คุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

CEMENTITIOUS PROPERTIES AND SULFATE RESISTANCE OF FLY ASH AND LIMESTONE POWDER CONCRETE

ยงยุทธ วัฒนกุล

YONGYUT WATTANAKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

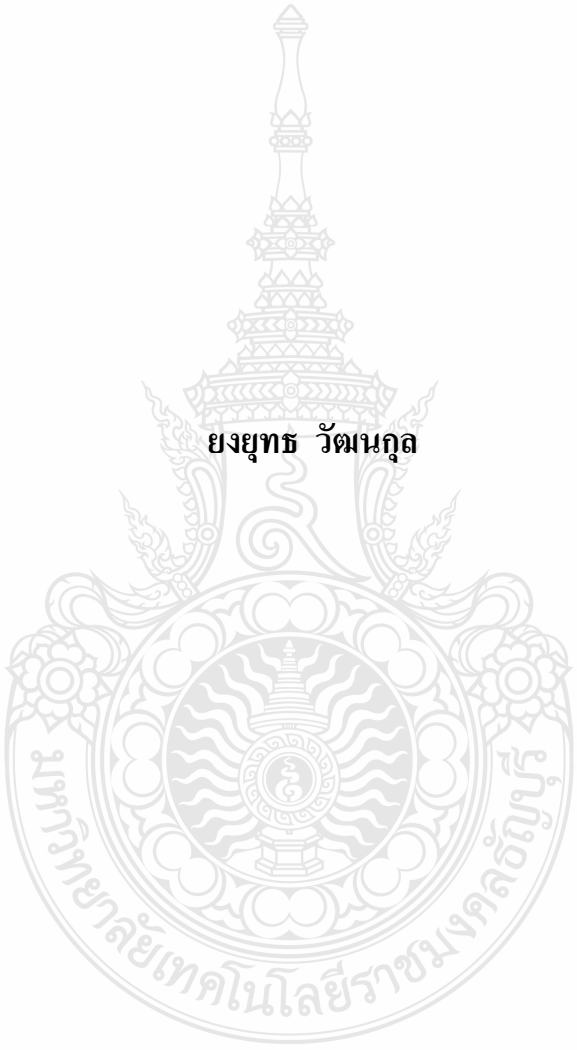
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

คุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

ยงยุทธ วัฒนกุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2554

CEMENTITIOUS PROPERTIES AND SULFATE RESISTANCE OF FLY ASH AND LIMESTONE POWDER CONCRETE

YONGYUT WATTANAKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

IN CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2011

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายยงยุทธ วัฒนกุล

COPYRIGHT © 2011 ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2554
FACULTY OF ENGINEERING คณะวิศวกรรมศาสตร์
RAJAMANKALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน
ชื่อนักศึกษา	นายยงยุทธ วัฒนกุล
รหัสประจำตัว	124970401008-3
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม และการก่อตัวของเพสต์ การยุบตัว ความพรุนและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต) และการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน (การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้เถ้าลอยและผงหินปูนในงานคอนกรีตอย่างเหมาะสม

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

สำหรับในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตไม่ว่าบดผสมหรือแทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ให้ค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เภทที่ 1 ล้วน โดยให้ค่า

ใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตไม่ว่าบดผสมหรือแทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ให้ค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เภทที่ 1 ล้วน โดยให้ค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน นอกจากนี้พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายผสมทั้งโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แต่พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตให้ผลในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น

คำสำคัญ : คุณสมบัติด้านซีเมนต์/คอนกรีต/เถ้าลอย/ผงหินปูน/ความต้านทานซัลเฟต

Thesis Title:	CEMENTITIOUS PROPERTIES AND SULFATE RESISTANCE OF FLY ASH AND LIMESTONE POWDER CONCRETE
Student Name:	Mr. Yongyut Wattanakul
Student ID:	124970401008-3
Degree Award:	Master of Engineering
Study Program:	Civil Engineering (Structural Engineering)
Academic Year:	2010
Thesis Advisor:	Assistant Professor Dr.Pitisan Krammart

ABSTRACT

This thesis aims to study the properties of cement (normal consistency and setting time of paste, slump, void and compressive strength of concrete), and sulfate resistance of concrete mixed with fly ash and limestone powder (expansion and weight loss) to serve as guidelines for use of fly ash and limestone powder in concrete work properly.

The results showed that normal consistency of paste when replaced by fly ash and fly ash with limestone powder in Portland cement type 1 and type 5 is less than that of cement concrete. Portland cement type 1 when replaced with limestone powder has normal consistency of paste equivalent to that of Portland cement type 1 only. Setting time Portland cement paste when replaced with fly ash and fly ash with limestone powder is longer than cement paste only, while the paste with cement paste replace with limestone powder has setting time close to plain Portland cement paste. The slump of concrete depends reversely on the amount of normal consistency of paste. The porosity of the concrete replaced with fly ash and with fly ash and limestone powder in Portland cement type 1 and type 5 is larger than that of plain concrete with Portland cement type 1. Concrete with lime stone powder has porosity less than that of plain concrete. Compressive strength of the concrete when replaced with fly ash and fly ash with limestone powder is less than that of plain concrete, especially when replaced high volume of fly ash. While concrete with powdered limestone has compressive strength close to that of plain concrete.

For expansion and weight loss in sodium sulfate solution, it was found that the expansion and weight loss of concrete, replaced with fly ash and limestone powder in Portland cement type 1 and type 5 is less than or equal to that of plain concrete with Portland cement type 5. For expansion and weight loss in magnesium sulfate solution, it was found that the expansion of concrete replaced with

fly ash and limestone powder in Portland cement type 1 and type 5 is less than of plain Portland cement type 1 concrete and less than Portland cement type 5 concrete. While weight loss of concrete mixed with fly ash is larger than that of plain Portland concrete. Moreover, it was found that the expansion of concrete in mixed solution between sodium sulfate and magnesium sulfate has same tendency as concrete in sodium sulfate solution and concrete in magnesium sulfate solution. But, the weight loss of concrete in mixed solution between sodium sulfate and magnesium sulfate has same tendency as concrete in magnesium sulfate solution.

Keywords: Cementitious properties/Concrete/Fly ash/Limestone powder/Sulfate resistance

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วง หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา พร้อมแนะนำแนวคิดแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และวิธีการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถาวร ธีรเวชญาณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความเมตตา ความเข้าใจ พร้อมทั้งความรู้อันมีประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่พันตรี อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ ซึ่งได้ให้ความรู้ คำแนะนำตลอดจนเอื้อเฟื้อข้อมูลบางส่วนของงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต

ท้ายสุด สำคัญยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมเจตน์ คุณแม่เล็ก วัฒนกุล ที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่างในชีวิตลูก แม้สิ่งต่างๆ เหล่านั้นจะได้มาอย่างยากลำบาก และด้วยหยาดเหงื่อของท่าน ให้โอกาสลูก จนมีโอกาสศึกษาเล่าเรียนจนถึงระดับนี้

ยงยุทธ วัฒนกุล

15 พฤษภาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวและข้องงานวิจัย	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	21
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	21
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา	21
3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์และส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา	30
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์	35
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	35
4.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	40
4.3 คุณสมบัติด้านความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต	60
4.4 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต	105
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	108
5.1 สรุป	108
5.2 ข้อเสนอแนะ	109

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	110
ภาคผนวก	
ก ตารางแสดงขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ทดสอบ	112
ข ตารางและรูปแสดงการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสานและเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน	125
ค ตารางแสดงค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน	176
ง ตารางแสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน	186
จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	190
ประวัติผู้เขียน	201

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ	5
2.2	ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
2.3	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618	11
2.4	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545	12
2.5	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ	13
2.6	สภาวะของซัลเฟต	16
2.7	ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต	18
3.1	สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาค่าความข้นเหลวปกติและการก่อตัวของตัวอย่างเพสต์	30
3.2	สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40	31
3.3	สัดส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55	32
4.1	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	36
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	40
4.3	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์และเวลาก่อตัวของเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	41
4.4	ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55ที่ใช้ในการศึกษา	48
4.5	ความพรุนของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40	50
4.6	ความพรุนของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55	52
4.7	ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน	55
4.8	ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน	58
4.9	การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของเพสต์และคอนกรีตเมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ล้วน	106

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.10	การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวของคอนกรีตและเมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตโดยเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ล้วน	106
4.11	การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาทั้งการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก ของคอนกรีตโดยเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ล้วน	107

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์	22
3.2	เครื่องมือหาความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน	23
3.3	เครื่องมือไวแคท	23
3.4	กรวยทดสอบค่าการยุบตัว	24
3.5	เครื่อง UTM (Universal Testing Machine)	25
3.6	ถังใส่สารละลายซัลเฟตและชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต	26
3.7	ถังพร้อมระบบหมุนเวียนสารละลายซัลเฟตในการแช่ตัวอย่างคอนกรีต	26
3.8	เครื่องวัดความยาว	28
3.9	แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต	28
3.10	เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม	29
3.11	แบบหล่อและตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต	30
4.1	ภาพขยายขนาด 2500 เท่าของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 เถ้าลอย และผงหินปูน	36
4.2	ขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 เถ้าลอย และผงหินปูน	38
4.3	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20	42
4.4	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน	43
4.5	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วย ถ้าลอย และผงหินปูน	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่ด้วยเถ้าลอย	43
4.7	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน	44
4.8	เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20	45
4.9	เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน	46
4.10	เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน	46
4.11	เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่ด้วยเถ้าลอย	47
4.12	เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน	47
4.13	ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน	49
4.14	ความพรุนของคอนกรีต (W/B=0.40) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	ความพรุนของคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน	53
4.16	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (W/B=0.40) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน	56
4.17	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (W/B=0.40) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365วัน	57
4.18	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (W/B=0.40) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลานปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน	57
4.19	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน	59
4.20	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365วัน	59
4.21	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลานปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	62
4.23	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน	62
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	63
4.25	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ระยะเวลา 690 วัน	64
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55)ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	65
4.27	การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน เมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 690 วัน	66
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.29	การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าและผงหินปูน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน	69
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ล้วน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	70
4.31	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน	71
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	72
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	73
4.34	การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 5 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน เมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 690 วัน	73
4.35	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.36	การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน	76
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)	77
4.38	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่ระยะเวลา 690 วัน	78
4.39	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)	79
4.40	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)	80
4.41	การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน เมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 690 วัน	80
4.42	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.43	การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่ระยะเวลา 690 วัน	83
4.44	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน	84
4.45	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน	86
4.46	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต	88
4.47	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55)ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต	89
4.48	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต	90
4.49	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต	90
4.50	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต	91
4.51	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต	92
4.52	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.53	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต	93
4.54	ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต	94
4.55	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ10 และ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน	95
4.56	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน	96
4.57	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ร้อยละ 20 และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน	97
4.58	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน	98
4.59	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่ระยะเวลา 800 วัน	99
4.60	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วนในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่ระยะเวลา 800 วัน	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.61	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน	101
4.62	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน	102
4.63	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน	102
4.64	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน	103
4.65	ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสม ผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน	103

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
CAH	Calcium Aluminate Hydrates
C-A-H	Calcium Aluminate Hydrates

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 1
บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีผลผลิต (By product) ที่เหลือใช้เป็นเถ้าลอยของถ่านหิน (Fly Ash) ประมาณปีละ 3 ล้านตัน [1] ในขณะที่ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยปกติแล้วผงหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งย่อยหินนั้น โดยอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร

การใช้เถ้าลอย (Fly Ash) แทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในเพสต์ลดลงและยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น อย่างเช่นทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตได้ดีขึ้น [2] ส่วนข้อเสียของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน คือทำให้ก่อตัวช้าและกำลังรับแรงในตอนต้นลดลง จึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยในงานที่ต้องการกำลังรับแรงในตอนต้นหรือต้องการถอดแบบเร็ว ในขณะที่การใช้ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างทำให้กำลังรับแรงในตอนต้นมีค่าเพิ่มขึ้น [3,4,5,6] อย่างไรก็ตามการใช้ผงหินปูนยังไม่แพร่หลายถึงแม้ว่าราคาจะถูกกว่าปูนซีเมนต์ก็ตาม การพัฒนาวัสดุประสานร่วมซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีต นอกจากจะมุ่งเน้นถึงคุณสมบัติทางกลแล้ว สิ่งสำคัญอีกอย่างที่ต้องคำนึงคือความคงทนของคอนกรีตต่อสภาพแวดล้อม โครงสร้างคอนกรีตทั่วไปที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีสารซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลายซัลเฟตสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ซึ่งจะพบได้ในดินหรือน้ำใต้ดิน น้ำเสียจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม หรือจากโรงงานผลิตสารเคมีบางประเภท และในน้ำทะเลที่มีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างของซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เป็นต้น ความเสียหายจากซัลเฟตที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตนั้น จะเกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าวอย่างรุนแรง ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น

จากผลการศึกษาของนักวิจัย [7] ซึ่งให้ผลในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) ของเถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม และ Slag เป็นต้น ในอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถต้านทานซัลเฟตได้ดี โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นส่วนมาก จากผลการศึกษาของปิติศานต์ [2] พบว่า ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (Fly Ash) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดี แต่ในกรณีของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นพบว่า การต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะแย่กว่าเมื่อเทียบกับการไม่แทนที่

นอกจากนี้จะเห็นว่าแม้ผลการวิจัยในต่างประเทศเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะช่วยต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดีแต่เถ้าลอยที่ได้มาจะไม่เหมือนกับของประเทศเรา ส่วนในกรณีแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นในต่างประเทศยังไม่ค่อยมีการกล่าวถึงหรือพูดได้ว่าในมาตรฐานต่างประเทศ เช่น ACI ไม่ได้กล่าวถึงกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟตเลย อีกอย่างในธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตนั้น จะไม่มีซัลเฟตชนิดใดชนิดหนึ่ง นั่นก็เช่นเดียวกันยังไม่มีการกล่าวถึงกรณีเมื่อโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานร่วมกับผงหินปูนผสมในส่วนผสมของคอนกรีต โดยคุณสมบัติด้านซีเมนต์ที่ศึกษาได้แก่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ เวลาการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวของคอนกรีต ความพรุนของคอนกรีต กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตโดยการวัดการขยายตัว (Expansion) และหาการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อสัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายซัลเฟตที่ผสมกันระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ และเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตเมื่อเผชิญกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟตโดยเฉพาะในกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) ซึ่งได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม และเวลาการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว ความพรุนและกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อไม่แทนที่และแทนที่ด้วยเถ้าลอย ผงหินปูน และทั้งแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายซัลเฟตที่ผสมกันระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟต

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างเพสต์ และตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาของวิทยาพนธ์ครั้งนี้ ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุประสาน 3 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน ทั้งในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติด้านซีเมนต์ และคุณสมบัติด้านความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต โดยแต่ละคุณสมบัติมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ โดยคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ลักษณะอนุภาคโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง การกระจายตัวของอนุภาค และความละเอียดโดยวิธีเบลน

1.3.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน

1.3.3 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม ได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม และเวลาการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว ความพรุน และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน

1.3.4 ความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน โดยวัดการขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต

1.3.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) รวมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านความต้านทานซัลเฟต ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่

1.4.1 เพื่อทราบถึงผลกระทบของการใช้เถ้าลอย และผงหินปูนในการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ ต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม และเวลาการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว ความพรุน และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน

1.4.2 เพื่อทราบถึงความต้านทานซัลเฟต ของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.4.3 เพื่อให้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการคัดเลือกเถ้าลอยและผงหินปูน สำหรับนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.4 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตเมื่อเผชิญกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต โดยเฉพาะกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟต

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผงที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านความคงทนของคอนกรีตได้แก่ การกัดกร่อนโดยซัลเฟต โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

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

1) <u>ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่ C_3S, C_2S, C_3A และC_4AF ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.1 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C. 150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 15 ของไทยได้แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

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

ข. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลัง

ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง

ค. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3

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

ง. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4

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

จ. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5

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

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ [8]

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

2) องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก และออกไซด์รอง ปริมาณประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

ก. ออกไซด์หลัก (Major oxides)

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

ข. ออกไซด์รอง (Minor oxides)

ออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล ((Na_2O) ไททาเนียมออกไซด์ (K_2O)) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [9]

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

3) สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

ออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

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

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสีเทาแก่ คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

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

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

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

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

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

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

การคำนวณปริมาณสารประกอบทั้ง 4 ชนิด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถหาได้จากสูตรการคำนวณ Bogue's Equation โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1: $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$

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

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

$$C_3A = 2.650Al_2O_3-1.692Fe_2O_3 \quad (2.3)$$

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

กรณีที่ 1: $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$

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

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

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

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

4) ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

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

$$2(3CaO.SiO_2)+6H_2O \rightarrow 3CaO.2Sio_2 3H_2O+3Ca(OH)_2 \qquad (2.9)$$

ข. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.10

$$2(2CaO.SiO_2)+4H_2O \rightarrow 3CaO.2Sio_2 3H_2O+Ca(OH)_2 \qquad (2.10)$$

ค. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.11

$$3CaO.Al_2O_3+6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \qquad (2.11)$$

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

$$3CaO.Al_2O_3+Ca.SO_4.2H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3Ca.SO_4 .31H_2O \qquad (2.12)$$

ง. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม ดังสมการที่ 2.13

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

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

2.1.2 วัสดุปอซโซลาน

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

1) <u>ชนิดของวัสดุปอซโซลาน</u>

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

ก. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไป (Volcanic Ash) หินภูมิไซท์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง

(Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (Limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

ข. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan)

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

2) <u>ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน</u>

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

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

2.1.3 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized Fly Ash) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน

เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (Electrostatic Precipiation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

1) <u>ชนิดของเถ้าลอย</u>

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

ก. เถ้าลอย ชนิด F (class F)

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica : SiO_2) และอลูมินา (Alumina : Al_2O_3) และเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric Oxide : Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide : CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนี่ยวและควอรตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

ข. เถ้าลอย ชนิด C (class C)

เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัสเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.3 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 [8]

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) 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

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในงานคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่า ควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า เถ้าถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าเถ้าถ่านหิน Class F

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

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545 [10]

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

เถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ดีต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีโดย ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [11]

ตัวอย่างเถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	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) <u>องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย</u>

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O, K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition : LOI) SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

3) <u>ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย</u>

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.10 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.14 และ/หรือสมการที่ 2.15 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2.1.4 ผงหินปูน

ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้ (By Product) จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของหินปูน จะประกอบด้วยสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (Inert Material) และวัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) มีรายละเอียดดังนี้

1) <u>วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี</u>

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

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

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

2) <u>วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี</u>

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.18

$$CaO+H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \qquad (2.17)$$

ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากสมการข้างต้นนี้ สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ เช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ดังสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.1.5 การกัดกร่อนโดยซัลเฟต

ปัจจุบันการศึกษาความเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อคอนกรีตนับว่ามีความจำเป็นยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือที่ใกล้กับทะเล เช่น ตอม่อ ท่าเรือ ประภาคาร เขื่อน ฯลฯ เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล ซัลเฟตอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด อำนาจการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น การทำลายของซัลเฟตไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้นและรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน เช่น ในท่อระบายน้ำโสโครก ในอาคารส่งน้ำเพื่อการชลประทาน ฐานรากและพื้นอาคาร ในดินที่มีซัลเฟต

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

การศึกษาการกัดกร่อนของซัลเฟตต่อคอนกรีตเป็นสิ่งที่น่าสนใจและจำเป็นอย่างมาก เพราะถ้าไม่ป้องกันผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในตอนเริ่มแรกของการก่อสร้างแล้ว คอนกรีตอาจเสียหายได้ในอนาตคอันใกล้ ทำให้ต้องซ่อมแซมคอนกรีตและการซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟตจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

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

ตารางที่ 2.6 สภาวะของซัลเฟต [12]

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

1 แหล่งของเกลือซัลเฟต

เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเล หรือในดินทั่วไป เกลือซัลเฟตชนิดที่พบมากที่สุดมักจะเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต รองลงมาก็คือแมกนีเซียมซัลเฟตเกลือซัลเฟตยังมักจะอยู่ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติ

2) กลไกการกัดกร่อนโดยโซเดียมซัลเฟต [7]

กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 2.19 ถึง 2.22 เริ่มต้นเมื่อโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจากไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการที่ 1 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีความเป็นด่างสูงมาก (pH=13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ Ettringite (C_6ASH_{32}) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลอื่น โดยที่สารยิปซัม ($C\underline{S}H_2$) ที่ได้จากสมการที่ 1 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\underline{S}H_{12}$) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังแสดงในสมการที่ 2.20 ถึง 2.22 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลปฏิกิริยาไฮเดรชั่นชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำละลายโซเดียมซัลเฟต จึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต

$$CH + N\underline{S} + 2H \rightarrow C\underline{S}H_2 + NH \quad (2.19)$$

$$C_4AH_{13} + 3C\underline{S}H_2 + 14H \rightarrow C_6A\underline{S}H_{32} + CH \quad (2.20)$$

$$C_4A\underline{S}H_{12} + 2C\underline{S}H_2 + 16H \rightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.21)$$

$$C_3A + 3C\underline{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.22)$$

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

3) <u>กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต</u> [7]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.23 ถึง 2.25 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่ไม่สูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettingite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.24 จากสมการที่ 2.23 และ 2.24 ทั้ง $C\underline{S}H_2$ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย $C\underline{S}H_2$ จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล (S_2H) ดังแสดงในสมการที่ 2.25 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลยดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม $C\underline{S}H_2$ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต

$$CH + M\underline{S} + 2H \rightarrow C\underline{S}H_2 + MH \qquad (2.23)$$

$$C_XS_YH_Z + xM\underline{S} + (3x+0.5y-z)H \rightarrow xC\underline{S}H_2 + xMH + 0.5yS_2H \qquad (2.24)$$

$$4MH + SH_{11} \rightarrow M_4SH_{8.5} + (n-4.5)H \qquad (2.25)$$

4) <u>ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต</u> [7]

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟตมีดังนี้

ก. สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต

ข. ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยากลดการทำลายขั้นรุนแรง

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

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

5) <u>วิธีการป้องกันการทำลายของซัลเฟต</u>

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

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

ค. ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น

ง. ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่มากเกินไป

ในบางกรณีการป้องกันความเสียหายจากการทำลายของซัลเฟตที่รุนแรงโดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่พอในสภาวะที่มีซัลเฟตเข้มข้นอยู่ในระดับรุนแรงมาก หากใช้ปอซโซลานร่วมด้วยจะเป็นการช่วยทำให้คอนกรีตให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตได้ดียิ่งขึ้น ตารางที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงข้อแนะนำของสมาคมคอนกรีตในสหรัฐอเมริกาสำหรับการเลือกใช้วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต ในสภาวะที่มีซัลเฟตอยู่ในระดับรุนแรงต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 2.7 ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต [12]

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (SO_4^{-2} ร้อยละ)	ซัลเฟตในน้ำ (PPM)	ประเภทของวัสดุประสาน	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
เบาบาง	0.00 - 0.10	0 - 15	-	-
ปานกลาง	0.10 - 0.20	150 – 1,500	Type 2, Type 1 + สารปอซโซลาน	ไม่สูงเกิน 0.50
รุนแรง	0.20 - 2 .00	1,500 – 10,000	Type 5	ไม่สูงกว่า 0.45
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000	Type 5 + สารปอซโซลาน	ไม่สูงกว่า 0.45

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษางานวิจัยที่ผ่านซึ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยและผงหินปูนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อความต้านทานสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล [2] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยบางส่วน โดยการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก ตัวอย่างถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต จากการศึกษาพบว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

การขยายตัวของมอร์ต้าร์แทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 68 สัปดาห์ ทุกส่วนผสมยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก ในขณะที่การแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน แต่ในกรณีมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน

Al- Moudi O.S.B. et al. [7] ได้ศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 โดยนำปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก พบว่า การสูญเสียกำลังอัดในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มีค่ามากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ปรากฏว่ามีค่ามากกว่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังนั้นจึงให้ความสำคัญต่อการสูญเสียกำลังอัดในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูมให้ผลดีที่สุดในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ไม่แนะนำให้ใช้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล [13] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่าการขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกันมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่ลงกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลาย

โซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

Al-Amoudi O.S.B. [14] ได้ศึกษาพบว่า ปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยร้อยละ 20 ของเถ้าลอย หรือร้อยละ 10 ของซิลิกาฟูม หรือร้อยละ 70 ของตะกรันเตาถลุงเหล็ก จะมีความต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดีมาก แต่จะต้านทานซัลเฟตได้แย่ลงเมื่อเป็นกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟต

S.U. Al-Dulaijan [15] ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 นอกจากนี้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม จากการศึกษาพบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีความสามารถใกล้เคียงกัน สามารถใช้ทดแทนกันได้ทั้งในสภาพแวดล้อมซัลเฟต

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนผสมของเพสต์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ผงหินปูน ทราย น้ำ สารโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20โดยเป็นปูนซีเมนต์ที่ใหม่ไม่จับตัวเป็นก้อน

2. เถ้าลอย ใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3. ผงหินปูน ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิต มีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นอุตสาหกรรม โดยมีความละเอียด 3 ไมโครเมตร

4. ทราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

5. หินเบอร์ 2 นำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปอบและปรับหินให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

6. น้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำประปา

7. สารโซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาหรือทดสอบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา และคุณสมบัติทางด้านความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10

1) <u>คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา</u>

โดยคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ศึกษาได้แก่

ก. ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 188-95 โดยขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์ (Le Chatelier Flask) (รูปที่ 3.1)

รูปที่ 3.1 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์

ข. ลักษณะอนุภาคของวัสดุประสานโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง (Scanning Electric Microscope: SEM)

ค. การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคแขวนลอยโดยใช้เรเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer: LPSA)

ง. ความละเอียดของวัสดุประสานโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 204-00 ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน(Air Permeability Apparatus) (รูปที่ 3.2)

2) <u>คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา</u>

สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

รูปที่ 3.2 เครื่องมือหาความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน

3.2.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม เวลาการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวของคอนกรีต ความพรุนของคอนกรีต และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

1) <u>ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์</u>

ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ (Normal Consistency) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 187-98 ด้วยเครื่องมือไวแคท (Vicat Apparatus) (รูปที่ 3.3)

รูปที่ 3.3 เครื่องมือไวแคท

2) <u>เวลาการก่อตัวของเพสต์</u>

เวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ ซึ่งทำการทดสอบหาเวลาการก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) และเวลาการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 191-99 ด้วยเครื่องมือไวแคท

3) <u>ค่าการยุบตัวของคอนกรีต</u>

ค่าการยุบตัว (Slump) ของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 143 ด้วยกรวยทดสอบการยุบตัว (Slump Cone) (รูปที่ 3.4)

รูปที่ 3.4 กรวยทดสอบค่าการยุบตัว

4) <u>ความพรุนของคอนกรีต</u>

ความพรุน (Porosity) ที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10x10x10 ซม.^{3} ทดสอบตามมาตรฐานASTM C642 โดยมีรายละเอียดต่างๆ คือ ทดสอบโดยผ่าชิ้นตัวอย่างออกเป็น 3 ส่วน ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 – 110 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นในอากาศ จนชิ้นตัวอย่างอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบครั้งแรกกับครั้งที่ 2 โดยมีค่าต่างกันไม่เกินร้อยละ 0.5 หากค่าครั้งที่ 2 เกินร้อยละ 0.5 ให้นำไปอบอีกอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จนกระทั่งมีค่าแตกต่างน้อยกว่าร้อยละ 0.5 นำไปแช่ในน้ำอุณหภูมิประมาณ 21 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 48 ชั่วโมง จึงนำมาเช็ดให้แห้งด้วยผ้าแล้วทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาเช็ดให้แห้งด้วยผ้า แล้วทำการชั่งน้ำหนักและชั่งน้ำหนักในน้ำ

5) <u>กำลังอัดประลัยของคอนกรีต</u>

กำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ของคอนกรีต ประยุกต์ใช้มาตรฐานอังกฤษ BS 1881 โดยใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ซม.^{3} ที่อายุ 28 และ 365 วัน ด้วยเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) (รูปที่ 3.5)

รูปที่ 3.5 เครื่อง UTM (universal testing machine)

3.2.3 คุณสมบัติด้านความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

สำหรับคุณสมบัติทางด้านความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้ประเมินความต้านทานซัลเฟต (Sulfate resistance) ของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้วิธีการวัดการขยายตัว (Expansion) และการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตในกรณีที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) และสารละลายที่ผสมกันระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟต

สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ใช้มีความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร จะได้ปริมาณอิออนซัลเฟตเท่ากับ 33,800 ppm ส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณอิออนซัลเฟตที่เท่ากันคือ 33,800 ppm สำหรับสารละลายซัลเฟตที่ผสมกันระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟต โดยใช้โซเดียมซัลเฟตต่อแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วนเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก โดยที่ความเข้มข้นของ SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ในสารละลาย 1 ลิตร เหมือนเดิม ดังนั้นในครั้งนี้ได้สารโซเดียมซัลเฟตเท่ากับ 37.50 กรัม และแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 10.59 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร โดยเตรียมสารละลายแต่ละชนิดไว้ล่วงหน้า 1 วัน อุณหภูมิสารละลายขณะแช่ตัวอย่างประมาณ 30±2°C ในการแช่ชิ้นตัวอย่างใช้อัตราส่วนปริมาตรสารละลายต่อปริมาตรตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ประมาณ 4 ต่อ 1 และจัดให้มีระบบการหมุนเวียนสารละลายในถัง โดยสารละลายซัลเฟตที่ใช้แช่ตัวอย่างจะมีทำการเปลี่ยนทุกๆอายุแช่ตัวอย่าง 2 เดือน

รูปที่ 3.6 ถังใส่สารละลายซัลเฟตและชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

รูปที่ 3.7 ถังพร้อมระบบหมุนเวียนสารละลายซัลเฟตในการแช่ตัวอย่างคอนกรีต

สำหรับรายละเอียดวิธีศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต มีดังนี้

ก. การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012 – 97 ด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) (รูปที่ 3.8) โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความยาว

- การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต ใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม.^{3} ดังรูปที่ 3.9 ในแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 2 ชิ้น

(ก) แบบหล่อ (ข) ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม.^{3}

รูปที่ 3.9 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

- ระยะเวลาการบ่มและระยะเวลาทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างคอนกรีต 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) เป็นเวลา 28 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2°C หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้ ณ ขณะนี้จะใช้

- การหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

เมื่อครบระยะเวลาแช่ในสารละลาย นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 2 ชิ้นขึ้นจากสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นำไปหาค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตได้จากสมการที่ (3.1)

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \qquad (3.1)$$

โดย ΔL คือ การขยายตัว (%)

L_x คือ ความยาวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลาต่างๆ (มม.) เทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน

L_i คือ ความยาวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มม.)

L_g คือ ความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มม.

ข. การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต ทำการทดสอบด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม (รูปที่ 3.10) โดยการหาการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม

- การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต ใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 10x10x10 ซม.^{3} ดังรูปที่ 3.11 ในแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 2 ชิ้น

(ก) แบบหล่อ (ข) ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10x10x10 ซม.^{3}

รูปที่ 3.11 แบบหล่อและตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตใน สารละลายซัลเฟต

- ระยะเวลาการบ่มและระยะเวลาทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างคอนกรีต 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) เป็นเวลา 28 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2°C หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 2 ชิ้นของแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตขึ้นจากน้ำแล้วล้างทำความสะอาดนำปูนขาวและสิ่งสกปรกที่อาจติดอยู่ที่ผิวของชิ้นตัวอย่างออกแล้วเช็ดผิวชิ้นตัวอย่างด้วยผ้าเมื่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง นำชิ้นตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักที่ชั่งได้ ณ ขณะนี้จะใช้เป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างคอนกรีต หลังจากชั่งน้ำหนักเสร็จแล้ว นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลายซัลเฟต เพื่อหาค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลาแช่ในสารละลายครบ 800 วัน

- การหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

เมื่อครบที่อายุแช่ในสารละลายซัลเฟต 800 วัน นำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 2 ชิ้นของแต่ละสัดส่วนผสมคอนกรีตขึ้นจากสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมาปัดผิวด้วยแปรงเพื่อให้เศษคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตหลุดออกและซับผิวให้แห้งด้วยผ้า เมื่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีตอยู่ในสถาวะอิ่มตัวผิวแห้งนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตไปชั่ง

$$\Delta W = \frac{W_x - W_i}{W_i} \times 100 \qquad (3.2)$$

โดย ΔW คือ การสูญเสียน้ำหนัก (%)

W_x คือ น้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลาต่างๆ (ก.)

W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้น (ก.)

3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของเพสต์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แยกตามคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้ศึกษา โดยมีรายละเอียดของสัดส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

3.3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาค่าความข้นเหลวปกติและการก่อตัวของเพสต์จำนวน 27 สัดส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 3.1

3.3.2 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหาค่ายุบตัว ความพรุนและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตจำนวน 54 สัดส่วนผสม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.55 แสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาค่าความข้นเหลวปกติ และการก่อตัวของตัวอย่างเพสต์

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ประเภทปูนซีเมนต์	สัดส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
			ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ผงหินปูน 3 μ
1	P-C1	ประเภทที่ 1	100	-	-
2	P-C1 FA30	ประเภทที่ 1	70	30	-
3	P-C1 FA50	ประเภทที่ 1	50	50	-
4	P-C1 LP10	ประเภทที่ 1	90	-	10
5	P-C1 LP20	ประเภทที่ 1	80	-	20
6	P-C1 FA20 LP10	ประเภทที่ 1	70	20	10
7	P-C1 FA10 LP20	ประเภทที่ 1	70	10	20
8	P-C1 FA40 LP10	ประเภทที่ 1	50	40	10
9	P-C1 FA30 LP20	ประเภทที่ 1	50	30	20
10	P-C5	ประเภทที่ 5	100	-	-
11	P-C5 FA30	ประเภทที่ 5	70	30	-

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาค่าความข้นเหลวปกติ และการก่อตัวของตัวอย่างเพสต์ (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ประเภทปูนซีเมนต์	สัดส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
			ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ผงหินปูน 3 μ
12	P-C5 FA50	ประเภทที่ 5	50	50	-
13	P-C5 LP10	ประเภทที่ 5	90	-	10
14	P-C5 LP20	ประเภทที่ 5	80	-	20
15	P-C5 FA20 LP10	ประเภทที่ 5	70	20	10
16	P-C5 FA10 LP20	ประเภทที่ 5	70	10	20
17	P-C5 FA40 LP10	ประเภทที่ 5	50	40	10
18	P-C5 FA30 LP20	ประเภทที่ 5	50	30	20
19	P-CP	ปอซโซลาน	100	-	-
20	P-CP LP10	ปอซโซลาน	90	-	10
21	P-CP LP20	ปอซโซลาน	80	-	20
22	P-CL10	บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10	100	-	-
23	P-CL10 FA30	บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10	70	30	-
24	P-CL10 FA50	บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10	50	50	-
25	P-CL20	บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20	100	-	-
26	P-CL20 FA30	บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20	70	30	-
27	P-CL20 FA50	บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20	50	50	-

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม^3)						
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ผงหินปูน 3 μ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	น้ำ	น้ำยาลดน้ำพิเศษ
1	C-C1-0.40	402	-	-	790	1080	161.8	0.907
2	C-C1 FA30-0.40	281	121	-	790	1080	161.8	0.907
3	C-C1 FA50-0.40	201	201	-	790	1080	161.8	0.907
4	C-C1 LP10-0.40	362	-	40	790	1080	161.8	0.907
5	C-C1 LP20-0.40	322	-	80	790	1080	161.8	0.907
6	C-C1 FA20 LP10-0.40	282	80	40	790	1080	161.8	0.907
7	C-C1 FA10 LP20-0.40	282	40	80	790	1080	161.8	0.907
8	C-C1 FA40 LP10-0.40	201	161	40	790	1080	161.8	0.907
9	C-C1 FA30 LP20-0.40	201	121	80	790	1080	161.8	0.907

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม^3)						
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ผงหินปูน 3 μ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	น้ำ	น้ำยาลดน้ำพิเศษ
10	C-C5-0.40	402	-	-	790	1080	161.8	0.907
11	C-C5 FA30-0.40	281	121	-	790	1080	161.8	0.907
12	C-C5 FA50-0.40	201	201	-	790	1080	161.8	0.907
13	C-C5 LP10-0.40	362	-	40	790	1080	161.8	0.907
14	C-C5 LP20-0.40	322	-	80	790	1080	161.8	0.907
15	C-C5 FA20 LP10-0.40	282	80	40	790	1080	161.8	0.907
16	C-C5 FA10 LP20-0.40	282	40	80	790	1080	161.8	0.907
17	C-C5 FA40 LP10-0.40	201	161	40	790	1080	161.8	0.907
18	C-C5 FA30 LP20-0.40	201	121	80	790	1080	161.8	0.907
19	C-CP-0.40	402	-	-	790	1080	161.8	0.907
20	C-CP LP10-0.40	362	-	40	790	1080	161.8	0.907
21	C-CP LP20-0.40	322	-	80	790	1080	161.8	0.907
22	C-CL10-0.40	402	-	-	790	1080	161.8	0.907
23	C-CL10 FA30-0.40	281	121	-	790	1080	161.8	0.907
24	C-CL10 FA50-0.40	201	201	-	790	1080	161.8	0.907
25	C-CL20-0.40	402	-	-	790	1080	161.8	0.907
26	C-CL20 FA30-0.40	281	121	-	790	1080	161.8	0.907
27	C-CL20 FA50-0.40	201	201	-	790	1080	161.8	0.907

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม^3)						
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ผงหินปูน 3 μ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	น้ำ	น้ำยาลดน้ำพิเศษ
1	C-C1-0.55	332	-	-	970	1080	182	-
2	C-C1 FA30-0.55	233	99	-	970	1080	182	-
3	C-C1 FA50-0.55	166	166	-	970	1080	182	-
4	C-C1 LP10-0.55	299	-	33	970	1080	182	-
5	C-C1 LP20-0.55	266	-	66	970	1080	182	-
6	C-C1 FA20 LP10-0.55	233	66	33	970	1080	182	-

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม^3)						
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ผงหินปูน 3 μ	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	น้ำ	น้ำยาลดน้ำพิเศษ
7	C-C1 FA10 LP20-0.55	233	33	66	970	1080	182	-
8	C-C1 FA40 LP10-0.55	166	133	33	970	1080	182	-
9	C-C1 FA30 LP20-0.55	166	99.5	66.5	970	1080	182	-
10	C-C5-0.55	332	-	-	970	1080	182	-
11	C-C5 FA30-0.55	233	99	-	970	1080	182	-
12	C-C5 FA50-0.55	166	166	-	970	1080	182	-
13	C-C5 LP10-0.55	299	-	33	970	1080	182	-
14	C-C5 LP20-0.55	266	-	66	970	1080	182	-
15	C-C5 FA20 LP10-0.55	233	66	33	970	1080	182	-
16	C-C5 FA10 LP20-0.55	233	33	66	970	1080	182	-
17	C-C5 FA40 LP10-0.55	166	133	33	970	1080	182	-
18	C-C5 FA30 LP20-0.55	166	99.5	66.5	970	1080	182	-
19	C-CP-0.55	332	-	-	970	1080	182	-
20	C-CP LP10-0.55	299	-	33	970	1080	182	-
21	C-CP LP20-0.55	266	-	66	970	1080	182	-
22	C-C-CL10-0.55	332	-	-	970	1080	182	-
23	C-CL10 FA30-0.55	233	99	-	970	1080	182	-
24	C-CL10 FA50-0.55	166	166	-	970	1080	182	-
25	C-CL20-0.55	332	-	-	970	1080	182	-
26	C-CL20 FA30-0.55	233	99	-	970	1080	182	-
27	C-CL20 FA50-0.55	166	166	-	970	1080	182	-

*** <u>หมายเหตุ</u> ***

- P หมายถึง เพสต์
- C หมายถึง คอนกรีต
- C1 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
- C5 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5
- CP หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน
- CL10 หมายถึง ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10

- CL20	หมายถึง	ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20
- FA	หมายถึง	เถ้าลอย
- LP	หมายถึง	ผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร
- ตัวเลข 10, 20, 30, 40 และ 50	หมายถึง	ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูน
- ตัวเลข 0.40, 0.55	หมายถึง	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

*** <u>การอ่านสัญลักษณ์</u> ***

- P-C1	หมายถึง	เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- P-C1 FA30	หมายถึง	เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30
- P-C1 LP10	หมายถึง	เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10
- P-C1 FA20 LP10	หมายถึง	เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10
- C-C1-0.40	หมายถึง	คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40
- C-CP-0.40	หมายถึง	คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40
- C-C1 FA30-0.40	หมายถึง	คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40
- C-C1 LP10-0.55	หมายถึง	คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55
- C-C1 FA20 LP10-0.55	หมายถึง	คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ10 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

การศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในครั้งนี้ ได้พิจารณาผลการศึกษา และวิเคราะห์ผลในหัวข้อดังต่อไปนี้คือ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาซึ่งได้แก่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม และเวลาการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัว ความพรุน และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต และสุดท้ายเป็นการศึกษาความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีในครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 เถ้าลอย และผงหินปูน

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน

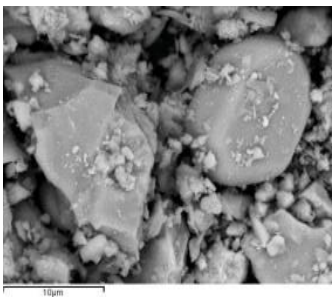
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 เถ้าลอย และผงหินปูน พบว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกันคือ 3.12 , 3.18 , 3.12 และ 3.17 ตามลำดับ ในขณะที่ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์อื่นๆ คือ 2.93 ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยและผงหินปูนมีค่าเท่ากับ 2.47 และ 2.79 ตามลำดับ สำหรับความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (3,250 ซม.^{2}/ก.) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (3,340 ซม.^{2}/ก.) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (4,080 ซม.^{2}/ก.) มีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในขณะที่ความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 เท่ากับ 5,150 ซม.^{2}/ก. และ 5,260 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับซึ่งมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 สำหรับเถ้าลอยนั้นความละเอียดมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 คือเท่ากับ 3,550 ซม.^{2}/ก. ในขณะที่ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอนที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้มีค่าความละเอียดมากที่สุดคือ 12,160 ซม.^{2}/ก.

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

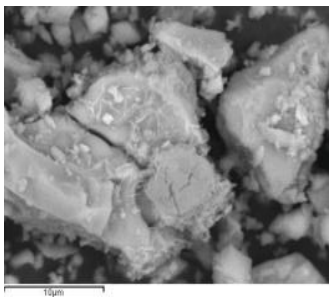
รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน		เถ้าลอย	ผงหินปูน 3μ
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5		ร้อยละ 10	ร้อยละ 20		
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	3.18	3.12	3.17	2.93	2.46	2.79
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ ก.)	3,250	3,340	4,080	5,150	5,266	3,550	12,160

4.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้โดยวิธี SEM (Scanning Electronic Microscope) ซึ่งขยาย 3,500 เท่า พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.1 ก. และ ข.) คือมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไปกระจายอยู่ทั่ว ส่วนกรณีของอนุภาคของเถ้าลอย (รูปที่ 4.1 ฉ.) นั้นพบว่ามีลักษณะที่แตกต่างจากกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 คือจะมีลักษณะที่กลม ผิวเรียบ ในขณะที่กรณีของผงหินปูน (รูปที่ 4.1 ช.) จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แต่ขนาดของอนุภาคจะมีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบกัน อย่างไรก็ตามในกรณีของลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (รูปที่ 4.1 ค.) และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนทั้งร้อยละ 10 และ 20 (รูปที่ 4.1 ง. และ จ.) นั้นจะมีลักษณะที่เป็นไปตามลักษณะของอนุภาคของส่วนที่ผสมกัน กล่าวคือถ้ามีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (กรณีปูนซีเมนต์ปอซโซลาน) จะมีลักษณะกลมของเถ้าลอยร่วมด้วย ส่วนกรณีเมื่อบดผสมผงหินปูนก็จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคมเห็นได้ชัดเจน เป็นต้น

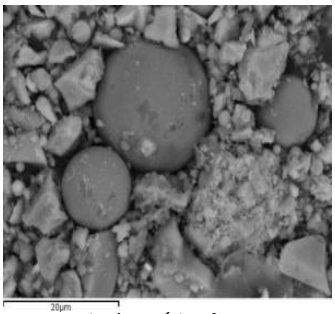


ก. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

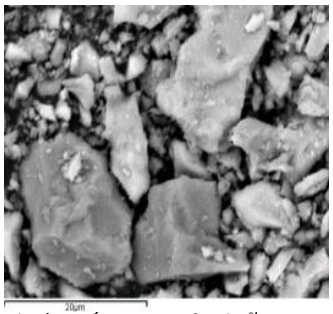


ข. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

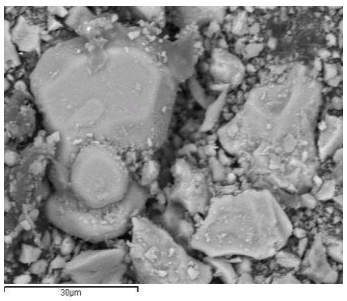
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 เถ้าลอย และผงหินปูน



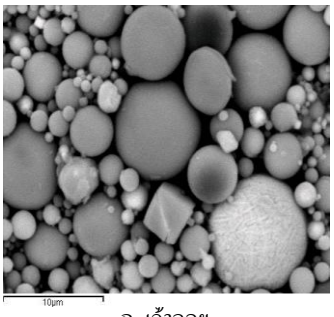
ค. ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน



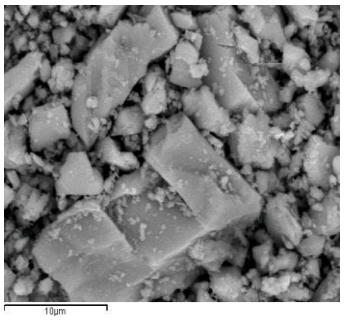
ง. ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10



จ. ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20



ฉ. เถ้าลอย



ช. ผงหินปูน 3μ

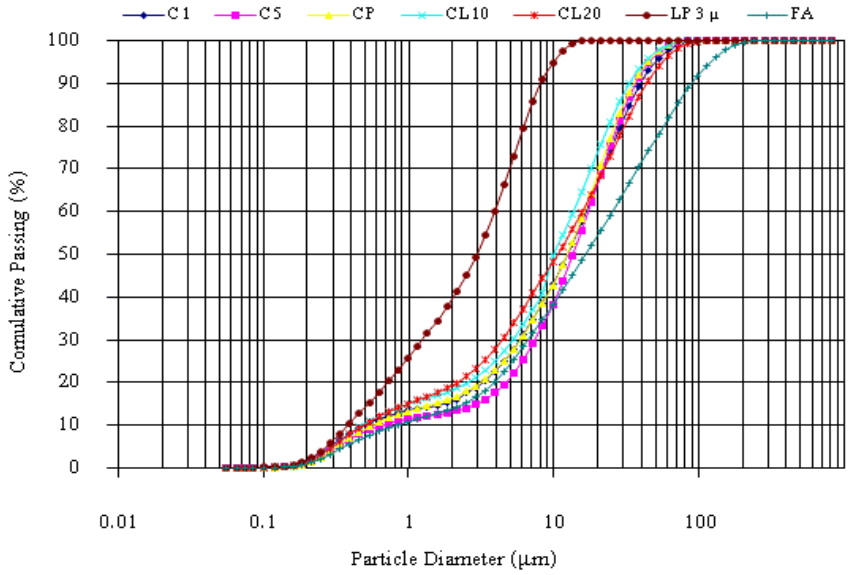
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 เถ้าลอย และผงหินปูน (ต่อ)

4.1.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและร้อยละสะสมของขนาดอนุภาคเพื่อบอกถึงลักษณะการกระจายและขนาดเฉลี่ย (d50) ของอนุภาคของวัสดุ ซึ่งพบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ประมาณ 12 และ 13 ไมโครเมตร ตามลำดับ และของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ประมาณ 10 11 และ 15 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนของเถ้าลอยมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 17 ไมโครเมตร ในขณะที่

ของผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 3 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

ส่วนลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้พบว่าการกระจายของอนุภาคของผงหินปูนค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งขนาดส่วนที่ละเอียด และส่วนที่หยาบ ส่วนกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน จะเห็นว่าค่อนข้างจับกลุ่มที่เหมือนกันคือ ส่วนอนุภาคส่วนที่ละเอียดมีแนวโน้มว่ามีมากกว่าส่วนที่หยาบ ยกเว้นกรณีของเถ้าลอยมีแนวโน้มว่าการกระจายตัวของอนุภาคส่วนที่หยาบจะมีมากกว่าส่วนละเอียด



รูปที่ 4.2 ขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 เถ้าลอย และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

4.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.2 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ วัสดุประสานดังกล่าวได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลานปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน เถ้าลอย และผงหินปูน พบว่า SiO_2 ของเถ้าลอยมีค่าค่อนข้างสูงคือเท่ากับร้อยละ 40.93 เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 19.50 และ 21.87 ตามลำดับ ในขณะที่ของผงหินปูนมี SiO_2 น้อยมากคือเท่ากับร้อยละ 0.46 ในกรณีของ Al_2O_3 ก็เช่นกันโดยที่ของเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 22.42 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และผงหินปูนเท่ากับร้อยละ 4.97 ,

3.87 และ 0.06 ตามลำดับ และกรณีของ Fe_2O_3 ก็ทำนองเดียวกันคือ เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูนมีค่าเท่ากับ 13.64 , 3.78 , 4.34 และ 0.03 ตามลำดับ ส่วนในกรณี CaO นั้นพบว่าของเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูน (ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5) โดย CaO มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.63 (เถ้าลอย) ร้อยละ 65.38 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) ร้อยละ 64.56 (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5) และร้อยละ 55.25 ซึ่งเป็นของผงหินปูน

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงออกไซด์หลักทั้ง 4 (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO) ของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ซึ่งเป็นการผสมเถ้าลอยและผงหินปูนลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลก็จะให้ค่าออกไซด์หลักไปในทิศทางของการเพิ่มเถ้าลอยหรือผงหินปูน กล่าวคือ กรณีปูนซีเมนต์ปอซโซลานซึ่งเป็นการผสมเถ้าลอยลงไป ดังนั้นจึงทำให้ SiO_2 ของปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งนี้เป็นเพราะ SiO_2 ของเถ้าลอยมีมากจึงมีผลให้ SiO_2 ในปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่าสูงขึ้น ส่วนในกรณีของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนก็ให้ผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ CaO ในผงหินปูน (55.25%) ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (65.38%) เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อบดผสมเป็นปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนจึงทำให้ CaO ในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อยเช่นกัน คือของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 มี CaO เท่ากับร้อยละ 63.29 และ 62.67 ตามลำดับ

ในส่วนออกไซด์รองอื่นๆ MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , TiO_2 , P_2O_3 , Free Lime และสารที่ไม่ละลายในกรด (Insoluble Residue) นอกเหนือจากออกไซด์หลักที่กล่าวมาแล้ว พบว่าของปูนซีเมนต์แต่ละชนิด รวมทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกันนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ยกเว้นกรณีของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากเผา (Loss on Ignition ; LOI) ของผงหินปูนค่อนข้างสูงคือร้อยละ 43.79 ในขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 2.27 , 1.59 และ 0.46 ตามลำดับ ดังนั้นจากการที่ LOI ของผงหินปูนมีค่อนข้างสูงจึงทำให้ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีค่าสูงตามไปด้วย คือร้อยละ 7.20 และ 9.93 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน		เถ้าลอย	ผงหินปูน (3μ)
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5		ร้อยละ 10	ร้อยละ 20		
ซิลิกอนไดออกไซด์	SiO_2	19.50	21.87	24.98	17.48	16.20	40.93	0.46
อลูมิเนียมออกไซด์	Al_2O_3	4.97	3.87	9.25	4.49	4.13	22.42	0.06
เฟอร์ริกออกไซด์	Fe_2O_3	3.78	4.34	5.97	3.36	3.01	13.64	0.03
คัลเซียมออกไซด์	CaO	65.38	64.56	52.65	63.29	62.67	13.63	55.25
แมกนีเซียมออกไซด์	MgO	1.08	1.11	1.62	1.02	0.98	2.93	0.37
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	SO_3	2.16	2.08	2.48	2.35	2.37	1.92	< 0.01
โซเดียมออกไซด์	Na_2O	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.89	< 0.01
โปตัสเซียมออกไซด์	K_2O	0.47	0.24	0.78	0.44	0.43	2.39	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา	LOI	2.27	1.59	1.85	7.20	9.93	0.46	43.79
แคลเซียมออกไซด์อิสระ	fCaO	1.00	0.76	1.02	0.78	0.61	0.22	-
Insoluble Residue	-	0.28	0.23	6.28	0.47	0.38	-	-

