโน้มมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 5) ทั้งนี้อาจเพราะผงหินปูนมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยที่ค่อนข้างละเอียดสามารถเข้าไปเติมเต็ม (Filler) ช่องว่างของเพสต์ (การแทนที่ในปริมาณร้อยละ 10 ซึ่งน่าเป็นปริมาณที่เหมาะสมกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 5) เป็นการลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นคอนกรีตจึงมีกำลังอัดประลัยสูงขึ้น ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดนั้นกลับให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ให้ค่ากำลังอัดประลัยต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดประลัยลดลง โดยเฉพาะในช่วงอายุต้น อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตา

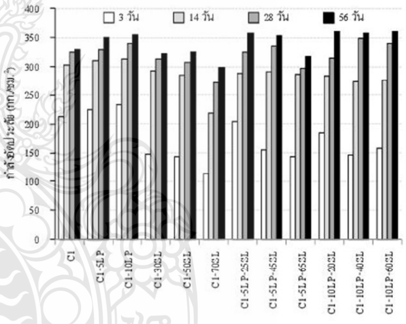
ถลุงเหล็กบดละเอียดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีอัตราการพัฒนาเพิ่มที่สูงขึ้น (รูปที่ 5 และรูปที่ 7) ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 6 และรูปที่ 7) พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตดังกล่าวมีแนวโน้มเหมือนกับการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและการแทนที่ด้วยผงหินปูนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการบ่มกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน



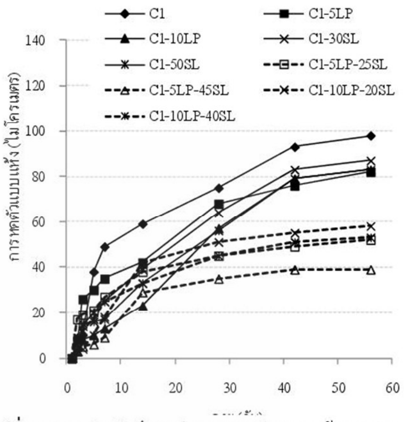
รูปที่ 7 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 3, 14, 28 และ 56 วัน

3.3 การหดตัวแบบแห้ง

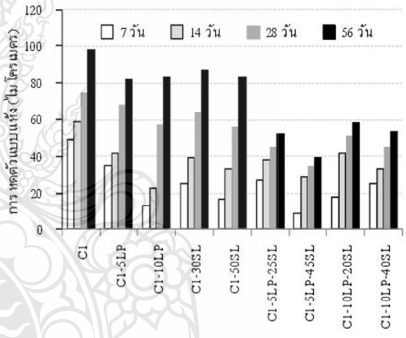
รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงค่าการหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผง

หินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

ผลการศึกษาพบว่า การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงสามารถดูดซับน้ำไว้ที่ผิวของอนุภาคได้มาก ทำให้เหลือน้ำอิสระน้อยลง คอนกรีตจึงมีช่องว่างลดลง ส่งผลให้การสูญเสียความชื้นยากขึ้น และพบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยผงหินปูน (โดยการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 50 มีแนวโน้มน้อยกว่าเมื่อแทนที่ด้วยร้อยละ 30) ซึ่งเหตุผลเพราะตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนในกรณีคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ก็ให้ผลการหดตัวแบบแห้งในทิศทางเดียวกับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และที่แทนที่ด้วยผงหินปูน กล่าวคือมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน

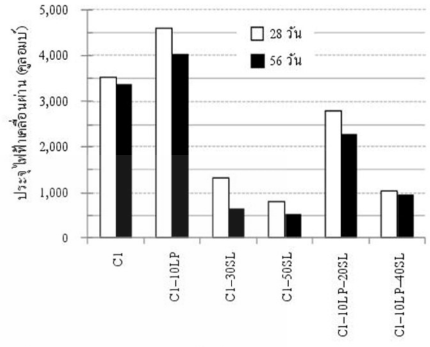


รูปที่ 9 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน

3.4 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

ผลการศึกษาการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (rapid chloride penetration test, RCPT) ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนที่อายุ 28 และ 56 วัน (รูปที่ 10) พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (โดยเฉพาะเมื่ออายุ 28 วัน มีค่าของประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านมากกว่า 4,000 คูลอมบ์) บ่งชี้ถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ในระดับที่สูง (ตารางที่ 1) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะคอนกรีตผสมผงหินปูนขาดคุณสมบัติในการยึดประสาน (แม้ว่าผงหินปูนเป็นวัสดุอุดโพรงช่องว่าง (Filler) ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นก็ตาม) จึงทำให้คลอไรด์สามารถแทรกผ่านเนื้อคอนกรีตได้ง่าย ส่วนปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 50) คือมีปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตน้อยกว่า 1,000 คูลอมบ์ บ่งชี้ถึงการแทรกซึมคลอไรด์ได้ในระดับที่ต่ำมาก (ตารางที่ 1) ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น สำหรับในกรณีของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนนั้นพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อการแทนที่ด้วยปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตมีค่ายิ่งต่ำลง ทั้งนี้ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 10 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือแนวโน้มเร็วกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่เพสต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และเพสต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2. ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าแปรผกผันตามปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มากจะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีค่าน้อย

3. กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ให้ค่ากำลังอัดประลัยน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ส่วนคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนนั้นพบว่าที่อายุต้นๆ ให้ค่ากำลังอัดประลัยที่น้อยกว่า แต่เมื่ออายุมากขึ้นค่ากำลังอัดประลัยมีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

4. การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5. ความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน กลับให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Pitisan Krammart, "**Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ash and calcium carbide waste, and sulfate resistance of fly ash concrete**," Ph. D. Thesis, Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University, 2005.

[2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, "**ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด**," วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ฉบับที่ 12, เมษายน 2554.

[3] ปิติศานต์ กร้ำมาตรและสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, "**การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน**," การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.

[4] N. Voglisa, G. Kakalia, E. Chaniotakisb, S. Tsivilisa, "**Portland-limestone cement. Their properties and hydration compared to those of other composite cements**," Cement & Concrete Composites, Vol. 27, pp. 191-196, 2005.

[5] จตุพร ชูตาภา และ วรพจน์ แสงราม, "**แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: $CaCO_3$)**," วิหารแดง, ปีที่ 1, ฉบับที่ 6 มิถุนายน, 2552.

[6] Neville, A.M., **Properties of Concrete**. Pittmen Book Limited, London, 1981.

[7] D. P. Bentz, Taijiro Sato, Igor de la Varga, W. Jason Weiss, "**Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures**," Cement & Concrete Composites, Vol. 34, pp.11-17, 2012.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายเจต นาจารย์
วัน เดือน ปี เกิด	5 กุมภาพันธ์ 2520
ที่อยู่	24 หมู่ที่ 5 ตำบลเนินหอม อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี 25230
การศึกษา	พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2542	รับราชการในตำแหน่งนายช่างโยธา สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท จังหวัดนครนายก
พ.ศ. 2545	รับราชการในตำแหน่งนายช่างโยธา องค์การบริหารส่วนจังหวัดนครนายก
พ.ศ. 2547	รับราชการในตำแหน่งนายช่างโยธา เทศบาลตำบลเมืองคง จังหวัดศรีษะเกษ
พ.ศ. 2548 - ปัจจุบัน	รับราชการในตำแหน่งรักษาราชการ ผอ.กองช่าง เทศบาลตำบลบ้านนาปรือ จังหวัดปราจีนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี