

ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม

DURABILITY OF CONCRETE MADE WITH INDUSTRIAL WASTES



ณัฐนันท์ แก้วลิ้ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม

ณัฐนันท์ เก้าลิม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม
Durability of Concrete Made with Industrial Wastes
ชื่อ – นามสกุล นายณัฐนันท์ เก้าลุ่ม
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.
ปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

จตุพล ตั้งปกาศิต

ประธานกรรมการ

(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ค.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวิชัย ตำราญวานิช, ปร.ค.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันดารัตน์ มณีเจริญ, D.Eng.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อังกฤ อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 15 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม
ชื่อ - นามสกุล	นายณัฐนนท์ เก้าลุ่ม
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิติสานต์ กร้ามาตร, ปร.ค.
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำวัสดุกากอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์ โดยวัสดุกากอุตสาหกรรม ประกอบด้วย เถ้าลอย (FA) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GGBS) ซิลิกาฟูม (SF) และผงหินปูน (LP) ซึ่งใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ในขณะที่เถ้าก้นเตา (BA) ใช้แทนที่ทราย

สำหรับความคงทนของคอนกรีตที่ศึกษาประกอบด้วย การหดตัวแบบอโตจินัสและแบบแห้งของคอนกรีต การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

ผลการศึกษาพบว่า การหดตัวแบบอโตจินัสและแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ FA GGBS SF และ LP มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน และการหดตัวแบบอโตจินัสและแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ BA มีค่าน้อยกว่าของที่ใช้ทรายล้วน ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้ FA GGBS SF และ LP มีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ใช้ BA มีค่าน้อยกว่าของที่ใช้ทรายล้วน สำหรับความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ FA GGBS SF และ LP มีค่าดีกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ BA มีค่าด้อยกว่าของที่ใช้ทรายล้วน นอกจากนี้พบว่า ในสารละลายซัลเฟตนั้น การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ใช้ FA (ที่มีปริมาณ CaO สูง) ในปริมาณที่มาก (>ร้อยละ 30) GGBS ในปริมาณที่มาก (มากกว่าร้อยละ 50) และ SF มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ใช้ FA (ที่มีปริมาณ CaO สูง) ในปริมาณที่น้อย (<ร้อยละ 30) GGBS ในปริมาณที่น้อย (<ร้อยละ 50) และ LP มีค่าไม่แตกต่างหรือแนวโน้มมากกว่าของ OPC ล้วน ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ใช้ BA มีแนวโน้มน้อยกว่าของที่ใช้ทรายล้วน สำหรับในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ FA GGBS และ SF มีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ LP มีค่าไม่แตกต่างหรือแนวโน้มน้อยกว่าของ OPC ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ BA มีแนวโน้มมากกว่าของที่ใช้ทรายล้วน

คำสำคัญ : ความคงทน เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน เถ้าก้นเตา

Thesis Title	Durability of Concrete Made with Industrial Wastes
Name - Surname	Mr. Nuttanont Kaolim
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pitisan Krammart, Ph.D.
Academic Year	2017

ABSTRACT

This thesis aimed to study the durability of concrete made with industrial wastes that could be applied as a guideline in making use of industrial waste materials. Industrial wastes included fly ash (FA), ground granulated blast-furnace slag (GGBS), silica fume (SF), and limestone powder (LP) were used partially replaces in ordinary portland cement (OPC); and the bottom ash (BA) was used for replacement of sand.

The autogenous and drying shrinkages of concrete, the carbonation of concrete, the chloride penetration resistance of concrete, and sulfate resistance of mortar were studied.

The study indicated that the autogenous and drying shrinkages of the concrete made with FA, GGBS, SF and LP were lower than that of OPC concrete. The autogenous and drying shrinkages of the concrete using BA were less than those of plain sand concrete. Furthermore, the carbonation of the concrete made with GGBS, FA, SF and LP was higher than that of OPC concrete, whereas the carbonation of the concrete using BA was less than that of plain sand concrete. The chloride penetration resistance of the concrete made with GGBS, FA, SF and LP was better than that of OPC concrete; however, the chloride penetration resistance of the concrete using BA was lower than that of plain sand concrete. In addition, in both sodium sulfate solution and magnesium sulfate solution, the expansion of mortars made with a large amount of high CaO content FA (>30%), a large amount of GGBS (>50%) and SF was less than that of OPC mortar. While the expansion of mortars made with small quantity of high CaO content FA (<30%), small quantity of GGBS (<50%) and LP showed no differences or tended to be higher than that of OPC mortar. Moreover, the expansion of mortar using BA tended to be lower than that of plain sand concrete. The weight loss of mortars made with GGBS, FA and SF in the magnesium sulfate solution was higher than that of OPC mortar, while the weight loss of mortar made with LP was not significantly different or tended to be less than OPC mortar. The weight loss of mortar using BA tended to be higher than that of plain sand mortar. Finally, it compared the durability of concrete using industrial wastes with OPC concrete and the durability of concrete using BA with that of plain sand concrete.

Keywords: durability, fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume, limestone powder, bottom ash

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติสานต์ กร้ามาตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวิชัย สาราณวนิช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่กรุณาแนะนำและเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบพระคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเดิมสิริกุล จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต รวมถึงเพื่อนๆปริญญาโททุกคน ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ผู้ทำวิจัยต้องกราบขออภัยเป็นอย่างสูง มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมศักดิ์ แก้วลิ้ม คุณแม่สุกัญญา แก้วลิ้ม ที่อดทนด้วยความยากลำบากในการเลี้ยงดู ส่งเสียและคอยอบรมสั่งสอนให้ลูกคนนี้ได้เล่าเรียนตลอดจนให้แง่คิดที่ดีในการดำเนินชีวิต ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด จนมีโอกาสจบการศึกษาถึงระดับนี้

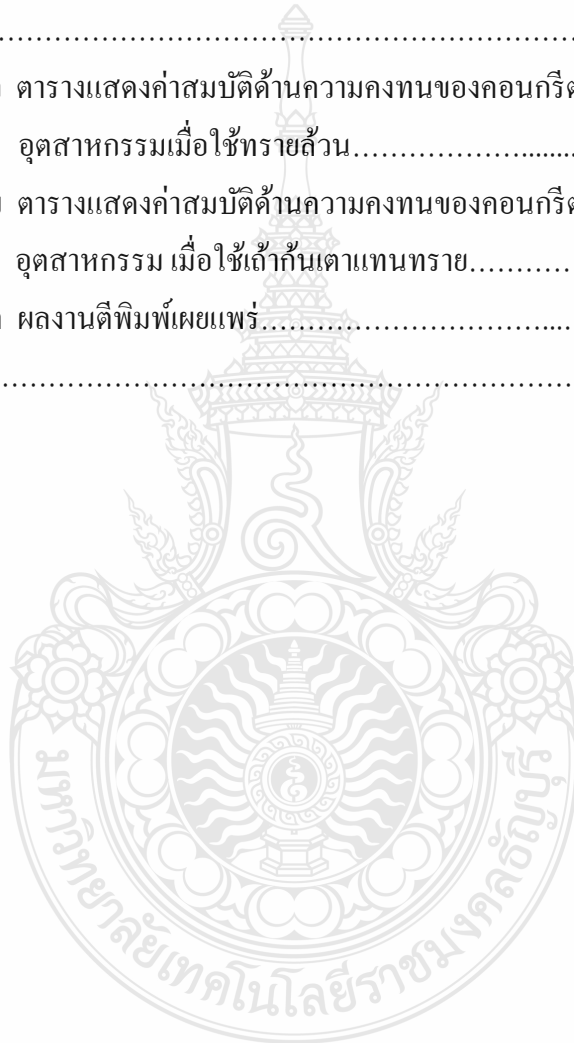
ณัฐนนท์ แก้วลิ้ม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(18)
บทที่ 1 บทนำ.....	20
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	20
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	22
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	22
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	23
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	65
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	68
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	68
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	69
3.3 รายละเอียดวิธีการศึกษา.....	73
3.4 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา.....	80
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	90
4.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	90
4.2 สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต.....	96
4.3 การเปรียบเทียบความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม.....	159

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	162
บรรณานุกรม.....	164
ภาคผนวก.....	167
ภาคผนวก ก ตารางแสดงค่าสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกาก อุตสาหกรรมเมื่อใช้ทรายล้วน.....	168
ภาคผนวก ข ตารางแสดงค่าสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกาก อุตสาหกรรม เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนทราย.....	177
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	184
ประวัติผู้เขียน.....	198



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเส้นล้อยตามมาตรฐาน ASTM C618.....	28
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเส้นล้อยตามมาตรฐาน มอก 2135-2545.....	28
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นล้อยจากแหล่งต่างๆ.....	29
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด.....	32
ตารางที่ 2.5 ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดใน ASTM C989.....	33
ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน.....	40
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม เส้นล้อย หิน เส้นล้อยบด ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	40
ตารางที่ 2.8 อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีและไม่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสม.....	42
ตารางที่ 2.9 ค่าการหดตัวทั่วไปของมอร์ตาร์และคอนกรีต.....	53
ตารางที่ 2.10 ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้.....	54
ตารางที่ 2.11 ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ.....	57
ตารางที่ 2.12 สภาพของซัลเฟต.....	61
ตารางที่ 2.13 ข้อเสนอแนะสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสถานะแวดล้อมซัลเฟต.....	64
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักใน สารละลายซัลเฟต เมื่อใช้ทรายล้วน.....	80
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักใน สารละลายซัลเฟต เมื่อใช้ทรายล้วน (ต่อ).....	81
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักใน สารละลายซัลเฟต เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย.....	81
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักใน สารละลายซัลเฟต เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย (ต่อ).....	82
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบอโดจีนัสและ โดยรวม เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55.....	83

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและ โดยรวม เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55 (ต่อ).....	84
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและ โดยรวม เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55.....	84
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและ โดยรวม เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55 (ต่อ).....	85
ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55.....	85
ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 (ต่อ).....	86
ตารางที่ 3.6 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น เมื่อใช้เถ้าก้น เตาแทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55.....	86
ตารางที่ 3.6 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น เมื่อใช้เถ้าก้น เตาแทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 (ต่อ).....	87
ตารางที่ 3.7 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55.....	87
ตารางที่ 3.8 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55.....	88
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ใน การศึกษา.....	91
ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาที่ใช้.....	94
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้.....	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำกั้นเตาที่ใช้.....	96
ตารางที่ 4.5 ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน.....	117
ตารางที่ 4.6 ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย.....	120
ตารางที่ 4.7 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (ลูลอมป์)ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน.....	125
ตารางที่ 4.8 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (ลูลอมป์)ของคอนกรีตเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย.....	125
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมกับของคอนกรีต/ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน.....	160
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบความคงทนของถ้ำกั้นเตาเมื่อใช้แทนที่ทรายกับของคอนกรีต/มอร์ตาร์ ที่ใช้ทรายล้วน.....	161



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120,100 และ 80 ตามมาตรฐาน ASTM C 989 ผสมอยู่ร้อยละ 50 เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน.....	37
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน.....	37
รูปที่ 2.3 ผลกระทบเนื่องจากปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์.....	38
รูปที่ 2.4 ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคเถ้ากั้นเตา.....	45
รูปที่ 2.5 กราฟระหว่าง Intensity และ Theta ของเถ้ากั้นเตาจากการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD....	46
รูปที่ 2.6 แบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และออโตจีนัส.....	48
รูปที่ 3.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร.....	69
รูปที่ 3.2 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร.....	69
รูปที่ 3.3 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด \varnothing 10x20 เซนติเมตร.....	70
รูปที่ 3.4 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร.....	70
รูปที่ 3.5 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด 2.54x2.54x28.5 เซนติเมตร.....	70
รูปที่ 3.6 เครื่องชั่ง.....	71
รูปที่ 3.7 เครื่อง Length Comparator.....	71
รูปที่ 3.8 ตู้อบ คาร์บอนขึ้น.....	72
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน.....	72
รูปที่ 3.10 สารละลายซัลเฟต.....	73
รูปที่ 3.11 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต.....	77
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาควัสดุที่ใช้โดยวิธี SEM.....	93
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของเถ้ากั้นเตาโดยวิธี SEM.....	93
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย.....	97

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด.....	98
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม	99
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน.....	100
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ..	101
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียดร่วมกับผงหินปูน.....	101
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียดร่วมกับซิลิกาฟูม.....	102
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ ทราย.....	103
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสม เถ้าลอย ร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	104
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสม ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ ทราย.....	104
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมซิลิ กาฟูม ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	105

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบอโคจีนัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมผง หินปูน ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	105
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย.....	107
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด.....	108
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม.....	109
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน.....	110
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน.....	111
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร่วมกับผงหินปูน.....	111
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร่วมกับซิลิกาฟูม.....	112
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	113
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย ร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	113
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตา ถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	114

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมซีลีกาฟุ่ม ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	114
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมผง หินปูน ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	115
รูปที่ 4.27 ตัวอย่างของคอนกรีตที่ทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้น โดยใช้ น้ำยาฟินอลทาไลน์ใน แอลกอฮอล์ฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	116
รูปที่ 4.28 ความลึกคาร์บอนขึ้นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน.....	118
รูปที่ 4.29 ความลึกคาร์บอนขึ้นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายกรณีบ่ม น้ำ.....	121
รูปที่ 4.30 ความลึกคาร์บอนขึ้นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่ม อากาศ.....	122
รูปที่ 4.31 ความลึกคาร์บอนขึ้นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ ทราย กรณีบ่มน้ำและบ่มอากาศ.....	124
รูปที่ 4.32 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน.....	127
รูปที่ 4.33 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ.....	129
รูปที่ 4.34 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่ม อากาศ.....	131
รูปที่ 4.35 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำและกรณีบ่มอากาศ.....	133
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย.....	134
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมตะกอนเตาถลุง เหล็กบดละเอียด.....	135

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมซิกาฟูม.....	136
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน.....	137
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผง หินปูน.....	138
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน.....	139
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมซิกาฟูมร่วมกับ ผงหินปูน.....	140
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย.....	141
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียด.....	141
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมซิกาฟูม.....	142
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน.....	142
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมด้วยเถ้าลอย ร่วมกับผงหินปูน.....	143

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน.....	144
รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมร่วมกับ ผงหินปูน.....	144
รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์.....	146
รูปที่ 4.51 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์.....	147
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตา แทนที่ทราย.....	148
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	148
รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เมื่อใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตาแทนที่ ทราย.....	149
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของ มอร์ตาร์ผสมผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	150
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตา แทนที่ทราย.....	151
รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย เมื่อใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	151

สารบัญรูป (ต่อ)

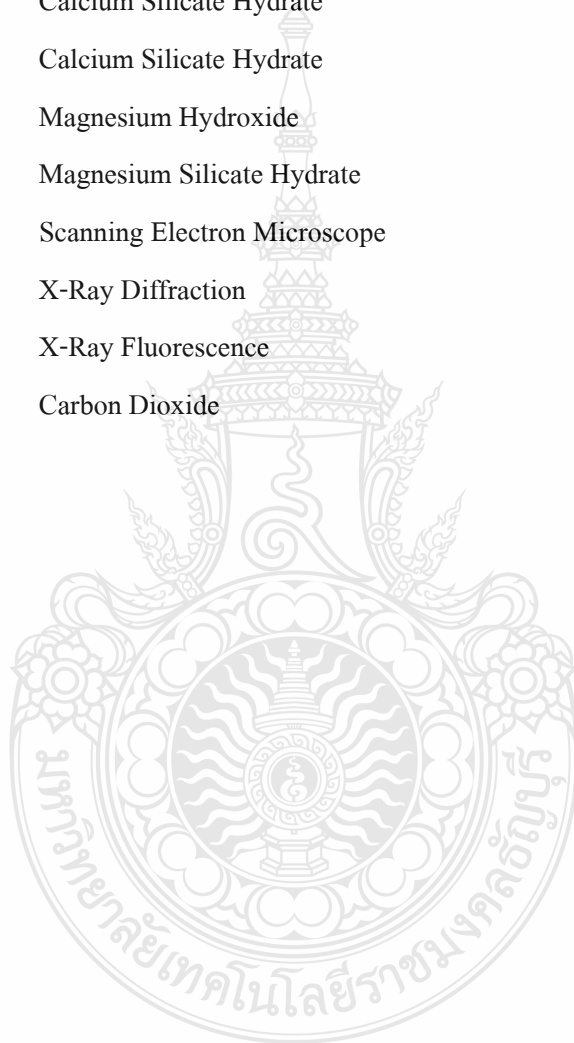
	หน้า
รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เมื่อใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตาแทนที่ ทราย.....	152
รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของ มอร์ตาร์ผสมผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย.....	152
รูปที่ 4.60 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 50 สัปดาห์.....	153
รูปที่ 4.61 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 50 สัปดาห์.....	154
รูปที่ 4.62 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์.....	155
รูปที่ 4.63 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักที่แช่ในสารละลาย แมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์.....	157
รูปที่ 4.64 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้เถ้าก้นเตา แทนที่ทราย ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์.....	158
รูปที่ 4.65 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักที่แช่ในสารละลาย แมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์.....	159

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

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

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

CAH	Calcium Aluminate Hydrates
C-A-H	Calcium Aluminate Hydrates
CH	Calcium hydroxide
CSH	Calcium Silicate Hydrate
C-S-H	Calcium Silicate Hydrate
MH	Magnesium Hydroxide
M-S-H	Magnesium Silicate Hydrate
SEM	Scanning Electron Microscope
XRD	X-Ray Diffraction
XRF	X-Ray Fluorescence
CO ₂	Carbon Dioxide



บทที่ 1

บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากถึง 0.5 ตันในทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น [1] หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม การผลิตปูนซีเมนต์ รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหิน เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความทนทานเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น แต่เมื่อพิจารณาถึงอายุการใช้งานของคอนกรีตแล้ว ยังคงต้องให้ความสำคัญกับความคงทนของคอนกรีตอยู่เสมอ ซึ่งสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อระบบโครงสร้างในระยะยาว เป็นตัวบ่งชี้ถึงการใช้งาน โครงสร้างหรืออาคารเป็นไปตามวัตถุประสงค์อย่างดี ถ้าคอนกรีตมีความทนทานสูงก็จะทนต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรงได้ดี และยี่คระระยะเวลาของการเสื่อมสภาพออกไปให้นานมากขึ้น คอนกรีตที่ดีต้องมีกำลังตามความต้องการและทนทานต่อสภาพดินฟ้าหรือสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน โดยยังสามารถคงรูปร่าง คุณภาพ คุณสมบัติ และการใช้งานได้ดีเช่นเดิม ความทนทานของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หมายถึงความสามารถของคอนกรีตในการทนต่อสภาพกักร้อน ไม่ว่าจะเป็นทางเคมี ทางกลหรือทางกายภาพ สาเหตุทางเคมีที่ทำลายคอนกรีตในระหว่างการใช้งาน ได้แก่ การเกิดคาร์บอนเนชัน การเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา การกักร้อนเนื่องจากซัลเฟตคลอไรด์ กรด ของเสียที่อยู่ในรูปของเหลว และก๊าซต่างๆจากโรงงานอุตสาหกรรม [2] เป็นต้น

วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมนับวันยังมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ด้วยแนวทางการดำเนินงานของกระทรวงอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ได้มีนโยบายส่งเสริมและสนับสนุนให้เกิด

อุตสาหกรรมให้บริการบำบัด และกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วให้ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ เพื่อรองรับและให้บริการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม แล้วนำวัสดุกากอุตสาหกรรมเหล่านั้นมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกครั้งในอุตสาหกรรมคอนกรีต สำหรับประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอย (fly ash) ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนมาใช้ผลิตคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างแพร่หลาย ปริมาณเถ้าลอยที่มีอยู่ในประเทศไทยโดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีปริมาณสูงถึง 3,000,000 ตันต่อปี [3] ข้อดีของเถ้าลอยมีหลายประการ คือ ถ้าใช้ปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงาน ลดการสูญเสียการยุบตัว เพิ่มกำลังในระยะยาว และเพิ่มความคงทนของคอนกรีต ส่วนข้อเสียหลักของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตคือ ทำให้คอนกรีตก่อตัวช้า กำลังของคอนกรีตในระยะต้นต่ำเถ้าลอยจึงไม่เป็นที่นิยมในงานคอนกรีตที่ต้องการการเร่งกำลังหรือถอดแบบเร็ว ส่วนการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ground granulated blast-furnace slag, GGBF slag) สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างดี นอกจากนี้ใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสาน (Cementitious Material) เช่นเป็นส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นต้น โดยซิลิกาฟุ้ง (silica fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว และต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟุ้ง อีกทั้งยังมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ในปริมาณที่น้อยจึงสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ แต่พบว่าซิลิกาที่มีอยู่จะน้อยและเป็นผลึกค่อนข้างมากซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านี้ในคอนกรีตไม่คืนกเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ ในขณะที่ผงหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เนื่องจากผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร จึงก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ ผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เมื่อแทนที่ผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามอร์ตาร์ผสมผงหินปูนมีกำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมสารปอซโซลานหลายชนิด จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าวทำให้มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น ในส่วนของเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) จะมีรูปร่างอนุภาคทั้งที่เป็นทรงกลมและไม่ทรงกลม รวมทั้งมีลักษณะเป็นรูพรุนกว่าเถ้าลอยมีความสามารถในการกักเก็บน้ำซึ่งน่าจะใช้เป็นวัสดุถมจากภายในโดยแทนที่มวลรวมละเอียด ดังนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะนำเถ้าก้นเตามาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต [4]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม (เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา) ซึ่งได้แก่ การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้ง การเกิดคาร์บอนชั่น ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ และความต้านทาน

ซัลเฟต เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ที่จำเป็นสำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยนำเอาวัสดุ
กากอุตสาหกรรมทั้งหมดมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม ผง
หินปูน และเถ้าก้นเตาที่ใช้ในการศึกษา

1.2.2 เพื่อศึกษาการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ตะกรัน
เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.2.3 เพื่อศึกษาการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
ซิลิกาฟุ่ม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.2.4 เพื่อศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตา
ถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.2.5 เพื่อศึกษาความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
บดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.2.6 เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม
ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาต่อความคงทนของคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้มีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1.3.1 วัสดุกากอุตสาหกรรมที่ใช้ในการศึกษาได้แก่

- เถ้าลอย จากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (FA)
- ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (SL)
- ซิลิกาฟุ่ม (SF)
- ผงหินปูน (LP)
- เถ้าก้นเตา จากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (BA)

1.3.2 มีการแทนที่ เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน ใน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (โดยน้ำหนัก) ในขณะที่เถ้าก้นเตาแทนที่ในทราย (โดยปริมาตร)

1.3.3 ทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตา
ถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.3.4 ทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
บดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.3.5 ทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตา
ถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.3.6 ทดสอบความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
บดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.3.7 วิเคราะห์ผลกระทบของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน
และเถ้าก้นเตาต่อความคงทนของคอนกรีต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผง
หินปูน และเถ้าก้นเตาที่ใช้ในการศึกษา

1.4.2 ทราบถึงผลของการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.4.3 ทราบถึงผลของการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
บดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.4.4 ทราบถึงผลของความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย
ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.4.5 ทราบถึงผลของความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
บดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา

1.4.6 ทราบถึงผลกระทบของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน
และเถ้าก้นเตาต่อความคงทนของคอนกรีต

1.4.7 สามารถนำวัสดุเหลือใช้ (เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผง
หินปูน และเถ้าก้นเตา) มาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต พร้อมทั้งลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ปฏิกริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

2.1.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide : $\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือ CH ดังสมการที่ 2.1



2.1.1.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2



2.1.1.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3



เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซัมเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (Clinker) โดยยิปซัม (Gypsum : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นบางๆ ของแเอทริงไจท์ (Ettringite : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{SO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4



2.1.1.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซัม ดังสมการที่ 2.5



เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงเนื่องจากการเกิดขึ้นเคลือบของแเอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของไอออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเฟสที่มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แเอทริงไจท์เปลี่ยนแปลงเป็นแคลเซียม-โมโนซัลโฟลูมิเนตและเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซัลเฟตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.1.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)

วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันเป็นปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) และถึงแม้ว่าปอซโซลานชนิดนั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในสัดส่วนผสมใดๆ ก็ตาม บางครั้งปอซโซลานบางส่วนไม่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ เนื่องจากองค์ประกอบในการทำปฏิกิริยามีไม่เพียงพอต่อขบวนการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.1.2.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

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

1) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

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

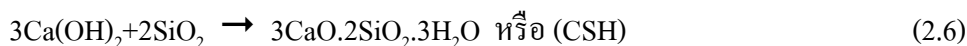
2) ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan)

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

2.1.2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.7

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



2.1.3 เถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fly Ash)

ปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานดัดแปลง เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินเอาพลังงานความร้อนไปใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่า ถ่านก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าลอย ซึ่งจะถูกดักจับ (Electrostatic Precipitation) เพื่อไม่ให้เป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบ

2.1.3.1 ชนิดของเถ้าลอย มาตรฐาน ASTM C618 [7] แบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

1) เถ้าลอย ชนิด F (class F)

ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.7 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO₂ มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO₂ สูง

2) เถ้าลอย ชนิด C (class C)

ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.6 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al₂O₃ มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al₂O₃ ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO₂ ต่ำแล้วยังมี Al₂O₃ ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [7]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
- ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และ ไอออนออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
- ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
- ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
- การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
- ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับเถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานหลัก โดยแบ่งชั้นคุณภาพและชนิดตามคุณลักษณะทางเคมี ได้เป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545 [8]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
-ปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อย่างต่ำ, ร้อย ละ	30.0	ชนิด ก 30.0	ชนิด ข 30.0	30.0
-ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ร้อยละ	5.0	< 10.0	< 10.0	5.0
-ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างมาก, ร้อย ละ	3.0	5.0	5.0	2.0
-ปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมาก, ร้อยละ	-	3.0	2.0	-
-การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างมา, ร้อยละ	6.0	6.0	6.0	6.0

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ตามก็ยังมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้งานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีโดย ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [9]

ตัวอย่าง เถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

2.1.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na₂O, K₂O) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H₂O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition : LOI) SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ ของเถ้าลอยไว้ต่ำกว่าร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.1.3.3 ปฏิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ปฏิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ดังสมการซึ่งเกิดจากการทำปฏิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO.2SiO₂.3H₂O หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) และอลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) จะทำปฏิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.6 และ/หรือสมการที่ 2.7 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic

Reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมออลูมิเนตไฮดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮดรชัน

2.1.4 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ground granulated blast-furnace slag) เริ่มตั้งแต่ ค.ศ. 1774 โดยใช้ทำมอร์ต้าซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนขาวและทราย หลังจากนั้นได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เรื่อยมา จนในปัจจุบันนี้สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างดี เช่นในประเทศเยอรมนีได้มีการผลิตปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมปูนขาวขายในปี ค.ศ. 1865 ประเทศฝรั่งเศสใช้ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กในปี ค.ศ. 1889 เพื่อก่อสร้างระบบใต้ดินในกรุงปารีสและใน ค.ศ. 1981 มีรายงานว่าร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในทวีปยุโรปเป็นปูนซีเมนต์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ [10]

ตะกรันเตาถลุงเหล็กนอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิมตัว (hydrated lime) ยิปซัม หรือแอนไฮไดรต์ (anhydrite) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของ ปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต

เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานคอนกรีตมาก ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะยังไม่ใช้วัสดุนี้ในงานก่อสร้างก็ตาม แต่ว่ามีตะกรันเตาถลุงเหล็กอยู่ตามโรงงานถลุงเหล็กทั่วทั้งประเทศเป็นจำนวนมาก และอาจสามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ในปัจจุบันมีการนำตะกรันดังกล่าวมาย่อยให้แตกเป็นชิ้นเล็กขนาดเท่ากับมวลรวมเพื่อถมที่ หรือใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีต แต่ปริมาณการใช้ยังน้อยและไม่แพร่หลายเพราะมีปัญหาเรื่องราคาค่าขนส่งและพลังงานในการย่อยหรือบดวัสดุ

ACI 116 [11] ให้คำจำกัดความของตะกรันเตาถลุงเหล็ก (blast-furnace slag) คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกตของแคลเซียมและอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก นอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (granulated blast-furnace slag) หมายถึงเม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึกซึ่งได้จากการทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุงเหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำ

2.1.4.1 กระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ในกระบวนการถลุงเหล็ก โรงงานจะใส่สินแร่เหล็กเข้าในเตาถลุงรวมทั้งใส่สารที่เป็นฟลักซ์ (flux) ซึ่งได้แก่ หินปูนและหินโคลโลไมต์ เพื่อลดอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวลงเพื่อประหยัดพลังงาน การเผาจะใช้ถ่านโค้ก (ถ่านโค้ก คือถ่านหินที่เผาจนหมดควัน) เป็นเชื้อเพลิง หลังจากเผาจนอุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ 2 อย่างเกิดขึ้นในเตาเผาพร้อมกัน คือ เหล็กที่หลอมจนเหลวซึ่งตกอยู่ก้นเตาและตะกรันเหลวซึ่งลอยอยู่บนเนื้อเหล็กเหลว การทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ช่วยป้องกันการเกิดผลึกใน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นเม็ดที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม. จึงเรียกว่าเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก ในทางตรงกันข้ามถ้าปล่อยให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ออกจากเตาเผาเย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กอยู่ในรูปที่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ และไม่มีคุณสมบัติทางวัสดุประสาน [10]

กระบวนการทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้มันเป็นผลึกทำได้ โดยการฉีดน้ำที่มีความเร็วสูงไปกระทบกับตะกรันเตาถลุงเหล็กเหลวที่ยังร้อนอยู่ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อตะกรันเตาถลุงเหล็กประมาณ 10:1 โดยมวล ซึ่งทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นเม็ด และอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกสูงมาก ภายหลังจากที่ได้เม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กจึงทำให้แห้ง และบดให้ละเอียดโดยใช้วิธีการเดียวกับการบดเม็ดปูนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ในช่วงก่อนและระหว่าง การบดเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กจะนำแม่เหล็กมาดูดแร่เหล็กที่ยังติดมาหรือตกค้างอยู่ก่อน เพื่อนำแร่เหล็กกลับไปใช้ใหม่ ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะบดให้ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์เพราะการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นตามความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่เพิ่มขึ้น

2.1.4.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก ซึ่งปนมากับสินแร่เหล็กและยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหินโคลโลไมต์ องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่นๆ ที่ติดมา เช่น SO_3 , Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดาใน ค.ศ.1988 [10] แม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในตารางที่ 2.4 จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะแต่ละโรงงานจะพบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่มาก การที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียม ก่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

2.1.4.3 ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ASTM C989 [12] ได้กำหนดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพคือ ชั้นคุณภาพ 80, 100 และ 120 ซึ่งแต่ละชั้นคุณภาพจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (slag activity index) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีชั้นคุณภาพสูงจะค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันสูง โดยค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันหาได้จาก

$$\text{ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)} = [SP/P] \times 100$$

เมื่อ SP = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ร้อยละ 50

P = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน

ข้อกำหนดที่ต้องการของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดของแต่ละชั้นคุณภาพที่แบ่งตาม ASTM C989 [12] ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันแล้วมาตรฐาน ASTM ยังได้กำหนดคุณสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต้องมีปริมาณวัสดุที่ค้างบนตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (No. 325) ไม่เกินร้อยละ 20 ปริมาณฟองอากาศในมอร์ต้าร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุประสานล้วนไม่เกินร้อยละ 12 ปริมาณของกำมะถันจากซัลไฟด์ (sulfide sulfur) ไม่เกินร้อยละ 2.5 และ ปริมาณของซัลเฟต (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 4.0

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด [10]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ โดยน้ำหนัก (%)
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 2.5 คำนีปฏิบัติการของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดใน ASTM C989 [12]

อายุและชั้นคุณภาพ	ค่าต่ำสุดของคำนีปฏิบัติการของตะกรัน (ร้อยละ)	
	ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบ 5ตัวอย่างติดต่อกัน	ผลทดสอบแต่ละ ตัวอย่าง
คำนีปฏิบัติการของตะกรันที่อายุ 7 วัน		
-ชั้นคุณภาพ80		
-ชั้นคุณภาพ100	75	70
-ชั้น2คุณภาพ120	95	90
คำนีปฏิบัติการของตะกรันที่อายุ 28 วัน		
-ชั้นคุณภาพ80	75	70
-ชั้นคุณภาพ100	95	90
-ชั้นคุณภาพ120	115	110
ความละเอียดของวัสดุที่ค้ำบน		20
ตะแกรงเบอร์ 325 ไม่นเกิน (ร้อยละ)		
ปริมาณฟองอากาศของมอร์ตาร์ที่ใช้		
ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสาน (ไม่เกินร้อยละ)		12

2.1.4.4 การทำปฏิกริยากับน้ำ

เมื่อผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ จะได้ผลลัพท์เช่นเดียวกับปฏิกริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือได้ C-S-H โดยในกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะได้ C-S-H มาจาก C_3S เป็นส่วนมาก ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะได้ C-S-H มาจาก C_2S เป็นส่วนใหญ่ และ C-S-H ที่ได้จากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความหนาแน่นสูงกว่ากรณีที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปฏิกริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับ การแตกตัวและการละลายของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ไม่เป็นผลึก เมื่อสัมผัสกับไอออนของไฮดรอกไซด์ (HO) ซึ่งได้มาจากกระบวนการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะทำปฏิกริยาทำให้ได้สาร C-S-H ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คอนกรีต นอกจากนี้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดยังสามารถทำปฏิกริยา กับอัลคาไลได้อีกด้วย โดยเฉพาะในกรณี

ของอัลคาไลไฮดรอกไซด์พบว่าไฮดรตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ได้มีความแข็งแรงสูงกว่าไฮดรตที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1) ปฏิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ [10]

- องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
- ความเข้มข้นของด่างอัลคาไลในระหว่างทำปฏิริยา
- ปริมาณที่ไม่เป็นผลึกของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
- ความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- อุณหภูมิในขณะที่ทำปฏิริยา

ปัจจัยเหล่านี้มีผลซึ่งกันและกัน จึงเกิดความยุ่งยากในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ ซึ่งกันและกัน ดังนั้น ASTM C989 [12] จึงแนะนำให้ควรใช้ค่าดัชนีของตะกรันเป็นดัชนีชี้ถึงความสามารถในการทำปฏิริยา นอกจากนี้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดควรได้รับการทดสอบก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติและคุณภาพตามต้องการ

2.1.4.5 ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตสด

โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีความสามารถในการเทและเขย่าหรือทำให้แน่นได้ง่ายกว่าคอนกรีตธรรมดา การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตออกไปในกรณีที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ เวลาการก่อตัวที่ยืดออกไปจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคอนกรีต ปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปเวลาการก่อตัวจะยืดออกไปราว 1/2 ถึง 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา [13] การใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเร่งการก่อตัวของคอนกรีตจะสามารถชดเชยผลกระทบของการก่อตัวที่ยืดออกไปได้ดี

การเข้มน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กล่าวคือ ถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้การเข้มน้ำลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์การเข้มน้ำของคอนกรีตจะสูงขึ้น อัตราการสูญเสียน้ำของคอนกรีตที่มี

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันหรือลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด [14]

2.1.4.6 ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การบ่มคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพเพราะคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะมีปัญหาเรื่องการสูญเสียกำลังหากหยุดบ่มภายหลังจากหล่อ 3 วันไปแล้ว ซึ่งจะคล้ายกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 และอัตราการสูญเสียกำลังของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสูงกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป มีแนวโน้มที่จะเสี่ยงอันตรายมากกว่าคอนกรีตธรรมดาในกรณีที่ไม่มีการบ่มที่ดี

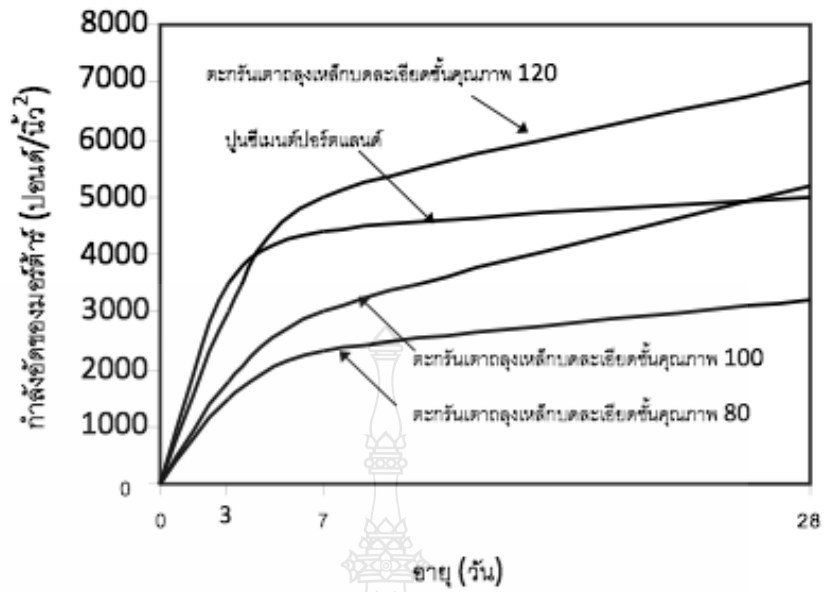
การพัฒนากำลังคอนกรีตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับคุณภาพ กล่าวคือการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120 จะทำให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเล็กน้อยในช่วงอายุ 1 ถึง 3 วัน และให้กำลังอัดสูงกว่าเมื่ออายุเกิน 7 วันไปแล้วแต่การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 80 และ 100 จะให้กำลังที่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นส่วนใหญ่ [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.1

นอกจากนี้การพัฒนากำลังยังขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูง ค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมอยู่จะมีค่าสูงขึ้นด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดอย่างมาก กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่อายุต่ำกว่า 28 วันจะลดลงเมื่อปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มขึ้นแต่หลังจากอายุ 28 วัน การพัฒนากำลังของส่วนผสมที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงจะพัฒนาได้ดีกว่า โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 จะให้กำลังสูงสุด [13]

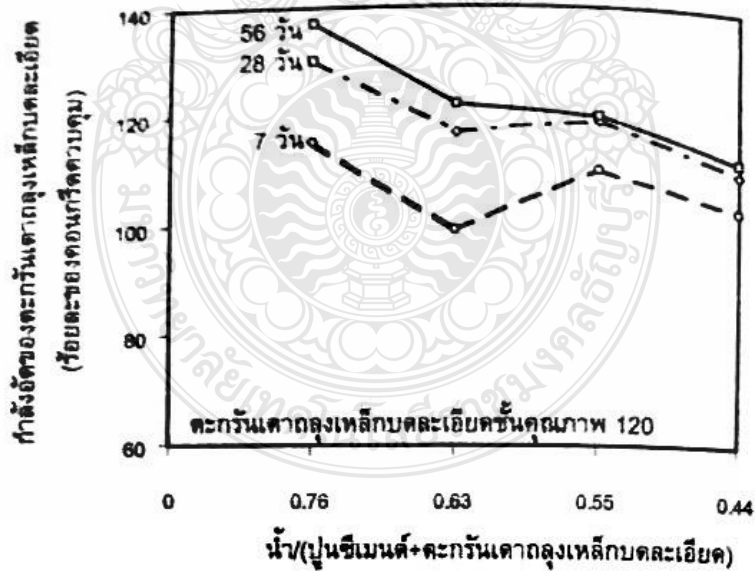
การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม และทำให้คอนกรีตที่บ่มน้ำขึ้นและการซึมผ่านน้ำจะลดลงอย่างมากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ยิ่งปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากจะยิ่งลดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตได้มากขึ้นเพราะ โครงสร้างของโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีแนวโน้มที่บ่มน้ำมากกว่ากรณีของซีเมนต์เพสต์ล้วน

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมี C_3A ถึงร้อยละ 12 ให้ผลการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (C_3A ไม่เกินร้อยละ 5) ซึ่งความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเนื่องมาจากคอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำ การที่ $Ca(OH)_2$ และอัลคาไลทำปฏิกิริยากับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดได้เป็น C-S-H จึงเหลืออัลคาไลและ $Ca(OH)_2$ น้อยลงในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟต การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัว เนื่องจากปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกา แต่ยังคงใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณ สูงถึงร้อยละ 40 ถึง 65 ของวัสดุประสานจึงจะสามารถลดปัญหานี้ได้ [14]

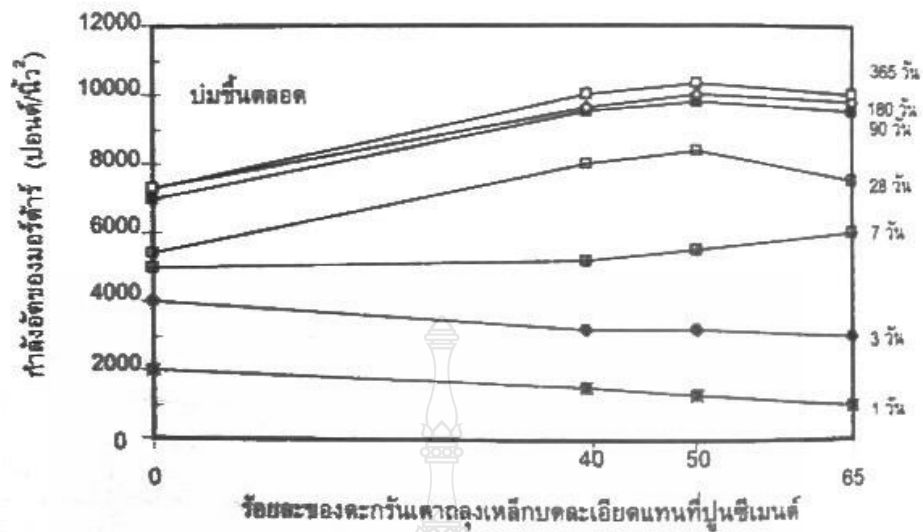
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและการต้านทานสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลักกันของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดพบว่ามีความสามารถเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป แต่การคืบและการหดตัวมีแนวโน้มว่าคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีค่าสูงกว่าของคอนกรีตธรรมดา ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีสีจางกว่าสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นเมื่อหล่อเป็นคอนกรีตแล้วจึงอาจมีสีออกไปทางเขียวอ่อนได้ นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีของกำมะถันจากซัลไฟด์กับส่วนผสมอื่นๆ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [10] การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปรับปรุงด้วยตะกรันหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก Type IS ถือว่าเป็นปูนซีเมนต์เทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C595 [14] ดังนั้นจึงสามารถใช้กับงานทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยกเว้นในกรณีที่ต้องการกำลังสูงในช่วงอายุต้นของคอนกรีต นอกจากนี้ยังสามารถใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมกับปูนซีเมนต์ในขณะผสมคอนกรีตก็ได้โดยปริมาณและอัตราส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดขึ้นอยู่กับชนิดของงานคอนกรีตแต่ละงาน



รูปที่ 2.1 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120, 100 และ 80 ตามมาตรฐาน ASTM C 989 ผลสมอยู่ร้อยละ 50 เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐาน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [13]



รูปที่ 2.3 ผลกระทบเนื่องจากปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ [13]

2.1.5 ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume)

ซิลิกาฟุ้ง ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed Silica Fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000°C ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO ซึ่งต่อมาจะออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ [14] โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ $0.1 \mu\text{m}$ และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง $25 \text{ m}^2/\text{g}$ (โดยวิธี Nitrogen Absorption) ขนาดของซิลิกาฟุ้ง ($0.1 \mu\text{m}$) เป็นขนาดที่เล็กมากๆ กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่เล็กมากๆ จึงมีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก ปัญหาของซิลิกาฟุ้งที่พบบ่อยเมื่อใช้ในคอนกรีตคือต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิม สาเหตุเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆ ของซิลิกาฟุ้งจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้าโรงงานของ Silicon Metal and Ferrosilicon Alloy จะมีผลพลอยได้ของซิลิกาฟุ้งที่ร้อยละ 75 หรือมากกว่าจะประกอบด้วยซิลิกอนกว่าร้อยละ 85 ถึง 95 ที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกซึ่งพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนในโรงงาน Ferrosilicon จะมีผลพลอยได้ของซิลิกอนประมาณร้อยละ 50 และพบว่าซิลิกาที่มีอยู่จะน้อยและเป็น

ผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ่มเหล่านี้ในคอนกรีตไม่ดีนักเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ [17]

2.1.5.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ่มคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟุ่มที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี SiO_2 ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO_2 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ่มมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน จะพบว่ามียังองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 2.6

2.1.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติ ทางกายภาพของซิลิกาฟุ่มที่เห็นชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงสีค่อนข้างดำหรือเทาหรือ เทาอมขาวที่ละเอียดมาก แต่ถ้าเป็นคอนกรีตซิลิกาฟุ่มจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของ ซิลิกาฟุ่มหลายๆเม็ดเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ่มมีค่าประมาณ 2.2 ความละเอียดทดสอบโดยวิธีของเบลนมีค่าประมาณ 150,000 ซม²/ก ขณะที่ของปูนซีเมนต์มีค่าเพียง 3400 ซม²/ก ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อขยายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 μm ขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 15 μm เนื่องจากมีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย ดังนั้นจึงนิยมนำซิลิกาฟุ่มมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า คอนกรีตซิลิกาฟุ่ม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ่ม, เถ้าถ่านหิน, และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I สามารถดูได้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)					
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน แม่เหมา	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟุ่ม	เถ้าแกลบ บด	ดินขาวเผา
SiO ₂	20	48	37	92	90	55
Al ₂ O ₃	5	26	11	0.7	0.5	40
Fe ₂ O ₃	3	10	0.3	1.2	2.0	0.5

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)					
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน แม่เหมา	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟุ่ม	เถ้าแกลบ บด	ดินขาวเผา
CaO	60	5	40	0.2	0.5	-
MgO	1.1	2	7	0.2	0.2	-
SO ₃	2.4	0.7	0.3	-	1.5	-
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.3	2.6	-	-
LOI.	2	3	-	-	4.7	-

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ่ม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบบด ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน แม่เหมา	เถ้าแกลบ บด	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟุ่ม
ความละเอียด-ของ เบลน (ซม ² /ก)	3,400	3,500	8,500	3,500	200,000
ความถ่วงจำเพาะ สี	3.15	2.0	2.2	2.9	2.2
	เทา	เทาอ่อนจนถึง เทาเข้มน้ำตาล สีน้ำตาล	เทาถึงเทา ดำ	เทา	เทาอมขาว จนถึงเทาตัว

2.1.5.3 การใช้ซิลิกาฟุ่มในคอนกรีต

ในประเทศไทย, อเมริกา และ ยุโรป จะใช้ซิลิกาฟุ่มในการผสมคอนกรีต โดยการผสม “แยก” กล่าวคือใส่ซิลิกาฟุ่มในการผสมคอนกรีตแต่ที่ประเทศแคนาดานอกจากการผสมแยกแล้ว ยังมีการใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ โดยมีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ราวร้อยละ 8 เนื่องจากซิลิกาฟุ่ม มีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่งหรือใช้งานมากพอสมควรเพราะหากไม่ระวังให้ดีอาจปลิวไปตามลมได้ง่ายดังนั้นจึงมีการใช้ซิลิกาฟุ่มในรูปที่ผสมกับน้ำให้อยู่ในรูปของเหลวข้น (Slurry Form) อย่างไรก็ตามโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จหลายๆแห่งยังคงใช้ซิลิกาฟุ่มในรูปของผงหรือคอนกรีตซิลิกาฟุ่ม เช่นเดิม สำหรับอันตรายของการสูดซิลิกาฟุ่มเข้าไปทางลมหายใจยังไม่มีรายงานที่เด่นชัดนัก แต่วัสดุที่ละเอียดขนาดนี้ไม่ว่าจะเป็นอะไรก็ตาม ล้วนเป็นวัสดุหรือสิ่งแปลกปลอมของร่างกายทั้งสิ้น จึงควรหลีกเลี่ยงให้ได้รับเข้าสู่ร่างกายให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ นอกจากนี้ U.S. Occupational Safety and Health Agency (OSHA) ได้ระบุไว้ว่าปริมาณฝุ่นในที่ซึ่งปฏิบัติงานไม่ควรสูงเกิน 15 มก/ม³ ส่วน American Conference of Governmental Industrial Hygienists ให้ค่าที่ต่ำกว่าคือปริมาณของฝุ่นในที่ทำงานไม่ควรเกิน 10 มก/ม³ ซึ่งถ้าปริมาณของฝุ่นที่เกิดในที่ทำงานมีค่าเกินนี้จะต้องใช้หน้ากากกันฝุ่นสวมป้องกันในขณะที่ทำงานการใช้คอนกรีตซิลิกาฟุ่มแทนซิลิกาฟุ่มจะสามารถลดปัญหานี้ได้เพราะคอนกรีตซิลิกาฟุ่มจะมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และไม่ปลิวลมง่ายนัก

1) ผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อความสามารถในการเท และการเข็มน้ำเนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงมาก ดังนั้นเมื่อใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้นซึ่งแนวทางแก้ไขในปัญหานี้คือการใส่สารลดน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษเข้าช่วยเพื่อไม่ให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตสูงจนเกินไปเพราะจะทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลงตามกฎของAbram's [18] ส่วนการเข็มน้ำในคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มพบว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ซิลิกาฟุ่ม

ผลกระทบต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นในคอนกรีต พบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตไม่ได้ลดอุณหภูมิของคอนกรีต ให้ต่ำลง ดังนั้นการใช้ซิลิกาฟุ่มเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดอุณหภูมิเนื่องจากปฏิกิริยา ไฮเดรชันจึงควรหลีกเลี่ยง

2) ผลกระทบต่อกำลังอัด ซิลิกาฟุ่มนิยมใช้เป็นวัสดุหนึ่งในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก (120 MPa ที่อายุ 90 วัน) โดย การใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งคอนกรีตที่ได้นอกจากจะมีกำลังอัดที่สูงมากแล้วยังมีค่าการซึมน้ำผ่าน ที่ต่ำมากด้วย เพราะซิลิกาฟุ่มจะไปอุดพวก โครงสร้างของ Pore ของไฮเดรตซีเมนต์เพสต์ไว้การใช้ซิลิกาฟุ่มในปริมาณที่เหมาะสมแทนที่ปูนซีเมนต์ใน

คอนกรีต จะมีประสิทธิภาพเหมือนใช้ปูนซีเมนต์ถึง 3 หรือ 4 เท่า เช่น ใช้ซิลิกาฟุ่ม 1 กก. แทนที่ปูนซีเมนต์ 3 หรือ 4 กก. ในคอนกรีตแต่ยังคงให้คอนกรีตที่มีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วันเท่ากันเพื่อให้เห็นภาพของการใช้ซิลิกาฟุ่มในคอนกรีต ขอยกตัวอย่างส่วนผสมคอนกรีตของ R.D. Hooton ที่ตีพิมพ์ใน ACI Material Journal No. 90, March-April 1993 ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 15 และ 20 ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ + ซิลิกาฟุ่ม) โดยมีผลการทดลองตามตารางที่ 2.13 ในการทดลองของ Hooton พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนผสมแทนที่ในปูนซีเมนต์มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วันค่อนข้างมาก กล่าวคือคอนกรีตธรรมดา(ไม่มีซิลิกาฟุ่ม) มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 55.6 MPa แต่เมื่อใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 (ส่วนผสมที่ 2), ร้อยละ 15 (ส่วนผสมที่ 3), และร้อยละ 20 (ส่วนผสมที่ 4) ทำให้กำลังอัดมีค่าเป็น 70.7 MPa, 75.2 MPa, และ 74.2 MPa ตามลำดับ แต่คอนกรีตเหล่านี้เมื่อปล่อยให้มียุครบ 5 ปี กลับพบว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มมาก (ร้อยละ 20) มีค่ากำลังอัดลดลง กล่าวคือมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 70.3 MPa. ส่วนที่มีซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 และ 15 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 79.6 MPa และ 68.6 MPa ตามลำดับขณะที่คอนกรีตที่ไม่มีซิลิกา-ฟุ่มกลับมีค่ากำลังอัดที่เพิ่มจาก 55.6 MPa ที่อายุ 28 วันมาเป็น 86.0 MPa กำลังที่ตีทั้งที่อายุ 28 วัน และ 5 ปี ที่อายุ 5 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 10 ของวัสดุประสานจะให้ค่า

ตารางที่ 2.8 อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีและไม่มีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนผสม

ส่วน ผสม ที่	อัตราส่วนผสม (kg/m ³)					สารลดน้ำ พิเศษ (ml/kg CM)	ค่า ยวบตัว (mm)	กำลังอัด ที่ 28 วัน (MPa)	กำลังดึง ผ่าซีกที่ 28 วัน (MPa)
	ปูนซีเมนต์	ซิลิกาฟุ่ม	ทราย	หิน	น้ำ				
1	401	0	729	1211	141	16.1	75	55.6	5.2
2	361	40	725	725	141	18.2	75	70.7	6.3
3	341	60	719	719	140	21.4	60	75.2	6.2
4	320	80	716	716	139	26.2	60	74.2	4.6

2.1.5.4 การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี จากการวิจัยพบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มในคอนกรีตช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต, การแทรกซึมของคลอไรด์รวมถึงการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำเค็ม (น้ำทะเล) ด้วย เหตุที่การกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีข้างต้นลดลง อาจเนื่องมาจากการที่โครงสร้างของ Pore ในคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กลงนั่นเอง

2.1.5.5 ปฏิริยาอัลคาไล-ซิลิกา พบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มจะทำให้การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาในคอนกรีตลดลง Malhotra กล่าวว่า การใช้ซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 15 ช่วยลดการขยายตัวของปฏิกิริยาของอัลคาไล-ซิลิกาได้ดีเช่นเดียวกับการใช้เถ้าถ่านหินร้อยละ 30 หรือใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 50 ส่วน Hooton รายงานว่าการใช้ซิลิกาฟุ่ม ถึงร้อยละ 20 จะลดการขยาย-ตัวได้มากกว่าการใช้ซิลิกาฟุ่ม ที่ร้อยละ 5, 10, หรือ 15 และการใช้เพียงร้อยละ 10 ก็เพียงพอที่จะลดปัญหาการขยายตัวของปฏิกิริยาของอัลคาไล-ซิลิกาได้

2.1.5.6 การแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกัน การใช้ซิลิกาฟุ่มจะเพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของ น้ำสลับกันได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีซิลิกาฟุ่ม ซึ่งอาจเนื่องมาจากการที่ค่าซึมผ่านน้ำต่ำและ โครงสร้างของ Pore ที่เล็กลง จึงทำให้น้ำที่ค้างอยู่ภายในมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของคอนกรีตทั่วไป

2.1.5.7 สรุปในปัจจุบันพบว่าซิลิกาฟุ่มนิยมใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูงและเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตเป็นหลัก สิ่งที่ควรระมัดระวังให้มากคือการผสมซิลิกาฟุ่มในคอนกรีต ควรมีความสม่ำเสมอ ตลอดทั่วกัน ควรทำการตรวจสอบว่าซิลิกาฟุ่มสามารถใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษได้ดีเพียงใดเพื่อที่จะได้ไม่ต้องใช้ปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตมากเกินไป ข้อสำคัญอีกข้อหนึ่งคือควรทำการตรวจสอบทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เพราะ ราคาของซิลิกาฟุ่มมีราคาแพงกว่าปูนซีเมนต์มากเพราะยังไม่สามารถผลิตขึ้นใช้ ได้ภายในประเทศ กล่าวคือในสหรัฐอเมริกาพบว่าราคาของซิลิกาฟุ่มมีราคาสูงกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา ราว 1 ถึง 3 เท่าแต่ในประเทศไทยมีราคาต่างกันเกือบ 15 ถึง 20 เท่า นอกจากนี้พึงระลึกเสมอว่า ซิลิกาฟุ่มเป็นผลพลอยได้ ซึ่งในอดีตก่อนที่จะมีการศึกษาเพื่อนำมาใช้งาน ได้นั้น ซิลิกาฟุ่มก็คือขยะหรือของเสียที่ต้องนำไปกำจัดทิ้ง เสียทั้งค่าขนส่งและค่าทิ้งจำนวนมาก แต่ขณะนี้ซิลิกาฟุ่มเป็นวัสดุที่ขายได้และขายในราคาแพงมากด้วย ส่วนวิศวกร-ไทยของเรา(รวมทั้งผู้เขียนด้วย) ยังคงเป็นผู้ใช้ (ซิลิกาฟุ่ม-ขยะ-ผลพลอยได้) และผู้รับเอาเทคโนโลยีของชาวบ้านมาใช้ได้อย่างได้ผลและซื้อตัดอย่างเหนียวแน่น

2.1.6 ผงหินปูน (Limestone Powder) [19]

ผงหินปูนเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของผงหินปูนจะประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

2.1.6.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุเฉื่อยมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จะมีส่วนช่วยลดการหดตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติของวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีจึงทำให้เสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตอีกด้วย ในขณะที่เดียวกันก็อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์เพสต์ สารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) อาจจัดได้ว่าเป็นสารประกอบที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี อย่างไรก็ตามสารประกอบดังกล่าวทั้งสองนั้นก็สามารถที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ ถ้าหากสารประกอบดังกล่าวมีความละเอียดมากเพียงพอหรือให้พลังงานความร้อนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมี

2.1.6.2 วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

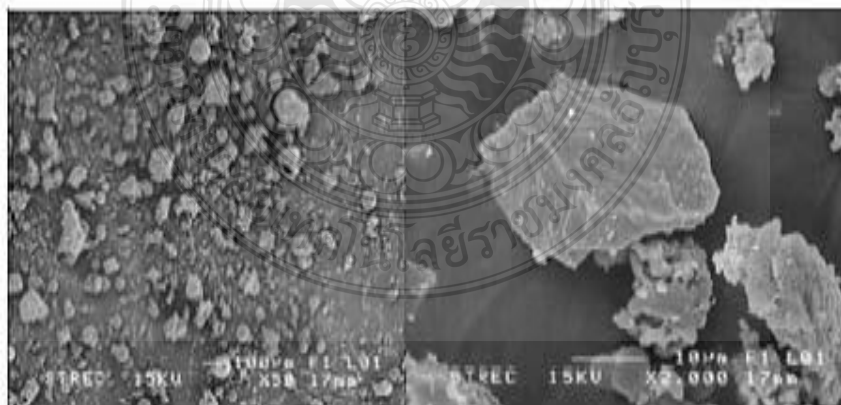
ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ การนำเอา ผงหินปูนและวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆเมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้งานเชิงพาณิชย์

2.1.7 ถ้ำก้นเตา (Bottom Ash)

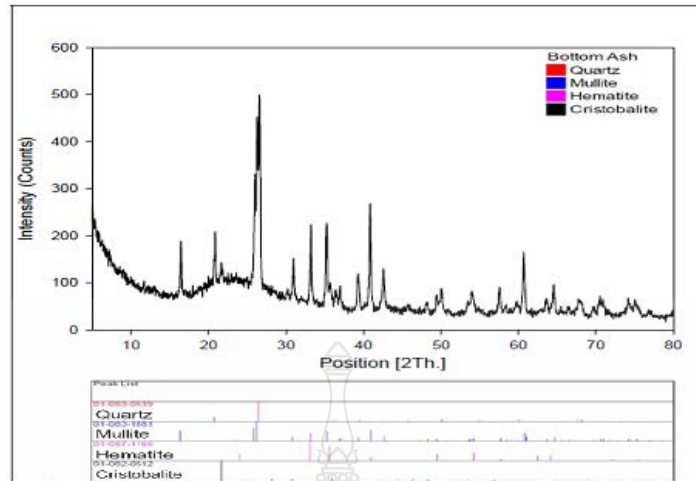
เป็นผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาถ่านหินในอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าประกอบไปด้วยขี้ถ้ำอนุภาคใหญ่และบางส่วนของถ่านหินขนาดเล็กซึ่งยังไม่ได้ถูกเผาตกลงสะสมรวมตัวกันอยู่ที่ก้นเตาซึ่งมีน้ำหล่อเย็นสำหรับเตาเผาถ้ำก้นเตามักจึงอยู่ในสภาพเปียกชื้นมีปริมาณประมาณร้อยละ 20 ของขี้ถ้ำทั้งหมดรูปร่างและลักษณะผิวของถ้ำก้นเตาเกิดจากการปะทะกันของอนุภาคถ่านหินจึงมีรูปร่างไม่แน่นอน มีความพรุนและมีผิวที่ขรุขระ สีและรูปร่างของถ้ำก้นเตาจะมีสีเทาดำ เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าจุดหลอมเหลวของถ่านหิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของ Fe_2O_3 และปริมาณคาร์บอนในถ่านหิน ซึ่ง Fe_2O_3 จะมีสีน้ำตาลถ้ำก้นเตา (Bottom Ash) เป็นขี้ถ้ำที่มีขนาดใหญ่ขนาดทั่วไปประมาณ 0.50-10.00 มิลลิเมตรถ้ำก้นเตามีคุณสมบัติที่สำคัญคือเป็นวัสดุมวลเบา ซึ่งหากนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างชั้นทางจะสามารถช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างทางอีกทั้งยังเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากรทางธรรมชาติ

2.1.7.1 องค์ประกอบทางเคมี

1) ถ้ำก้นเตาโดยวิธี X-Ray Diffraction พบว่าถ้ำก้นเตาประกอบด้วยสารหลายชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของสารมาตรฐานพบว่า ถ้ำก้นเตามีองค์ประกอบของสารประเภทซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ Quartz, Cristobalite และ Mullite รูปร่างอนุภาคของถ้ำก้นเตาจากการทดสอบโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope พบว่าถ้ำก้นเตามีลักษณะโครงสร้างของอนุภาคขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคถ้ำก้นเตา



รูปที่ 2.5 กราฟระหว่าง Intensity และ Theta ของเถ้าก้นเตาจากการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD

2) คุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของเถ้าหนักพบว่ามีลักษณะคล้ายทราย ส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลเข้มถึงดำสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ปริมาณความชื้นในเนื้อวัสดุร้อยละ 11.93 - 12.66 ความถ่วงจำเพาะ(GA) 2.32 อนุภาคของเถ้าก้นเตามีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันไปโดยลักษณะพื้นผิวมีทั้งเรียบและขรุขระ มีลักษณะความเป็นเหลี่ยมคมและมีขนาดเทียบเท่าทราย (Sand) , กรวด (Gravel) , ตะกอนทราย (Silt) และดินเหนียว (Clay) มีการกระจายตัวด้วยขนาดละเอียดที่ไม่สม่ำเสมอ (Poorly-graded) สามารถจำแนกด้วยระบบ Unified Soil Classification System และ AASHTO จัดอยู่ในกลุ่ม SP และ A-3

2.1.7.2 คุณสมบัติเชิงกลของเถ้าก้นเตา

- 1) การต้านทานการสึกหรอและความคงทนนั้นเถ้าก้นเตามีความต้านทานการสึกหรอและความคงทนน้อยเนื่องจากเป็นวัสดุเม็ดละเอียด
- 2) การดูดซึมน้ำของเถ้าหนัก เนื่องจากเถ้าหนักมีขนาดเม็ดวัสดุขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากจึงมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าวัสดุมวลรวมโดยทั่วไป
- 3) ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาเมื่อเทียบกับวัสดุมวลรวมจะมีค่าที่น้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำมาใช้งานจะทำให้มีน้ำหนักคงที่ลดลง
- 4) ความเหนียวของวัสดุ เนื่องจากเถ้าก้นเตาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากการเผาไหม้ของถ่านหินดังนั้น เถ้าก้นเตาจึงเป็นวัสดุประเภท Non-Plastic
- 5) ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเถ้าก้นเตาจะน้อยกว่าวัสดุมวลรวมโดยทั่วไป ทั้งรูปแบบการบดอัดแบบมาตรฐานและการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

6) ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC.)จะสูงกว่าวัสดุรวมรวมโดยทั่วไปทั้งรูปแบบการบดอัด แบบมาตรฐานและการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

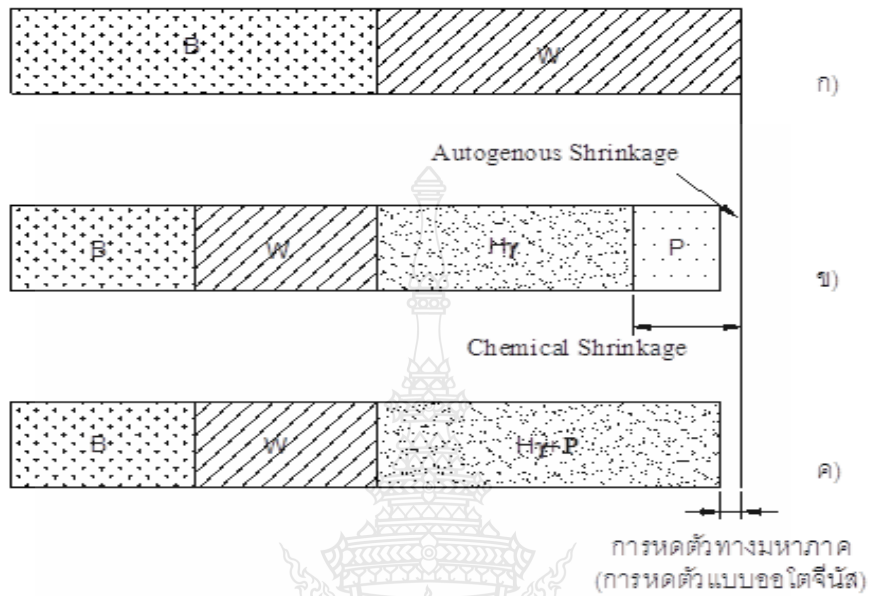
2.1.8 การหดตัวของแบบออโตจีนัส (Autogenous Shrinkage)

2.1.8.1 กลไกของการหดตัวของแบบออโตจีนัส

การหดตัวของแบบออโตจีนัสเป็นการหดตัวที่ส่วนหนึ่งเป็นการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Chemical Shrinkage) ที่เกิดหลังจากการก่อตัวขั้นสุดท้ายของคอนกรีต รวมทั้งอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการสูญเสียความชื้นในช่องว่างคาปิลลารี (Capillary Pores) ในพาสต์ เนื่องจากความชื้นบางส่วนถูกใช้ในปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ ทำให้เกิด Capilla Section ขึ้นในช่องว่างคาปิลลารี มีผลให้คอนกรีตหดตัวจากแรง Capilla Section นี้ วัสดุประสานในที่นี้หมายถึงความรวมถึงปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานทั้งหลาย เช่น เถ้าลอย เถ้าตะกอนเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น การหดตัวของแบบออโตจีนัสแตกต่างจากการหดตัวของแบบแห้งตรงที่ไม่ได้มีการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่เป็นการสูญเสียความชื้นภายในตัวคอนกรีตเอง การหดตัวของแบบออโตจีนัสเกิดขึ้นทันทีหลังจากที่ผสมคอนกรีตเสร็จ แต่ในทางปฏิบัติการจะมีผลต่อปริมาตรหลังจากเทคอนกรีตเสร็จแล้ว เนื่องจากการหดตัวในช่วงก่อนการเทคอนกรีตจะไม่มีผลต่อปริมาตรของโครงสร้างที่จะเท และจะมีผลทางโครงสร้างหลังจากที่คอนกรีตก่อตัวแล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก่อนการก่อตัวจะไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต ดังนั้นจึงนิยามวัดค่าการหดตัวของแบบออโตจีนัสโดยเริ่มต้นจากระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น

ที่ผ่านมการหดตัวของแบบนี้ไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ในอดีตมักเป็นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคาปิลลารีมาก มีขนาดใหญ่และต่อเนื่อง ดังนั้นความชื้นในคอนกรีตจึงสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกจากบริเวณหนึ่งไปอีกบริเวณหนึ่ง ไปยังอีกบริเวณหนึ่ง และน้ำจากการบ่มก็สามารถเข้าถึงภายในคอนกรีตได้ทำให้การหดตัวของแบบออโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้ในคอนกรีตเหล่านี้มีค่าต่ำจนไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาประกอบในการออกแบบ แต่ในทางตรงกันข้าม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตชนิดใหม่ๆขึ้นมาหลายชนิด ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำและปริมาณซีเมนต์ผสมมาก เช่น คอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete) และคอนกรีตที่ไม่ต้องใช้เครื่องเขย่า (Self-Compacting Concrete) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาแล้ว คอนกรีตเหล่านี้จะมีปริมาณช่องว่างคาปิลลารีที่น้อยกว่า มีขนาดเล็กกว่า และมีความต่อเนื่องของช่องว่างคาปิลลารีน้อยกว่าหรืออีกนัยหนึ่ง มีค่าความชื้นน้ำต่ำมาก ดังนั้นเมื่อความชื้นในช่องว่างคาปิลลารีถูกใช้ในปฏิกิริยา จึงเป็นการยกที่ความชื้นจากส่วน

อื่น หรือความชื้นจากการบ่มจะเข้ามาเสริมในบริเวณดังกล่าวได้ จึงทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสในคอนกรีตเหล่านี้สูงจนไม่สามารถละลายได้ในการออกแบบ



ซึ่ง B : วัสดุประสาน

W : น้ำ

P : ช่องว่างที่แทรกตัวอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

H_T : ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

รูปที่ 2.6 แบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และอโตจีนัส [2]

ในรูปที่ 2.6 อธิบายถึงแบบจำลองการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีและอโตจีนัส โดย ก) ปริมาตรของวัสดุประสานน้ำ ก่อนทำการผสม ข) ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไปแล้วบางส่วน ปริมาตรที่ทดลองทั้งหมดนี้คือ การหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมักไม่มีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีตเพราะการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกๆ และการหดตัวที่เกิดขึ้นมักจะเกิดในช่องว่างภายในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การหดตัวแบบนี้เป็นผลทางจุลภาค (Microscopic Volume Reduction) ซึ่งไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงในคอนกรีต หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความชื้นบางส่วนจะถูกดึงจากช่องว่างคาпил

ลารี เพื่อไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน เรียกกระบวนการนี้ว่า “การสูญเสียความชื้นภายในคอนกรีต” ถ้าไม่มีน้ำเข้าไปทดแทนในส่วนที่นำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวขึ้น เรียกว่า การหดตัวแบบอโตจีนัส ซึ่งการหดตัวแบบนี้ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงของคอนกรีต จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้น ค) แสดงส่วนที่หดทางมหภาค โคนส่วนที่หดตัวทางจุลภาคจะเป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันและไม่ทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นในคอนกรีต ส่วนการหดตัวทางมหภาคเป็นการหดตัวที่มีผลต่อปริมาตรโดยรวมของคอนกรีต ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในคอนกรีต

การหดตัวแบบนี้จะมีค่ามากขึ้นถ้าคอนกรีตยังมีความชื้นน้ำต่ำเช่นคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมหรือวัสดุปอซโซลานที่เป็นขนาดเล็กกว่าขนาดของปูนซีเมนต์มาก เช่น เถ้าลอยที่ผ่านการคัดขนาดเป็นต้น คอนกรีตที่ใช้เถ้าตะกอนลึงเหล็กซึ่งมักมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ในปริมาณมากมักจะมีการหดตัวแบบอโตจีนัสสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งตะกอนละเอียดมากสำหรับปูนซีเมนต์ ได้มีการพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูงจะมีหารหดตัวแบบอโตจีนัสสูง การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบนี้ เกิดขึ้นต่อเมื่อมีการยัดครั้งแรกขึ้น ดังนั้นบางครั้งอาจจะพบการแตกร้าวขึ้นภายในคอนกรีตโดยที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจากบริเวณผิวของคอนกรีตได้ เนื่องจากคอนกรีตข้างในหดตัว แต่คอนกรีตบริเวณผิวซึ่งได้รับน้ำจากการบ่มที่เพียงพอไม่หดตัว

2.1.8.2 บริเวณที่อาจทำให้เกิดรอยแตกร้าวจากการหดตัวแบบอโตจีนัส

บริเวณที่น้ำบ่มคอนกรีตไม่สามารถเข้าไปถึงได้อย่างเต็มที่และเป็นบริเวณที่ถูกยัดครั้งแรกด้วยสิ่งที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่า เช่นถูกยัดครั้งแรกด้วยเหล็กเสริม ถูกยัดครั้งแรกโดยคอนกรีตที่เทไว้แล้วหรือแม้แต่ถูกยัดครั้งแรกโดยเนื้อคอนกรีตบริเวณที่ผิวที่ได้รับการบ่มอย่างเพียงพอ เป็นต้น

2.1.8.3 ช่วงเวลาที่เกิดการหดตัวแบบอโตจีนัส

การหดตัวแบบอโตจีนัสจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุประสานกับน้ำจึงทำให้การหดตัวแบบนี้มีอัตราสูงในช่วงวันแรกๆ และจะค่อยๆมีอัตราต่ำลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป

2.1.8.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนัส

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบอโตจีนัสมีดังต่อไปนี้

1) ความเร็วของการดำเนินปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยมาถ้าปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเร็วทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสเกิดความเร็วและสูงตามไปด้วย ดังนั้นการหดตัวแบบอโตจีนัสจะสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิการบ่มสูงขึ้น ในปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็วขึ้น เช่น มีปริมาณ C_3A สูง เป็นต้น

2) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ถ้ามีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ ก็จะทำให้เกิดการหดตัวแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากความชื้นน้ำจะต่ำลง และขนาดช่องว่างอะปิลลารีก็เล็กลงด้วย

3) ลักษณะโครงสร้างช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ยังมีขนาดเล็กและมีความไม่ต่อเนื่องก็จะทำให้การหดตัวแบบอโตจีนัสสูงขึ้น เนื่องจากน้ำอิสระเคลื่อนตัวไม่สะดวกและช่องว่างมีขนาดเล็กจะทำให้เกิดแรงดึงแบบอะปิลลารีสูง

อย่างไรก็ตามเพื่อป้องกันปัญหาจากการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบอโตจีนัส จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของการใช้วัสดุจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาใช้ในงานคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามงานเหล่านั้นมีจำนวนน้อยที่สนใจศึกษาในด้านพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีต นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าจะมีผลการศึกษาดังกล่าวนี้ ผลเหล่านั้นอาจไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรงสำหรับประเทศไทย ทั้งนี้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมและสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาในเรื่องเหล่านี้สำหรับเพื่อนำข้อมูลมาใช้งานในประเทศไทยต่อไป [4]

2.1.9 การหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage)

เกิดจากการที่น้ำในคอนกรีตระเหยออกมาทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว การหดตัวแบบแห้งในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นการหดตัวที่สำคัญ ยิ่งกว่าการหดตัวที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หากการออกแบบและการก่อสร้างคอนกรีตไม่ได้เผื่อการหดตัวแบบแห้งอย่างเพียงพอแล้ว จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวและการบิดตัวของคอนกรีตได้ ซึ่งส่วนมากเกิดขึ้นเนื่องจากการยัดรีงของโครงสร้างตัวอย่างที่เห็นได้ชัดในเรื่องนี้ คือ การตัดหรือสร้างร่องในพื้นถนนหรือพื้นคอนกรีตสำหรับการหดตัวและการขยายตัวของคอนกรีต เพื่อป้องกันการแตกร้าวที่เกิดขึ้นแบบไม่มีทิศทางและแลดูไม่สวยงาม [5]

2.1.9.1 กลไกของการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ เพราะโดยทั่วไปมวลรวมมีการหดตัวต่ำมาก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของซีเมนต์เพสต์กับความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน

1) การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำในโพรงคาปิลลารีเป็นหลัก โดยในช่วงแรกน้ำในโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่จะถูกขับออกมาก่อนตามด้วยน้ำในโพรงคาปิลลารีที่มีขนาดเล็กลง การสูญเสียน้ำที่เหลืออยู่ในโพรงเกิดเป็นผิวโค้ง (meniscus) และการเกิดแรงตึงผิว (surface tension) ซึ่งมีขนาดสูงขึ้นเมื่อโพรงมีขนาดเล็กลง

นอกจากนี้การสูญเสียน้ำดูดซับที่อยู่ในซอก (hindered adsorbed water) หรือที่อยู่ในโพรงขนาดจิ๋ว (micropore) มีส่วนทำให้เกิดการหดตัว การหดพบว่าแผ่น CSH ซึ่งการเคลื่อนตัว และยึดเกาะกันดังกล่าวเป็นส่วนของการหดตัวอย่างถาวรซึ่งคืนกลับไม่ได้ (irreversible shrinkage)

2) การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ใน ช่วงนี้เกิดในอัตราที่ต่ำกว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในโพรงคาปิลลารีถูกขจัดออกไปและแรงดึงผิวจะหมดไป การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสีย น้ำดูดซับ (adsorbed water) ที่ผิวของอนุภาคของเจลเป็นหลัก ซึ่งเริ่มมีความสำคัญเมื่อความหนาของชั้นน้ำลดลงเหลือเพียง 2 โมเลกุล มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 การหดตัวจากการสูญเสีย น้ำอาจยังคงมีอยู่แต่ไม่มากนักเมื่อความชื้นลดลงจะเกิดสูญเสีย น้ำที่ดูดซับชั้นสุดท้ายและทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น การหดตัวในช่วงนี้เป็น การหดตัวแบบคืนกลับได้ (reversible shrinkage)

3) การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 10 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ใน ช่วงนี้เกิดขึ้นในอัตราที่สูง การตากแห้งที่สภาวะนี้ทำให้น้ำระหว่างแผ่น C-S-H (interlayer water) ถูกขจัดออกไป การสูญเสีย น้ำในช่วงนี้ทำให้แผ่น C-S-H เคลื่อนที่เข้าหากัน การหดตัวจะเป็นแบบคืนกลับได้ แต่ถ้าหากแห้งรุนแรงและนานพอ แผ่น C-S-H ที่เคลื่อนที่เข้าใกล้กันจะสามารถยึดเกาะกัน ได้ ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวแบบถาวร

2.1.9.2 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของคอนกรีต

องค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของคอนกรีต ได้แก่ มวลรวม ปริมาณของน้ำ และปูนซีเมนต์ คุณสมบัติของปูนซีเมนต์รูปร่างและขนาดของคอนกรีต เป็นต้น การเสริมเหล็กในคอนกรีตสามารถลดการหดตัวเพราะเหล็กช่วยยึดไม่ให้คอนกรีตหดตัวแต่ทำให้เกิดแรงอัดในเหล็ก และแรงดึงในคอนกรีตได้ คอนกรีตที่อยู่ในอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะเกิดการหดตัวสูง

1) มวลรวมเนื่องจากซีเมนต์เพสต์เป็นต้นกำเนิดของการหดตัว ดังนั้นการเพิ่มปริมาตรของมวลรวมจึงลดปริมาณซีเมนต์เพสต์และการหดตัวได้อย่างดี นอกจากนี้การหดตัวของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม ได้คละมวลรวมที่แข็งแกร่ง มีการดูดซึมน้ำน้อย และมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้คอนกรีตมีการหดตัวน้อย ส่วนกำลังของมวลรวมนั้นไม่เป็นปัจจัยที่สำคัญนัก เพราะกำลังของมวลรวมจะสูงกว่าซีเมนต์เพสต์มาก การใช้หิน แก่ กำลังโมดูลัส ยืดหยุ่น ความพรุน ลักษณะของผิว รูปร่าง ปริมาณ ขนาดและขนาดทราย และมวลรวมเบา ซึ่งจะ ไม่แข็งแกร่งทำให้คอนกรีตมีการหดตัวสูงกว่าการใช้หินควอร์ตซ์ในส่วนผสมของคอนกรีต ขณะที่หินปูนและหินอ่อนจะทำให้หดตัวต่ำ ส่วนหินบะซอลต์ กรวด และหินแกรนิตจะทำให้หดตัวปานกลางขนาดคละ และ

ขนาดของวัสดุผสมจะมีผลทางอ้อมต่อการหดตัวของคอนกรีต คอนกรีตที่มีขนาดกะของวัสดุผสมที่ใช้กันทั่วไปจะมีการหดตัวใกล้เคียงกัน การใช้มวลรวมขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์น้อยลงจึงทำให้การหดตัวน้อยลงด้วย ส่วนรูปร่างของวัสดุผสมจะมีผลเล็กน้อยต่อการหดตัว การใช้มวลรวมก่อนกลมสามารถลดปริมาณน้ำได้ซึ่งการลดปริมาณน้ำจะทำให้การหดตัวแบบแห้งลดลงได้ การเพิ่มปริมาณของหินโดยให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ทำให้การหดตัวลดลงแต่ทำให้ส่วนผสมมีค่าการยุบตัวต่ำลงด้วย

2) ปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์เป็นตัวกำหนดปริมาณและคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการหดตัวของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์อย่างมาก ส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำมากจะมีการหดตัวสูงและการหดตัวจะมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.9 เพราะการมีน้ำในส่วนผสมมากย่อมมีน้ำระเหยออกจากคอนกรีตมากขึ้น การหดตัวของไฮเดรตซีเมนต์มีค่าสัดส่วนตรงกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงประมาณ 0.2 ถึง 0.6

3) ความชื้น อาจแบ่งได้เป็นความชื้นขนาดที่บ่งคอนกรีตและความชื้นของอากาศตอนตกแห้ง การบ่มมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตไม่มากนักเพราะการบ่มที่ดีย่อมทำให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้มากขึ้น และจำนวนของเจลเพิ่มขึ้น เม็ดปูนจะทำปฏิกิริยากับน้ำจนเหลือเม็ดปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาอยู่น้อย ซึ่งเม็ดปูนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ต้านการหดตัว นอกจากนี้การบ่มที่ดีย่อมทำให้โพรงคาปีลลารีน้อยลงและคอนกรีตแข็งแรงขึ้น ดังนั้นการบ่มธรรมดาจึงมีผลต่อการหดตัวไม่มาก การใช้ความดันสูงในการบ่มสามารถลดการหดตัวได้มาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจล ถ้าทิ้งคอนกรีตไว้ในน้ำจะมีการขยายตัวแต่ถ้าทิ้งไว้ในอากาศแห้งจะเกิดการหดตัว ความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพสมดุลมีค่าประมาณร้อยละ 94 สำหรับคอนกรีตที่ตากแห้งแล้วนำมาใส่ในน้ำสามารถขยายตัวกลับคืนมาบางส่วนแต่มีบางส่วนเป็นการหดแบบถาวร และถ้าเอาไปตากแห้งอีกคอนกรีตจะหดตัวได้อีก

ตารางที่ 2.9 ค่าการหดตัวทั่วไปของมอร์ตาร์และคอนกรีต

อัตราส่วน มวลรวม ต่อปูนซีเมนต์	การหดตัวที่อายุ 6 เดือน ($\times 10^{-6}$) ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ			
	0.4	0.5	0.6	0.7
3	800	1200	-	-
4	550	850	1050	-
5	400	600	750	850
6	300	400	550	650
7	200	300	400	500

หมายเหตุ : แท่งทดสอบมีหน้าตัด 127x127 มม. ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50

4) ขนาดและรูปร่างของแท่งทดสอบ อัตราการสูญเสียน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว พื้นที่ผิวที่มากทำให้การสูญเสียน้ำเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต กล่าวคือ คอนกรีตขนาดเล็กจะสูญเสียน้ำเร็วกว่าคอนกรีตขนาดใหญ่ คอนกรีตเมื่อสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัว การหดตัวเกิดขึ้นที่ผิวของคอนกรีตและขยายเข้าไปในส่วนของคอนกรีตซึ่งใช้เวลานานมากเมื่อเป็นคอนกรีตขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับกันว่าการหดตัวจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต โดยการหดตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรของคอนกรีต [4]

2.1.10 การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้วถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

2.1.10.1 แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หินทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อม) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้

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

หมายเหตุ: โดยการทดสอบเพื่อหาปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C 1218/C 1218M: Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete [6]

อย่างไรก็ตามปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้นส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (de-icing salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

- 1) การแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary suction)
- 2) การแพร่ของไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต
- 3) การแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่ใช่อันตรายมากนัก ส่วนความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากมีความ

เข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีต เป็นช่องว่างอิมมิดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย ส่วนในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงถึงแม้ว่าจะมีปริมาณออกซิเจนมาก แต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัด โดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจน ผ่านช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิมมิด (saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไป ทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นอออนของคลอไรด์ (chloride Ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียก (saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของอออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกัน แต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณอออนของคลอไรด์ (chloride ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (threshold content of chloride ions) ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

2.1.10.2 สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed chloride) โดยกลไกดังต่อไปนี้

1) Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Fridel's Salt) หรือ

$3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (calcium chloroferrite) หรือแม้แต่วิวใน โครงสร้างของผลผลิตของ ปฏิริยาไฮดรชั่น

2) Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮดรชั่น เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึด อยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิริยาเช่น มวลรวม หรือ ผงหินปูนได้ด้วย ถึงแม้จะเป็น ปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะมี สภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วน ของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วน ที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

2.1.10.3 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับ สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเลเป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูง กว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation ซึ่งเกิด ได้ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

1) ในกรณีของสภาวะเปียกสลับกับแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิว คอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ทั้งเกลือไว้ในบริเวณ ผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้า สู่สภาวะเปียกน้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อ สภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายรอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของ คอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

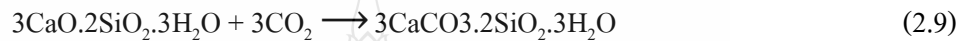
2) ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ใน กรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮดรชั่น เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮดรท (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบ เข้าไปได้ อย่างไรก็ตามในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีต ได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ว่า ในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสถานะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดินซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจ

2.1.11.1 กลไกของการเกิดคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชันเกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) บริเวณผิวหน้าหรือใกล้เคียงผิวหน้าของคอนกรีต ตามสมการของปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



หรือ



ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นปฏิกิริยา (2.8) มากกว่า (2.9) และในความเป็นจริงแล้วทั้งสองปฏิกิริยาก็ต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของสารละลาย คอนกรีตที่ถูกคาร์บอนเตไปแล้วจะมีความพรุนน้อยลงเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันจะช่วงอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีตลักษณะของการทำปฏิกิริยาจะเกิดในบริเวณใกล้เคียงผิวหน้าของคอนกรีตที่มีโอกาสสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดีโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Pores) เข้าไปทำปฏิกิริยาในบริเวณใกล้เคียงผิวหน้าของคอนกรีตได้ ดังนั้นคาร์บอนเนชันจะค่อยๆ คืบหน้าเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยอัตราที่ช้าลงเรื่อยๆ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่านโครงสร้างช่องว่าง (Pore Structure) ของคอนกรีตและผ่านส่วนที่ถูกคาร์บอนเตไปแล้ว ซึ่งจะมีความพรุนน้อยลง ทำให้ซึมผ่านเข้าไปน้ำยากขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันต้องการทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำหรือคอนกรีตที่แห้งสนิทจะไม่เกิดคาร์บอนเนชัน เนื่องจากในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะไม่มรก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าไปได้มาก ส่วนในคอนกรีตที่แห้งสนิทก็จะไม่มีน้ำในการทำปฏิกิริยา ดังนั้น คาร์บอนเนชันจะรุนแรง ในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอยู่ระหว่างกึ่งชื้นกึ่งแห้ง (Semi-Dry) นั่นคือ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 40 ถึงร้อยละ 60 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาก

2.1.11.2 ผลของคาร์บอนเนชัน

คาร์บอนเนชันทำให้เกิดผลที่สำคัญ 3 ประการคือ

- 1) ทำให้ความพรุนของคอนกรีตบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง
 - 2) ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชันต่ำลง
- เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ผลในประการแรก

อาจจะเป็นผลดีต่อกอนกรีตในเรื่องความคงทน แต่ผลประการหลังจะสามารถทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนชั้นเกิดเข้าไปถึงตำแหน่งเหล็กเสริมจนทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้หรือต่ำกว่าระดับวิกฤต

3) ทำให้หดตัว (Carbonation shrinkage) ซึ่งเป็นจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้หน่วยแรงอัด ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง หรือจากการที่ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) เกิดเสียน้ำ (Dehydrate) ซึ่งส่งผลให้เกิดการหดตัว

ผลของคาร์บอนชั้นทั้ง 3 กรณีนี้ ในกรณีที่ 2 คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจะเป็นกรณีที่มีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีตมากที่สุด ส่วนในกรณีที่ 1 คือกรณีที่ทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง จะเป็นกรณีที่ดีต่อความคงทนของคอนกรีต อย่างไรก็ดี ในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็กคาร์บอนชั้นจะมีผลเสียมากกว่าผลดีที่ได้จากการลดความพรุน

2.1.11.3 ปัจจัยที่มีผลต่อคาร์บอนชั้น

1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่ไม่ชื้นและแห้งเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอนชั้นรุนแรง

2) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ยิ่งมากก็จะทำให้เกิดคาร์บอนชั้นรุนแรง

3) อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นดำเนินไปได้เร็ว

4) ความพรุนของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำต่ำจะเกิดคาร์บอนชั้นได้เร็วและมาก

5) การใช้สารปอซโซลานบางชนิด จะทำให้เกิดคาร์บอนชั้นมากขึ้นถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไป

2.1.11.4 การป้องกันการเกิดคาร์บอนชั้น

1) ออกแบบให้คอนกรีตมีความพรุนต่ำ เช่น ใช้ปริมาณน้ำน้อย อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ หรือใช้วัสดุเติมช่องว่าง (Filler) เช่น ซิลิกาฟูม จะช่วยให้คอนกรีตมีอัตราเกิดคาร์บอนชั้นลดลง

2) บ่มคอนกรีตให้ดี การบ่มคอนกรีตให้ยาวนานขึ้นจะทำให้คอนกรีตบริเวณผิวและใกล้ผิวคอนกรีตมีความทึบน้ำดีขึ้น

3) สำหรับการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก ควรออกแบบคอนกรีตหุ้มคอนกรีตให้หนาขึ้นถ้าทราบว่าโครงสร้างดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่คาร์บอนชั้นรุนแรง [4]

2.1.12 การกักคร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

ปัจจุบันการศึกษาความเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อคอนกรีตนั้นมีความจำเป็นยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือที่ใกล้กับทะเลเช่น ตอม่อท่าเรือ ประภาคาร เขื่อน ฯลฯ เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล ซัลเฟตอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด อันอาจการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น การทำลายของซัลเฟตไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้นและรุนแรงมากในกรณีที่เปียกและแห้งสลับกัน เช่น ในท่อระบายน้ำโสโครก ในอาคารส่งน้ำเพื่อชลประทาน ฐานรากและพื้นอาคารในดินที่มีซัลเฟต

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตในทะเลเกิดขึ้นโดยการกักคร่อนทางเคมีและการกัดเซาะทางกายภาพ เช่น การกระแทกของคลื่นและการที่คอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน สำหรับการกักคร่อนทางเคมีพบว่าเกลือในรูปของสารละลายจะสามารถทำลายคอนกรีตได้ เพราะจะซึมเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ได้ สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กักคร่อนคอนกรีตโดยตรง และรุนแรง คือแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ส่วนเกลือแกง ($NaCl$) กับโปตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งมักพบมากในน้ำทะเลเช่นกันจะทำให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดสนิมได้ง่ายในน้ำใต้ดินบริเวณที่มีแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) มักมีซัลเฟตปนอยู่เสมอ โดยทั่วไปดินมีซัลเฟตอยู่เล็กน้อยคือประมาณร้อยละ 0.01 ถึง 0.05 ของน้ำหนัก แต่จะเพิ่มสูงมากขึ้นเนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยธรรมชาติ

การศึกษากการกักคร่อนของซัลเฟตต่อคอนกรีตเป็นสิ่งที่น่าสนใจและจำเป็นอย่างมาก เพราะถ้าไม่ป้องกันผลกระทบของการกักคร่อนเนื่องจากซัลเฟตในตอนเริ่มแรกของการก่อสร้างแล้วคอนกรีตอาจเสียหายได้ในอนาคตอันใกล้ ทำให้ต้องซ่อมแซมคอนกรีตและการซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากการกักคร่อนของซัลเฟตจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ โดยธรรมชาติของซัลเฟตแต่ละชนิดมีความสามารถละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน (คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, 2536) กล่าวคือ แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ละลายน้ำเพียง 1.2 กรัม/ลิตร ส่วนโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ละลายน้ำ 240 กรัม/ลิตร และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ละลายน้ำ 300 กรัม/ลิตร เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาความทนทานต่อซัลเฟตจึงใช้สารโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต

(MgSO₄) กลไกการกัดกร่อนของซัลเฟตไอออนทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการขยายตัวในคอนกรีตที่แข็งตัวจนกระทั่งเกิดการแตกร้าว โดยสภาวะของซัลเฟตสามารถแบ่งตามสภาพแวดล้อมซัลเฟตแสดงดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 สภาวะของซัลเฟต

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (SO ₄ ²⁻ , ร้อยละ)	ซัลเฟตในน้ำ (ppm.)
เบาบาง	0.00-0.10	0-150
ปานกลาง	0.10-0.20	150-1,500
รุนแรง	0.20-2.00	1,500-10,000
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000

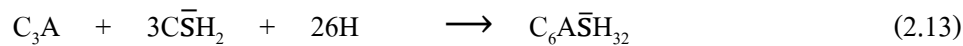
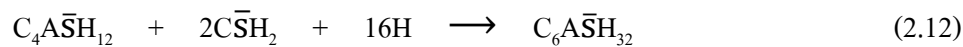
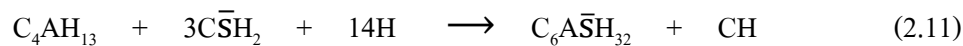
2.1.12.1 แหล่งของเกลือซัลเฟต

เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเล หรือในดินทั่วไป เกลือซัลเฟต ชนิดที่พบมากที่สุด มักจะเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือแมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังมักจะอยู่ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติด้วย

2.1.12.2 กลไกของการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

กลไกนี้เริ่มต้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (NS) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการ (2.10) ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ซึ่งทำให้ค่า pH ของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นเป็น 13.5 ซึ่งมากกว่าค่า pH ของสารละลาย CH อิมพัที่มีค่าเพียง 12.4 ดังนั้นจึงเป็นการรักษาเสถียรภาพของ C-H-S และ Ettringite (C₆A₃H₃S₂) ไม่ให้ทำปฏิกิริยากลายไปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น สารยิปซัม (C₂H₂) ที่ได้จากสมการ (2.3) จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C₄AH₁₃) โมโนซัลเฟต (C₄A₃H₁₂S) และ/หรือ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้ Secondary Ettringite อีก ดังแสดงในสมการ (2.11) ถึง (2.13) เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นผลที่เกิดจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต



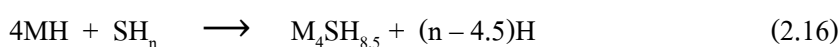
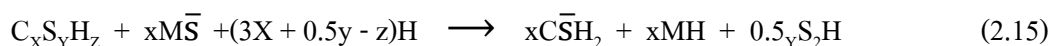
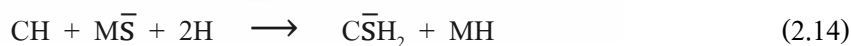


โดยที่ C = CaO, N = Na₂O, M = MgO, S = SiO₂, \bar{S} = SO₃, H = H₂O

กล่าวโดยสรุป การทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตนั้นขึ้นอยู่กับกาเกิด Secondary Ettringite ดังแสดงในสมการ (2.11) ถึง (2.13) สารตั้งต้นในสมการดังกล่าวมีองค์ประกอบของอลูมินต ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์ด้านทานโซเดียมซัลเฟต จึงมีเหตุผลที่ต้องจำกัดปริมาณ C₃A ให้น้อยกว่าร้อยละ 5 ถ้าปริมาณ C₃A มีอยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 8 การทำลายโดยซัลเฟตมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น และถ้าปริมาณ C₃A มีมากกว่าร้อยละ 8 การทำลายน่าจะเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอีกสองประการ ที่มีอิทธิพลต่อการทำลายในลักษณะนี้คือ ปริมาณ C₄AF ซึ่งแม้ว่าจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟตได้น้อยกว่า C₃A แต่มีกลไกการพัฒนาล้ากับการเกิด Ettringite แต่มีการขยายตัวน้อยกว่า ส่วนองค์ประกอบอีกประการหนึ่งคือ NH ที่เป็นผลผลิตจากสมการ (2.10) ซึ่งทำให้ Ettringite มีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงทำให้การขยายตัวมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังปฏิกิริยาที่ได้จากสมการ (2.10) ยังมีปริมาณมากกว่าสารตั้งต้น ดังนั้นถ้าต้องการผลิตปูนซีเมนต์ที่ด้านทานซัลเฟต ต้องลดปริมาณ CH ลง พร้อมๆกับการจำกัดปริมาณ C₃A และ C₄AF ในการลดปริมาณ CH ทำได้โดยการลดอัตราส่วน C₃S / C₂S ลง หรือใช้ปูนซีเมนต์ผสม

2.1.12.3 กลไกของการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟต

กลไกการทำลายเริ่มต้นจากปฏิกิริยาในสมการ (2.14) อย่างไรก็ตาม MH ที่เกิดขึ้นนี้ไม่เหมือนกับ NH ตรงที่มีความสามารถในการละลายน้ำที่น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่า 10.5 ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่มีเสถียรภาพ



- 1) ผลกระทบจากการที่มีค่า pH ต่ำมีดังนี้
 - Secondary Ettringite จะไม่เกิดขึ้น
 - $M\bar{S}$ จะทำปฏิกิริยากับ C-S-H ดังแสดงในสมการ (2.14) ได้ยิปซัม ($C\bar{S}H_2$) Brucite (MH) และ Silica Gel (S_2H) ซึ่ง Gel นี้มีความสามารถในการประสานได้น้อยกว่าของ C-S-H
 - C-S-H มีแนวโน้มแตกตัวให้ Lime ทำให้ค่า pH สูงขึ้น โดย Lime นี้จะไปทำปฏิกิริยากับ $M\bar{S}$ ทำให้ได้ MH มากขึ้น ดังแสดงในสมการ (2.15)
 - ความเข้มข้นของยิปซัมและ Brucite ในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งมีมากขึ้น ในขณะที่ C-S-H ยังสูญเสีย Lime ต่อเนื่อง และมีความสามารถในการประสานน้อยลง
 - การลดลงของ MH นั้นมาจากการที่ MH ทำปฏิกิริยากับ S_2H ดังแสดงในสมการ (2.16) ได้ M-S-H ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย

ดังนั้นกลไกในการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจะเริ่มต้นจากสมการ (2.15) ถึง (2.16) โดยการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย การทำลายดังกล่าวจะทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของผิวซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว และเกิดการสะสมของยิปซัม และ Brucite อย่างไรก็ตามในที่สุด Brucite จะถูกเปลี่ยนไปเป็น M-S-H ดังแสดงในสมการ (2.16) โดยที่ไม่เกิดการขยายตัวมากอย่างกรณีการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

2.1.12.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟตมีดังนี้

- 1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต
- 2) ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยากลดการทำลายขั้นรุนแรง
- 3) ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยจะมีแนวโน้มที่จะต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น
- 4) ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีต ถ้าลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุพอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

2.1.12.5 วิธีการป้องกันการทำลายของซัลเฟต

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

2) การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย

3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เฟสดีไม่มากเกินไป

ในบางกรณีการป้องกันความเสียหายจากการทำลายของซัลเฟตที่รุนแรง โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่พอในสภาวะที่มีซัลเฟตเข้มข้นอยู่ในระดับรุนแรงมาก หากใช้ปอซโซลานร่วมด้วยจะเป็นการช่วยทำให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อซัลเฟตได้ดียิ่งขึ้น ตารางที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงข้อกำหนดของสมาคมคอนกรีตในสหรัฐอเมริกา สำหรับการเลือกใช้วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต ในสภาวะที่มีซัลเฟตอยู่ในระดับรุนแรงต่างๆ กัน [4]

ตารางที่ 2.13 ข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต

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

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul และ T. Leelawat (2006) ได้ทำการศึกษาเรื่อง A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete มีการใช้เถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่างกันสำหรับการหล่อคอนกรีตทดสอบ มีการนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยไปวางไว้ในสภาวะแวดล้อมต่างๆกันคือในเมือง ชนบท และชายทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO สูงจะมีการเกิดคาร์บอนเนชันต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของ CaO ต่ำ ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชันของสภาวะแวดล้อมในเมืองสูงกว่าสภาวะแวดล้อมอื่นๆ นอกจากนี้พบว่า การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ก็ทำให้การเกิดคาร์บอนเนชันได้เร็วขึ้น

Chindaprasirt et al. (2008) ทำการทดลองหาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต โดยแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% เป็นเวลา 30 วัน ตัวอย่างมอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่า ตัวอย่างมอร์ต้าที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และ ตัวอย่างมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงชนิดเดียว

ชัยชาญ โชติถนอม (2546) ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีความละเอียดแตกต่างกัน ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้เถ้าลอย 3 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยไม่คัดขนาด และเถ้าลอยคัดขนาดละเอียดสุดร้อยละ 45 และ ร้อยละ 10 โดยปริมาณการแทนที่เถ้าลอยต่อสารซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30 ทุกส่วนผสม ใช้คอนกรีตมีกำลังอัดเฉลี่ยประมาณ 45 สำหรับคอนกรีตกำลังปานกลางและ 75 เมกะปาสกาล สำหรับคอนกรีตกำลังสูงตามลำดับ โดยคอนกรีตกำลังสูงใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าค่าประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยไม่คัดขนาดเถ้าลอยคัดขนาดละเอียดสุดร้อยละ 45 และขนาดละเอียดสุดร้อยละ 10 อยู่ในระดับต่ำ ต่ำมาก และต่ำมาก ตามลำดับสำหรับคอนกรีตกำลังปานกลาง และมีค่าต่ำมากทั้งหมดสำหรับคอนกรีตกำลังสูง และค่าประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดจะลดลงเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น ทั้งคอนกรีตกำลังปานกลางและกำลังสูง การทดสอบด้วยวิธีวัดกระแสมีประสิทธิภาพในการใช้วัดคอนกรีต และสามารถแยกแยะ ถึงแม้ว่าคอนกรีตจะมีความแตกต่างไม่มาก จากการทดสอบการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 3 พบว่าระยะแทรกซึมของคลอไรด์ที่วัดได้สำหรับระยะเวลาที่แช่ 6 เดือน ส่วนผสมกำลังปานกลางที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียวให้ค่าสูงสุด และจะลดลงเมื่อผสมเถ้าลอยและเมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากขึ้น และสำหรับส่วนผสมกำลังสูง ระยะแทรกซึมของคลอไรด์จะค่อนข้างต่ำทุกส่วนผสมและให้ค่าใกล้เคียงกับกำลังปานกลาง

ที่ผสมแก้าลอย โดยที่การแช่ที่ 6 เดือน ไม่สามารถแยกแยะระยะแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีการแทรกซึมต่ำได้

เอกศักดิ์ ฤกษ์มหาลิขิต, ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ (2552) ได้ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่แทนที่บางส่วนของวัสดุประสานด้วยแก้าลอยฝุ่นหินปูนและสารขยายตัวโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 จากการศึกษาพบว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่ามอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ขณะที่มอร์ตาร์ที่ผสมแก้าลอยและมอร์ตาร์ที่ผสมสารขยายตัวมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินปูนให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ลดลง สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมแก้าลอยและฝุ่นหินปูนที่บางอัตราส่วนผสมและมอร์ตาร์ที่ผสมแก้าลอยและสารขยายตัวให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

วิเชียร ชาลี และ ชีรพงศ์ เชื้อพลบ ศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคในการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมแก้าลอยหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล [22] โดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตธรรมดาเทียบกับคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยแก้าลอยหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและมี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45, 0.55 และ 0.65 (ส่วนผสมเดียวกับคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล) หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบความแน่นของคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่อายุคอนกรีต 28 และ 90 วัน เปรียบเทียบกับผลทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุแช่น้ำทะเล 10 ปี ผลการศึกษาพบว่าการใช้แก้าลอยหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคในคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลง และมีทิศทางตรงกันข้ามกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ส่วนความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคที่อายุ 90 วัน มีแนวโน้มสูงขึ้นและเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ อายุของคอนกรีตที่นานขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของคลื่น อัลตราโซนิคในคอนกรีตที่ผสมแก้าลอยหินเพิ่มขึ้นชัดเจนกว่าคอนกรีตธรรมดา การศึกษาครั้งนี้สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสม แก้าลอยหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน จากผลการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคได้

ปิติสานต์ กร้ามาตร และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล (2549) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภท

ที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือ ร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่า การขยายตัวเมื่อแช่ทิ้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ใน สารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัด และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกันมอร์ตาร์ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับ แรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่งกันต่ำกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสอง ชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยา ปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยัง พบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการ สูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลง ของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกัน ข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak and H.T. Cao (2005) ได้ศึกษาการ ต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมปอซโซลาน (เถ้าลอยชนิด F และ เถ้าแกลบ) ใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตัวอย่างที่ใช้วัด การขยายตัวจะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 และทำการตรวจสอบค่า pH ของ สารละลาย จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยและเถ้าแกลบช่วยลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ และค่า pH นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าแกลบมีประสิทธิภาพมากกว่าเถ้าลอย จากผลการทดสอบ SEM ที่ผิวตัวอย่างที่ แตร้าวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตชี้ให้เห็นว่าการทำลายโดยซัลเฟตของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสม เถ้าลอย หรือเถ้าแกลบถูกยับยั้งโดยการลดแคลเซียมออกไซด์ และอัตราส่วน C/S ของ CSH เจล เมื่อ เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วนพบว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีแคลเซียมซัลเฟตน้อยกว่า และเกิดแอมorphous ใจที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับในกรณีมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยก็จะ น้อยกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ล้วน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีมากกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปอซโซลานทั้งสองชนิดนี้ในอัตราการแทนที่ถึง ร้อยละ 40 เพื่อสร้างซีเมนต์ผสมที่มีความต้านทานซัลเฟตดี

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

สำหรับการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรม โดยวิธีการศึกษาในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรมครั้งนี้ ประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน เถ้าก้นเตา ทราช หิน และน้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.เล่ม 1-2532 หรือมาตรฐาน ASTM C150
- 2) เถ้าลอย ใช้เถ้าลอยแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (FA)
- 3) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (SL)
- 4) ซิลิกาฟูม (SF)
- 5) ผงหินปูน ขนาดความละเอียด 8 ไมโครเมตร (LP)
- 6) เถ้าก้นเตา ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (BA)
- 7) ทราช ใช้ทราชร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆแล้ว
- 8) หิน ได้จากการย่อยหินแกรนิต
- 9) น้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีต และบ่มคอนกรีต เป็นน้ำประปา

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรม ประกอบด้วย การทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต การทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และการทดสอบความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยเป็นเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญในการทดสอบ ดังนี้

3.2.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร

3.2.2 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร

3.2.3 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด $\varnothing 10 \times 20$ เซนติเมตร (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต ขนาด $\varnothing 10 \times 20$ เซนติเมตร

3.2.4 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร

3.2.5 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด $2.54 \times 2.54 \times 28.5$ เซนติเมตร (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 แบบหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด $2.54 \times 2.54 \times 28.5$ เซนติเมตร

3.2.6 เครื่องชั่ง (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่ง

3.2.7 เครื่อง Length Comparator (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่อง Length Comparator

3.2.8 ตู้อบ คาร์บอนเนชั่น (รูปที่ 3.8)



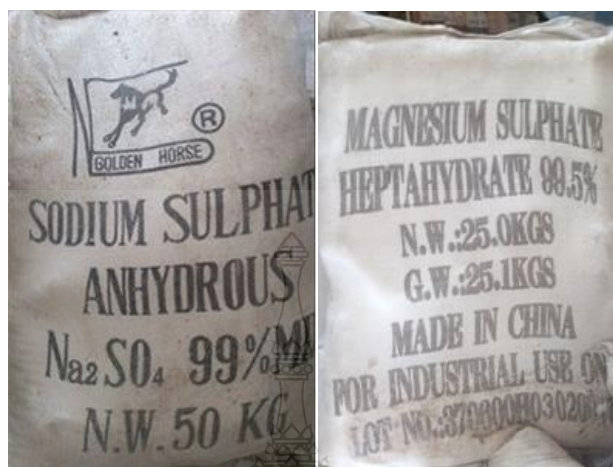
รูปที่ 3.8 ตู้อบ คาร์บอนเนชั่น

3.2.9 เครื่องทดสอบแบบแรงให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน (รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแบบแรงให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน

3.2.10 สารละลายซัลเฟต (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 สารละลายซัลเฟต

3.3 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดของวิธีการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมในครั้งนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา และคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.3.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- 1) ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน ตามมาตรฐาน ASTM C188 [15]
- 2) ความละเอียดของวัสดุประสาน โดยใช้วิธีของเบลน ตามมาตรฐาน ASTM C204 [16]
- 3) ภาพถ่ายกำลังสูงของอนุภาควัสดุ โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope (SEM)
- 4) ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้ากั้นเตา (Water-Retaining Ability) ตามขั้นตอนของ R.Kasemchaisiri และ S.Tangtermsirikul [17]
- 5) ความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตา โดยทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสถานะแห้งด้วยเตาอบตามมาตรฐาน ASTM C128 [18] และคำนวณความถ่วงจำเพาะของเถ้ากั้นเตาในสถานะค่าการกักเก็บน้ำ ดังสมการที่ 3.1

$$\rho_{WR} = \rho_{OD} \times (1 + WR) \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_{WR} คือ ความถ่วงจำเพาะของเถ่ากั้นเตาในสถานะค่าการกักเก็บน้ำ

ρ_{OD} คือ ความถ่วงจำเพาะของเถ่ากั้นเตาในสถานะแห้งด้วยเตอบ

WR คือ ค่าการกักเก็บน้ำ (%)

3.3.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.3.2 ความคงทนของมอร์ตาร์และคอนกรีต

สำหรับสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรมในครั้งนี้ ประกอบไปด้วย การหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ มีรายละเอียดดังนี้

3.3.2.1 การหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีต

ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C157 [19] โดยใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเตรียมขึ้น โดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร โดยในแต่ละสัปดาห์การผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยจะใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต จำนวน 3 ชิ้นด้วยกัน เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของการหดตัวแบบอโตจีนัส เมื่อหล่อชิ้นงานเสร็จแล้วให้นำมาหุ้มด้วยพลาสติก เพื่อไม่ให้มีน้ำระเหยออก เมื่อครบ 1 วันแกะแบบออกแล้วหุ้มด้วยพลาสติกและห่อด้วยฟอยอีกชั้นหนึ่ง แล้ววัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นั้น จะเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัปดาห์การผสม เมื่อสิ้นสุดกระบวนการวัดต่างๆ จะเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจัดวางชิ้นตัวอย่างไว้บนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28, 42, 56 และ 90 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวแบบแห้งที่อายุบ่มต่างๆกัน โดยในการวัดการหดตัวแต่ละอายุนั้น จะทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต เพื่อตรวจสอบการสูญเสียน้ำออกจากตัวอย่างคอนกรีตหรือไม่

การคำนวณร้อยละของการหดตัวของคอนกรีต โดยที่ค่าความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น ที่ได้จากการวัดครั้งแรก และค่าที่วัดได้ในอายุต่างๆ แล้วนำไปคำนวณหาค่าร้อยละของการหดตัวของคอนกรีต ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.2)

$$\text{การหดตัว (\%)} = [(L_i - L_t) / L_g] \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ L_i คือความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างคอนกรีต (มิลลิเมตร)

L_t คือ ความยาวของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุต่างๆ ที่ต้องการวัดการหดตัว (มิลลิเมตร)

L_g คือ ความยาวมาตรฐานของตัวอย่างคอนกรีต เท่ากับ 285 มิลลิเมตร

3.3.2.2 การหดตัวของแท่งของคอนกรีต

ในการทดสอบการหดตัวของแท่งของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C596 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร โดยในแต่ละสัปดาห์การผสมคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยจะใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีต จำนวน 3 ชิ้นด้วยกัน เพื่อการนำมาหาค่าเฉลี่ยของการหดตัวโดยรวม หลังจากที่ได้หล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอดออกจากแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน เมื่อเสร็จสิ้นการบ่มจะนำชิ้นตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้นขึ้นจากน้ำ เช็ดด้วยผ้าแห้งแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา จะเข้าสู่กระบวนการชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งและวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะที่มีความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้นของชิ้นตัวอย่างในแต่ละสัปดาห์การผสม เมื่อสิ้นสุดกระบวนการวัดต่างๆ จะเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจัดวางชิ้นตัวอย่างไว้บนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับเหล็กโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุ 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28, 42, 56 และ 90 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวของแท่งที่อายุบ่มต่างๆกัน

การคำนวณร้อยละของการหดตัวของแท่งนั้น โดยที่ค่าความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น ที่ได้จากการวัดครั้งแรกหลังจากบ่มในน้ำ 7 วัน และค่าที่วัดได้ในช่วงอายุบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ จะนำไปคำนวณหาค่าร้อยละของการหดตัวของแท่ง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.3)

$$\Delta L = [(L_i - L_t) / L_g] \times 100 \quad (3.3)$$

โดย ΔL คือค่าการหดตัวโดยรวม (%)

L_t คือค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานหลังจากบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ (มิลลิเมตร)

L_i คือค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

L_g คือค่าความยาวของ gauge length หรือเท่ากับ 285 มิลลิเมตร

3.3.2.3 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 856 [28] ด้วยตู้อบคาร์บอนชั้น โดยมีปริมาณความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 40,000 ppm ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 40 ถึง 60 และอุณหภูมิประมาณ 40 ถึง 50 องศาเซลเซียส ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10x10x10 เซนติเมตร บ่มน้ำที่อายุ 28 วัน แล้วใส่เข้าตู้อบคาร์บอนชั้นโดยใช้ระยะเวลาในการเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 และ 90 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวมาผ่าเป็น 2 ซีก จากนั้นฉีดด้วยสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ซึ่งปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอนชั้น แต่ในส่วนที่เกิดคาร์บอนชั้น ตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสี ซึ่งใช้เวอร์เนียร์วัดค่าระยะความลึกคาร์บอนชั้นบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง (บริเวณที่เกิดคาร์บอนชั้น) โดยใช้ตัวอย่าง 2 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.3.2.4 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติด้านการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุประสานที่ต่างชนิดกัน โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มิลลิเมตร บ่มตัวอย่างในน้ำเป็นระยะเวลา 7 14 28 และ 56 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวมาตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 50 มิลลิเมตร โดยในแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมด 2 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต ส่วนสารละลายที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์

รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้วิธี rapid chloride permeability test (RCPT) ซึ่งใช้ค่าประจุไฟฟ้าที่

เคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวอย่าง เพื่อนำไปประเมินระดับการซึมผ่านได้ของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1202 [29] และแสดงผลการทดสอบเป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างทดสอบ (total charge passed) มีหน่วยเป็น Coulombs



รูปที่ 3.11 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของตัวอย่างคอนกรีต

3.3.2.5 ความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

สำหรับรายละเอียดของวิธีการศึกษาได้ทำการทดสอบสมบัติด้านความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ เมื่อใช้วัสดุประสานที่ต่างชนิดกัน โดยทำการประเมินความต้านทานซัลเฟตใน 2 ลักษณะซึ่งได้แก่ การขยายตัว (expansion) และการสูญเสียน้ำหนัก (weight Loss)

ก) การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์

ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัวของตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์นั้น ในการศึกษานี้ จะวัดการขยายตัวของทั้งตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยใช้ตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ขนาด $2.54 \times 2.54 \times 28.5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง (mold) แล้วหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ตัวอย่างจะถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งได้แยกเตรียมไว้ เพื่อทำการทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างแท่งมอร์ตาร์ที่อายุต่างๆ สำหรับสารละลายซัลเฟต จะมีการเปลี่ยนที่อายุทุก ๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง

ในส่วนวิธีการวัดการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012 [29] โดยหลังจากแช่ตัวอย่างในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 ต่อจากนั้นนำตัวอย่างแช่ในสารละลายซัลเฟต แล้วทำการวัดความยาวของตัวอย่างที่อายุ 2, 3, 4, 8, 13 และ 16 สัปดาห์ และ ทุก ๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต สำหรับการขยายตัวของตัวอย่างเป็นการเฉลี่ยการขยายตัว 4 แท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคำนวณดังสมการที่ 3.4

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

โดยที่ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (มิลลิเมตร)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต (มิลลิเมตร)

ข) การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์

ในการประเมินการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ ในการศึกษานี้ จะวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น โดยใช้ตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร หลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง (mold) แล้วหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ตัวอย่างจะถอดแบบที่อายุ 1 วัน

ในส่วนการวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ ในสารละลายซัลเฟตนั้น โดยหลังจากถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ตาร์ 1 วัน แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ ของแต่ละสัดส่วนผสมซึ่งน้ำหนักโดยเป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ หลังจากชั่งน้ำหนักเสร็จแล้ว นำตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ แช่ในสารละลายซัลเฟต เมื่อครบอายุที่ต้องการวัดการสูญเสียน้ำหนัก นำตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ มาขัดผิวด้วยแปรงเพื่อให้เศษมอร์ตาร์ ที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายโดยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตหลุดออกต่อจากนั้น นำตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าไปหาการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ตาร์ ได้ดังสมการที่ 3.5

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (\%)} = [(W_i - W_f) / W_i] \times 100 \quad (3.5)$$

โดย W_i คือ ค่าน้ำหนักเริ่มต้น

W_f คือ ค่าน้ำหนักที่อายุต่างๆที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ค) การเตรียมสารละลายซัลเฟต

สำหรับสารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ 2 สารละลายซัลเฟต ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต สารละลายโซเดียมซัลเฟตใช้ โซเดียมซัลเฟตเท่ากับ 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตรซึ่งให้ปริมาณของไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตใช้ แมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 42.36 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ปริมาณของไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

3.4 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรมในครั้งนี้นำประกอบไปด้วย การทดสอบความต้านทานซัลเฟตที่ใช้ตัวอย่างของมอร์ตาร์ ส่วนของการทดสอบการหดตัวแบบออโต จินัสและแบบแห้ง การทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชัน และการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์โดยใช้ตัวอย่างของคอนกรีต มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานซัลเฟตประกอบไปด้วย มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูม และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน โดยใช้ทรายล้วน ส่วนตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานซัลเฟตประกอบไปด้วย มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน เมื่อใช้ถ้ำกันตาแทนที่ทราย

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟต เมื่อใช้ทรายล้วน

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก (กรัม)						
		ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	น้ำ	ทราย
1	MC-0.55	1.00	-	-	-	-	0.55	2.75
2	MC-20FA-0.55	0.80	0.20	-	-	-	0.55	2.75
3	MC-40FA-0.55	0.60	0.40	-	-	-	0.55	2.75
4	MC-30SL-0.55	0.70	-	0.30	-	-	0.55	2.75
5	MC-50SL-0.55	0.50	-	0.50	-	-	0.55	2.75
6	MC-5LP-0.55	0.95	-	-	-	0.05	0.55	2.75
7	MC-10LP-0.55	0.90	-	-	-	0.10	0.55	2.75
8	MC-15FA-5LP-0.55	0.80	0.15	-	-	0.05	0.55	2.75
9	MC-10FA-10LP-0.55	0.80	0.10	-	-	0.10	0.55	2.75
10	MC-35FA-5LP-0.55	0.60	0.35	-	-	0.05	0.55	2.75
11	MC-30FA-10LP-0.55	0.60	0.30	-	-	0.10	0.55	2.75

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลาย
ซัลเฟต เมื่อใช้ทรายล้วน (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1	สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์โดยน้ำหนัก (กรัม)					ทราย
			เถ้าลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกา ฟูม	ผงหินปูน	น้ำ	
12	MC-25SL-5LP-0.55	0.70	-	0.25	-	0.05	0.55	2.75
13	MC-20SL-10LP-0.55	0.70	-	0.20	-	0.10	0.55	2.75
14	MC-45SL-5LP-0.55	0.50	-	0.45	-	0.05	0.55	2.75
15	MC-40SL-10LP-0.55	0.50	-	0.40	-	0.10	0.55	2.75
16	MC-5SF-0.55	0.95	-	-	0.05	-	0.55	2.75
17	MC-10SF-0.55	0.90	-	-	0.10	-	0.55	2.75
18	MC-5SF-5LP-0.55	0.90	-	-	0.05	0.05	0.55	2.75
19	MC-10SF-10LP-0.55	0.85	-	-	0.10	0.10	0.55	2.75

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลาย
ซัลเฟต เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1	สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์โดยน้ำหนัก (กรัม)					เถ้ากั้นเตา
			เถ้าลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ผง หินปูน	น้ำ	ทราย	
1	MC-0.55	1.00	-	-	-	0.55	2.75	-
2	MC-10BA-0.55	1.00	-	-	-	0.55	2.75	10% Vol.
3	MC-30BA-0.55	1.00	-	-	-	0.55	2.75	30% Vol.
4	MC-40FA-0.55	0.60	0.40	-	-	0.55	2.75	-
5	MC-40FA-10BA-0.55	0.60	0.40	-	-	0.55	2.75	10% Vol.
6	MC-40FA-30BA-0.55	0.60	0.40	-	-	0.55	2.75	30% Vol.
7	MC-50SL-0.55	0.50	-	0.50	-	0.55	2.75	-
8	MC-50SL-10BA-0.55	0.50	-	0.50	-	0.55	2.75	10% Vol.
9	MC-50SL-30BA-0.55	0.50	-	0.50	-	0.55	2.75	30% Vol.
10	MC-10LP-0.55	0.90	-	-	0.10	0.55	2.75	-

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟต เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์โดยน้ำหนัก (กรัม)					
			เถ้าลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ผง หินปูน	น้ำ	ทราย	เถ้ากั้นเตา
11	MC-10LP-10BA-0.55	0.90	-	-	0.10	0.55	2.75	10% Vol.
12	MC-10LP-30BA-0.55	0.90	-	-	0.10	0.55	2.75	30% Vol.

3.4.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้ง ประกอบไปด้วย คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยใช้ทรายล้วน ส่วนตารางที่ 3.4 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้ง ประกอบไปด้วย คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย

ตารางที่ 3.5 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้น ประกอบไปด้วย คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยใช้ทรายล้วน ส่วนตารางที่ 3.6 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้น ประกอบไปด้วย คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย

ตารางที่ 3.7 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ประกอบไปด้วย คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยใช้ทรายล้วน ส่วนตารางที่ 3.8 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ประกอบไปด้วย คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมผงหินปูน เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้ง เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภท 1	เถ้า ลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC-0.40	332	-	-	-	-	970	1080	132
2	CC-20FA-0.40	266	67	-	-	-	970	1080	132
3	CC-40FA-0.40	200	132	-	-	-	970	1080	132
4	CC-30SL-0.40	232	-	100	-	-	970	1080	132
5	CC-50SL-0.40	166	-	166	-	-	970	1080	132
6	CC-5SF-0.40	315	-	-	17	-	970	1080	132
7	CC-10SF-0.40	298	-	-	34	-	970	1080	132
8	CC-5LP-0.40	315	-	-	-	17	970	1080	132
9	CC-10LP-0.40	298	-	-	-	34	970	1080	132
10	CC-15FA-5 LP-0.40	264	49	-	-	17	970	1080	132
11	CC-10FA-10LP-0.40	264	34	-	-	34	970	1080	132
12	CC-35FA-5LP-0.40	199	116	-	-	17	970	1080	132
13	CC-30FA-10LP-0.40	199	99	-	-	34	970	1080	132
14	CC-25SL-5LP-0.40	232	-	83	-	17	970	1080	132
15	CC-20SL-10LP-0.40	232	-	66	-	34	970	1080	132
16	CC-45SL-5LP-0.40	166	-	149	17	-	970	1080	132
17	CC-40SL-10LP-0.40	166	-	132	34	-	970	1080	132
18	CC-0.55	332	-	-	-	-	970	1080	183
19	CC-20FA-0.55	266	67	-	-	-	970	1080	183
20	CC-40FA-0.55	200	132	-	-	-	970	1080	183
21	CC-30SL-0.55	232	-	100	-	-	970	1080	183
22	CC-50SL-0.55	166	-	166	-	-	970	1080	183
23	CC-5SF-0.55	315	-	-	17	-	970	1080	183
24	CC-10SF-0.55	298	-	-	34	-	970	1080	183
25	CC-5LP-0.55	315	-	-	-	17	970	1080	183
26	CC-10LP-0.55	298	-	-	-	34	970	1080	183

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้ง เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภท 1	เถ้า ลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
27	CC-15FA-5 LP-0.55	264	49	-	-	17	970	1080	183
28	CC-10FA-10LP-0.55	264	34	-	-	34	970	1080	183
29	CC-35FA-5LP-0.55	199	116	-	-	17	970	1080	183
30	CC-30FA-10LP-0.55	199	99	-	-	34	970	1080	183
31	CC-25SL-5LP-0.55	232	-	83	-	17	970	1080	183
32	CC-20SL-10LP-0.55	232	-	66	-	34	970	1080	183
33	CC-45SL-5LP-0.55	166	-	149	17	-	970	1080	183
34	CC-40SL-10LP-0.55	166	-	132	34	-	970	1080	183

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้ง เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)								
		ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้า ลอย	ตะกรัน เตาถลุง เหล็ก	ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	เถ้ากั้นเตา
1	CC-10BA-0.40	332	-	-	-	-	893	1080	133	10% Vol.
2	CC-30BA-0.40	332	-	-	-	-	739	1080	133	30% Vol
3	CC-40FA-10BA-0.40	199	133	-	-	-	893	1080	133	10% Vol
4	CC-40FA-30BA-0.40	199	133	-	-	-	739	1080	133	30% Vol
5	CC-50SL-10BA-0.40	166	-	166	-	-	893	1080	133	10% Vol
6	CC-50SL-30BA-0.40	166	-	166	-	-	739	1080	133	30% Vol
7	CC-10SF-10BA-0.40	299	-	-	33	-	893	1080	133	10% Vol
8	CC-10SF-30BA-0.40	299	-	-	33	-	739	1080	133	30% Vol
9	CC-10LP-10BA-0.40	299	-	-	-	33	893	1080	133	10% Vol
10	CC-10LP-30BA-0.40	299	-	-	-	33	739	1080	133	30% Vol

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้ง เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 และ 0.55 (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)								
		ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้า ลอย	ตะกรัน เตาถลุง เหล็ก	ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	เถ้ากั้นเตา
11	CC-10BA-0.55	332	-	-	-	-	893	1080	183	10% Vol
12	CC-30BA-0.55	332	-	-	-	-	739	1080	183	30% Vol
13	CC-40FA-10BA-0.55	199	133	-	-	-	893	1080	183	10% Vol
14	CC-40FA-30BA-0.55	199	133	-	-	-	739	1080	183	30% Vol
15	CC-50SL-10BA-0.55	166	-	166	-	-	893	1080	183	10% Vol
16	CC-50SL-30BA-0.55	166	-	166	-	-	739	1080	183	30% Vol
17	CC-10SF-10BA-0.55	315	-	-	33	-	893	1080	183	10% Vol
18	CC-10SF-30BA-0.55	299	-	-	33	-	739	1080	183	30% Vol
19	CC-10LP-10BA-0.55	299	-	-	-	33	893	1080	183	10% Vol
20	CC-10LP-30BA-0.55	299	-	-	-	33	739	1080	183	30% Vol

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนชั่น เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC-0.55	332	-	-	-	-	970	1080	183
2	CC-20FA-0.55	266	67	-	-	-	970	1080	183
3	CC-40FA-0.55	200	132	-	-	-	970	1080	183
4	CC-30SL-0.55	232	-	100	-	-	970	1080	183
5	CC-50SL-0.55	166	-	166	-	-	970	1080	183
6	CC-5SF-0.55	315	-	-	17	-	970	1080	183
7	CC-10SF-0.55	298	-	-	34	-	970	1080	183

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้น เมื่อใช้ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ตะกรันเตา			ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
			เถ้าลอย	ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกาฟูม				
8	CC-5LP-0.55	315	-	-	-	17	970	1080	183
9	CC-10LP-0.55	298	-	-	-	34	970	1080	183
10	CC-15FA-5LP-0.55	266	49	-	-	17	970	1080	183
11	CC-10FA-10LP-0.55	264	34	-	-	34	970	1080	183
12	CC-35SL-5LP-0.55	199	-	116	-	17	970	1080	183
13	CC-30FA-10LP-0.55	199	99	-	-	34	970	1080	183
14	CC-25SL-5LP-0.55	232	-	83	-	17	970	1080	183
15	CC-20SL-10LP-0.55	232	-	67	-	34	970	1080	183

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนขึ้น เมื่อใช้เถ้ากั้นเตา แทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)									
		ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้า ลอย	ตะกรัน เตาถลุง		ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	เถ้ากั้นเตา
				เหล็ก	เหล็ก						
1	CC-0.55	332	-	-	-	-	970	1080	183	-	
2	CC-10BA-0.55	332	-	-	-	-	893	1080	183	10% Vol.	
3	CC-30BA-0.55	332	-	-	-	-	739	1080	183	30% Vol	
4	CC-40FA-0.55	199	133	-	-	-	970	1080	183	-	
5	CC-40F-10BA-0.55	199	133	-	-	-	893	1080	183	10% Vol	
6	CC-40FA-30BA-0.55	199	133	-	-	-	739	1080	183	30% Vol	
7	CC-50SL-0.55	166	-	166	-	-	970	1080	183	-	
8	CC-50SL-10BA-0.55	166	-	166	-	-	893	1080	183	10% Vol	

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น เมื่อใช้เถ้ากั้นเตา แทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 (ต่อ)

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)								
		ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้า ลอย	ตะกรัน เตาถลุง เหล็ก	ซิลิกา ฟูม	ผง หินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	เถ้ากั้นเตา
9	CC-50SL-30BA-0.55	166	-	166	-	-	739	1080	183	30% Vol
10	CC-10SF-0.55	299	-	-	33	-	970	1080	183	-
11	CC-10SF-10BA-0.55	315	-	-	33	-	893	1080	183	10% Vol
12	CC-10SF-30BA-0.55	299	-	-	33	-	739	1080	183	30% Vol
13	CC-10LP-0.55	299	-	-	-	33	970	1080	183	-
14	CC-10LP-10BA-0.55	299	-	-	-	33	893	1080	183	10% Vol
15	CC-10LP-30BA-0.55	299	-	-	-	33	739	1080	183	30% Vol

ตารางที่ 3.7 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เมื่อใช้ ทรายล้วน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)							
		ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC-0.55	332	-	-	-	-	970	1080	183
2	CC-40FA-0.55	200	132	-	-	-	970	1080	183
3	CC-30SL-0.55	232	-	100	-	-	970	1080	183
4	CC-10SF-0.55	298	-	-	34	-	970	1080	183
5	CC-10LP-0.55	298	-	-	-	34	970	1080	183
6	CC-30FA-10LP-0.55	199	99	-	-	34	970	1080	183
7	CC-20SL-10LP-0.55	232	-	67	-	34	970	1080	183

ตารางที่ 3.8 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						
		ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ผง หินปูน	ทราย	หิน	น้ำ	เถ้ากั้นเตา
1	CC-0.55	332	-	-	970	1080	183	-
2	CC-10BA-0.55	332	-	-	893	1080	183	10% Vol
3	CC-30BA-0.55	332	-	-	739	1080	183	30% Vol
4	CC-40FA-0.55	200	132	-	970	1080	183	-
5	CC-40FA-10BA-0.55	200	132	-	893	1080	183	10% Vol
6	CC-40FA-30BA-0.55	200	132	-	739	1080	183	30% Vol
7	CC-30FA-10LP-0.55	199	99	34	970	1080	183	-
8	CC-30FA-10LP-10BA-0.55	199	99	34	893	1080	183	10% Vol
9	CC-30FA-10LP-30BA-0.55	199	99	34	739	1080	183	30% Vol

หมายเหตุ;

MC-30FA-10LP-0.55 หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย ร่วมกับผงหินปูน โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 30 และใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ w/b เท่ากับ 0.55

MC-40FA-10BA-0.55 หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ในทรายเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ w/b เท่ากับ 0.55

CC-35FA-5LP-0.40 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย ร่วมกับผงหินปูน โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 35 และใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 5 โดยปริมาตร เมื่อใช้ w/b เท่ากับ 0.40

CC-30FA-10LP-30BA-0.55 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้า
ลอยร่วมกับผงหินปูน โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 30
และใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 10 โดยใช้เถ้าก้นเตา
แทนที่ในทรายเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ w/b เท่ากับ 0.55



บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมในครั้งนี้ ได้พิจารณาผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลในหัวข้อดังต่อไปนี้ สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา และสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 etailoy ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา โดยสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี

4.1.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ศึกษา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด โดยวิธีเบลน ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา และความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา

4.1.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1) ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 etailoy ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3.13 ส่วนความถ่วงจำเพาะของetailoy ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนนั้นจะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยetailoyมีค่าเท่ากับ 2.21 ส่วนของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าเท่ากับ 2.96 ซิลิกาฟูมมีค่าเท่ากับ 2.20 และผงหินปูนมีค่าเท่ากับ 2.79 สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3,250 ซม.²/ก. ส่วนซิลิกาฟูมจะมีความละเอียดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น

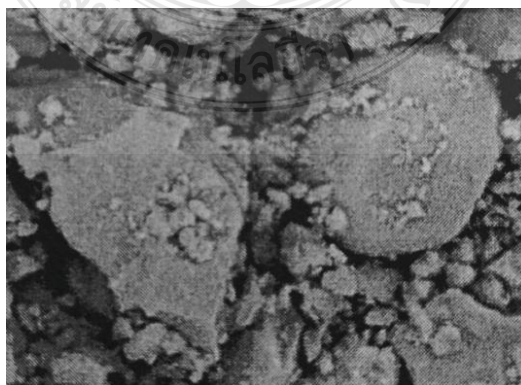
ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ พอร์ต แลนด์ ประเภทที่ 1	วัสดุภาคอุตสาหกรรม			
		ถ้ำลอย	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซิลิกาฟุ่ม	ผงหินปูน
ความถ่วงจำเพาะ	3.13	2.21	2.96	2.20	2.79
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ชม. ² / ก.)	3,250	2,867	4,600	-	5,200

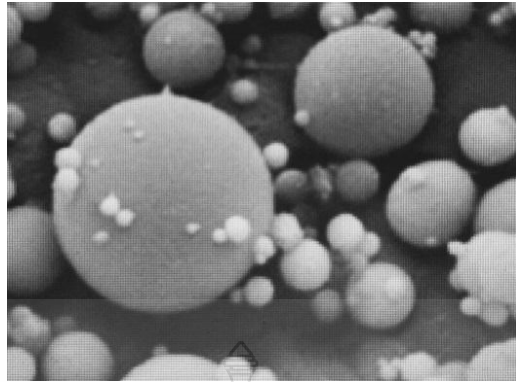
4.1.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope: SEM ของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1) ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาควัสดุ

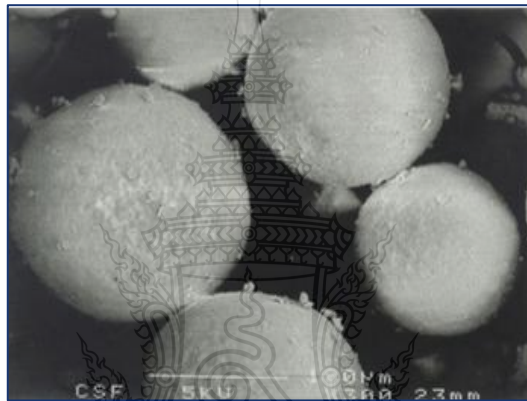
จากการถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาควัสดุที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้โดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope: SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ 4.1 ก) มีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว ส่วนอนุภาคของถ้ำลอย (รูปที่ 4.1 ข) และซิลิกาฟุ่ม (รูปที่ 4.1 ค) พบว่ามีลักษณะผิวเรียบค่อนข้างกลมผิวเรียบ ส่วนรูปร่างของอนุภาคของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (รูปที่ 4.1 ง) และของผงหินปูน (รูปที่ 4.1 จ) มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคคล้ายกับอนุภาคของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว



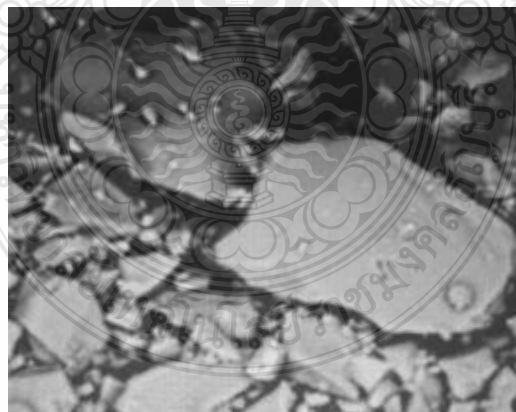
ก) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



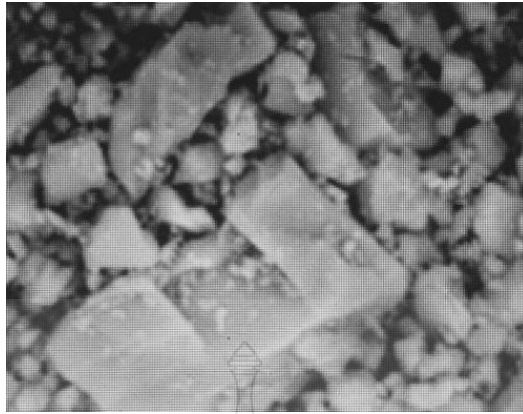
ข) ใ้ล่าย



ค) ซิลิกาฟูม



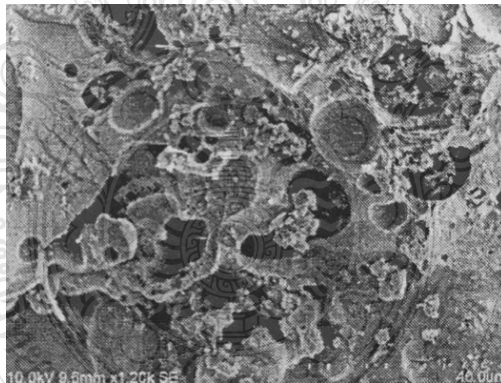
ง) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



จ) ผงหินปูน

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาควัสดุที่ใช้โดยวิธี SEM

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงโดยวิธี SEM ของอนุภาคของเถ้าก้นเตา จากการถ่ายภาพขยายของอนุภาคของเถ้าก้นเตาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน พื้นที่ผิวส่วนใหญ่มีลักษณะที่ขรุขระ มีรูพรุน



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของเถ้าก้นเตาโดยวิธี SEM

4.1.1.3 ความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา โดยทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาในสถานะแห้งด้วยเตาอบตามมาตรฐาน ASTM C128 [22] และคำนวณความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาในสถานะค่าการกักเก็บน้ำ ตามขั้นตอนของ R.Kasemchaisiri และ

S.Tangtermsirikul [12] ซึ่งการทดสอบพบว่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตามีค่าเท่ากับ 2.64 ดังตารางที่ 4.2

4.1.1.4 ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา โดยทดสอบหาค่าการกักเก็บน้ำตามขั้นตอนของ R.Kasemchaisiri และ S.Tangtermsirikul [12] พบว่าค่าการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตา มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.6

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาที่ใช้

รายการ	เถ้าก้นเตา
ความถ่วงจำเพาะ	2.64
ความสามารถในการกักเก็บน้ำ (%)	29.6

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

4.1.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry : XRF ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ดังตารางที่ 4.3 พบว่า SiO_2 ของซิลิกาฟูมมีค่าสูงสุดคือเท่ากับร้อยละ 92 และรองลงมาเป็นของของเถ้าลอย มีค่าค่อนข้างสูง โดยอยู่ที่ 35.71 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.5 ในขณะที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าเท่ากับร้อยละ 36 ส่วนของผงหินปูนมีค่า SiO_2 น้อยมากคือเท่ากับร้อยละ 0.46 ในกรณีของ Al_2O_3 ก็เช่นกันโดยที่ของเถ้าลอยสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 20.44 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เท่ากับร้อยละ 4.97, 0.7 และ 0.06 ตามลำดับ และกรณีของ Fe_2O_3 ก็ทำนองเดียวกันคือ เถ้าลอยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซิลิกาฟูม ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนมีค่าเท่ากับร้อยละ 18.34, 3.78, 1.2, 0.8 และ 0.03 ตามลำดับ ส่วนในกรณีของ CaO นั้นพบว่าของเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 1.73 (เถ้าลอย) ร้อยละ 65.38 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) ร้อยละ 55.25 (ผงหินปูน) และร้อยละ 38.5 ซึ่งเป็นของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

ในส่วนออกไซด์รองอื่นๆ ได้แก่ MgO, Na₂O, K₂O, SO₃, Free Lime และสารที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue %) นอกเหนือจากออกไซด์หลักที่กล่าวมาแล้วพบว่าของปูนซีเมนต์ รวมทั้งเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ร้อยละออกไซด์	ปูนซีเมนต์		ตะกรันเตา		
	ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ถลุงเหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน
SiO ₂	19.5	35.71	36	92	0.46
Al ₂ O ₃	4.97	20.44	11.5	0.7	0.06
Fe ₂ O ₃	3.78	15.54	0.8	1.2	0.03
CaO	65.38	16.52	38.5	0.2	55.25
MgO	1.08	2	10	0.2	0.37
Na ₂ O	<0.01	1.15	-	-	<0.01
K ₂ O	0.47	2.41	-	-	0.01
SO ₃	2.16	4.26	1.45	-	<0.01
LOI	2.27	0.49	-	-	43.79

4.1.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านเตา

จากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยวิธี X-ray fluorescence spectrometry : XRF ของเถ้าถ่านเตา ดังตารางที่ 4.4 พบว่า SiO₂ ของเถ้าถ่านเตาที่ใช้มีค่าเท่ากับร้อยละ 63.18 ในกรณีของ Al₂O₃ พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 19.48 และกรณีของ Fe₂O₃ พบว่าเถ้าถ่านเตามีค่าเท่ากับร้อยละ 7.32 ส่วนในกรณี CaO นั้นพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 2.05

ในส่วนออกไซด์รองอื่นๆ ได้แก่ MgO, Na₂O, K₂O, SO₃, TiO₂ และ P₂O₅ นอกเหนือจากออกไซด์หลักที่กล่าวมาแล้วพบว่าเถ้าถ่านเตาที่ใช้มีค่าน้อยกว่าออกไซด์หลัก โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.28, 1.05, 1.10, 0.12, 0.95 และ 0.22 ตามลำดับ ในส่วนของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเผา (Loss on Ignition; LOI) ก็เช่นเดียวกันคือเท่ากับร้อยละ 2.80

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

ร้อยละออกไซด์	องค์ประกอบทางเคมี
SiO ₂	63.18
Al ₂ O ₃	19.48
Fe ₂ O ₃	7.32
CaO	2.05
MgO	1.28
Na ₂ O	1.05
K ₂ O	1.10
SO ₃	0.12
TiO ₂	0.95
P ₂ O ₅	0.22
LOI	2.80

4.2 สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

สำหรับสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมในครั้งนี้ ได้ศึกษาการหดตัวแบบอโตจีนัสและแบบแห้งของคอนกรีต การเกิดคาร์บอเนชันของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 การหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีต

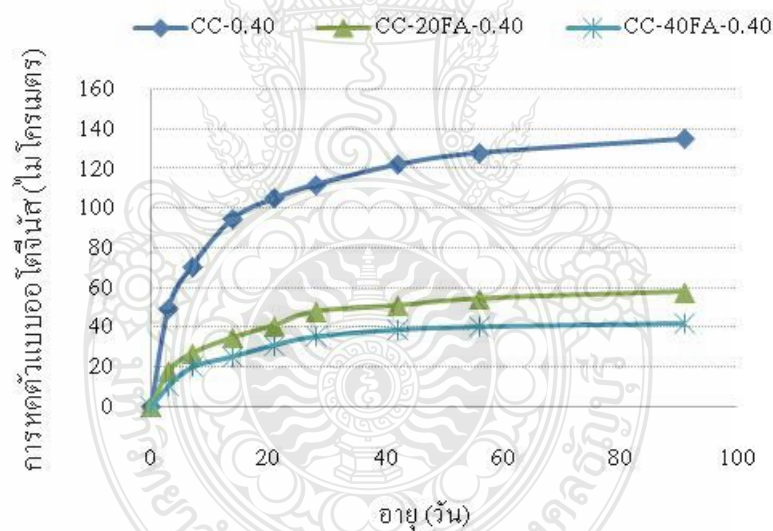
สำหรับในการศึกษาการหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีต โดยที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 ในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบดังต่อไปนี้ 1) ชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และ 2) การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1.1 ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

- กรณีวัสดุประสานร่วม 2 ชนิด

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยใช้ w/b เท่ากับ 0.40 จากการศึกษาพบว่า การหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 20

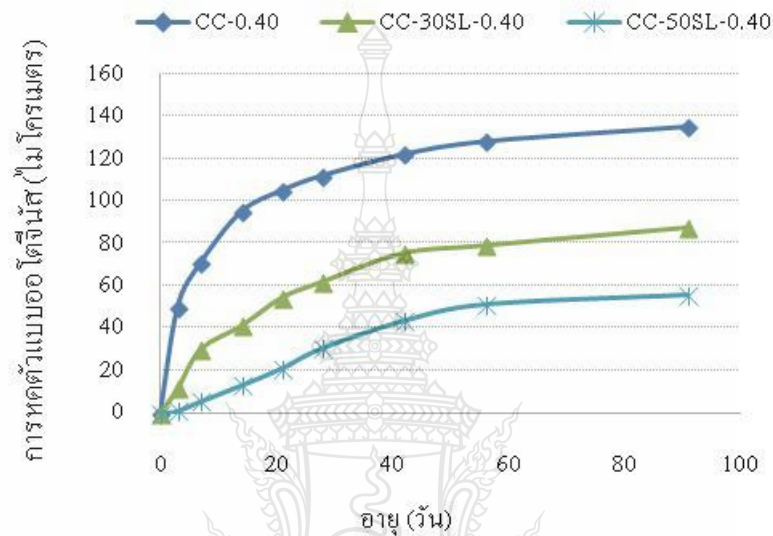
และ 40) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น นั้นแสดงว่าการใช้เถ้าลอยสามารถลดการหดตัวของคอนกรีตได้ เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง การสูญเสียน้ำในช่องว่างคาปิลลารีจึงลดลงตามไปด้วย รวมทั้งการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซึ่งการหดตัวของคอนกรีตเกิดจากการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชันออกจากช่องว่างคาปิลลารี ดังนั้นเมื่อมีน้ำอิสระเพิ่มขึ้นการหดตัวจึงลดลง อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย ก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ซึ่ง CSH ทำหน้าที่เป็นกาวประสานและอุดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ให้มีความแน่นที่เพิ่มขึ้น ส่วนเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่เหมือน Micro Aggregates ในการช่วยลดช่องว่างของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้นสามารถต้านทานการหดตัวได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีการหดตัวของคอนกรีตน้อยกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณมาก ส่งผลให้น้ำอิสระในคอนกรีตมากขึ้นด้วย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมปริมาณเท่ากัน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของคอนกรีตกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย

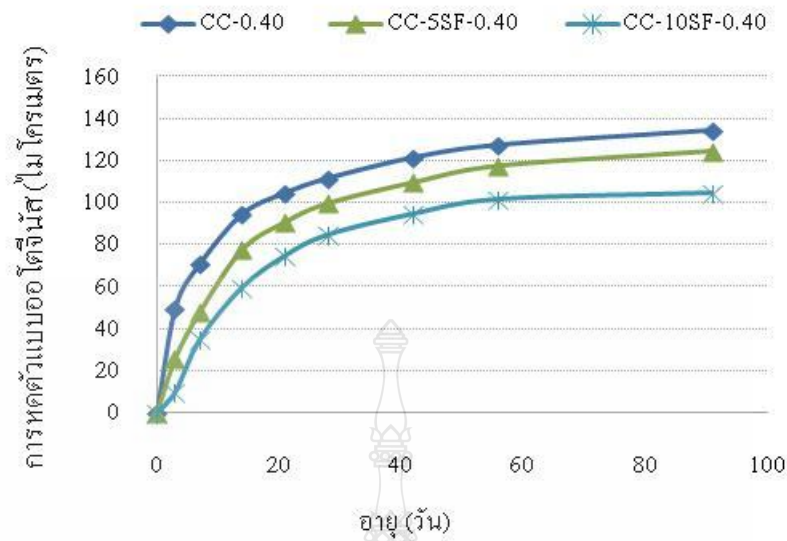
สำหรับรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของคอนกรีตกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.40 พบว่าการหดตัวของคอนกรีตผสมตะกอนเตา

ลึงเหล็กบดละเอียด (ทั้งร้อยละ 30 และ 50) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การหดตัวแบบอโตจินัสมีค่าน้อยลงด้วย เหตุผลเช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานเช่นเดียวกับเถ้าลอย ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว



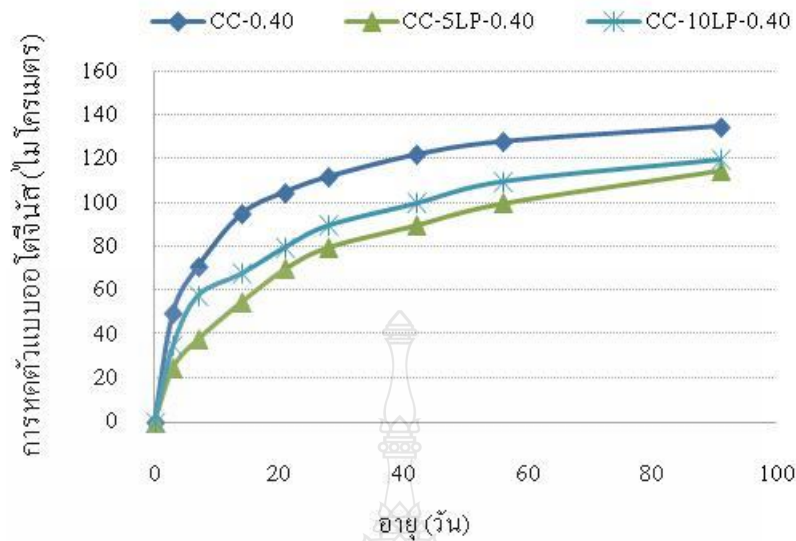
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจินัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.40 พบว่าการหดตัวแบบอโตจินัสของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม (ทั้งร้อยละ 5 และ 10) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เนื่องจากซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอซโซลาน เหตุผลดังกล่าวแล้ว นอกจากนี้ซิลิกาฟูมมีอนุภาคที่ละเอียดมากทำหน้าที่เหมือน Micro Aggregates ในการช่วยลดช่องว่างของคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้น การหดตัวแบบอโตจินัสจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมซิกาฟูม

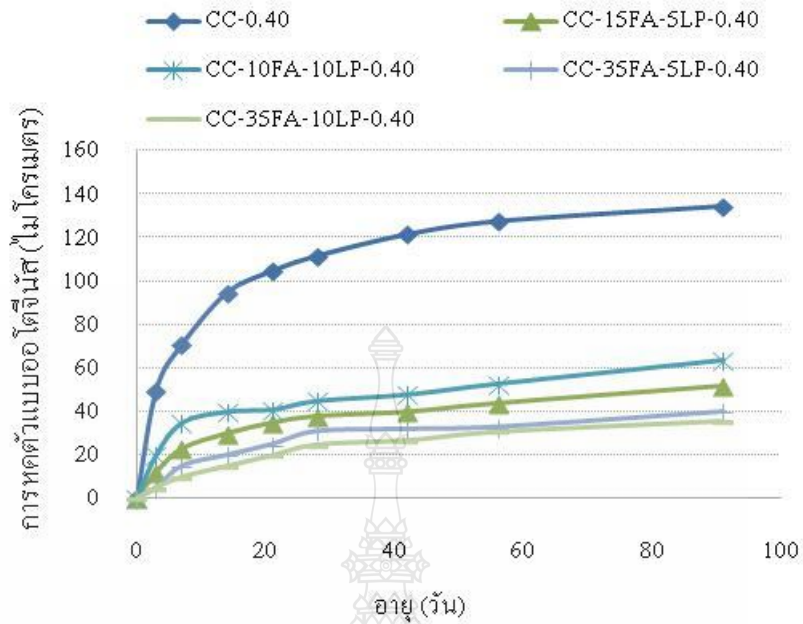
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.40 พบว่าการหาคัดตัวแบบอโตจีนิกส์ของคอนกรีตผสมผงหินปูน (ทั้งร้อยละ 5 และ 10) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ผงหินปูน ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ สามารถเข้าไปช่วยอุดหรือเติมเต็มช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์ได้ ส่งผลให้โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น สามารถต้านทานการหดตัวได้สูง แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ผงหินปูนในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 นั้น พบว่าแนวโน้มการหาคัดตัวแบบอโตจีนิกส์ของคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของการแทนที่ร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ปริมาณร้อยละ 10 แม้ว่าจะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงมากกว่าก็ตาม แต่การแทนที่ร้อยละ 10 นั้น อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไป จึงทำให้โครงสร้างของเพสต์มีความแข็งแรงน้อยกว่าของการแทนที่ด้วยร้อยละ 5 ที่มีความแน่นของเพสต์ที่มากกว่า จึงทำให้เพสต์ผงหินปูนที่แทนด้วยปริมาณร้อยละ 10 ต้านทานการหดตัวได้น้อยกว่าของเพสต์ที่แทนที่ด้วยร้อยละ 5



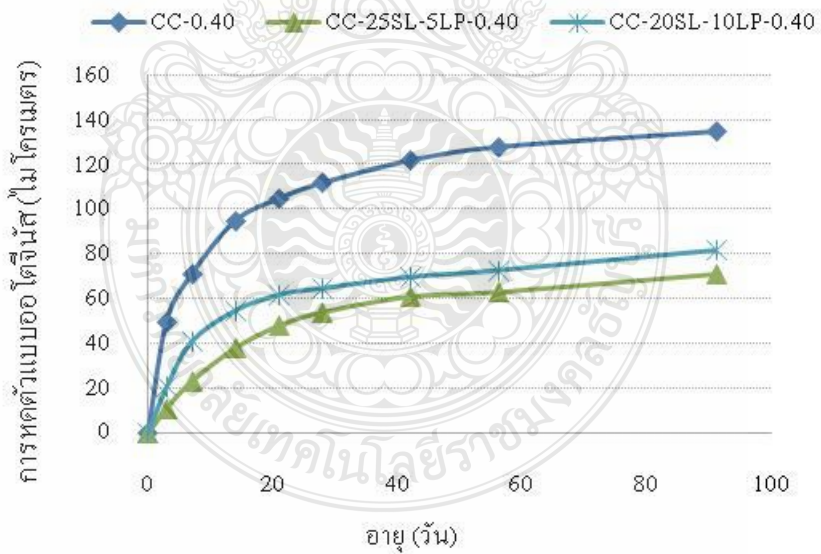
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน

- กรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด

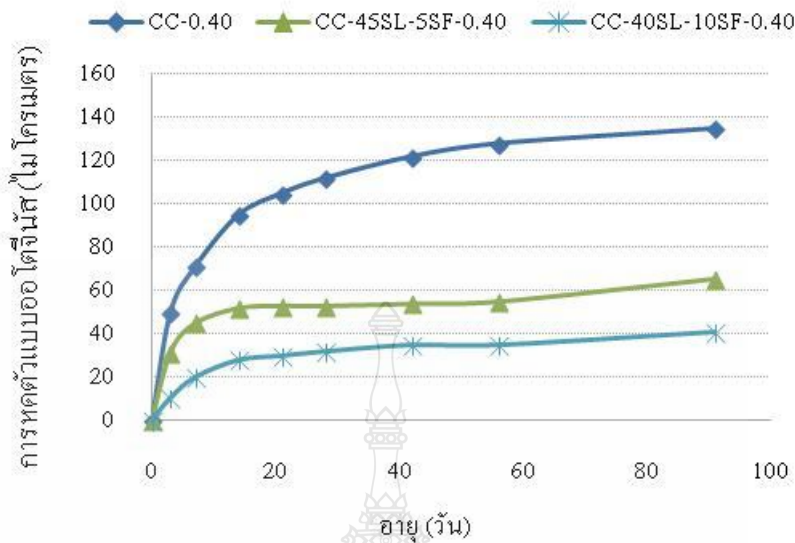
รูปที่ 4.7 ถึง 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 4.7) คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 4.8) และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับซิลิกาฟูม (รูปที่ 4.9) โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.40 พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กร่วมกับผงหินปูน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับซิลิกาฟูม ซึ่งต่างก็เป็นคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด มีค่าการหาคัดตัวแบบอโตจีนิกส์น้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีแนวโน้มไปในทำนองเดียวกับของคอนกรีตผสมวัสดุประสานร่วม 2 ชนิด เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดตัวแบบอโด้จิ้นส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดตัวแบบอโด้จิ้นส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

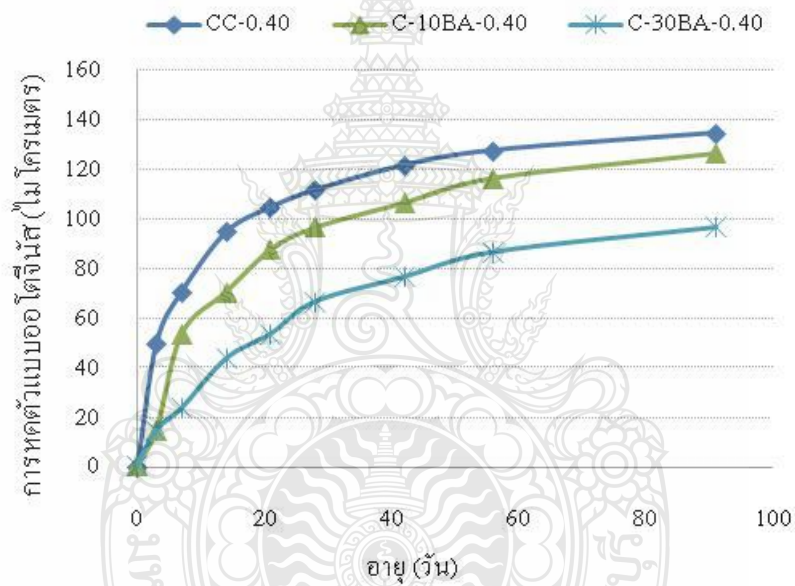


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับซิลิกาฟูม

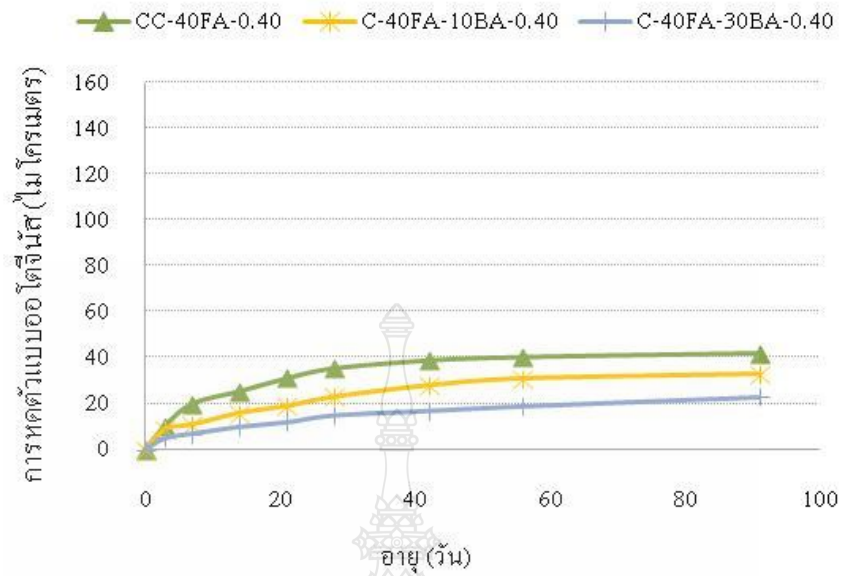
4.2.1.2 ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย และรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมผงหินปูน ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย พบว่าไม่ว่าจะใช้วัสดุประสาน ทั้ง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เถ้าลอยร้อยละ 40 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ซิลิกาฟูม ร้อยละ 10 และผงหินปูน ร้อยละ 10 การหดตัวแบบอโตจีนิกส์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายทั้ง ร้อยละ 10 และ 30 มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะเนื่องจากการ

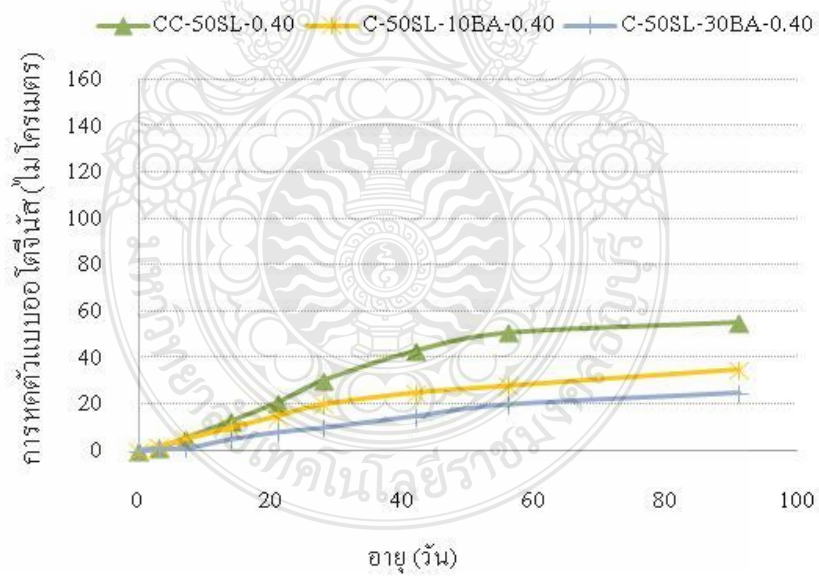
ใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูง มีลักษณะเป็นรูพรุนที่มีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่ จึงทำให้มีปริมาตรของช่องว่างโดยรวมมาก เป็นผลให้เถ้าก้นเตาสามารถกักเก็บน้ำไว้ในรูพรุนได้มาก จึงทำให้มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง ดังนั้นการที่มีน้ำกักเก็บไว้ในรูพรุนของเถ้าก้นเตาได้มาก ทำให้น้ำภายในรูพรุนนี้จะค่อยๆ ถูกนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างช้าๆ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภายหลังคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ส่งผลให้แรงดึงคาปิลารีที่เกิดขึ้นในช่องว่างคาปิลารีลดลง ซึ่งการหดตัวของบอโตจีนัสเกิดจากการสูญเสียน้ำในช่องว่างคาปิลารีเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นการที่มีน้ำอิสระภายในคอนกรีตมากขึ้น จึงทำให้การหดตัวของบอโตจีนัสของคอนกรีตมีค่าลดลง



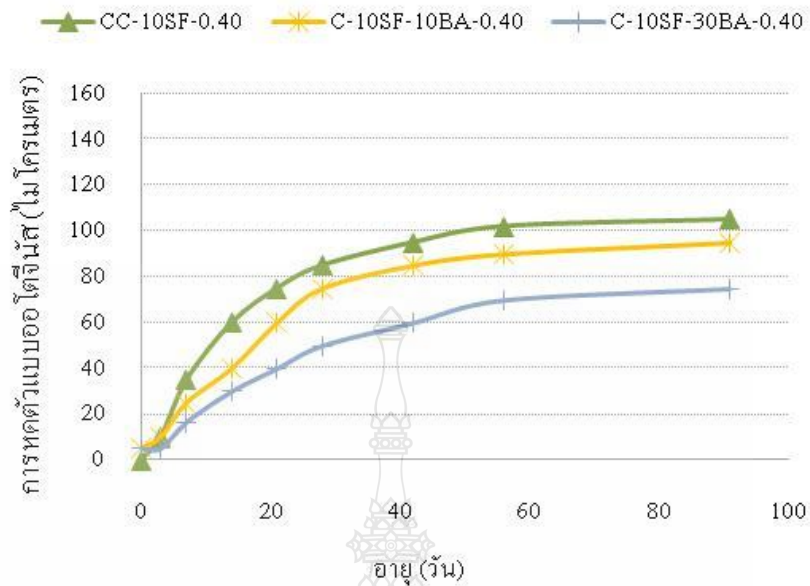
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของบอโตจีนัสกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถ้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย



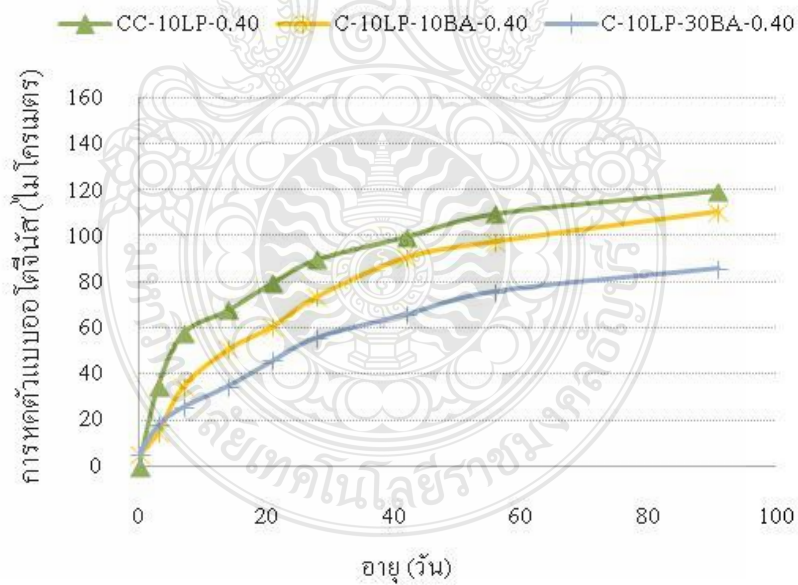
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบออคิเจนกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมถั่วลอย ร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของแบบออคิเจนกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกั่ว เตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมซิลิกาฟุม ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบอโตจีนิกส์กับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมผง หินปูน ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

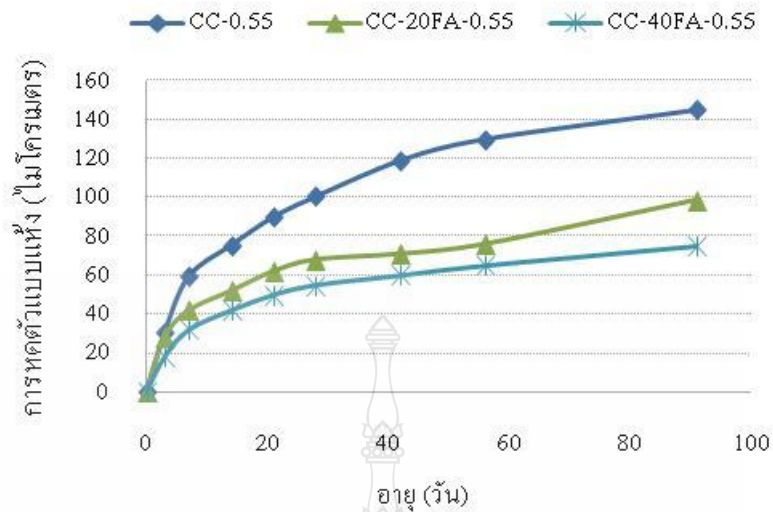
4.2.2 การหัดัวแบบแห่งของคอนกรีต

สำหรับในการศึกษาการหัดัวแบบแห่งของคอนกรีต โดยที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 ในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบดังต่อไปนี้ 1) ชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และ 2) การใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.2.1) ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

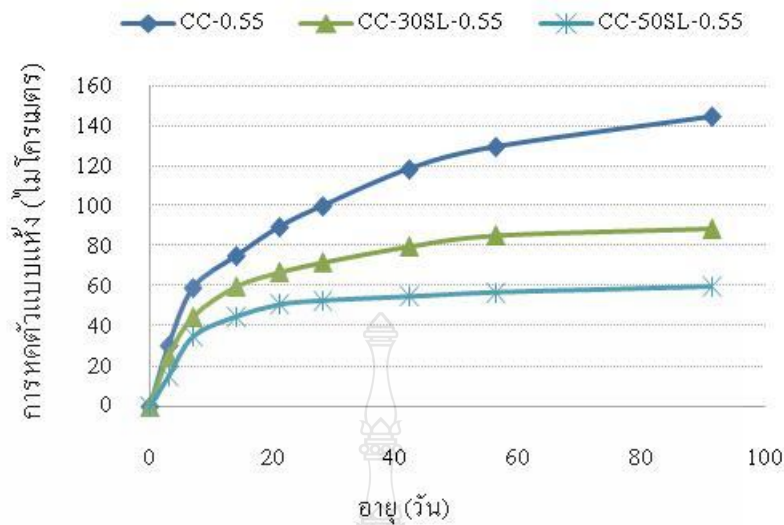
- กรณีวัสดุประสานร่วม 2 ชนิด

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหัดัวแบบแห่งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 จากการศึกษาพบว่าการหัดัวแบบแห่งของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น นั้นแสดงว่าการใช้เถ้าลอยสามารถลดการหัดัวแบบแห่งของคอนกรีตได้ เนื่องจากการใช้เถ้าลอยจะมีส่วนที่ทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยา โดยเถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ซึ่ง CSH ทำหน้าที่เป็นกาวประสานและอุดช่องว่างซีเมนต์เพสต์ ให้ความหนาแน่นขึ้น ส่วนเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่เหมือน Micro Aggregates ในการช่วยลดช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นขึ้นสามารถต้านทานการหัดัวได้ ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่าการหัดัวแบบแห่งน้อยกว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานและช่วยในการเติมเต็มได้ดีกว่า ทำให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้นน้ำจึงระเหยสู่อากาศได้ยากกว่า การหัดัวแบบแห่งจึงลดลง



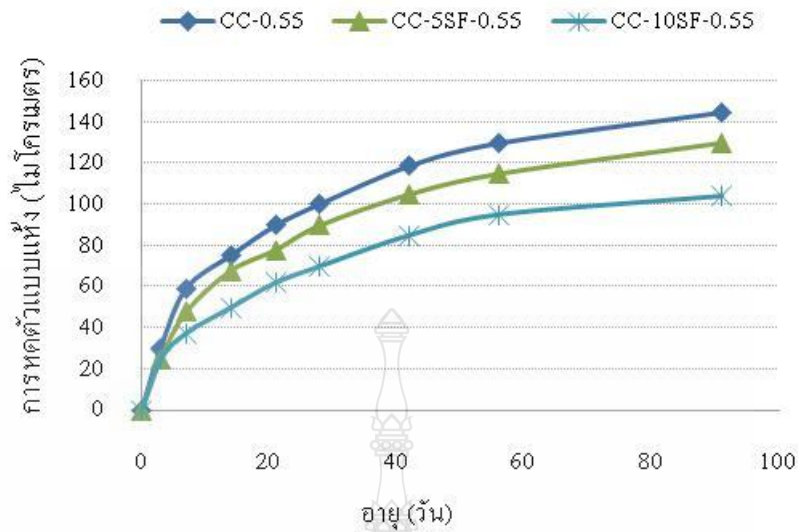
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอย

สำหรับรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกั่วเหล็กบดละเอียดโดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 พบว่าการหัดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกั่วเหล็กบดละเอียด (ทั้งร้อยละ 30 และ 50) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การหัดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมีค่าน้อยลงด้วย เหตุผลเช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว



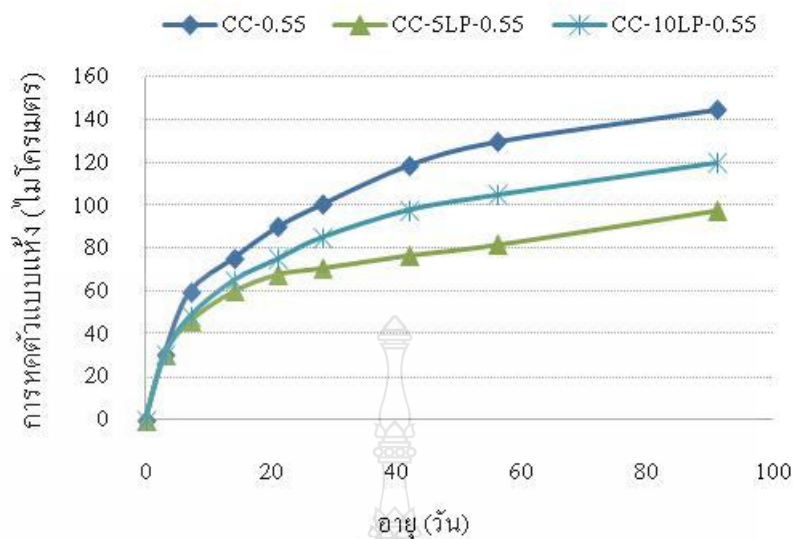
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 พบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม (ทั้งร้อยละ 5 และ 10) มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 10) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ซิลิกาฟุ่มจะมีส่วนที่ทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยา โดยซิลิกาฟุ่มที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ซึ่ง CSH ทำหน้าที่เป็นกาวประสานและอุดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ให้มีความแน่นที่เพิ่มขึ้น ส่วนซิลิกาฟุ่มที่ไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่เหมือน Micro Aggregates ในการช่วยอุดช่องว่างของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้นสามารถต้านทานการหดตัวได้



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

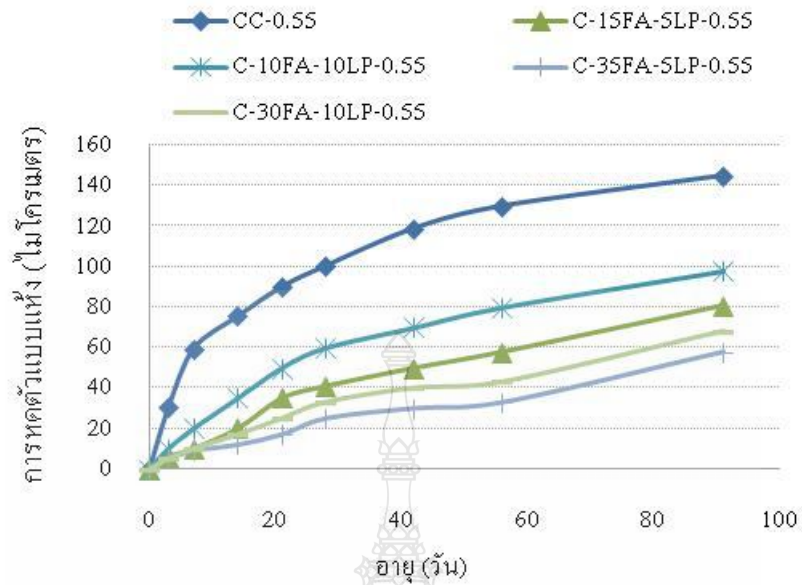
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 พบว่าการหัดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงหินปูน (ทั้งร้อยละ 5 และ 10) มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เนื่องจากความละเอียดของผงหินปูนที่มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถเติมเต็มช่องว่างได้ดีดีกว่า ทำให้ลดช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ได้มากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานต่อการหัดตัวได้ดีขึ้น การหัดตัวจึงมีค่าลดลง ประกอบกับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เป็นเหลี่ยมมุม และมีรูปร่างไม่แน่นอนของผงหินปูน ทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ในอนุภาคที่ยึดติดกันได้ดีกว่าจึงส่งผลน้ำที่จะระเหยออกจากเพสต์ได้ยากขึ้น การหัดตัวจึงมีค่าลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ผงหินปูนในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 นั้น พบว่าแนวโน้มการหัดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของการแทนที่ร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ปริมาณร้อยละ 10 นั้น อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไปทำให้มีช่องว่างมากกว่า จึงทำให้โครงสร้างของเพสต์มีความแข็งแรงน้อยกว่าของการแทนที่ด้วยร้อยละ 5 ที่มีความแน่นของเพสต์ที่มากกว่า การหัดตัวแบบแห้งจึงมีค่ามากขึ้น



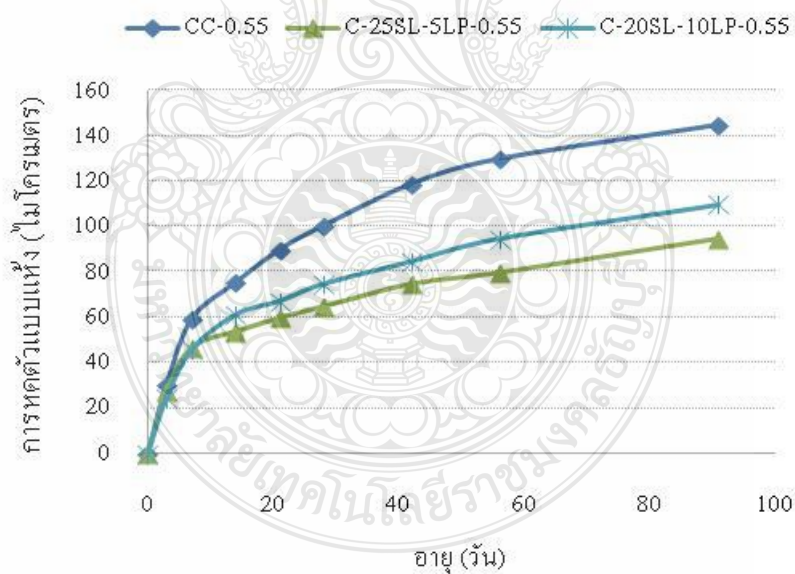
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมผงหินปูน

- กรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด

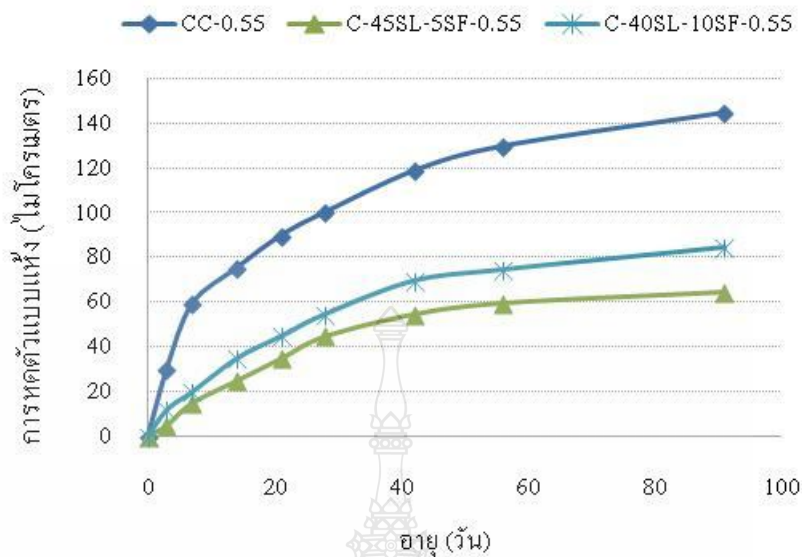
รูปที่ 4.19 ถึง 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 4.19) คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 4.20) และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับซิลิกาฟูม (รูปที่ 4.21) โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กร่วมกับผงหินปูน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับซิลิกาฟูม ซึ่งต่างก็เป็นคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด มีค่าการหัดตัวแบบแห้งน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน โดยมีแนวโน้มไปในทำนองเดียวกับของคอนกรีตผสมวัสดุประสานร่วม 2 ชนิด เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

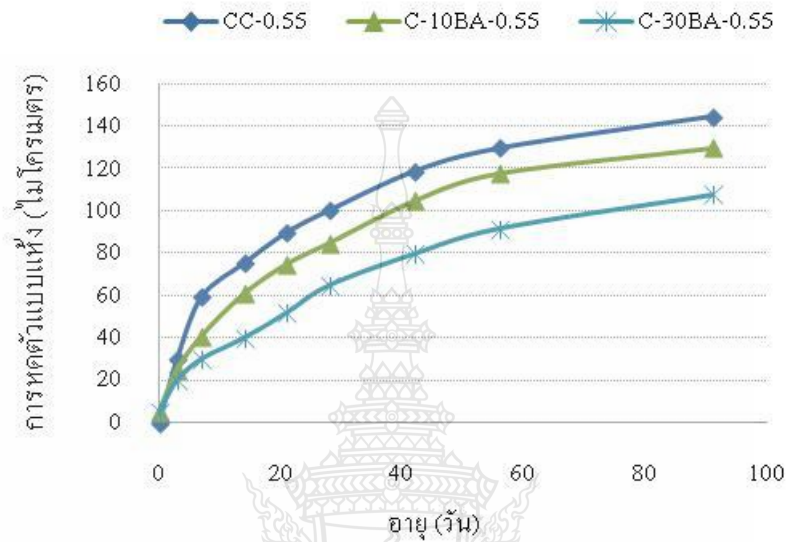


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับซิลิกาฟวม

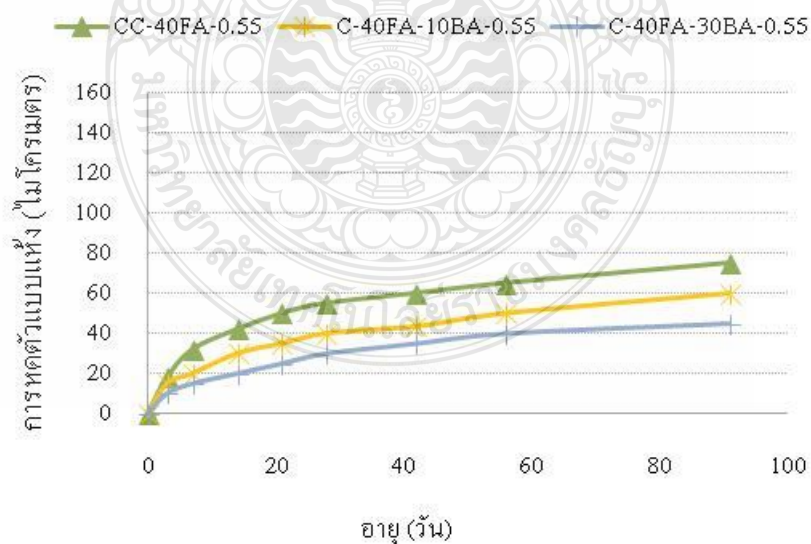
4.2.1.2 ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมซิลิกาฟวม ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย และรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมผงหินปูน ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย พบว่า ไม่ว่าจะใช้วัสดุประสาน ทั้ง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เถ้าลอยร้อยละ 40 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ซิลิกาฟวม ร้อยละ 10 และผงหินปูน ร้อยละ 10 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายทั้ง ร้อยละ 10 และ 30 มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะการใช้เถ้าก้นเตาที่มีค่าการกักเก็บน้ำสูง มีลักษณะเป็นรูพรุนที่มีขนาด

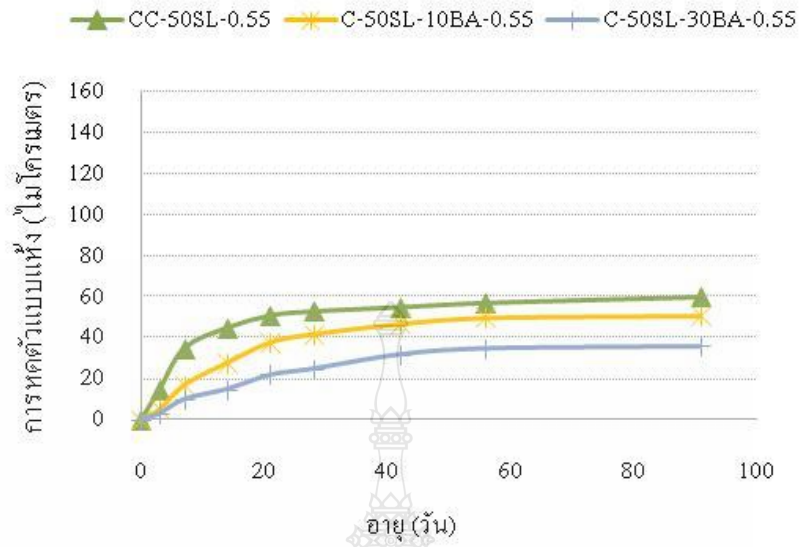
โดยเฉลี่ยใหญ่ จึงทำให้มีปริมาตรของช่องว่างโดยรวมมาก เป็นผลให้เด้ากั้นเตาสามารถยึดและกักเก็บน้ำไว้ภายในรูปพรุนได้ดี จึงทำให้น้ำระเหยออกได้ยากขึ้น ทำให้การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมีค่าลดลง



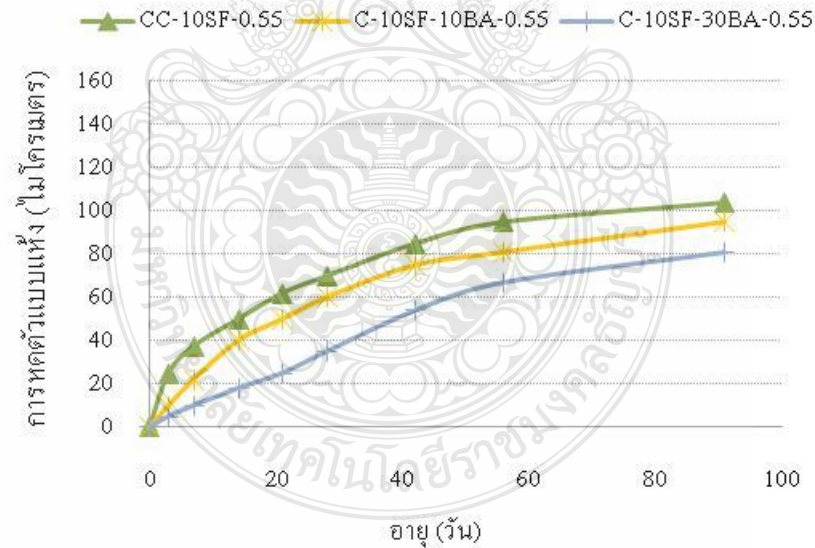
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เด้ากั้นเตาแทนที่ทราย



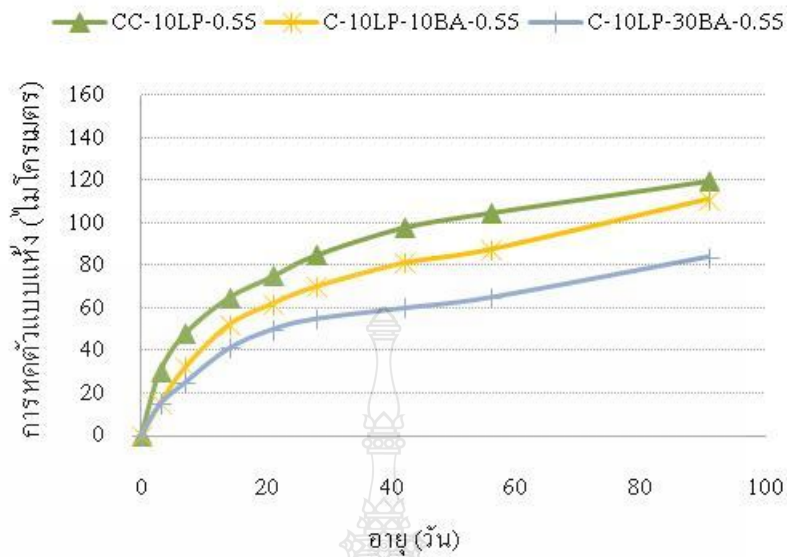
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย ร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เด้ากั้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียด ร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างการหัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการหาคัดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างคอนกรีตผสมผงหินปูน ร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

4.2.3 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

สำหรับในการศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต โดยที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 ในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบดังต่อไปนี้ 1) ชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย และ 3) ผลกระทบจากชนิดของการบ่ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.3.1) ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

การศึกษากการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตที่ผสม เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม ผงหินปูน เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และผสมด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับซิลิกาฟูม โดยศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชั่น ที่อายุ 28 วันและ 91 วัน โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตเท่ากับ 0.55 โดยรูปที่ 4.27 ตัวอย่างของคอนกรีตที่ทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยใช้น้ำยาฟีนอลทาตินในแอลกอฮอล์ชนิดลงบนผิวคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตดังกล่าวได้แสดงดังตารางที่ 4.5

รูปที่ 4.28 แสดงความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน แล้วเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน จากการศึกษาพบว่าเมื่อคอนกรีตกรณีนี้

เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน (รูปที่ 4.27 ก)) ความลึกของคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ทั้ง 2 วัสดุประสาน และ 3 วัสดุประสาน (เป็นการผสมร่วมกับผงหินปูน) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะ การลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลาน จะเป็นการลดปริมาณ Ca(OH)_2 จึงเป็นการเร่งการเกิดคาร์บอนชั้น ส่วนในกรณีของผงหินปูนแม้ว่าไม่ได้เป็นสารปอซโซลาน แต่ก็เป็นการลดปูนซีเมนต์ลง จึงทำให้ลด Ca(OH)_2 จึงทำให้เกิดคาร์บอนชั้นมากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ส่วนคอนกรีตเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน (รูปที่ 4.27 ข)) พบว่าการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ทั้ง 2 วัสดุประสาน และ 3 วัสดุประสานยังให้ผลการเกิดคาร์บอนชั้นมากกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

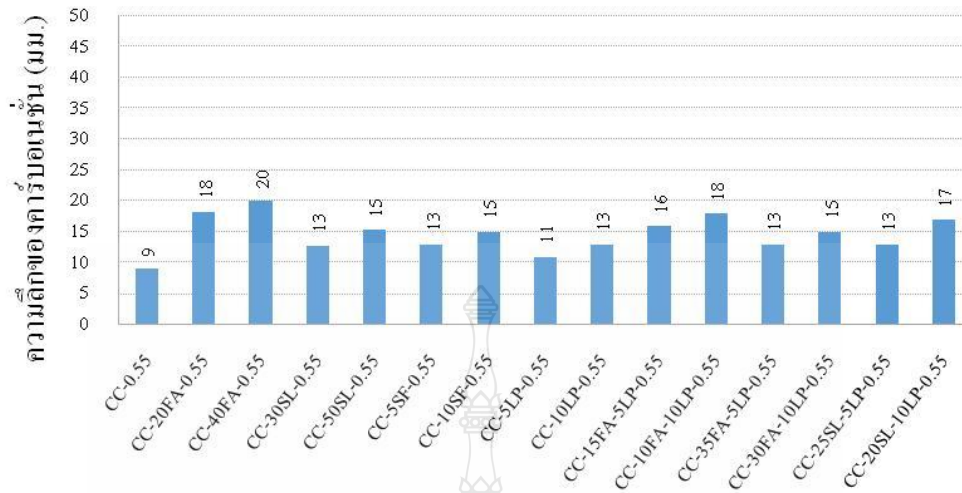
สังเกตว่าในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของผงหินปูนไม่ว่าจะเป็นทั้ง 2 วัสดุประสานและ 3 วัสดุประสาน จะให้ค่าความลึกที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนซึ่งไม่ใช่วัสดุปอซโซลาน (ไม่ลด Ca(OH)_2) และตัวของผงหินปูนเองเป็นสารเติมเต็มจึงเป็นการช่วยให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้นจึงส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้ยากขึ้น



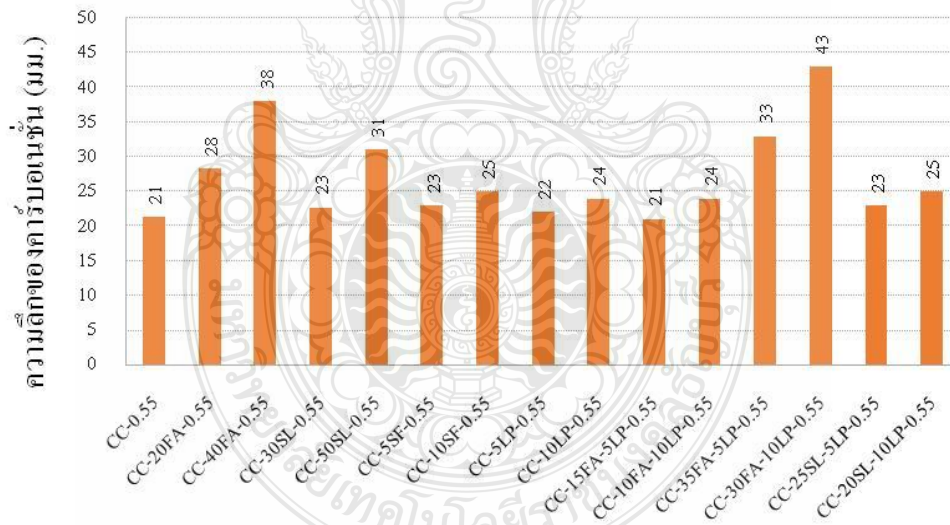
รูปที่ 4.27 ตัวอย่างของคอนกรีตที่ทดสอบการเกิดคาร์บอนชั้น โดยใช้น้ำยาฟีนอลทาฮีนในแอลกอฮอล์ชนิดลงบนผิวคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 4.5 ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

ลำดับ	สัญลักษณ์	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)	
		เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	
		เป็นระยะเวลา 28 วัน	เป็นระยะเวลา 91 วัน
1	CC-0.55	9	21
2	CC-20FA-0.55	18	28
3	CC-40FA-0.55	20	38
4	CC-30SL-0.55	13	23
5	CC-50SL-0.55	15	31
6	CC-5SF-0.55	13	23
7	CC-10SF-0.55	15	25
8	CC-5LP-0.55	11	22
9	CC-10LP-0.55	13	24
10	CC-15FA-5LP-0.55	16	21
11	CC-10FA-10LP-0.55	18	24
12	CC-35FA-5LP-0.55	13	33
13	CC-30FA-10LP-0.55	15	43
14	CC-25SL-5LP-0.55	13	23
15	CC-20SL-10LP-0.55	17	25



ก) เเชษฐก้าชคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



ข) เเชษฐก้าชคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

รูปที่ 4.28 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

4.2.3.2 ผลกระทบจากการใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย

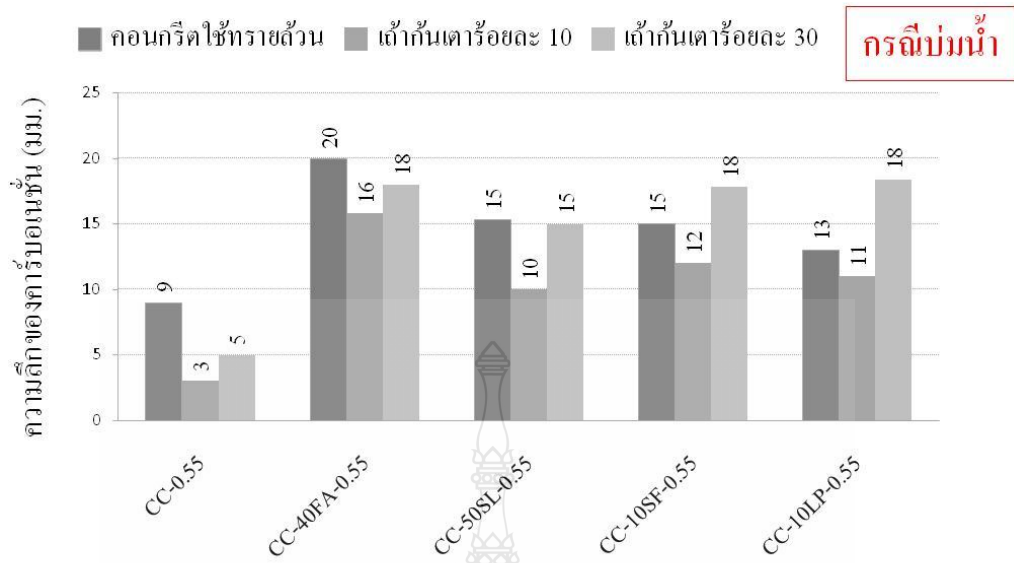
ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10 และ 30 ในกรณีการบ่มน้ำและบ่มอากาศ แล้วเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน พบว่า การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้ากั้นเตาเป็นวัสดุที่มีบางส่วนสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (ส่วนที่มีความละเอียด) เมื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานจึงทำให้คอนกรีตทึบขึ้นทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้ยากทำให้การเกิดคาร์บอนชั้นน้อยลง

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้ากั้นเตาร้อยละ 10 และ 30 พบว่าการแทนที่ร้อยละ 30 กลับได้ค่าการเกิดคาร์บอนชั้นมากกว่าร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเป็นไปได้เพราะว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้ากั้นเตาร้อยละ 30 จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้ากั้นเตาร้อยละ 10 จึงเป็นการลด Ca(OH)_2 จึงทำให้เกิดคาร์บอนชั้นมากขึ้น

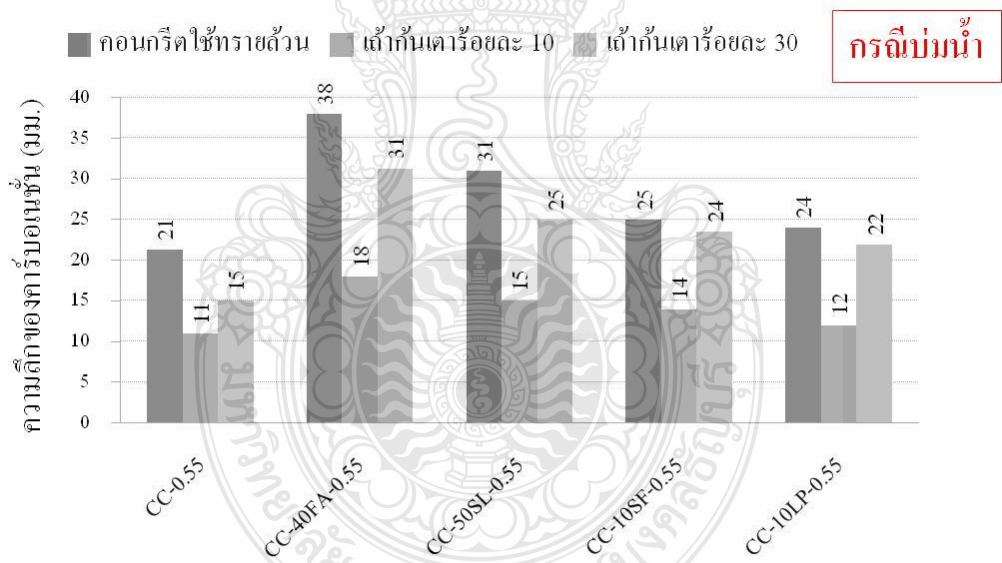
สังเกตว่าเมื่อคอนกรีตเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 วัน และ 91 วัน เมื่อเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นานขึ้นจะทำให้เกิดคาร์บอนชั้นมากขึ้น ทั้งนี้เพราะว่ามีการเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่า

ตารางที่ 4.6 ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อใช้เสาเข็มเดาแทนที่ทราย

ลำดับ	สัญลักษณ์	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)			
		เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นระยะเวลา 28 วัน		เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นระยะเวลา 91 วัน	
		ปมน้ำ	ปมอากาศ	ปมน้ำ	ปมอากาศ
		1	CC-0.55	9	8
2	CC-10BA-0.55	3	2	11	23
3	CC-30BA-0.55	5	4	15	25
4	CC-40FA-0.55	20	19	38	41
5	CC-40FA-10BA-0.55	16	14	18	35
6	CC-40FA-30BA-0.55	18	16	31	40
7	CC-50SL-0.55	15	13	31	43
8	CC-50SL-10BA-0.55	10	8	15	38
9	CC-50SL-30BA-0.55	15	12	25	42
10	CC-10SF-0.55	15	13	25	32
11	CC-10SF-10BA-0.55	12	11	14	23
12	CC-10SF-30BA-0.55	18	12	24	30
13	CC-10LP-0.55	13	12	24	29
14	CC-10LP-10BA-0.55	11	9	12	27
15	CC-10LP-30BA-0.55	18	16	22	36

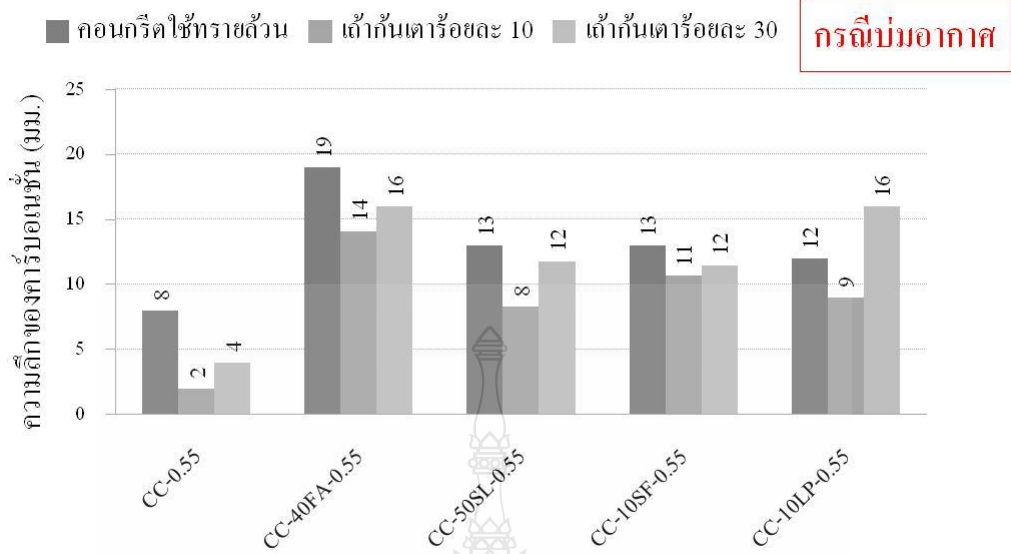


ก) เฝ้าดูก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน

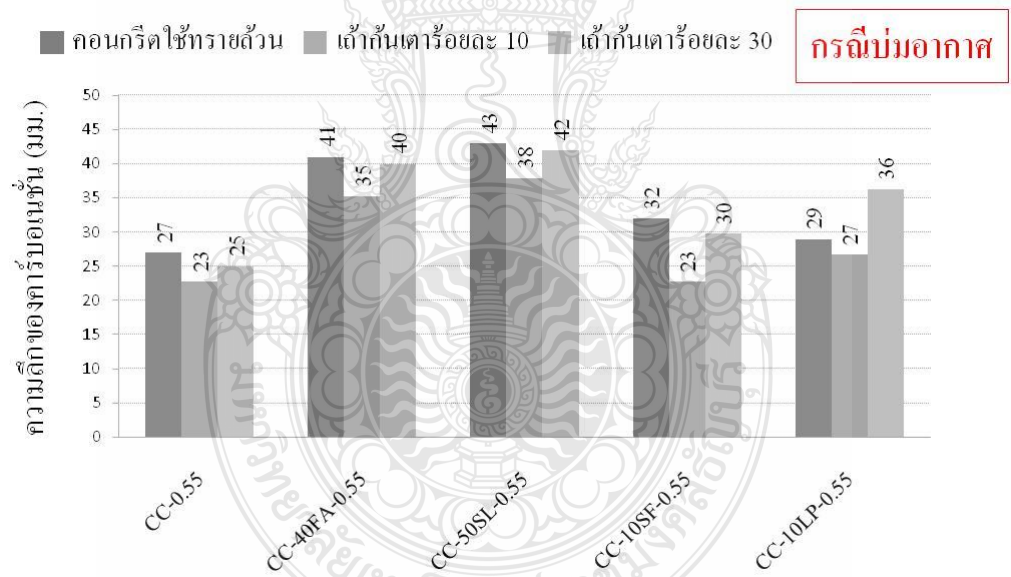


ข) เฝ้าดูก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

รูปที่ 4.29 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เต้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ



ก) เฝชิญกั้ชคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน

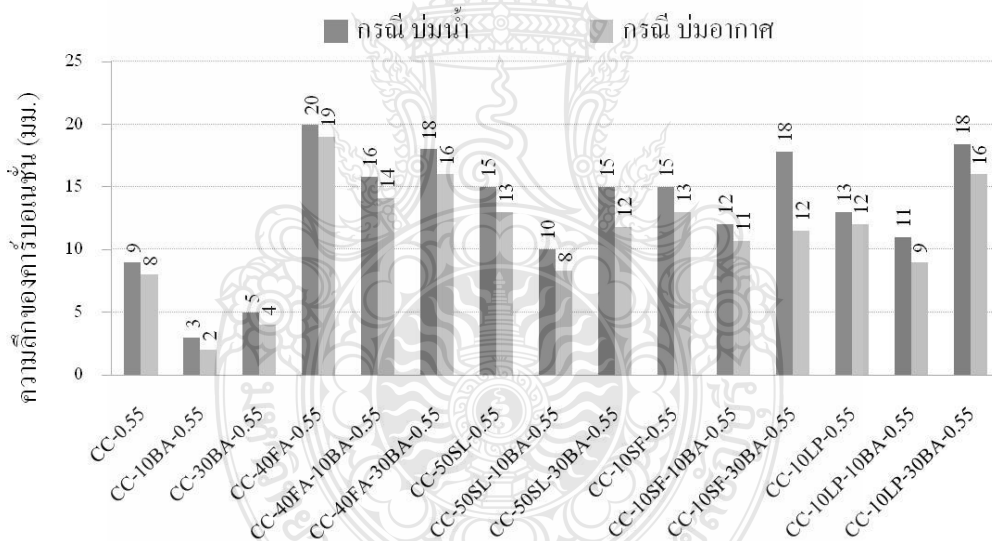


ข) เฝชิญกั้ชคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

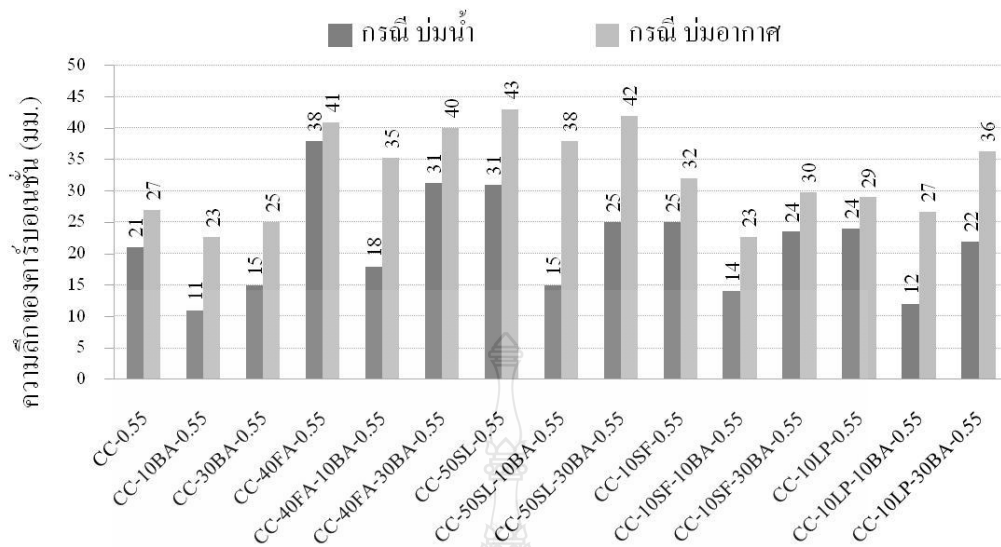
รูปที่ 4.30 ความลึกคาร์บอนเนชันของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้เติ้กัันเตาแทนที่ทราย กรณีเป๋มอากาศ

4.2.3.3 ผลกระทบจากชนิดของการบ่ม

รูปที่ 4.31 แสดงการเกิดคาร์บอนเนชั่นเนื่องจากการบ่มน้ำและบ่มอากาศแล้ว นำคอนกรีตผสมถั่วลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และ คอนกรีตผสมผงหินปูน โดยใช้ทรายล้วนและ ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย โดยเผชิญก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 28 และ 91 วัน พบว่าที่การเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน นั้นการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่บ่มอากาศ เพราะการบ่มน้ำ นั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีจึงเป็นการไปลด Ca(OH)_2 มากกว่าคอนกรีตที่บ่มอากาศ แต่เมื่อ การเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน กลับพบว่าการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำน้อยกว่าของคอนกรีตที่บ่มอากาศ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการบ่มน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยา ปอซโซลานที่เกิดสมบูรณ์จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบขึ้นทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปได้ช้า ส่งผลให้เกิดคาร์บอนเนชั่นได้น้อย



ก) เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



ข) เฝื่อนักษาคาร์บอนไดออกไซด์ 91 วัน

รูปที่ 4.31 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายกรณีสมน้ำและปมอากาศ

4.2.4 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 นั้น โดยตารางที่ 4.7 และ 4.8 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คลูอมบ์) ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนและเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย ตามลำดับ โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตประกอบไปด้วย 1) ผลกระทบของชนิดวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย และ 3) ผลกระทบจากชนิดของการบ่ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.7 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

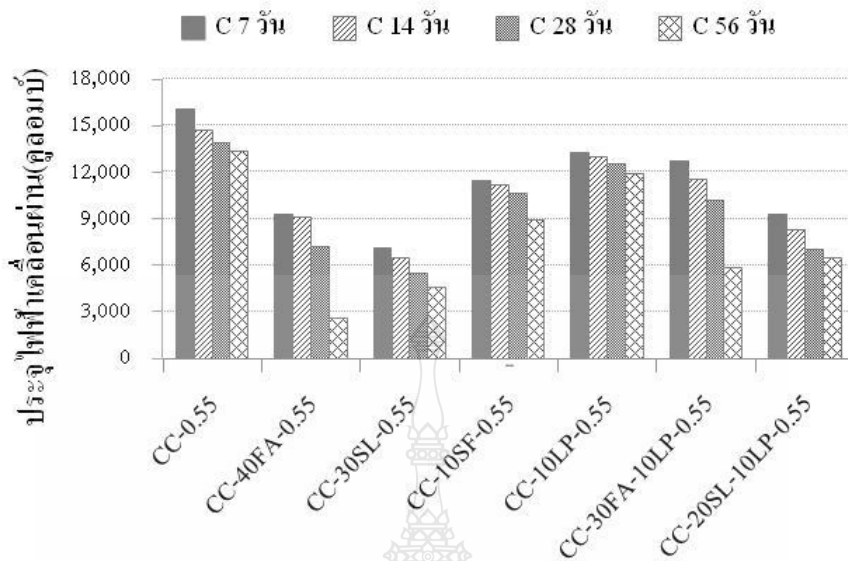
ลำดับ	สัญลักษณ์	ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์)			
		อายุการบ่ม (วัน)			
		7	14	28	56
1	CC-0.55	16058	14697	13864	13311
2	CC-40FA-0.55	9243	9054	7164	2619
3	CC-30SL-0.55	7137	6435	5472	4527
4	CC-10SF-0.55	11484	11196	10674	8874
5	CC-10LP-0.55	13257	12951	12510	11898
6	CC-30FA-10LP-0.55	12762	11547	10152	5817
7	CC-20SL-10LP-0.55	9315	8289	7002	6507

ตารางที่ 4.8 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย

ลำดับ	สัญลักษณ์	ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์)					
		อายุบ่ม 7 วัน		อายุบ่ม 28 วัน		อายุบ่ม 56 วัน	
		บ่มน้ำ	บ่มอากาศ	บ่มน้ำ	บ่มอากาศ	บ่มน้ำ	บ่มอากาศ
1	CC-0.55	12546	12843	6966	8172	6264	7704
2	CC-10BA-0.55	16344	20214	14625	14814	9819	10980
3	CC-30BA-0.55	20583	21303	16380	17037	9522	11511
4	CC-40FA-0.55	12060	13734	3285	8757	1557	7758
5	CC-40FA-10BA-0.55	19107	19548	2970	10062	1638	7101
6	CC-40FA-30BA-0.55	17397	19710	3267	11970	1494	8253
7	CC-30FA-10LP-0.55	14184	19647	3141	8901	2115	5139
8	CC-30FA-10LP-10BA-0.55	20034	26127	16425	16632	11556	12780
9	CC-30FA-10LP-30BA-0.55	15651	17847	4608	12933	2178	9927

4.2.4.1 ผลกระทบของชนิดวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.32 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 เมื่ออายุ 7, 14, 28, และ 56 วัน พบว่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าระดับการซึมผ่านที่ดีกว่า (มีค่าปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ที่น้อยกว่า) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานและผลจากความละเอียดของวัสดุดังกล่าว จะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในพาสต์ โดยเฉพาะซิลิกาฟูม และผงหินปูน (ซึ่งผงหินปูนไม่ใช่สารปอซโซลาน) จึงส่งผลให้ระดับการซึมผ่านที่ดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และจากการศึกษาพบว่าระดับการซึมผ่านของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยมีค่าระดับการซึมผ่านที่ดีกว่าของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ซึ่งเป็นการแทนที่ 3 วัสดุประสาน ให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีของ 2 วัสดุประสานที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้น โดยเฉพาะอายุ 28 และ 56 วัน จะมีค่าระดับการซึมผ่านที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอายุของตัวอย่างคอนกรีต 7 และ 14 วัน เพราะตัวอย่างคอนกรีตเมื่ออายุมากขึ้นจะมีความทึบน้ำมากขึ้น ส่งผลให้สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่า ซึ่งพิจารณาและเปรียบเทียบจากผลการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าตามมาตรฐานของ ASTM C1202 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตทุกสัดส่วนที่ศึกษา และทุกอายุ มีค่าปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านมากกว่า 4,000 คูลอมบ์ ซึ่งจัดอยู่ในระดับการซึมผ่านได้ในระดับสูง ยกเว้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 56 วัน มีแนวโน้มน้อยกว่า 4,000 คูลอมบ์ ซึ่งจัดอยู่ในระดับการซึมผ่านได้ในระดับปานกลาง



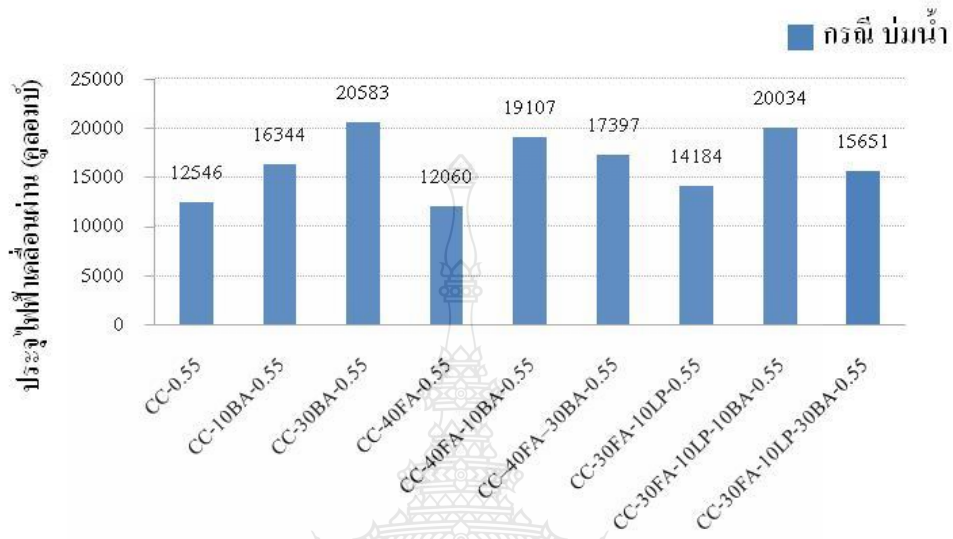
รูปที่ 4.32 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (กิโลวัตต์) ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

4.2.4.2 ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

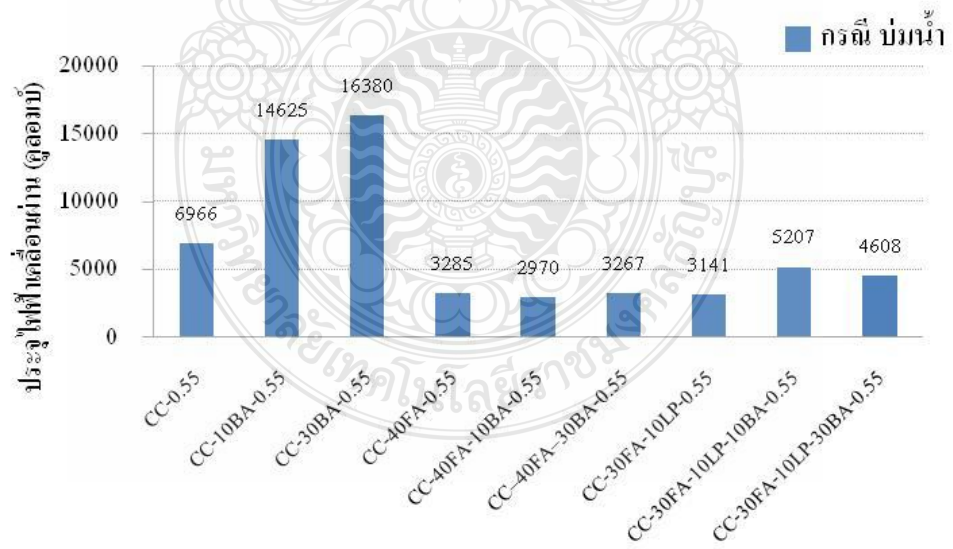
1) กรณีปม่น้ำ

รูปที่ 4.33 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (กิโลวัตต์) ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีปม่น้ำ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งอายุ 7, 28 และ 56 วัน พบว่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 30) เพราะการใช้เถ้าก้นเตาที่มีความพรุน มีลักษณะเป็นรูพรุนที่มีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้อยลง เช่นเดียวกับคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 7 วัน พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย (ทั้งร้อยละ 10 และ 30) มีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เพราะการใช้เถ้าก้นเตาที่มีความพรุน มีลักษณะเป็นรูพรุนที่มีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้อยลง อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของตัวอย่างคอนกรีตที่ 28 และ 56 วัน กลับพบว่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าไม่แตกต่างกับของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เพราะเมื่อคอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้น ที่อายุมากขึ้น 28 และ 56 วัน ปฏิกริยาปอซโซลานจากการใช้เถ้าลอยมากขึ้นและการเติมเต็มของผงหินปูน ส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่น

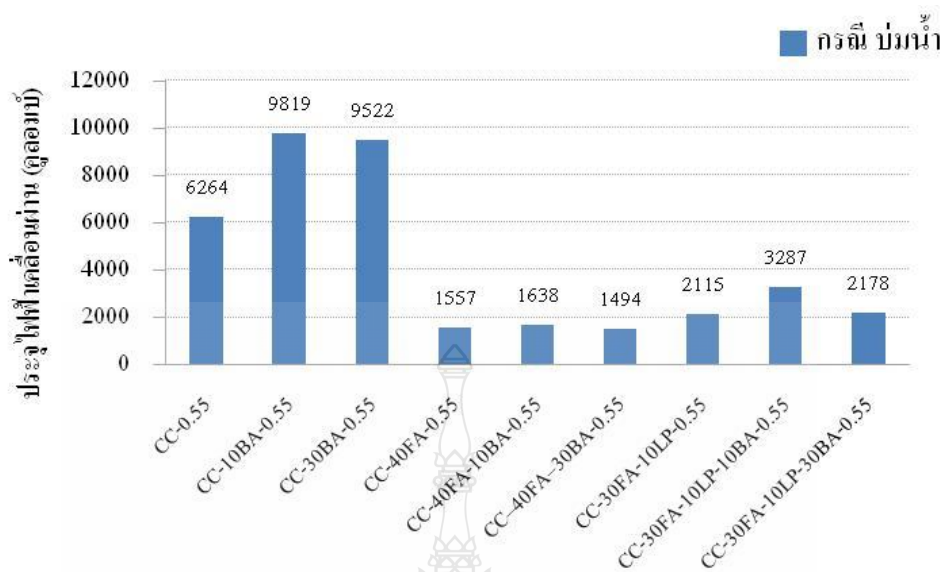
และที่บวมมากขึ้นสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี โดยเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาและทรายล้วนไม่มีผลต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต



ก) อายุ 7 วัน



ข) อายุ 28 วัน

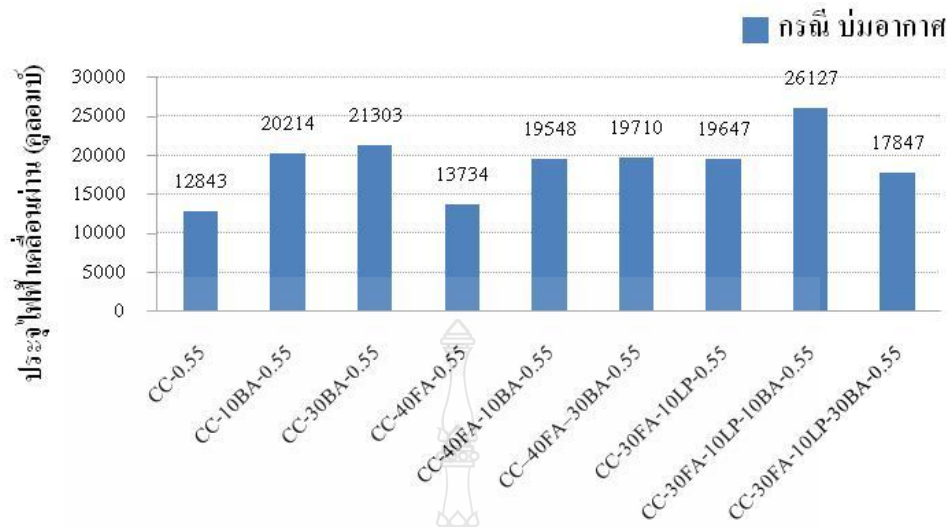


ค) อายุ 56 วัน

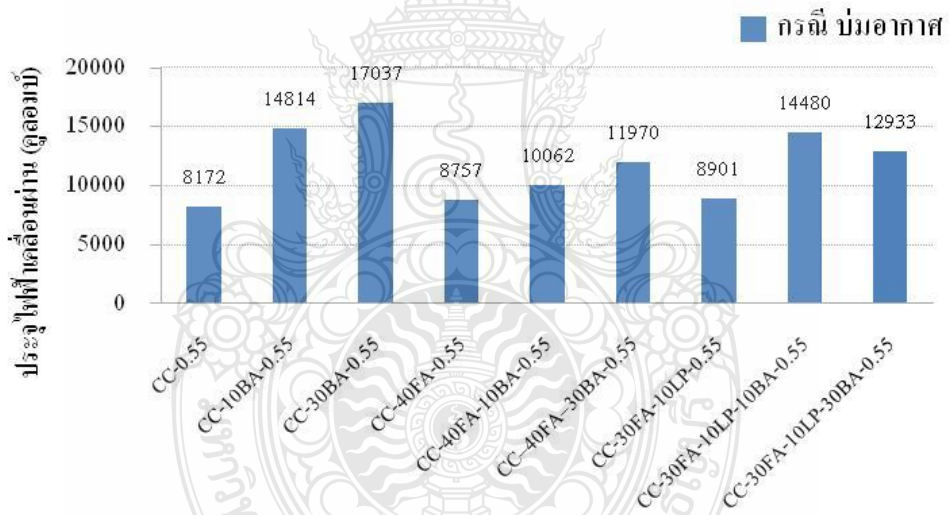
รูปที่ 4.33 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำ

2) กรณีบ่มอากาศ

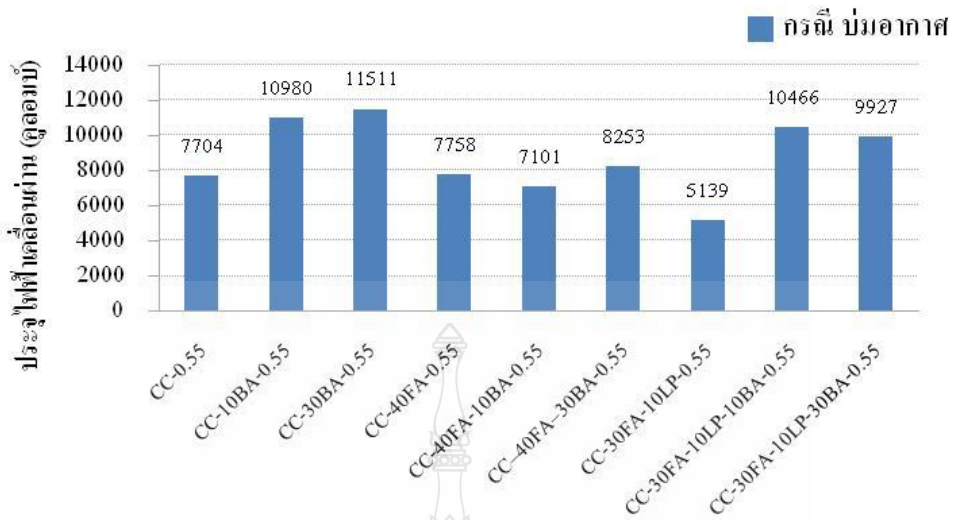
รูปที่ 4.34 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มอากาศ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ทั้งอายุ 7, 28 และ 56 วัน พบว่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายมีค่าต่ำกว่าของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เพราะการใช้เถ้ากั้นเตาที่มีความพรุน มีลักษณะเป็นรูพรุนที่มีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้อยลง ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตน้อยลง



ก) อายุ 7 วัน



ข) อายุ 28 วัน

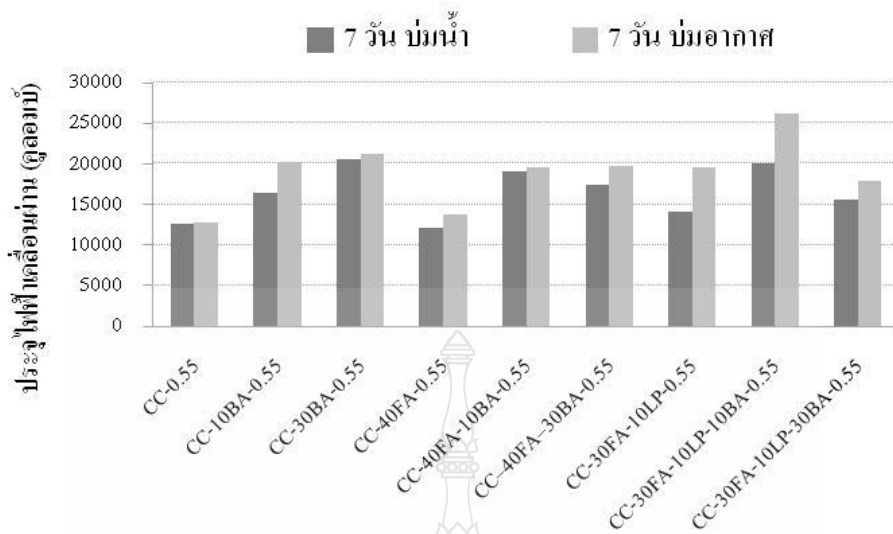


ค) อายุ 56 วัน

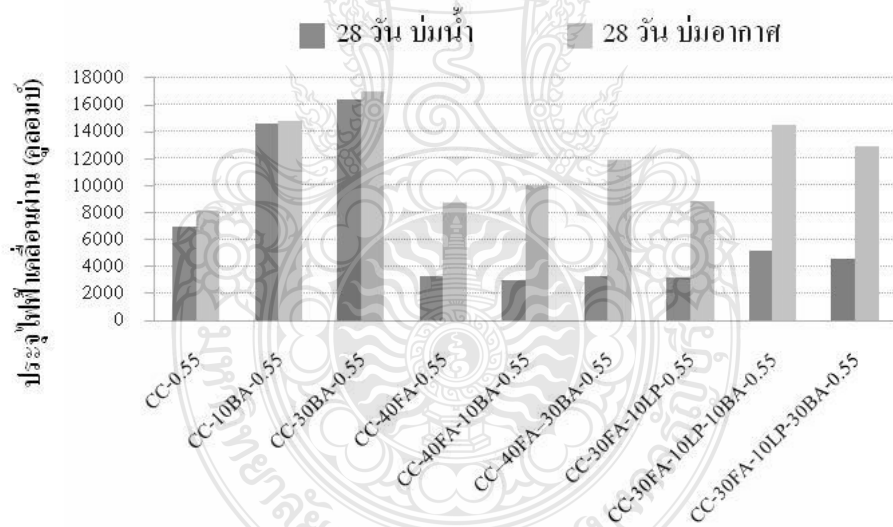
รูปที่ 4.34 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (กิโลวัตต์) ของคอนกรีตที่ใช้เส้ากันเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มอากาศ

4.2.4.2 ผลกระทบจากชนิดของการบ่ม

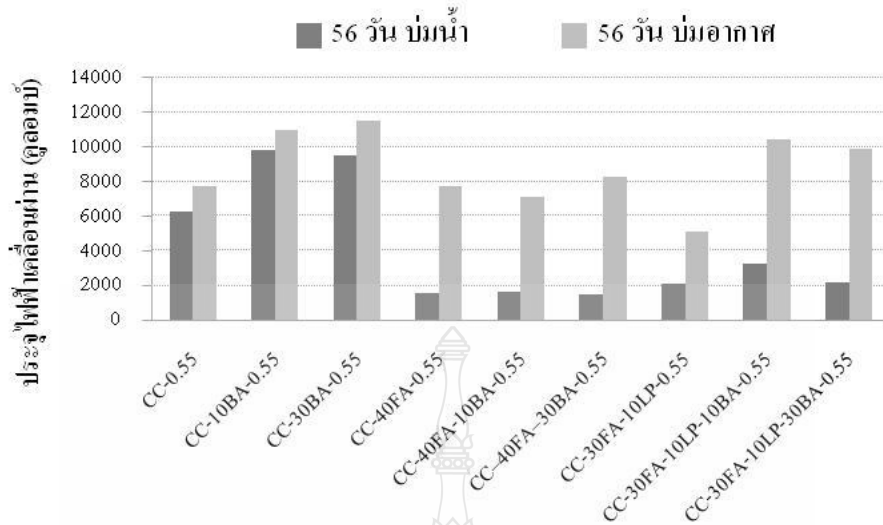
รูปที่ 4.35 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (กิโลวัตต์) ของคอนกรีตที่ใช้เส้ากันเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำและกรณีบ่มอากาศ พบว่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตกรณีบ่มน้ำมีค่าดีกว่าเมื่อบ่มอากาศ (ทั้ง 7, 28 และ 56 วัน) ทั้งนี้เพราะกรณีที่บ่มน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้สมบูรณ์กว่าส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบมากกว่า ทำให้มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ดีกว่ากรณีบ่มอากาศ



ก) อายุ 7 วัน



ข) อายุ 28 วัน



ค) อายุ 56 วัน

รูปที่ 4.35 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทราย กรณีบ่มน้ำและกรณีบ่มอากาศ

4.2.5 ความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

การศึกษาต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ในครั้งนี้ ได้พิจารณาในการประเมินความต้านทานซัลเฟตใน 2 ลักษณะ คือ การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.5.1 การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต

การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟตในครั้งนี้จะพิจารณาถึง 1) ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายต่อการขยายตัวในสารละลายซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์

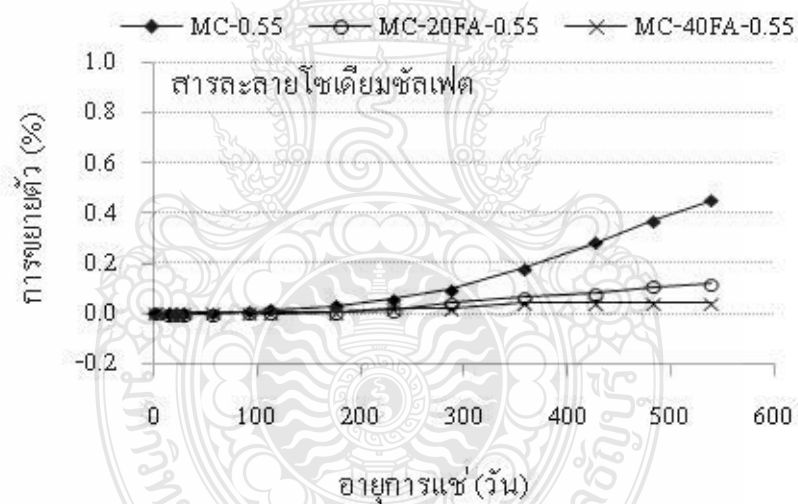
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีการแทนที่เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ใน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยได้พิจารณาทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

(ก) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

- กรณีวัสดุประสานร่วม 2 ชนิด

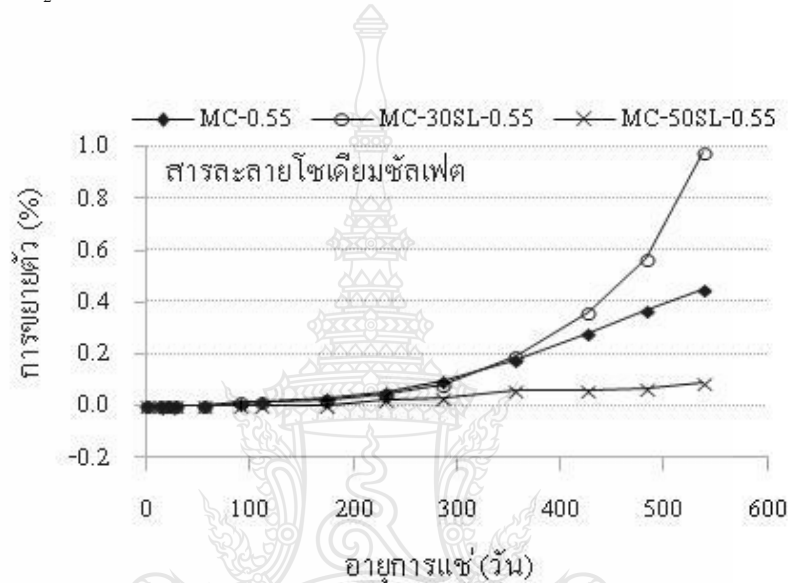
รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 โดยใช้ w/b เท่ากับ 0.55 จากการศึกษาพบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มาก (ร้อยละ 40) ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้สามารถลด Ca(OH)_2 ได้มากจึงทำให้เกิดยิปซัมและ Ettringite น้อย ส่งผลให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตลดน้อยลง



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

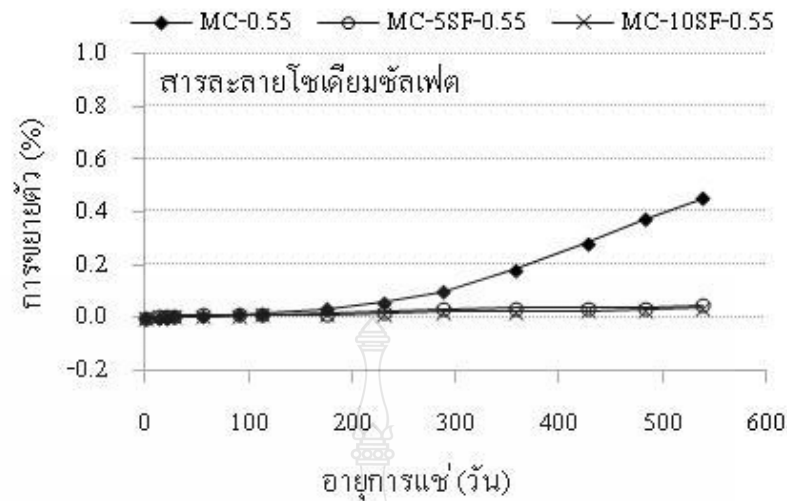
รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 และ 50 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 จะมีแนวโน้มค่าการขยายตัวมากกว่าของตัวอย่างมอร์ตาร์

ดาร์ปุนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ตะกรันเตากลูกละเอียดซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 38.50) ในปริมาณที่น้อยนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดน้อยซึ่งทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้น้อยทำให้ Ettingite เกิดมาก ในขณะที่ตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตากลูกละเอียดร้อยละ 50 มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปุนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ร้อยละ 50 นั้น ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดมาก ทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ทำให้เกิด Ettingite น้อย ส่งผลให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตน้อย



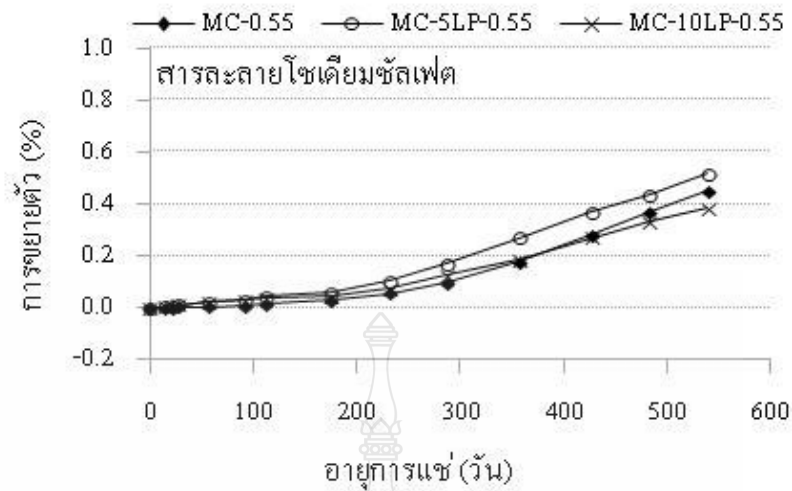
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปุนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตากลูกละเอียด

รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ปุนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 พบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 และ 10 จะมีแนวโน้มค่าการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ปุนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 รวมทั้งซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงซึ่งจะเข้าไปช่วยเติมเต็มช่องว่างในมอร์ตาร์จึงทำให้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากส่งผลให้ค่าการขยายตัวน้อย



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 พบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 จะมีแนวโน้มค่าการขยายตัวมากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้

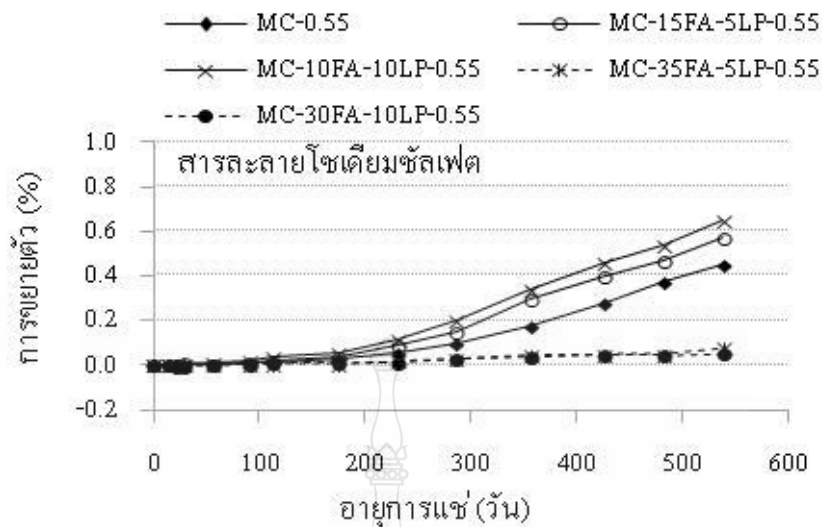
เนื่องจากผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติการทำปฏิกิริยาทางเคมีแต่จะมีคุณสมบัติทางกายภาพกล่าวคือ ผงหินปูนจะเข้าไปอุดช่องว่างในมอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีความแน่นเพิ่มขึ้นและทำให้ช่องว่างน้อยลง เมื่อสารละลายโซเดียมซิลิเฟต เข้าไปทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในมอร์ตาร์ทำให้เกิดยิปซัมและ Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากมอร์ตาร์เหลือช่องว่างให้ขยายตัวน้อยแต่ Ettringite ยังเกิดการขยายตัวต่อไปเรื่อยๆ จึงเป็นผลทำให้มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 มี การขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน

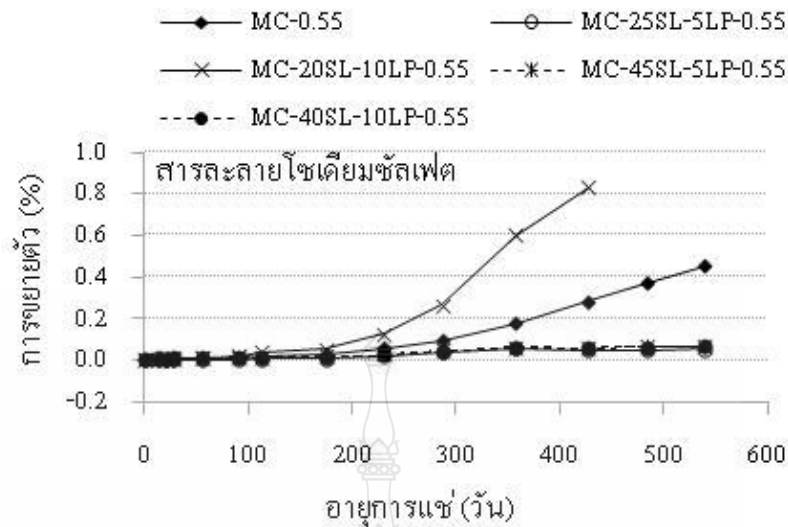
- กรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด

รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 30 และ 35 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 พบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่ามากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งมีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 16.52) ในปริมาณที่น้อย ผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด Ca(OH)_2 ได้น้อย จึงทำให้เกิด Ettringite มากขึ้น รวมทั้งการแทนที่ ผงหินปูนจะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างทำให้ตัวอย่างมอร์ตาร์มีช่องว่างน้อยลงในการรองรับ Ettringite ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีการแทนที่ด้วยผงหินปูน ส่วนเมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมในปริมาณที่มากซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มาก จะช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้มาก ส่งผลให้การขยายตัวน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน



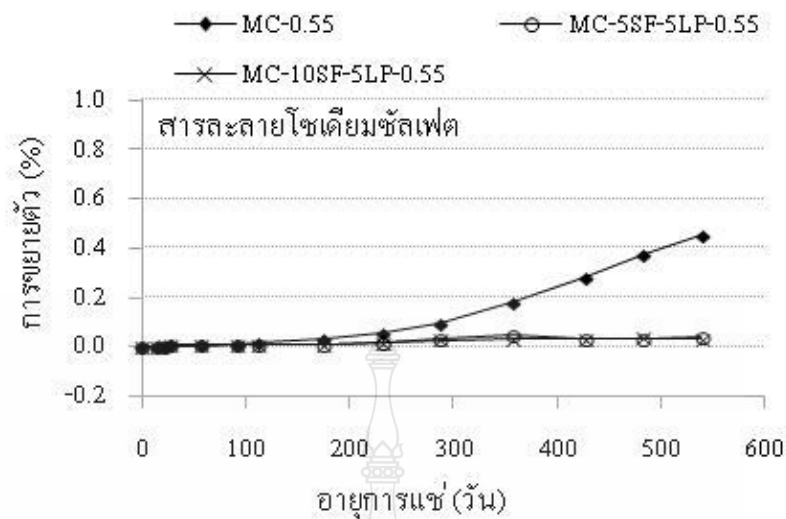
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมถ้ำลอยร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมตระกรันเตากลูงเหล็กบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 25, 40 และ 45 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมตระกรันเตากลูงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 จะมีค่าการขยายตัวมากกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนซึ่งเป็นการแทนที่ด้วยตระกรันเตากลูงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 20) โดยมีปริมาณ CaO ของตระกรันเตากลูงเหล็กบดละเอียดค่อนข้างสูง ส่งผลให้การขยายตัวมีค่าค่อนข้างมากกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการแทนที่ด้วยตระกรันเตากลูงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากทำให้ค่าการขยายตัวน้อยลง เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีของการแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่ม ส่วนการแทนที่ผงหินปูนจะช่วยให้การเติมเต็มช่องว่างทำให้ตัวอย่างมอร์ตาร์มีความแน่นเพิ่มขึ้นและทำให้ช่องว่างน้อยลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีของการแทนที่ด้วยผงหินปูน

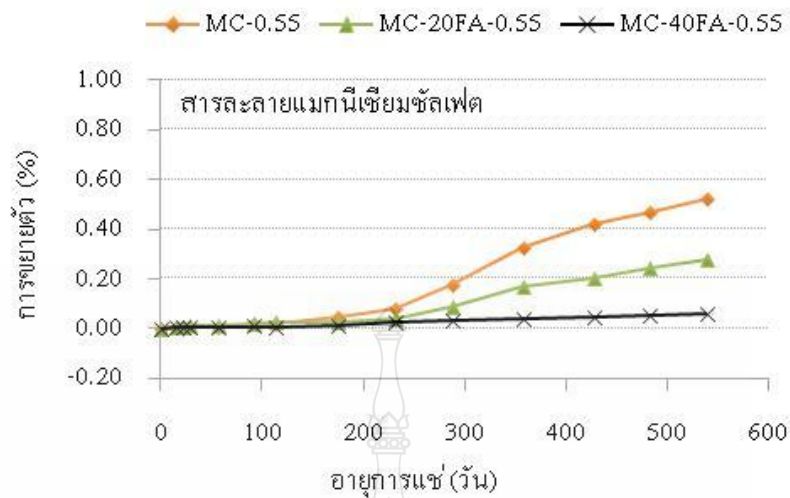


รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน

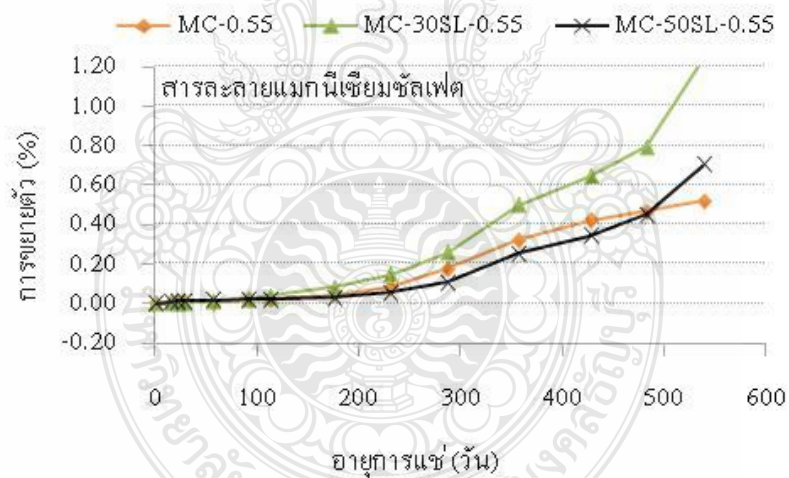
(ข) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

- กรณีวัสดุประสานร่วม 2 ชนิด

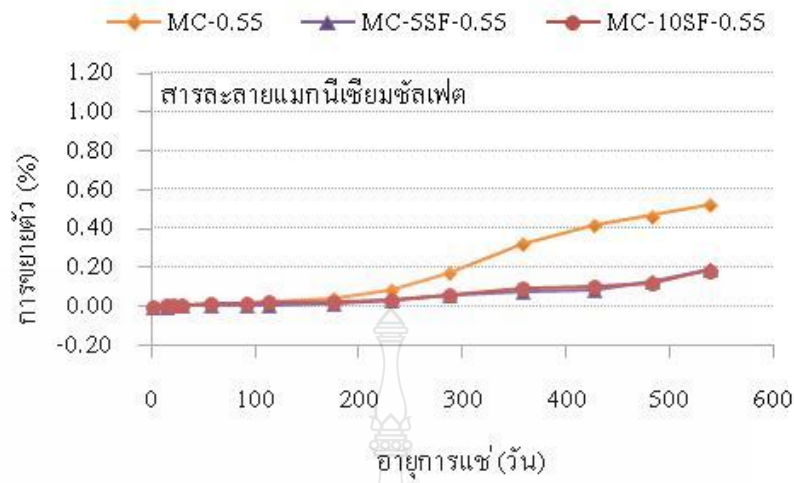
รูปที่ 4.43 ถึง 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 (รูปที่ 4.43) ของมอร์ตาร์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 50 (รูปที่ 4.44) ของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 4.45) และของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 4.46) พบว่า การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผสมซิลิกาฟุ่ม จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว ยกเว้นกรณีของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน ให้ค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ดีกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการใช้ผงหินปูนจะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างได้ดีทำให้ตัวอย่างมอร์ตาร์มีความทึบมากขึ้น โดยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าได้ยากกว่า ส่งผลให้การขยายตัวน้อยลง



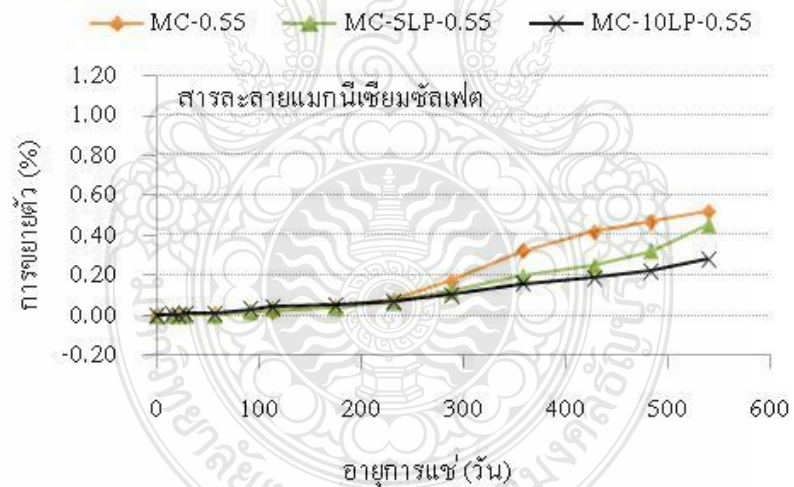
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมถั่วลันเตา



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



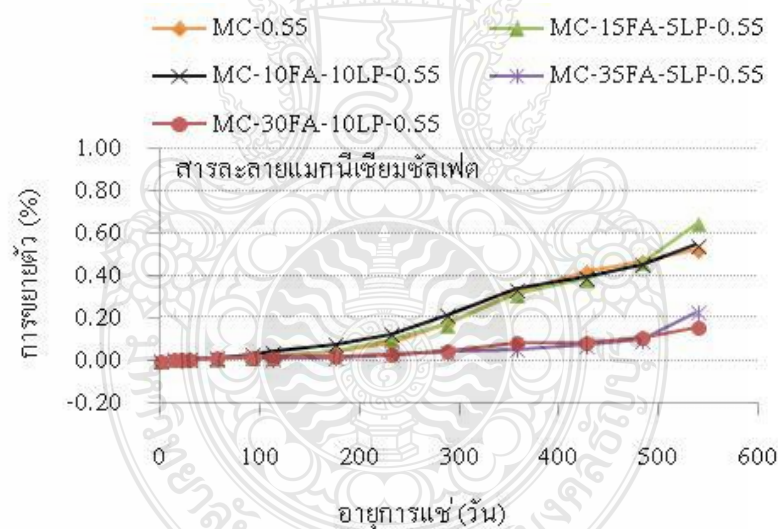
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูม



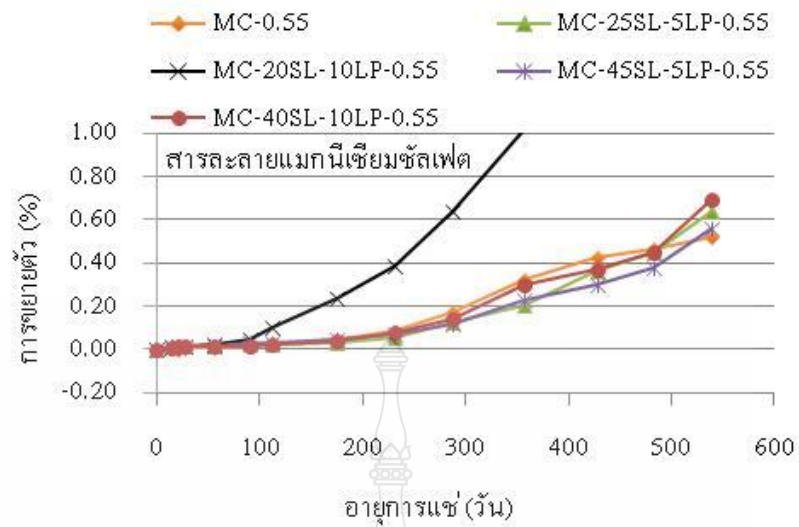
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน

- กรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด

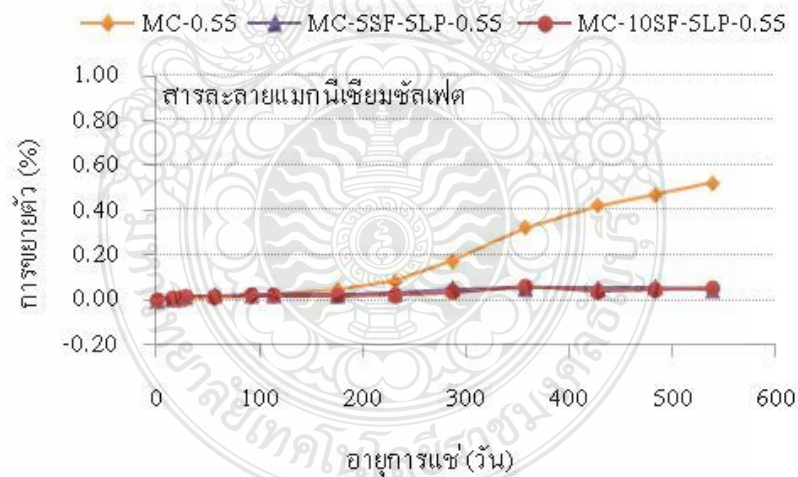
รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 30 และ 35 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ส่วน รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 25, 40 และ 45 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 และรูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมในอัตราส่วนร้อยละ 5 และ 10 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5 พบว่า การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เหตุผลดังกล่าวแล้ว



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน และมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน

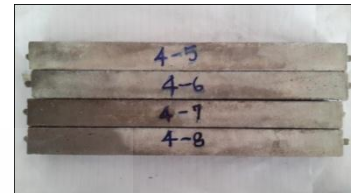
โดยรูปที่ 4.50 และ 4.51 แสดงตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่ใช้ในการวัดค่า
การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์



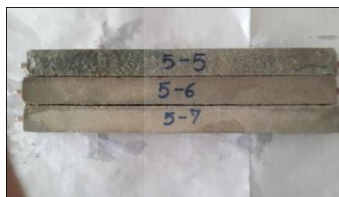
MC-0.55



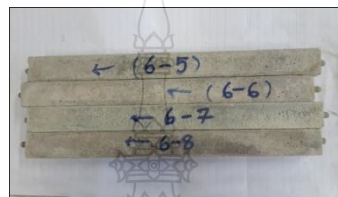
MC-20FA-0.55



MC-40FA-0.55



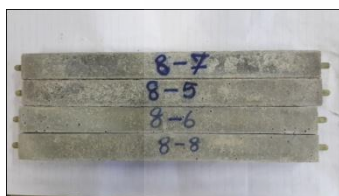
MC-30SL-0.55



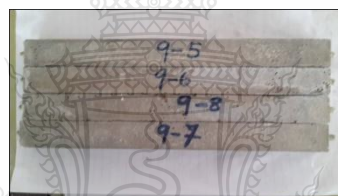
MC-50SL-0.55



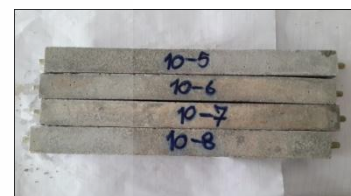
MC-5LP-0.55



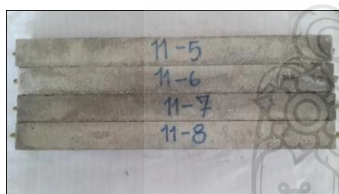
MC-10LP-0.55



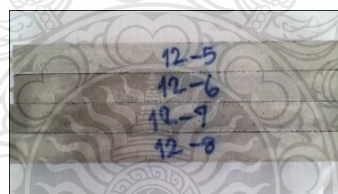
MC-15FA-5LP-0.55



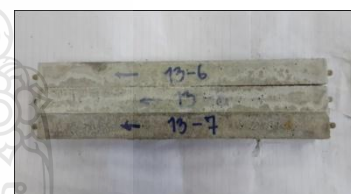
MC-10FA-10LP-0.55



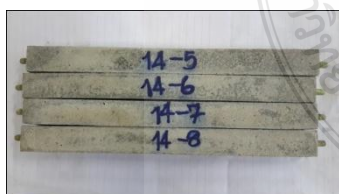
MC-35FA-5LP-0.55



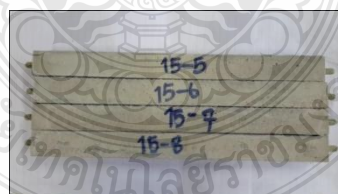
MC-30FA-10LP-0.55



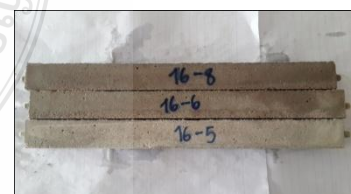
MC-25SL-5LP-0.55



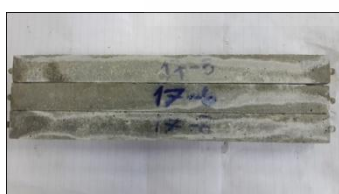
MC-20SL-10LP-0.55



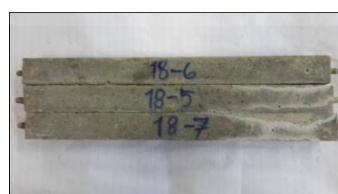
MC-45SL-5L-0.55



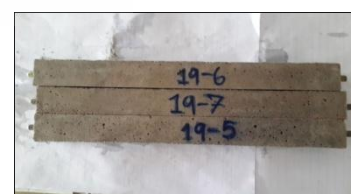
MC-40SL-10LP-0.55



MC-5SF-0.55



MC-10SF-0.55



MC-5SF-5LP-0.55



MC-10SF-5LP-0.55

รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์



MC-0.55



MC-20FA-0.55



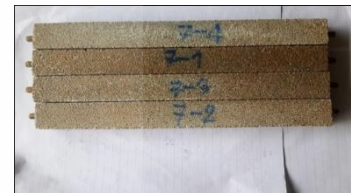
MC-40FA-0.55



MC-30SL-0.44



MC-50SL-0.55



MC-5LP-0.55



MC-10LP-0.55



MC-15FA-5LP-0.55



MC-10FA-10LP-0.55



MC-35FA-5LP-0.55



MC-30FA-10LP-0.55



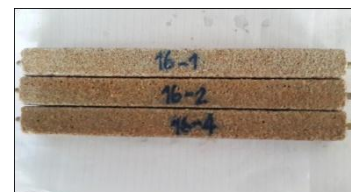
MC-25SL-5LP-0.55



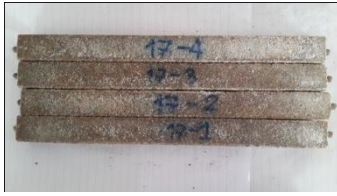
MC-20SL-10LP-0.55



MC-45SL-5LP-0.55



MC-40SL-10LP-0.55



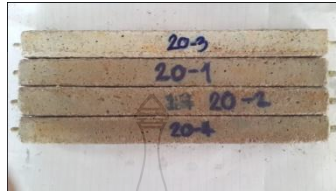
MC-5SF-0.55



MC-10SF-0.55



MC-5SF-5LP-0.55



MC-10SF-5LP-0.55

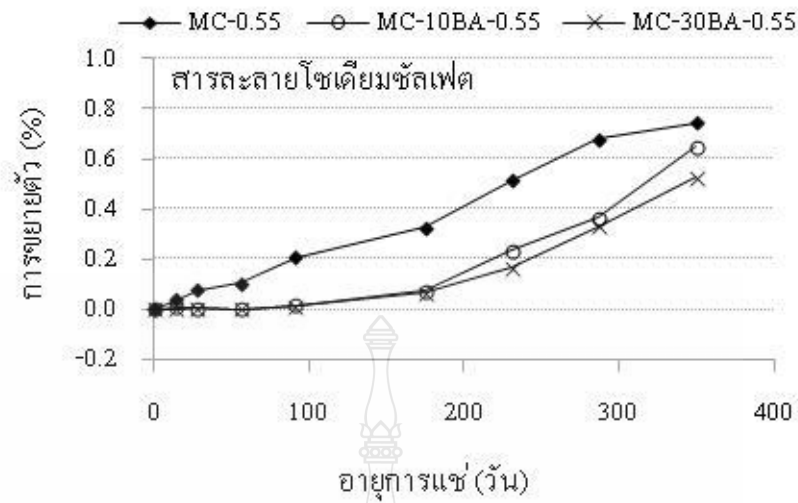
รูปที่ 4.51 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์

2) ผลกระทบจากการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายต่อการขยายตัวในสารละลายซัลเฟต

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผงหินปูน และเถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในปริมาณที่ต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

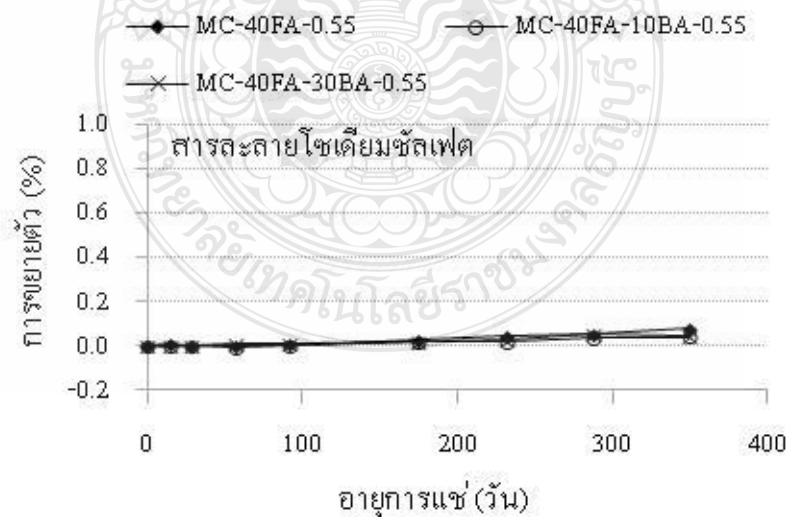
(ก) กรณีแฉะในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแฉะในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เมื่อใช้ทรายล้วนและเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 พบว่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์เมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่อใช้เถ้าก้นเตาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้บางส่วน (ส่วนที่มีความละเอียด) จึงสามารถช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าน้อยลง



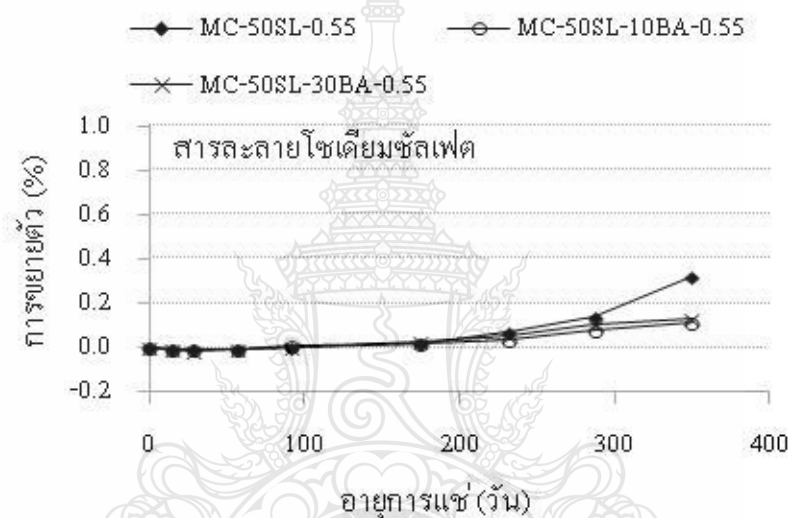
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน เมื่อใช้ทรายล้วนและถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย

รูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมถ้ำลอยเมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 พบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทรายมีค่าไม่แตกต่างกับของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน



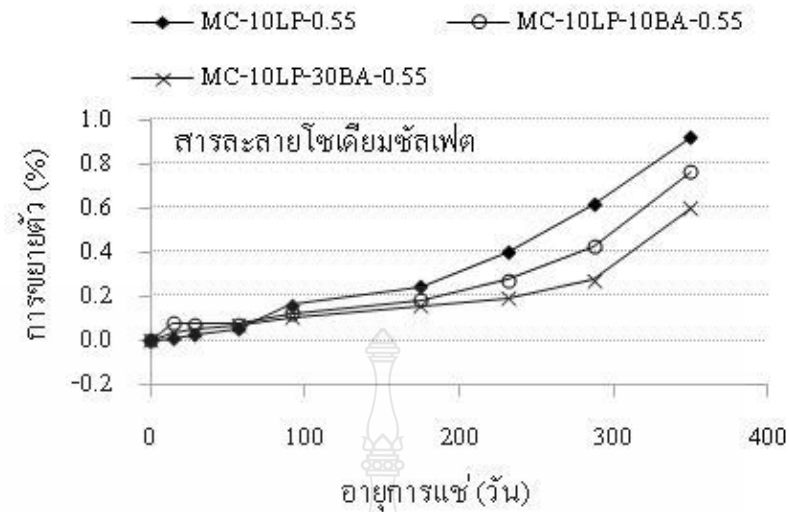
รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมถ้ำลอย เมื่อใช้ทรายล้วนและถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย

รูปที่ 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 พบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ตาร์เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทรายมีแนวโน้มน้อยกว่าของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เพราะเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้บางส่วน (ส่วนที่มีความละเอียด) จึงสามารถช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าน้อยลง



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เมื่อใช้ทรายล้วนและถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย

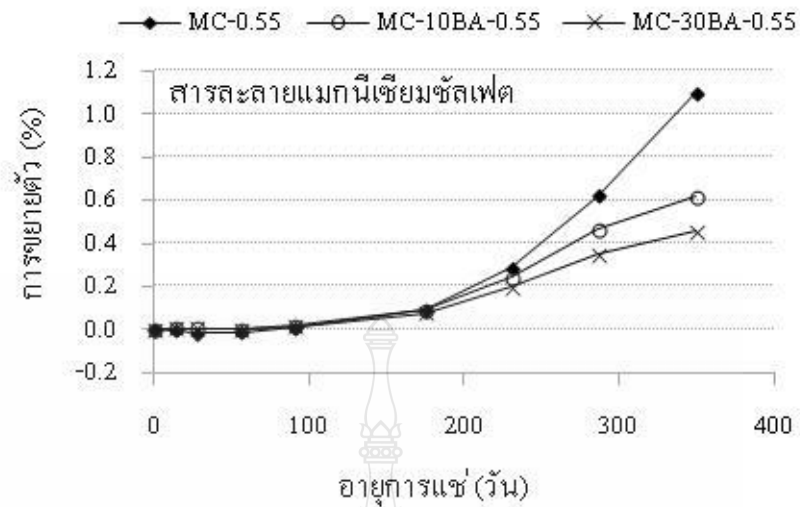
รูปที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนเมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 พบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์เมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาแทนที่ทรายมีแนวโน้มน้อยกว่าของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เพราะเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้บางส่วน (ส่วนที่มีความละเอียด) จึงสามารถช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าน้อยลง



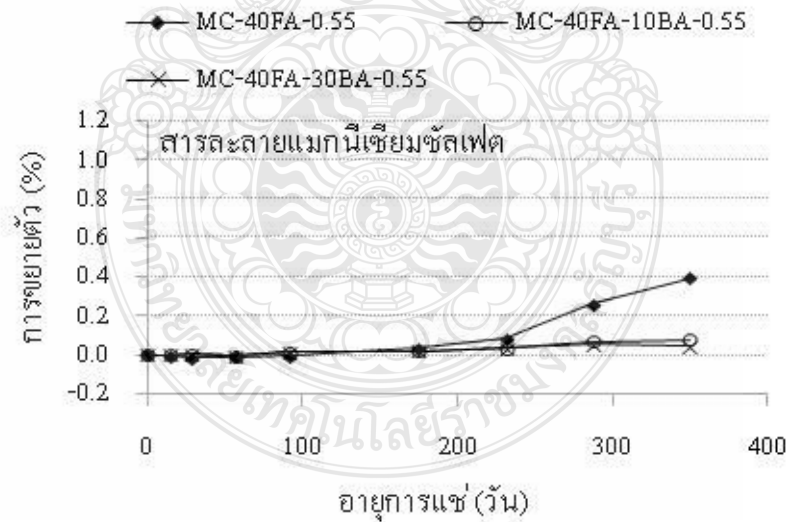
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วนและเถ้าก้นเตาแทนที่ทราย

(ข) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

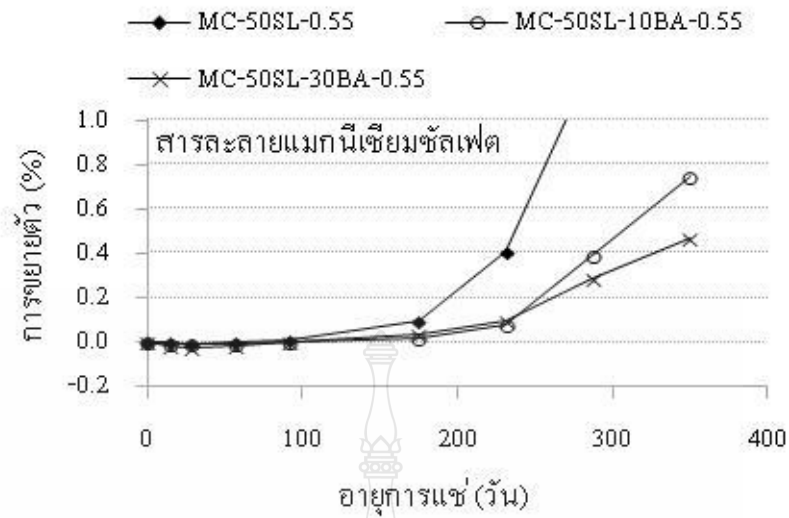
รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 เมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 และรูปที่ 4.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 พบว่า การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์เมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายมีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้เพราะเมื่อใช้เถ้าก้นเตาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้บางส่วน (ส่วนที่มีความละเอียด) จึงสามารถช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าน้อยลง



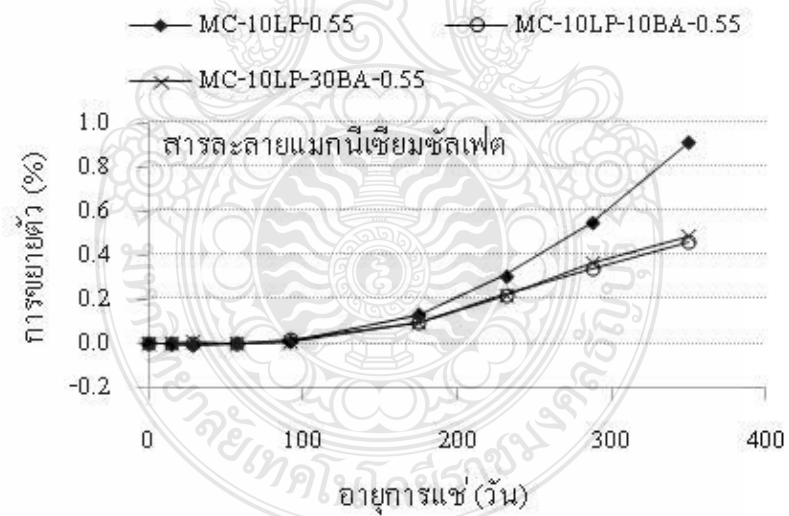
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อใช้ทรายล้วนและถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมถ้ำลอย เมื่อใช้ทรายล้วนและถ้ำกั้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เมื่อใช้ทรายล้วนและถั่วกั้นเตาแทนที่ทราย



รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูน เมื่อใช้ทรายล้วนและถั่วกั้นเตาแทนที่ทราย

โดยรูปที่ 4.60 และ 4.61 แสดงตัวอย่างมอร์ตาร์ดเมื่อใช้เข้ากันเตาแทนที่ทรายที่ใช้ในการวัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 50 สัปดาห์



MC-0.55



MC-10BA-0.55



MC-30BA-0.55



MC-40FA-0.55



MC-40FA-10BA-0.55



MC-40FA-30BA-0.55



MC-50SL-0.55



MC-50SL-10BA-0.55



MC-50SL-30BA-0.55



MC-10LP-0.55



MC-10LP-10BA-0.55



MC-10LP-30BA-0.55

รูปที่ 4.60 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ดที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 50 สัปดาห์



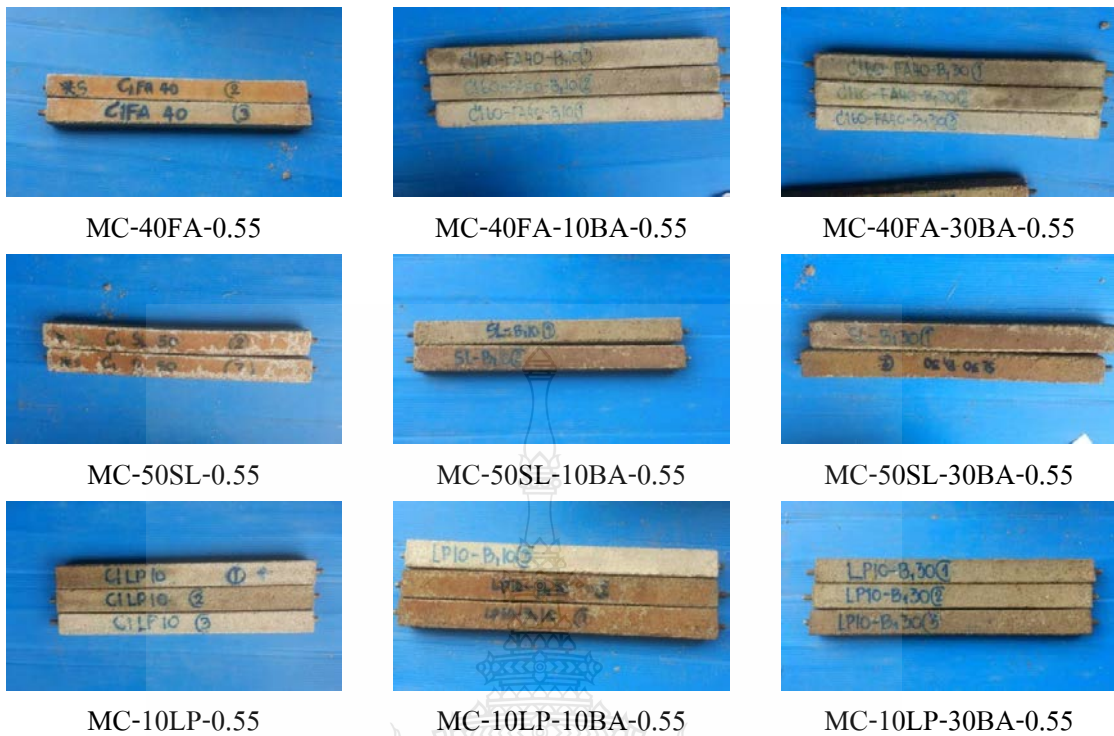
MC-0.55



MC-10BA-0.55



MC-30BA-0.55



รูปที่ 4.61 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่วัดค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 50 สัปดาห์

4.2.5.2 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ในสารละลายซัลเฟต

การประเมินผลความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์เฉพาะในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น ซึ่งได้พิจารณาถึง 1) ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน และ 2) ผลกระทบจากการใช้ถั่วกั้นเตาแทนที่ทรายต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีการแทนที่ที่ถั่วลยตะกรันเตาสูงเหลือกบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนที่ต่างกัน และได้พิจารณาในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 4.62 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 61 สัปดาห์ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต

ตัวผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม ผสมผงหินปูน ผสมเถ้าลอย ร่วมกับผงหินปูน ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และผสมซิลิกาฟูมร่วมกับผงหินปูน พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และ ผสมซิลิกาฟูม มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะเนื่องจากผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในมอร์ต้าร์ลดน้อยลง (ลด Ca(OH)_2) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ผงหินปูนสามารถไปเติมเต็มช่องว่างในมอร์ต้าร์ได้ จึงทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักมีค่าน้อยกว่า ส่วนเมื่อใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด พบว่า การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ผงหินปูนสามารถไปเติมเต็มช่องว่างในมอร์ต้าร์ได้ดี มีความทึบมากขึ้นจึงทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักมีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 4.62 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 61 สัปดาห์

รูปที่ 4.63 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวัดค่าการสูญเสีย น้ำหนักที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์



MC-0.55



MC-20FA-0.55



MC-40FA-0.55



MC-30SL-0.55



MC-50SL-0.55



MC-5LP-0.55



MC-10LP-0.55



MC-15FA-5LP-0.55



MC-10FA-10LP-0.55



MC-35FA-5LP-0.55



MC-30FA-10LP-0.55



MC-25SL-5LP-0.55



MC-20SL-10LP-0.55



MC-45SL-5LP-0.55



MC-40SL-10LP-0.55



MC-5SF-0.55



MC-10SF-0.55



MC-5SF-5LP-0.55



MC-10SF-5LP-0.55

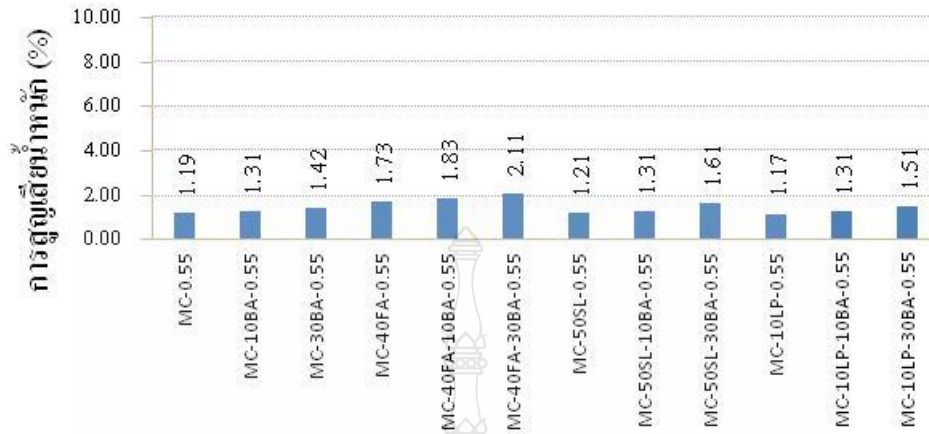
รูปที่ 4.63 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์

2) ผลกระทบเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์

รูปที่ 4.64 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เมื่ออายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 50 สัปดาห์ ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มอร์ตาร์ผสมตะกอนดินเหนียวร้อยละ 50 มอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อใช้ทรายล้วนและเมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มอร์ตาร์ผสมตะกอนดินเหนียวร้อยละ 50 และมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ได้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าของมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากั้นเตา (ส่วนที่มีความละเอียด) ทำให้ความเป็นด่างในมอร์ตาร์น้อยลง (ลด Ca(OH)_2) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้ากั้นเตาในปริมาณที่สูงขึ้น รวมทั้งเถ้ากั้นเตาที่มีสภาพเป็นรูพรุนส่งผลให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น

ส่วนรูปที่ 4.65 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์

การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ที่อายุ 50 สัปดาห์



รูปที่ 4.64 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน และเมื่อใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์





MC-10LP-0.55



MC-10LP-10BA-0.55

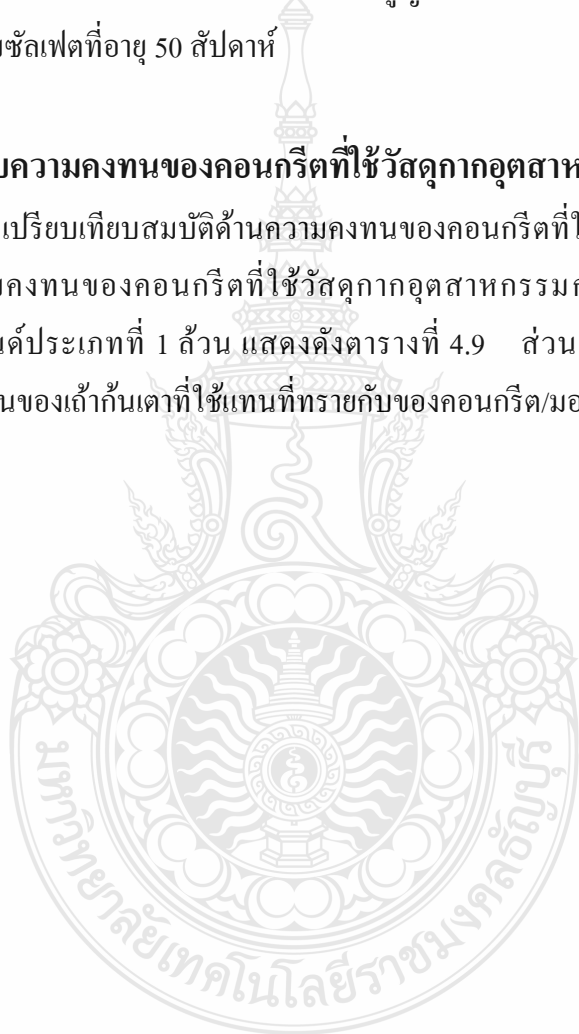


MC-10LP-30BA-0.55

รูปที่ 4.65 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์

4.3 การเปรียบเทียบความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม

สำหรับการเปรียบเทียบสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมในครั้งนี้ ได้ศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมกับของคอนกรีต/มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน แสดงดังตารางที่ 4.9 ส่วนตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบความคงทนของถ้ำกันเคาที่ใช้แทนที่ทรายกับของคอนกรีต/มอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายล้วน



ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรมกับของคอนกรีต/มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน

สมบัติความคงทน	แก้ล้อย	ตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียด	ซิลิกาฟูม	ผงหินปูน	แก้ล้อยร่วมกับ ผงหินปูน	ตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียด ร่วมกับผงหินปูน	ตะกรันเตาถลุง เหล็กบดละเอียด ร่วมกับซิลิกาฟูม	ซิลิกาฟูมร่วม กับผงหินปูน
การหดตัวแบบอโตจีนัสของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	N/A
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	N/A
การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	N/A	N/A
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ของ คอนกรีต	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	ดีกว่า	N/A	N/A
- การขยายตัวในสารละลาย Na ₂ SO ₄	น้อยกว่า	มากกว่า (แทนที่ < 50 %)	น้อยกว่า	ไม่แตกต่าง	มากกว่า (แก้ล้อย < 15 %)	มากกว่า (ตะกรันเตา < 20 %)	N/A	น้อยกว่า
- การขยายตัวในสารละลาย MgSO ₄	น้อยกว่า	น้อยกว่า (แทนที่ > 50 %)	น้อยกว่า	/ มากกว่า	น้อยกว่า (แก้ล้อย > 15 %)	น้อยกว่า (ตะกรันเตา > 20 %)	N/A	น้อยกว่า
- การสูญเสียน้ำหนักในสารละลาย MgSO ₄	มากกว่า	มากกว่า (แทนที่ < 50 %)	มากกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า (แก้ล้อย < 15 %)	น้อยกว่า (ตะกรันเตา < 20 %)	N/A	น้อยกว่า
	มากกว่า	มากกว่า (แทนที่ > 50 %)	มากกว่า	ไม่แตกต่าง	ไม่แตกต่าง (แก้ล้อย > 15 %)	มากกว่า (ตะกรันเตา > 20 %)	มากกว่า	น้อยกว่า

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบความคงทนของถ้ำกันเตาเมื่อใช้แทนที่ทรายกับของคอนกรีต/มอร์ตาร์ที่ใช้ทรายล้วน

สมบัติความคงทน	ถ้ำลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด	ซีลีกาฟูม	ผงหินปูน	ถ้ำลอยร่วมกับ ผงหินปูน
การหดตัวแบบออโตจีนัสของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	N/A
การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	N/A
การเกิดคาร์บอนเนชันของคอนกรีต	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	N/A
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของ คอนกรีต	ดีน้อยกว่า	N/A	N/A	N/A	ดีน้อยกว่า
การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์	ไม่แตกต่าง	น้อยกว่า	N/A	น้อยกว่า	N/A
-การขยายตัวในสารละลาย Na ₂ SO ₄	น้อยกว่า	น้อยกว่า	N/A	น้อยกว่า	N/A
-การขยายตัวในสารละลาย MgSO ₄	มากกว่า	มากกว่า	N/A	มากกว่า	N/A
-การสูญเสียน้ำหนักในสารละลาย MgSO ₄					

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรมในครั้งนี สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1) การหาค่าความบวมของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการหาค่าความบวมของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตามีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก

2) การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตามีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน

3) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าก้นเตามีค่าดีกว่าเมื่อใช้ทรายล้วน

4) ในสารละลายซัลเฟต (ทั้งโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต) นั้น การขยายตัวของมอร์ตาร์เมื่อใช้เถ้าลอย (ที่มีปริมาณ CaO สูง) ในปริมาณที่มาก (มากกว่าร้อยละ 30) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มาก (มากกว่าร้อยละ 50) และซิลิกาฟูม มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ตาร์เมื่อใช้เถ้าลอย (ที่มีปริมาณ CaO สูง) ในปริมาณที่น้อย (น้อยกว่าร้อยละ 30) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่น้อย (น้อยกว่าร้อยละ 50) และผงหินปูน มีค่าไม่แตกต่างหรือแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์เมื่อใช้เถ้าก้นเตามีแนวโน้มน้อยกว่าของเมื่อใช้ทรายล้วน

5) ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เมื่อใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เมื่อใช้ผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างหรือแนวโน้มน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เมื่อใช้เถ้าก้นเตามีแนวโน้มมากกว่าของเมื่อใช้ทรายล้วน

6) สามารถเปรียบเทียบความคงทนของคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุกาออกุตสาหกรรมกับของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเปรียบเทียบความคงทนของคอนกรีตเมื่อใช้ถ้ำกั้นเตา กับของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วนได้



บรรณานุกรม

- [1] PitisanKrammart, 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] ปริญญา จินดาประเสริฐ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2553). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- [3] สมชัย กกกำแหง, การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง ศักยภาพในการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์, พ.ศ. 2536, สำนักงานวิจัยและพัฒนา, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, หน้า 4-1 ถึง 4-23.
- [4] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, 2543. **ความคงทนของคอนกรีต.1:วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์**
- [5] ศักรินทร์ เหลือคำกร. **การควบคุมการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 6. (Control Drying Shrinkage Crack in Concrete. สืบค้นจาก http://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/b-p0059.pdf)
- [6] American Society for Testing and Materials ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Annual book of ASTM standard Vol.04.02.
- [7] American Society for Testing and Materials, ASTM C618. (2008). **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. Annual Book of ASTM Standard.
- [8] กระทรวงอุตสาหกรรม, **กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต**, มาตรฐาน มอก.2135-2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546, หน้า 3.
- [9] สหภาพ หอมวุฒิวงศ์, ดิลก คูร์ตันเวช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, **การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อเถ้าถ่านหิน**, การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการงานคอนกรีต, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar
- [11] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars
(Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)
- [12] ASTM C151, Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement
- [13] ASTM C157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement, Mortar, and Concrete
- [14] ASTM C595, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement.
- [15] American Society for Testing and Materials, ASTM C188. (2009). **Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.** Annual Book of ASTM Standard.
- [16] American Society for Testing and Materials, ASTM C204. (2007). **Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus.** Annual Book of ASTM Standard.
- [17] Kasemchaisiri, R. and Tangtermsirikul, S. (2007). **A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete.** Construction and Building Materials, 21(6), 1322-1334.
- [18] American Society for Testing and Materials, ASTM C 128. (2004). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.** Annual Book of ASTM Standard.
- [19] American Society for Testing and Materials, ASTM C157. (2004). **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement, Mortar, and Concrete.** Annual Book of ASTM Standard.
- [20] American Society for Testing and Materials, ASTM C596. (2009). **Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement.** Annual Book of ASTM Standard.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] American Society for Testing and Materials, ASTM C1012. (2004). **Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.** Annual Book of ASTM Standard.
- [22] ศ.ดร. ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2553). **เสถียรภาพในงานคอนกรีต. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้าง** มูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, (4).
- [23] สุพัฒน์ชัย ใจช่วย, สรัณกร เหมะวิบูลย์, สนธยา ทองอรุณศรี, พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์ และ สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2555). **ผลของการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาต่อการหดตัวของคอนกรีต.** เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 8, โรงแรมอมารี ออคิด พัทยา จังหวัดชลบุรี.
- [24] Cusson, D. and Hoogeveen, T. (2008). **Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking.** Cement and Concrete Research, 38(6), 757-765.
- [25] ASTM C187, Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste
- [26] ASTM C191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle
- [27] ASTM C595, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement
- [28] ASTM C856, Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete
- [29] ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่าสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม

เมื่อใช้ทรายล้วน



ตารางที่ ก.1 ค่าร้อยละการหดตัวของแบบอโตนีส์ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุของคอนกรีต (วัน)								
	0	3	7	14	21	28	42	56	91
CC-0.40	0.00	50.00	71.00	95.00	105.00	112.00	122.00	128.00	135.00
CC-20FA-0.40	0.00	18.00	27.00	35.00	41.00	48.00	51.00	54.00	58.00
CC-40FA-0.40	0.00	10.50	20.10	25.50	31.20	35.50	39.00	40.50	42.20
CC-30SL-0.40	0.00	11.50	30.20	41.20	54.50	62.00	75.50	79.10	87.50
CC-50SL-0.40	0.00	1.00	5.50	13.00	21.00	30.50	43.30	51.00	55.50
CC-5SF-0.40	0.00	26.00	48.00	78.00	91.00	100.00	110.00	118.00	125.00
CC-10SF-0.40	0.00	10.00	35.00	60.00	75.00	85.00	95.00	102.00	105.00
CC-5LP-0.40	0.00	25.00	38.00	55.00	70.00	80.00	90.00	100.00	115.00
CC-10LP-0.40	0.00	35.00	58.00	68.00	80.00	90.00	100.00	110.00	120.00
CC-15FA-5 LP-0.40	0.00	12.00	23.00	30.00	35.00	38.00	40.00	44.00	52.00
CC-10FA-10LP-0.40	0.00	20.00	35.00	40.00	41.00	45.00	48.00	53.00	64.00
CC-35FA-5LP-0.40	0.00	5.00	15.00	20.00	25.00	31.00	32.00	33.00	40.00
CC-30FA-10LP-0.40	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	27.00	31.00	36.00
CC-25SL-5LP-0.40	0.00	11.00	23.00	38.00	48.00	54.00	61.00	63.00	71.00
CC-20SL-10LP-0.40	0.00	20.50	41.00	55.00	62.00	65.00	70.00	73.00	82.00
CC-45SL-5LP-0.40	0.00	31.50	45.00	52.00	53.00	53.50	54.00	55.00	65.00
CC-40SL-10LP-0.40	0.00	10.50	20.00	28.00	30.00	32.00	35.00	35.50	41.00

ตารางที่ ก.2 ค่าร้อยละการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุของคอนกรีต (วัน)								
	0	3	7	14	21	28	42	56	91
CC-0.40	0.00	30.50	59.50	75.50	90.00	100.50	119.00	130.00	145.00
CC-20FA-0.55	0.00	28.00	42.00	52.00	62.00	68.00	71.00	76.00	98.50
CC-40FA-0.55	0.00	18.00	32.00	42.00	50.00	55.00	60.00	65.00	75.00
CC-30SL-0.55	0.00	25.00	45.00	60.00	67.00	72.00	80.00	85.50	89.00
CC-50SL-0.55	0.00	15.00	35.00	45.00	51.00	53.00	55.00	57.10	60.00
CC-5SF-0.55	0.00	25.00	45.00	68.00	78.00	90.00	105.00	115.00	130.00
CC-10SF-0.55	0.00	25.00	37.50	50.00	62.00	70.00	85.00	93.00	104.00
CC-5LP-0.55	0.00	30.00	46.00	60.00	68.00	71.00	77.00	82.00	95.00
CC-10LP-0.55	0.00	30.00	48.00	65.00	75.00	85.00	98.00	105.00	120.00
CC-15FA-5 LP-0.55	0.00	6.00	10.00	20.00	35.00	41.00	50.00	58.00	81.00
CC-10FA-10LP-0.55	0.00	10.00	20.00	35.00	50.00	60.00	70.00	80.00	95.00
CC-35FA-5LP-0.55	0.00	5.00	9.00	12.00	17.00	25.00	30.00	33.00	58.00
CC-30FA-10LP-0.55	0.00	5.00	10.00	17.00	25.00	33.00	40.00	43.00	68.00
CC-25SL-5LP-0.55	0.00	17.50	47.00	54.00	60.00	65.00	75.00	80.00	95.00
CC-20SL-10LP-0.55	0.00	25.00	46.00	61.50	67.50	75.00	85.00	95.00	110.00
CC-45SL-5LP-0.55	0.00	5.00	15.00	25.00	35.00	45.00	55.00	60.00	65.00
CC-40SL-10LP-0.55	0.00	12.00	20.00	35.00	45.00	55.00	70.00	75.00	85.00

ตารางที่ ก.3 ค่าความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

สัญลักษณ์	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)	
	เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น	เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น
	ระยะเวลา 28 วัน	ระยะเวลา 91 วัน
CC-0.55	9	21
CC-20FA-0.55	18	28
CC-40FA-0.55	20	38
CC-30SL-0.55	13	23
CC-50SL-0.55	15	31
CC-5SF-0.55	13	23
CC-10SF-0.55	15	25
CC-5LP-0.55	11	22
CC-10LP-0.55	13	24
CC-15FA-5LP-0.55	16	21
CC-10FA-10LP-0.55	18	24
CC-35FA-5LP-0.55	13	33
CC-30FA-10LP-0.55	15	43
CC-25SL-5LP-0.55	13	23
CC-20SL-10LP-0.55	17	25

ตารางที่ ก.4 ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตเมื่อใช้ทรายล้วน

สัญลักษณ์	ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน (คูลอมบ์)			
	อายุการบ่ม (วัน)			
	7	14	28	56
CC-0.55	16058	14697	13864	13311
CC-40FA-0.55	9243	9054	7164	2619
CC-30SL-0.55	7137	6435	5472	4527
CC-10SF-0.55	11484	11196	10674	8874
CC-10LP-0.55	13257	12951	12510	11898
CC-30FA-10LP-0.55	12762	11547	10152	5817
CC-20SL-10LP-0.55	9315	8289	7002	6507

ตารางที่ ก.5 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %													
		0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 week	61 week	69 week	77 week
MC-0.55	Mg	0.000	0.0045	0.0006	0.0082	0.0066	0.0165	0.0220	0.0450	0.0822	0.1755	0.3225	0.4212	0.4676	0.5218
	Na	0.000	0.0001	0.0001	0.0043	0.0037	0.0087	0.0153	0.0305	0.0566	0.0970	0.1791	0.2831	0.3715	0.4521
MC-20FA-0.55	Mg	0.000	0.0044	0.0080	0.0096	0.0119	0.0200	0.0240	0.0288	0.0389	0.0845	0.1706	0.2038	0.2412	0.2776
	Na	0.000	-0.0026	-0.0046	-0.0010	-0.0012	0.0035	0.0040	0.0054	0.0138	0.0398	0.0659	0.0814	0.1074	0.1204
MC-40FA-0.55	Mg	0.000	0.0068	0.0054	0.0078	0.0071	0.0085	0.0065	0.0104	0.0233	0.0317	0.0378	0.0439	0.0552	0.0621
	Na	0.000	0.0023	-0.0004	0.0014	0.0017	0.0016	0.0008	0.0020	0.0168	0.0218	0.0446	0.0425	0.0405	0.0432
MC-30SL-0.55	Mg	0.000	0.0031	0.0040	0.0060	0.0094	0.0239	0.0396	0.0806	0.1451	0.2592	0.4976	0.6460	0.7965	1.2432
	Na	0.000	0.0009	0.0016	0.0033	0.0013	0.0137	0.0150	0.0230	0.0480	0.0862	0.1899	0.3611	0.5706	0.9763
MC-50SL-0.55	Mg	0.000	0.0075	0.0118	0.0130	0.0167	0.0206	0.0210	0.0319	0.0561	0.1057	0.2516	0.3421	0.4518	0.7060
	Na	0.000	0.0018	-0.0021	0.0010	-0.0008	-0.0010	0.0030	0.0046	0.0216	0.0286	0.0586	0.0632	0.0710	0.0865
MC-5LP-0.55	Mg	0.000	0.0046	-0.0002	0.0005	0.0018	0.0210	0.0319	0.0387	0.0697	0.1242	0.2007	0.2515	0.3216	0.4518
	Na	0.000	0.0032	0.0058	0.0110	0.0250	0.0306	0.0440	0.0600	0.1060	0.1696	0.2704	0.3711	0.4382	0.5177
MC-10LP-0.55	Mg	0.000	0.0074	0.0053	0.0080	0.0132	0.0322	0.0427	0.0537	0.0737	0.1037	0.1596	0.1887	0.2211	0.2854
	Na	0.000	0.0042	0.0068	0.0115	0.0240	0.0276	0.0400	0.0460	0.0752	0.1244	0.1859	0.2705	0.3316	0.3839

ตารางที่ ก.5 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน (ต่อ)

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %													
		0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 week	61 week	69 week	77 week
MC-15FA-5LP-0.55	Mg	0.000	0.0071	0.0046	0.0106	0.0097	0.0149	0.0153	0.0401	0.0994	0.1704	0.3151	0.3848	0.4606	0.6458
	Na	0.000	0.0048	0.0018	0.0083	0.0046	0.0118	0.0191	0.0400	0.0882	0.1498	0.2970	0.4012	0.4706	0.5702
MC-10FA-10LP-0.55	Mg	0.000	0.0050	0.0066	0.0100	0.0150	0.0275	0.0421	0.0769	0.1237	0.2155	0.3380	0.3950	0.4525	0.5469
	Na	0.000	0.0011	0.0024	0.0053	0.0140	0.0223	0.0345	0.0551	0.1162	0.2028	0.3425	0.4626	0.5359	0.6519
MC-35FA-5LP-0.55	Mg	0.000	0.0051	0.0078	0.0099	0.0097	0.0110	0.0101	0.0136	0.0276	0.0408	0.0553	0.0733	0.0967	0.2318
	Na	0.000	0.0036	-0.0009	0.0024	-0.0001	0.0030	0.0039	0.0039	0.0168	0.0283	0.0465	0.0469	0.0492	0.0763
MC-30FA-10LP-0.55	Mg	0.000	0.0030	0.0052	0.0070	0.0110	0.0160	0.0180	0.0200	0.0284	0.0471	0.0832	0.0847	0.1069	0.1569
	Na	0.000	-0.0007	-0.0016	-0.0026	-0.0010	0.0058	0.0078	0.0094	0.0128	0.0250	0.0374	0.0430	0.0457	0.0526
MC-25SL-5LP-0.55	Mg	0.000	0.0150	0.0120	0.0162	0.0173	0.0241	0.0257	0.0287	0.0582	0.1238	0.2056	0.3612	0.4509	0.6391
	Na	0.000	0.0098	0.0046	0.0023	0.0004	0.0043	0.0065	0.0076	0.0213	0.0387	0.0543	0.0476	0.0476	0.0539
MC-20SL-10LP-0.55	Mg	0.000	0.0099	0.0118	0.0147	0.0190	0.0481	0.1016	0.2390	0.3857	0.6385	1.0160	1.1944	1.3602	1.7192
	Na	0.000	0.0059	0.0054	0.0064	0.0100	0.0225	0.0360	0.0524	0.1270	0.2654	0.6011	0.8312	-	-
MC-45SL-5LP-0.55	Mg	0.000	0.0125	0.0097	0.0173	0.0185	0.0296	0.0343	0.0447	0.0678	0.1147	0.2246	0.2960	0.3792	0.5624
	Na	0.000	0.0064	0.0075	0.0102	0.0111	0.0167	0.0170	0.0187	0.0279	0.0494	0.0607	0.0567	0.0688	0.0686
MC-40SL-10LP-0.55	Mg	0.000	0.0080	0.0112	0.0127	0.0146	0.0182	0.0200	0.0357	0.0768	0.1378	0.2950	0.3716	0.4516	0.6951
	Na	0.000	0.0051	0.0078	0.0092	0.0087	0.0127	0.0125	0.0150	0.0268	0.0371	0.0626	0.0592	0.0630	0.0698

ตารางที่ ก.5 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วน (ต่อ)

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %														
		0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 week	61 week	69 week	77 week	
MC-5SF-0.55	Mg	0.000	0.0020	0.0034	0.0058	0.0054	0.0093	0.0096	0.0175	0.0356	0.0558	0.0782	0.0865	0.1278	0.1935	
	Na	0.000	0.0032	0.0054	0.0066	0.0090	0.0111	0.0120	0.0140	0.0212	0.0304	0.0346	0.0363	0.0356	0.0467	
MC-10SF-0.55	Mg	0.000	0.0050	0.0083	0.0090	0.0128	0.0184	0.0230	0.0270	0.0361	0.0563	0.0921	0.1028	0.1196	0.1867	
	Na	0.000	0.0037	0.0021	0.0035	0.0045	0.0067	0.0089	0.0099	0.0130	0.0218	0.0226	0.0246	0.0298	0.0356	
MC-5SF-5LP-0.55	Mg	0.000	0.0080	0.0100	0.0150	0.0190	0.0234	0.0240	0.0245	0.0292	0.0501	0.0509	0.0526	0.0567	0.0459	
	Na	0.000	0.0008	0.0013	0.0060	0.0072	0.0091	0.0095	0.0105	0.0172	0.0297	0.0481	0.0316	0.0315	0.0399	
MC-10SF-5LP-0.55	Mg	0.000	0.0047	0.0068	0.0144	0.0142	0.0184	0.0186	0.0193	0.0220	0.0331	0.0591	0.0401	0.0454	0.0511	
	Na	0.000	0.0012	0.0038	0.0050	0.0078	0.0093	0.0098	0.0110	0.0175	0.0277	0.0311	0.0325	0.0362	0.0327	

ตารางที่ 6.6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน)

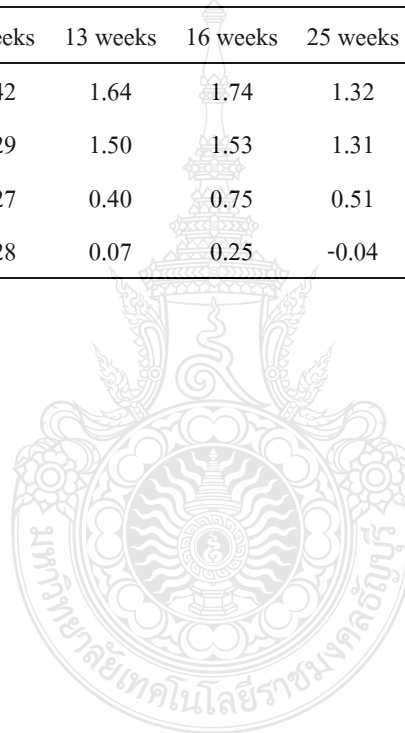
Table shows the weight of mortar Loss cube (5 x 5 x 5 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

Sample	Weight loss of cube Specimens, %											
	0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 weeks	61 weeks
MC-0.55	0	0.58	0.95	0.78	0.96	1.66	2.01	1.62	1.74	2.17	1.78	1.90
MC-20FA-0.55	0	0.50	1.06	1.13	1.50	1.41	1.78	1.57	1.89	2.10	2.07	2.19
MC-40FA-0.55	0	-0.19	0.43	0.57	0.99	1.48	2.05	1.73	2.20	2.61	3.10	3.26
MC-30SL-0.55	0	0.08	0.67	0.55	0.95	1.02	1.39	0.91	1.30	1.57	2.57	3.17
MC-50SL-0.55	0	0.07	0.63	-0.10	1.02	1.34	1.42	0.71	1.35	1.84	2.60	3.20
MC-5LP-0.55	0	0.14	0.80	0.73	1.08	1.55	1.75	1.22	1.62	1.98	1.57	1.60
MC-10LP-0.55	0	0.04	0.60	0.53	0.93	0.89	1.49	1.12	1.51	1.72	1.38	1.54
MC-15FA-5LP-0.55	0	0.02	0.56	0.48	0.81	1.24	1.85	1.49	1.90	2.10	2.24	2.53
MC-10FA-10LP-0.55	0	0.08	0.72	0.51	0.95	1.17	1.59	1.09	1.54	1.79	1.73	1.93
MC-35FA-5LP-0.55	0	0.09	0.80	0.78	1.18	1.43	1.90	1.58	2.13	2.02	2.34	2.45
MC-30FA-10LP-0.55	0	-0.03	0.41	0.46	0.86	0.90	1.36	1.01	1.50	1.71	1.82	1.90
MC-25SL-5LP-0.55	0	0.16	0.60	0.56	0.98	1.81	2.22	2.09	2.12	2.37	2.43	2.56
MC-20SL-10LP-0.55	0	0.25	0.82	0.77	1.15	1.82	2.18	1.81	2.13	2.26	2.21	2.36
MC-45SL-5LP-0.55	0	0.06	0.64	0.71	1.13	1.61	2.39	2.16	2.59	2.80	3.21	3.53
MC-40SL-10LP-0.55	0	0.00	0.73	0.67	1.05	1.35	1.93	1.60	2.11	2.51	2.62	2.69

ตารางที่ ก.6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ทรายล้วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน) (ต่อ)

Table shows the weight of mortar Loss cube (5 x 5 x 5 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

Sample	Weight loss of cube Specimens, %											
	0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	8 weeks	13 weeks	16 weeks	25 weeks	33 weeks	41 weeks	51 weeks	61 weeks
MC-5SF-0.55	0	0.37	1.07	1.10	1.42	1.64	1.74	1.32	1.52	2.14	2.08	2.15
MC-10SF-0.55	0	0.38	0.94	0.90	1.29	1.50	1.53	1.31	1.54	1.94	1.80	1.95
MC-5SF-5LP-0.55	0	-0.24	-0.07	-0.37	0.27	0.40	0.75	0.51	0.62	1.13	1.13	1.29
MC-10SF-5LP-0.55	0	-0.21	-0.06	-0.15	0.28	0.07	0.25	-0.04	0.33	0.57	0.88	1.10



ภาคผนวก ข

ตารางแสดงค่าสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม
เมื่อใช้เถ้ากั้นเตาแทนที่ทราย



ตารางที่ ข.1 ค่าร้อยละการหดตัวของแบบบอโตจีนัสของคอนกรีตเมื่อใช้เท่ากับเดาแทนที่ทราย

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุของคอนกรีต (วัน)								
	0	3	7	14	21	28	42	56	91
CC-10BA-0.40	1.00	15.00	54.00	71.00	88.00	97.00	107.00	117.00	127.00
CC-30BA-0.40	1.00	15.00	24.00	44.00	54.00	67.00	77.00	87.00	97.00
CC-40FA-10BA-0.40	0.00	9.00	11.00	16.00	19.00	23.00	28.00	31.00	33.00
CC-40FA-30BA-0.40	0.00	5.00	7.00	10.00	12.00	15.00	17.00	19.00	23.00
CC-50SL-10BA-0.40	0.00	2.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	28.00	35.00
CC-50SL-30BA-0.40	0.00	1.00	1.00	5.00	8.00	10.00	15.00	20.00	25.00
CC-10SF-10BA-0.40	5.00	10.00	25.00	40.00	60.00	75.00	85.00	90.00	95.00
CC-10SF-30BA-0.40	5.00	5.00	16.50	30.00	40.00	50.00	60.00	70.00	75.00
CC-10LP-10BA-0.40	5.00	15.00	35.00	51.00	61.00	74.00	91.00	98.00	111.00
CC-10LP-30BA-0.40	5.00	18.00	26.00	35.00	46.00	56.00	66.00	76.00	86.00

ตารางที่ ข.2 ค่าร้อยละการหดตัวของแบบแห้งของคอนกรีตเมื่อใช้เท่ากับเดาแทนที่ทราย

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุของคอนกรีต (วัน)								
	0	3	7	14	21	28	42	56	91
CC-10BA-0.40	5.00	25.00	41.00	61.00	75.00	85.00	105.00	118.00	130.00
CC-30BA-0.40	5.00	20.00	30.00	40.00	52.00	65.00	80.00	92.00	108.50
CC-40FA-10BA-0.55	0.00	15.00	20.00	30.00	35.00	40.00	43.50	50.00	60.00
CC-40FA-30BA-0.55	0.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00
CC-50SL-10BA-0.55	0.00	5.00	17.00	28.00	38.00	42.00	47.00	50.00	51.00
CC-50SL-30BA-0.55	0.00	3.00	10.00	15.00	22.00	25.00	32.00	35.00	36.00
CC-10SF-10BA-0.55	0.00	10.00	22.00	40.00	50.00	60.00	75.00	81.00	95.00
CC-10SF-30BA-0.55	0.00	5.00	10.00	18.00	25.00	35.00	54.00	67.00	81.00
CC-10LP-10BA-0.55	0.00	15.00	32.00	52.00	62.00	70.00	81.00	87.50	111.00
CC-10LP-30BA-0.55	0.00	15.00	25.00	41.00	50.00	55.00	60.00	65.00	84.00

ตารางที่ ข.3 ค่าความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตเมื่อใช้ใช้เหล็กเส้นเตาแทนที่ทราย

สัญลักษณ์	ความลึกคาร์บอนชั้น (มม.)			
	เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นระยะเวลา 28 วัน		เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นระยะเวลา 91 วัน	
	บ่มน้ำ	บ่มอากาศ	บ่มน้ำ	บ่มอากาศ
	CC-0.55	9	8	21
CC-10BA-0.55	3	2	11	23
CC-30BA-0.55	5	4	15	25
CC-40FA-0.55	20	19	38	41
CC-40FA-10BA-0.55	16	14	18	35
CC-40FA-30BA-0.55	18	16	31	40
CC-50SL-0.55	15	13	31	43
CC-50SL-10BA-0.55	10	8	15	38
CC-50SL-30BA-0.55	15	12	25	42
CC-10SF-0.55	15	13	25	32
CC-10SF-10BA-0.55	12	11	14	23
CC-10SF-30BA-0.55	18	12	24	30
CC-10LP-0.55	13	12	24	29
CC-10LP-10BA-0.55	11	9	12	27
CC-10LP-30BA-0.55	18	16	22	36

ตารางที่ ข.4 ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตเมื่อใช้เก้าอี้เตาแทนที่ทราย

สัญลักษณ์	ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน (คูลอมบ์)					
	อายุบ่ม 7 วัน		อายุบ่ม 28 วัน		อายุบ่ม 56 วัน	
	บ่มน้ำ	บ่มอากาศ	บ่มน้ำ	บ่มอากาศ	บ่มน้ำ	บ่มอากาศ
CC-0.55	12546	12843	6966	8172	6264	7704
CC-10BA-0.55	16344	20214	14625	14814	9819	10980
CC-30BA-0.55	20583	21303	16380	17037	9522	11511
CC-40FA-0.55	12060	13734	3285	8757	1557	7758
CC-40FA-10BA-0.55	19107	19548	2970	10062	1638	7101
CC-40FA-30BA-0.55	17397	19710	3267	11970	1494	8253
CC-30FA-10LP-0.55	14184	19647	3141	8901	2115	5139
CC-30FA-10LP-10BA-0.55	20034	26127	16425	16632	11556	12780
CC-30FA-10LP-30BA-0.55	15651	17847	4608	12933	2178	9927



ตารางที่ ข.5 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ถ้ำกันเตาแทนที่ทราย

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %								
		0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	16 weeks	24 weeks	32 weeks	40 weeks	50 weeks
MC-10BA-0.55	Mg	0.0000	0.0063	0.0030	0.0014	0.0170	0.0906	0.2408	0.4647	0.6181
	Na	0.0000	0.0071	0.0034	0.0014	0.0182	0.0752	0.2344	0.3641	0.6491
MC-30BA-0.55	Mg	0.0000	0.0032	0.0037	0.0023	0.0151	0.0775	0.1979	0.3510	0.4553
	Na	0.0000	0.0030	0.0037	0.0000	0.0140	0.0663	0.1654	0.3304	0.5270
MC-40FA-10BA-0.55	Mg	0.0000	0.0001	0.0071	-0.0033	0.0149	0.0196	0.0315	0.0684	0.0781
	Na	0.0000	-0.0030	-0.0004	-0.0050	0.0053	0.0187	0.0208	0.0392	0.0404
MC-40FA-30BA-0.55	Mg	0.0000	0.0004	0.0060	-0.0046	0.0115	0.0201	0.0330	0.0523	0.0458
	Na	0.0000	0.0036	0.0049	0.0094	0.0142	0.0199	0.0298	0.0515	0.0485
MC-50SL-10BA-0.55	Mg	0.0000	-0.0063	-0.0102	-0.0112	0.0002	0.0147	0.0830	0.3879	0.7449
	Na	0.0000	-0.0054	-0.0098	-0.0042	0.0084	0.0165	0.0388	0.0767	0.1182
MC-50SL-30BA-0.55	Mg	0.0000	-0.0139	-0.0232	-0.0158	-0.0026	0.0349	0.0979	0.2914	0.4688
	Na	0.0000	-0.0068	-0.0140	-0.0072	0.0054	0.0230	0.0549	0.1054	0.1316
MC-10LP-10BA-0.55	Mg	0.0000	0.0018	-0.0026	0.0012	0.0145	0.0968	0.2219	0.3360	0.4598
	Na	0.0000	0.0760	0.0730	0.0740	0.1212	0.1832	0.2742	0.4273	0.7646
MC-10LP-30BA-0.55	Mg	0.0000	0.0032	0.0071	0.0020	0.0070	0.0984	0.2173	0.3669	0.4871
	Na	0.0000	0.0351	0.0468	0.0709	0.1035	0.1565	0.1884	0.2730	0.6002

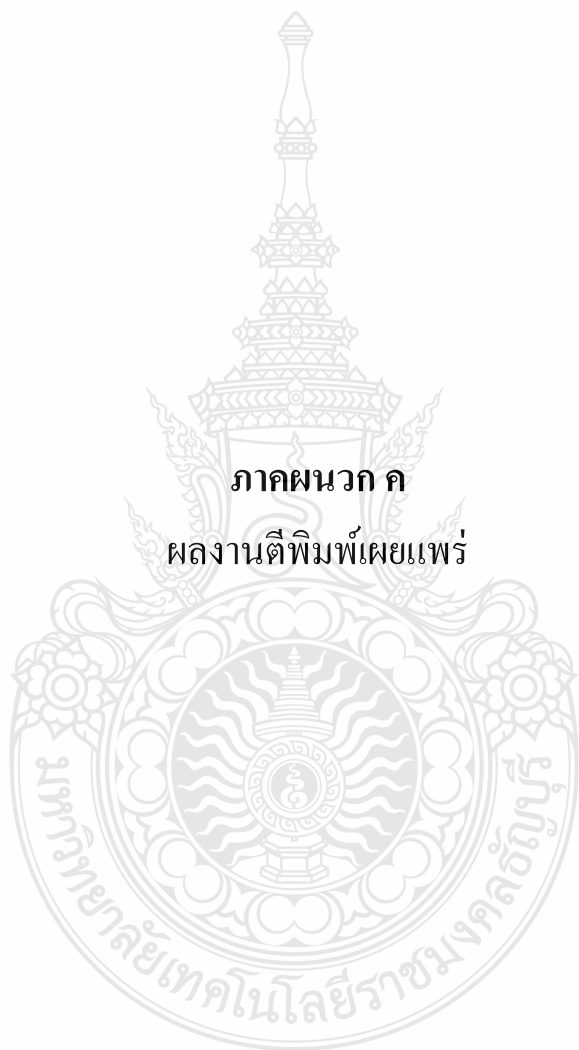
ตารางที่ ข.5 ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้ถ้ำกันเตาแทนที่ทราย (ต่อ)

Table shows the expansion of mortar bar (25 x 25 x 285 mm) which immerses in sulfate solution at each variable ages.

Sample	Sulfate Solution	Expansion of Paste Bars Specimens, %								
		0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	16 weeks	24 weeks	32 weeks	40 weeks	50 weeks
MC-40FA-0.55	Mg	0.0000	-0.0030	-0.0137	-0.0104	-0.0032	0.0347	0.0826	0.2591	0.3947
	Na	0.0000	0.0094	0.0013	0.0034	0.0061	0.0265	0.0450	0.0551	0.0788
MC-50SL-0.55	Mg	0.0000	0.0054	-0.0090	-0.0013	0.0068	0.0971	0.4046	1.2554	1.9951
	Na	0.0000	-0.0044	-0.0104	-0.0054	0.0019	0.0196	0.0689	0.1389	0.3189
MC-10LP-0.55	Mg	0.0000	0.0012	-0.0069	-0.0009	0.0117	0.1298	0.3083	0.5437	0.9132
	Na	0.0000	0.0082	0.0261	0.0510	0.1608	0.2420	0.4012	0.6146	0.9165
MC-0.55	Mg	0.0000	-0.0048	-0.0189	-0.0113	0.0106	0.0912	0.2869	0.6209	1.0986
	Na	0.0000	0.0413	0.0771	0.1030	0.2089	0.3248	0.5158	0.6772	0.7439

ตารางที่ ข.6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อใช้เท่ากับเตาแทนที่ทรายในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 50 สัปดาห์ (350 วัน)

Sample	Weight loss of cube Specimens, %								
	0 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	16 weeks	24 weeks	32 weeks	40 weeks	50 weeks
MC-10BA-0.55	0.00	-0.27	-0.40	-0.69	-1.16	-0.97	-0.58	1.03	1.31
MC-30BA-0.55	0.00	-0.13	-0.26	-0.39	-0.86	-0.66	-0.33	0.54	1.42
MC-40FA-10BA-0.55	0.00	-0.14	-0.32	-0.50	-0.95	-0.76	-0.42	1.49	1.83
MC-40FA-30BA-0.55	0.00	-0.17	-0.39	-0.41	-0.90	-0.67	-0.23	1.08	2.11
MC-50SL-10BA-0.55	0.00	-0.05	-0.27	-0.37	-0.79	-0.57	-0.16	-1.01	1.31
MC-50SL-30BA-0.55	0.00	-0.18	-0.29	-0.42	-0.90	-0.76	-0.45	0.73	1.61
MC-10LP-10BA-0.55	0.00	-0.12	-0.39	-0.36	-0.77	-0.62	-0.25	0.82	1.31
MC-10LP-30BA-0.55	0.00	-0.24	-0.39	-0.54	-1.06	-0.90	-0.37	0.93	1.29
MC-40FA-0.55	0.00	-0.28	-0.55	-0.52	-0.89	-0.69	-0.38	1.33	1.73
MC-50SL-0.55	0.00	-0.09	-0.25	-0.34	-0.71	-0.51	-0.14	-0.75	1.21
MC-10LP-0.55	0.00	-0.20	-0.25	-0.52	-0.84	-0.73	-0.35	0.72	1.17
MC-0.55	0.00	-0.28	-0.49	-0.44	-0.87	-0.69	-0.29	0.77	1.19



ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุม
วิชาการคอนกรีตประจำปี
ครั้งที่

10th ANNUAL CONCRETE CONFERENCE



คณะวิศวกรรมศาสตร์
FACULTY OF ENGINEERING

20-22 ตุลาคม 2557
ณ โรงแรมดุสิต ไฮส์แลนด์ รีสอร์ท
อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย



จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทความวิจัย สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง (MAT)(ต่อ)		หน้า
MAT-47	การศึกษาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีการบ่มแรงดันไฮดรอสแตติกที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับบ่มแบบปกติ	MAT-253
MAT-48	Internal curing with lightweight aggregate produced from biomass-derived waste	MAT-264
MAT-49	แบบจำลองการทำนายการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีตผสมตะกั่วดินแดง	MAT-278
MAT-50	กำลังและความสามารถในการเสียดทานของแผ่นโพลีเอทิลีนที่เคลือบด้วยผงซีเมนต์ภายใต้แรงกดที่และแรงกระแทก	MAT-290
MAT-51	พฤติกรรมของกลไกภายในระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นและชั้นดินเหนียวอ่อน	MAT-305
MAT-52	คุณสมบัติเชิงกลของอีโพลีเอทิลีนผสมเส้นใยเหล็ก	MAT-305
MAT-53	การศึกษาการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมจริงในจังหวัดนครปฐม	MAT-313
MAT-54	การพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกขลุ่ยหินภูเขาไฟ	MAT-320
MAT-55	การพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกประสานจากเศษหินภูเขาไฟ	MAT-327
MAT-56	การพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นจากเศษหินภูเขาไฟ	MAT-334
MAT-57	การวิเคราะห์หินภูเขาไฟสำหรับพัฒนาเป็นมวลรวมในคอนกรีต	MAT-341
MAT-58	ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก	MAT-347
MAT-59	ผลกระทบของการใช้เถ้าแก้วเป็นวัสดุผสมภายในคอนกรีตกำลังอัดประลัยของคอนกรีต	MAT-355
MAT-60	ผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระสูงต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์และการขยายตัวของมอร์ตาร์สำหรับผสมเถ้าลอย	MAT-363
MAT-61	การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ในสภาวะระเหยเร็วภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง	MAT-371
MAT-62	คุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของคอนกรีตผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ	MAT-379
MAT-63	กำลังอัดของคอนกรีตภายใต้แบบหล่อแบบอัดความดัน	MAT-384
MAT-64	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุกันน้ำระหว่างยางโพลีไวนิลคลอไรด์และยางบิวไทด์ในรอบท่อก่อสร้าง	MAT-389
MAT-65	ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อความต้านทานการบอบเนชั่นและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	MAT-395

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 10

ศ.ดร.สมนึก	ตั้งเต็มสิริกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
ดร.เฉลิมชัย	วาณิชย์ล้ำเลิศ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.ปานเทพ	จูลนิพิฐวงษ์	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.วรางคณา	แสงสร้อย	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
น.อ.รศ.ดร.ธนากร	พีระพันธุ์	โรงเรียนนายเรืออากาศ
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ณัฐวัฒน์	จุฑารัตน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.วิรัช	เลิศไพฑูรย์พันธ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รศ.ว่าที่ พ.ต.อิทธิพร	ศิริสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.ธัชวีร์	ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.รัฐภูมิ	ปรีชาตปรีชา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สรันการ	เหมะวิบูลย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ณัฐวุฒิ	ทิพย์โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รศ.จรรยา	เจริญเนตรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.สนธยา	ทองอรุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา(ตาก)
ผศ.ดร.อุดมวิทย์	ไชยสกุลเกียรติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.จตุพล	ตั้งประกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ปิติตานต์	กร้ามาคร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐพงศ์	มกระรัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.กิตติภูมิ	รอดสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ปิติ	สุคนษสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.วีระชาติ	ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิรวงล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.ชัย	จาดุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บูรณัตร	ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.วันชัย	สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 10(ต่อ)

ดร.นันทวัฒน์	ชมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.วิจน์วงศ์	กริพละ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุวิมล	สัจจวานิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
คุณอนุชิต	เจริญศุภกุล	บริษัท วิสิทธิ์ เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด
ผศ.ดร.วิทิศ	ปานสุข	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อความต้านทานคาร์บอนเนชั่นและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต
Effect of Binder Types on Carbonation and Chloride Penetration Resistances of Concrete

ณัฐนที เก้าลิ้ม(NuttanontKaolim)¹

ปิติสานครี มาตรา(PitisanKrammart)²

ทวีชัย สำราญวานิช(TaweechaiSunranwanich)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
(boss7ok@hotmail.com)

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อบทความนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต ผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูมและผสมผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากการศึกษาพบว่า การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ขณะที่การผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน มีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ในส่วนความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน มีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน นอกจากนี้พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจากจังหวัดระยองมีค่าดีกว่าของเถ้าลอยจากจังหวัดลำปางสุดท้ายพบว่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่อายุการบ่มที่มากกว่าคอนกรีตที่มีอายุการบ่มที่น้อยกว่า

Abstract: This paper is to study effect of binder types on carbonation and chloride penetration resistances of concrete. Fly ash, ground granulated blast-furnace slag (GGBS), silica fume and limestone powder were used to partially replaced type I Portland cement. The result showed that the carbonation resistance of concrete mixed with fly ash was higher than that of type I Portland cement concrete (OPC). While the carbonation resistance of concrete mixed with GGBS, silica fume and limestone powder were similar or slightly higher when compared with OPC concrete. In addition, it was found that the chloride penetration resistances of concrete mixed with fly ash, GGBS, silica fume, and limestone powder were better than those of OPC concrete. Furthermore, it was noted that the chloride penetration resistance of concrete mixed with fly ash from Rayong province were higher than those mixed with fly ash from Lampang province. Finally, the chloride penetration resistances of concrete with longer curing time were better than those with shorter curing time.

Keywords: Carbonation, Chloride, Fly ash, Ground granulated blast-furnace slag, Silica fume, Limestone powder

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสการอนุรักษ์พลังงานรวมถึงสภาวะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากถึง 0.5 ตันในทุกๆ 1 ตันของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้น [1] หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่างๆย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น

สำหรับประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนมาใช้ผลิตคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างแพร่หลาย ปริมาณเถ้าลอยที่มีอยู่ในประเทศไทยโดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีปริมาณสูงถึง 3,000,000 ตันต่อปี [2] การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blast-furnace slag, GGBF slag) สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างดี นอกจากใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสาน (Cementitious material) เช่นเป็นส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นต้น ส่วนผงหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหิน ซึ่งปกติแล้วจะเก็บไว้ในบริเวณแหล่งย่อยหิน เนื่องจากผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร จึงก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ ผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เมื่อแทนที่ผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับ

แรงอัดในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าวทำให้มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้นในขณะที่ซิลิกาฟูม (Silica fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ตซ์ (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็วและต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟูมอีกทั้งยังมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) ในปริมาณที่น้อยจึงสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้แต่พบว่าซิลิกาที่มีอยู่จะน้อยและเป็นผลึกค่อนข้างมากซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟูมเหล่านี้ในคอนกรีตไม่ดีนักเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ [3]

ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและส่งผลกระทบต่อเหล็กเสริมเกิดสนิมได้เป็นสาเหตุที่ทำให้ความคงทนของคอนกรีตลดลงอีกด้วย ส่วนคลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้จากไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) โดยการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ (Chloride penetration) ซึ่งเกิดขึ้นจากกลไกต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ประจุไฟฟ้า และแรงดันน้ำ นอกจากนั้นยังอาจเกิดขึ้นจากแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสารที่เคลื่อนผ่านด้วยเมื่อคลอไรด์จากภายนอกเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตถือเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ซึ่งมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตทั้งทางตรงและทางอ้อมและนำไปสู่การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตต่อไป

งานวิจัยนี้ศึกษาความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชันและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อช่วยลด

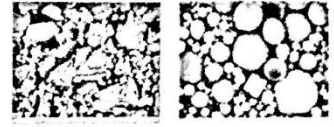
ผลกระทบเนื่องจากการทำลายของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคอนกรีตและเกล็ดคลอไรด์ต่อเหล็กเสริมในคอนกรีต

2. ระเบียบวิธีศึกษา

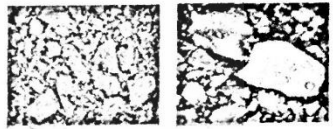
2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่
- 1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 2. เถ้าลอย จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง จำนวน 3 ชนิด คือ F(A) F(B) และ F(C) และจากโรงงานไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง จำนวน 1 ชนิด คือ F(D)
- 3. ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดโดยมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 14 ไมโครเมตร
- 4. ซิลิกาฟุ้งโดยมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร
- 5. ผงหินปูน ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิตมีสิ่งเจือปนน้อยโดยมีความละเอียดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8 ไมโครเมตร
- 6. ททราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนออกจนสะอาด นำไปทำการอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated-surface dry, SSD)
- 7. หินขนาดโตสุด 3/4 นำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปทำการอบและปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง
- 8. น้ำ ใช้น้ำประปามีค่าความเป็นกรดค่า pH ในช่วง 7 ถึง 8

ภาพที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน (ที่ใช้ในการศึกษา) โดยวิธี scanning electronic microscope (SEM) ซึ่งขยาย 1,500 เท่า ส่วนตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความด่างจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบส และขนาดอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ข) เถ้าลอย



(ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ง) ผงหินปูนขนาด 8 ไมโครเมตร

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ SEM กำลังขยาย 1,500 เท่า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความด่างจำเพาะ ความละเอียดโดยวิธีเบส และขนาดอนุภาคเฉลี่ย ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

Chemical Composition	C	F				SL	SF	LP
		(A)	(B)	(C)	(D)			
SiO ₂ %	19.5	35.71	26.61	25.22	61.64	36	92	0.46
Al ₂ O ₃ %	4.97	20.44	13.6	13.88	20.27	11.5	0.7	0.06
Fe ₂ O ₃ %	3.78	15.54	18.34	17.39	5.56	0.8	1.2	0.03
CaO %	65.38	16.52	24.97	26.25	1.73	38.5	0.2	55.25
MgO %	1.08	2	2.33	2.38	0.96	10	0.2	0.37
Na ₂ O %	<0.01	1.15	1.75	1.4	0.73	-	-	<0.01
K ₂ O %	0.47	2.41	1.77	1.92	1.36	-	-	0.01
SO ₃ %	2.16	4.26	8.53	9.44	0.38	1.45	-	<0.01
LOI %	2.27	0.49	0.53	0.56	5.38	-	-	43.79
Free lime %	-	1.71	3.94	3.06	0.03	-	-	-
Insoluble Residue %	0.28	-	-	-	-	2.35	-	-
ความด่างจำเพาะ	3.12	2.21	2.57	2.57	2.17	-	2.2	2.79
ความละเอียดโดยวิธีเบส, cm ² /g	3,250	2,867	2,802	2,722	2,723	4,600	200,000	12,160
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, μm	16	-	-	-	-	14	15	8

หมายเหตุ C หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
 F หมายถึง เถ้าลอย (A,B,C คือ เถ้าลอยจากแม่เมาะ และ D เถ้าลอยจากจังหวัดระยอง)
 SL หมายถึง ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
 SF หมายถึง ซิลิกาฟุ้ง
 LP หมายถึง ผงหินปูน

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตได้ทำการทดสอบหาความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การทดสอบความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

การศึกษารังนี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด (100x100x100 มม.) โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีต 3 ตัวอย่างต่อสัดส่วนผสมเพื่อทดสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C856 หลังจากหล่อลงแบบหล่อ (Mold) โดยถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated lime water) จนครบอายุ 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปเผชิญคาร์บอนไดออกไซด์ในตู้ โดยใช้ระยะเวลาในการสัมผัสคาร์บอนไดออกไซด์ที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ถึง 55 เมื่อครบอายุที่กำหนด จึงนำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น (Carbonation depth)

สำหรับวิธีการทดสอบค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต เมื่อครบอายุที่กำหนดทำการเก็บก้อนตัวอย่าง (ขนาด 100x100x100 มม.) ทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่นโดยผ่าก้อนตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก (Splitting) โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต จากนั้นติดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein) ที่ก้อนตัวอย่าง ซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น แต่ในส่วนที่เกิดคาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสีใช้เวอร์เนียร์วัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีทั้งหมด 8 จุดต่อคอนกรีตแต่ละซีก แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

2.2.2 การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

การทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตใช้ชิ้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 50 มิลลิเมตร โดยหลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนถึงอายุที่จะทำการทดสอบ ซึ่งจะทดสอบที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ใช้วิธี rapid chloride permeability test (RCPT) ซึ่งใช้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่าง เพื่อนำไปประเมินระดับการซึมผ่านได้ของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1202 [4] ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับค่าการแทรกซึมของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ (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 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษาความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตคือ 1 ลูกบาศก์เมตรที่ใช้ในการศึกษาโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีตคือ 1 ลบ.ม. (กก.)							
	C	FA	SL	SF	LP	S	G	W
C	372	-	-	-	-	771	1003	205
C-40F(A)	223	143	-	-	-	771	1003	205
C-40F(B)	223	141	-	-	-	771	1003	205
C-40F(C)	223	144	-	-	-	771	1003	205
C-40F(D)	223	140	-	-	-	771	1003	205
C-30SL	260	-	111	-	-	771	1003	205
C-10SF	334	-	-	37	-	771	1003	205
C-10LP	334	-	-	-	37	771	1003	205
C-30F(A)-10LP	223	111	-	-	37	771	1003	205
C-30F(B)-10LP	223	111	-	-	37	771	1003	205
C-30F(C)-10LP	223	111	-	-	37	771	1003	205
C-30F(D)-10LP	223	111	-	-	37	771	1003	205
C-20SL-10LP	260	-	74	-	37	771	1003	205

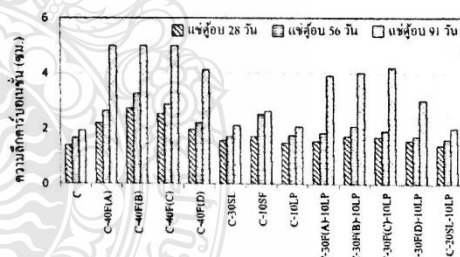
หมายเหตุ C-xLP-ySL หมายถึง วัสดุประสานที่ผสมขึ้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูนและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยใช้ผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ x โดยน้ำหนัก และมีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ y โดยน้ำหนัก

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 ความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

ภาพที่ 2 แสดงความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตทั้งหมดที่ศึกษาจำนวน 13 สัดส่วน พบว่าค่าความลึกคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตของเด็ลลอสทั้ง 4 ชนิด มีค่าค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งที่เผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 28, 56 และ 91 วัน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเด็ลลอสเป็นการลดปูนซีเมนต์ รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นการลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) จึงทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นเร็วขึ้น ส่วนค่าความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ในปริมาณที่ไม่มาก (ร้อยละ 30 สำหรับตะกรันเตา

ถลุงเหล็กบดละเอียด และร้อยละ 10 สำหรับซิลิกาฟูมและผงหินปูน) จึงลดปริมาณ Ca(OH)₂ ได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับของเด็ลลอสที่แทนที่ร้อยละ 40 โดยเฉพาะผงหินปูนไม่ใช้สารปอซโซลานจึงไม่ช่วยลดปริมาณ Ca(OH)₂ นอกจากนี้กรรมวิธีของซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีอนุภาคค่อนข้างละเอียดจึงเป็นการเติมเต็มได้มากกว่า ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าได้ยากขึ้น ส่วนเมื่อพิจารณาผลของชนิดของเด็ลลอสที่ 4 ชนิด ให้ความสำคัญคาร์บอนเนชั่นใกล้เคียงกัน และเมื่อใช้วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary binder) พบว่าความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตให้ผลแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับการใช้วัสดุประสานสองชนิด (Binary binder) กล่าวคือในส่วนที่มีเด็ลลอสเป็นส่วนผสมร่วม จะให้ค่าความลึกคาร์บอนเนชั่นที่มากขึ้น เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่างคอนกรีตที่นานขึ้น (91 วัน) ส่งผลให้ค่าความลึกคาร์บอนเนชั่นในอัตราที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นมากเมื่ออายุมาก ส่งผลให้ลดปริมาณ Ca(OH)₂ ได้มาก จึงทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น



ภาพที่ 2 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุบ่มน้ำ 28 วันแล้วเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน

3.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

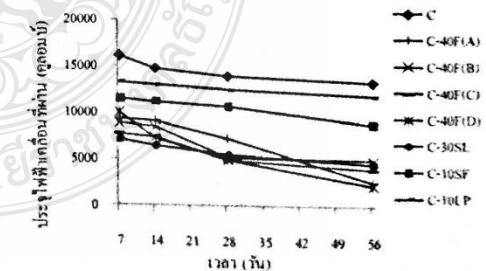
ตารางที่ 4 แสดงผลปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คลออมบ์) ของคอนกรีต ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน ส่วนภาพที่ 3 แสดงค่าความสัมพัทธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คลออมบ์) และอายุการบ่มของคอนกรีตผสมเด็ลลอสผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูนส่วนภาพที่ 4 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คลออมบ์) ของคอนกรีตผสมเด็ลลอส ผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน พบว่าความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเด็ลลอส ผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน ดีกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนซึ่งพิจารณาและเปรียบเทียบจากผลการเคลื่อนที่ของประจุตามมาตรฐานของ ASTM C1202 จะเห็นได้ว่าจำนวนประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเกิน 4,000 คลออมบ์ซึ่งจัดอยู่ในระดับการซึมผ่านได้สูง ยกเว้นของคอนกรีตผสมเด็ลลอสที่อายุ 56 วัน มีแนวโน้มน้อยกว่า 4,000 คลออมบ์ ซึ่งจัดอยู่ในระดับการซึมผ่านได้ในระดับปานกลาง

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าคอนกรีตที่อายุ 28 และ 56 วัน ระดับการซึมผ่านของคอนกรีตที่ผสมเด็ลลอส ผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน นั้นมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลาน และผลจากความละเอียดของวัสดุตั้งกล่าว จะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเฟสค์ โดยเฉพาะซิลิกาฟูม และผงหินปูน(ซึ่งผงหินปูนไม่ใช่สารปอซโซลาน)จึงส่งผลให้ระดับการซึมผ่านที่ต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และนอกจากนี้พบว่าระดับการซึมผ่านของคอนกรีตที่ผสมเด็ลลอส (ทั้ง 4 ชนิด) และผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียด และผสมผงหินปูน โดยมีค่าระดับการซึมผ่านที่ต่ำกว่าของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน ทั้งนี้เป็นเพราะเด็ลลอสและตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียดเป็นสารปอซโซ

ลาน ซึ่งจะทั้งปฏิกิริยาปอซโซลาน และการเติมเต็มจึงทำให้มีความทึบน้ำได้ดีกว่าของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม และผงหินปูน โดยกรณีของซิลิกาฟูม แม้ว่าจะเป็นสารปอซโซลานด้วยแต่ผลสืบเนื่องจากมีเฉพาะSiO₂ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดไม่ดีเท่ากับของเด็ลลอส หรือตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียด ซึ่งมีSiO₂ และ Al₂O₃เป็นส่วนประกอบ จึงทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้ดีกว่าส่วนเมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดของเด็ลลอสทั้ง 4 ชนิดต่อการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกัน

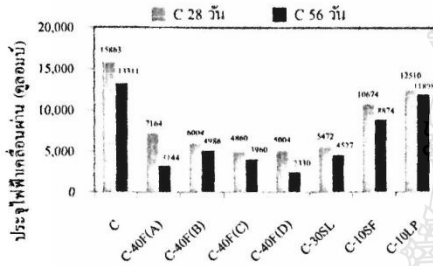
ตารางที่ 4 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คลออมบ์) ของคอนกรีต ที่อายุ 7, 14, 28, และ 56 วัน

สัญลักษณ์	ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คลออมบ์)			
	อายุการบ่ม (วัน)			
C	16058	14697	13864	13311
C-40F(A)	9243	9054	7164	2619
C-40F(B)	8861	8452	5068	4986
C-40F(C)	7731	7366	4860	3980
C-40F(D)	10120	7308	5004	2330
C-30SL	7137	6435	5472	4527
C-10SF	11484	11196	10674	8874
C-10LP	13257	12951	12510	11898
C-30F(A)-10LP	12762	11547	10152	5817
C-30F(B)-10LP	16743	13257	11376	9016
C-30F(C)-10LP	14130	13365	12798	8235
C-30F(D)-10LP	18087	16038	15687	12353
C-20SL-10LP	9315	8289	7002	6507



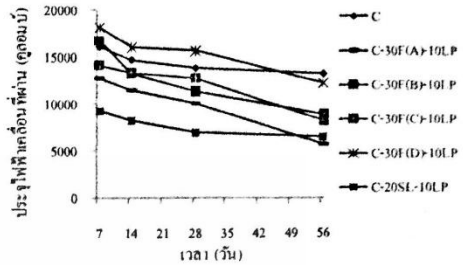
MAT-400

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) และอายุการบ่มของคอนกรีตผสมเด็าลอยผสมตะกรันเตาสูงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน

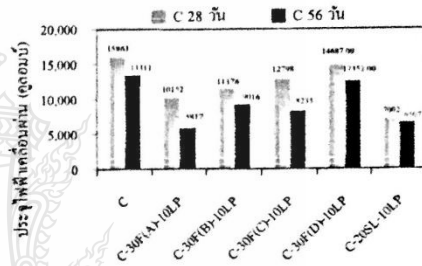


ภาพที่ 4 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตผสมเด็าลอย ผสมตะกรันเตาสูงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูนที่อายุ 28 และ 56 วัน

ภาพที่ 5 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) และอายุการบ่มของคอนกรีตผสมเด็าลอยร่วมกับผงหินปูนและ ผสมตะกรันเตาสูงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนและภาพที่ 6 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตผสมเด็าลอยร่วมกับผงหินปูนร่วมกับผงหินปูนและ ผสมตะกรันเตาสูงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน ซึ่งเป็นการแทนที่ 3 วัสดุประสาน พบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีของ 2 วัสดุประสานที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งให้ผลของระดับการซึมผ่านที่ดีกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) และอายุการบ่มของคอนกรีตผสมเด็าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมตะกรันเตาสูงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน



ภาพที่ 6 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์) ของคอนกรีตผสมเด็าลอยร่วมกับผงหินปูน และผสมตะกรันเตาสูงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 28 และ 56 วัน

4. สรุป

1) ความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนการผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียดผสมซิลิกาฟูมและผสมผงหินปูนมีความต้านทานใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน

2) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน มีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน

3) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจากระยะย้อมมีค่าต่ำกว่าของเถ้าลอยจากลำปาง

4) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่อายุการบ่มที่มากมีค่ามากกว่าของการบ่มที่น้อยกว่า

5) การใช้คอนกรีตผสมตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียด ผสมซิลิกาฟูม และผสมผงหินปูน หรือตะกรันเตาดลูงเหล็กบดละเอียดผสมร่วมกับผงหินปูน และซิลิกาฟูมผสมร่วมกับผงหินปูนให้ความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการแทรกซึมคลอไรด์ได้ต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วน

and sulfate resistance of fly ash concrete, Ph.D. Thesis, Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, 2005.

[2] สมชัย กกกำแหง, การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง ศักยภาพในการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์, พ.ศ. 2536, สำนักงานวิจัยและพัฒนา, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, หน้า 4-1 ถึง 4-23.

[3] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, 2543. ความคงทนของคอนกรีต.1:วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

[4] American Society for Testing and Materials ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Annual book of ASTM standard Vol.04.02.

เอกสารอ้างอิง

- [1] PitisanKrammart, Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ash and calcium carbide waste,

หนังสือตอบรับความฉับสมบูรณ์ No. ACC10-0092 (MAT-65)

From: Thai TCA <thaitca@gmail.com>
Sent: Thursday, October 9, 2014 12:47 AM
To: boss7ok@hotmail.com
Subject: หนังสือตอบรับความฉับสมบูรณ์ No. ACC10-0092 (MAT-65)

Dear Nuttanont Kaolim

สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย ได้รับบทความฉับสมบูรณ์
ของท่านสำหรับการส่งเข้าร่วม การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี
ครั้งที่ 10 (ACC10) จากท่านเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

จึงขอส่งหนังสือตอบรับความเข้าร่วมการประชุมดังกล่าวมา
ตามเอกสารแนบ และจะแจ้งกำหนดการนำเสนอบทความให้ท่านท
ราบทาง website ต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

นางสาวอุมาพร มหาแก้ว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายณัฐนนท์ เก้าลุ่ม
วัน เดือน ปีเกิด	20 พฤษภาคม 2534
ที่อยู่	104 หมู่ 7 ตำบลบ่อทอง อำเภอกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี 25110
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขา วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2555
ประสบการณ์การทำงาน	บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นต์ (จำกัด มหาชน) ตำแหน่ง วิศวกรโยธาฝ่ายผลิต ตั้งแต่ พ.ศ. 2559 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	082-0365763
อีเมล	nuttanont_k@mail.rmutt.ac.th