4.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ (Cementitious) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวที่พิจารณาได้แก่ ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ เวลาการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ ค่าการยุบตัว (Slump) ความพรุน (Void) และกำลังอัดประลัย (Compressive Strength ; fc') ของตัวอย่างคอนกรีต

4.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 ถึง 4.7 แสดงปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ที่ศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 27 สัดส่วนผสม โดยเปรียบเทียบระหว่างเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 และการแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ดังกล่าว

จากรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 25.20 และ 25.60 ตามลำดับ ส่วนเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละ 27.30) ซึ่งมากกว่าทั้งกรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าจากการบดร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้เถ้าลอยมีความละเอียดเพิ่มขึ้นและอนุภาคเป็นเหลี่ยมคมมากขึ้นจึงทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้น สำหรับเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (ร้อยละ 25.60) มีค่าไม่แตกต่างจากเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในขณะที่เพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 เท่ากับร้อยละ 23.30

ส่วนกรณีของเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ 4.4) พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมยิ่งลดลง กล่าวคือเมื่อแทนที่ร้อยละ 30 และ 50 เท่ากับร้อยละ 22.66 และ 20.42 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอยที่กลมดังที่กล่าวมาแล้ว และการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 จะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมไม่แตกต่างกันคือร้อยละ 25.40 และ 25.25 ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนดังกล่าวมาแล้ว

สำหรับเพสต์ของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (รูปที่ 4.5) จะให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 นั่นคือเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะลดปริมาณน้ำที่เหมาะสม ในขณะที่การแทนที่ด้วยผงหินปูน (ในปริมาณที่ศึกษาในครั้งนี้) ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

รูปที่ 4.6 เป็นเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกันคือการแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ลดลง ในขณะการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 จะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมไม่แตกต่างกัน

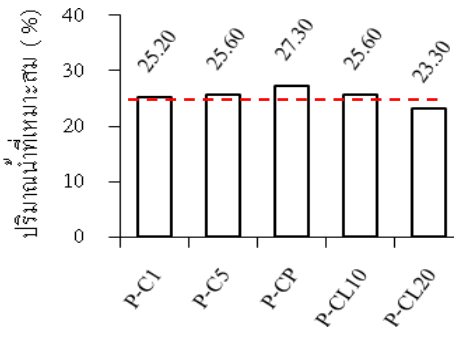
รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ระหว่างการบดผสมและการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนพบว่า การบดผสมเถ้าลอยจะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากกว่าการแทนที่ ในขณะที่การบดผสมและการแทนที่ผงหินปูนให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์และเวลาก่อตัวของเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

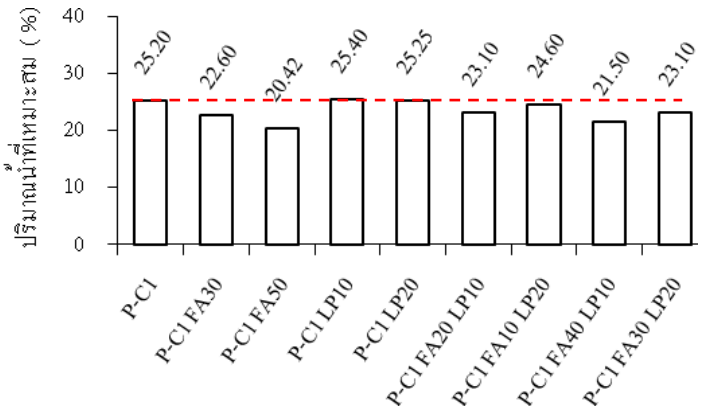
ลำดับที่	เพสต์	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	เวลาการก่อตัว (นาที)	
			การก่อตัวเริ่มต้น	การก่อตัวสุดท้าย
1	P-C1	25.20	90	157
2	P-C1 FA30	22.60	175	217
3	P-C1 FA50	20.42	195	240
4	P-C1 LP10	25.40	90	150
5	P-C1 LP20	25.25	95	150
6	P-C1 FA20 LP10	23.10	80	172
7	P-C1 FA10 LP20	24.60	85	157
8	P-C1 FA40 LP10	21.50	100	180

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์และเวลาก่อตัวของเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา(ต่อ)

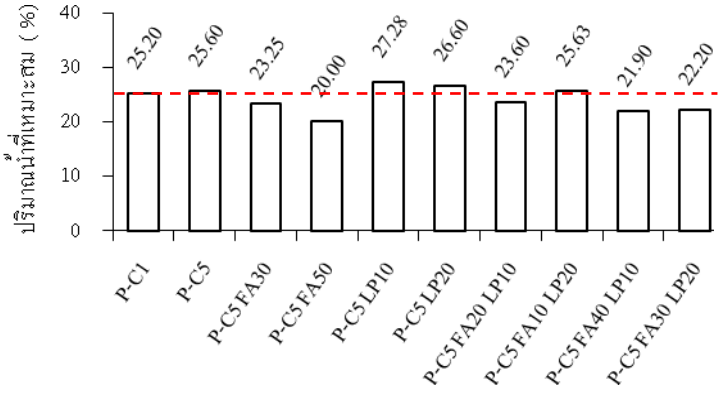
ลำดับที่	เพสต์	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	เวลาการก่อตัว (นาที)	
			การก่อตัวเริ่มต้น	การก่อตัวสุดท้าย
9	P-C1 FA30 LP20	23.10	90	162
10	P-C5	25.60	152	217
11	P-C5 FA30	23.25	135	217
12	P-C5 FA50	20.00	190	240
13	P-C5 LP10	27.28	155	200
14	P-C5 LP20	26.60	145	202
15	P-C5 FA20 LP10	23.60	175	232
16	P-C5 FA10 LP20	25.63	145	217
17	P-C5 FA40 LP10	21.90	155	242
18	P-C5 FA30 LP20	22.20	145	232
19	P-CP	27.30	188	265
20	P-CP LP10	27.40	187	270
21	P-CP LP20	26.30	180	247
22	P-CL10	25.60	127	180
23	P-CL10 FA30	22.48	195	255
24	P-CL10 FA50	20.65	262	300
25	P-CL20	23.30	120	172
26	P-CL20 FA30	20.80	180	232
27	P-CL20 FA50	19.40	210	247



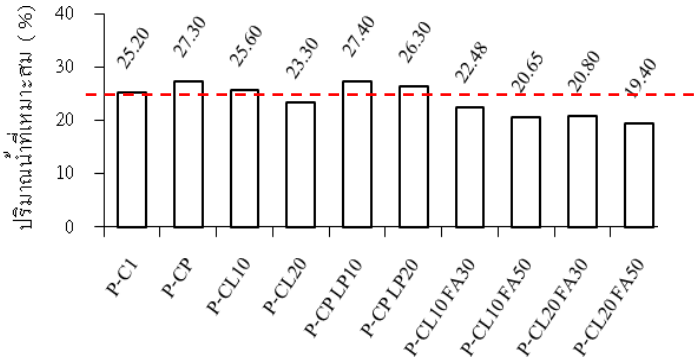
รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20



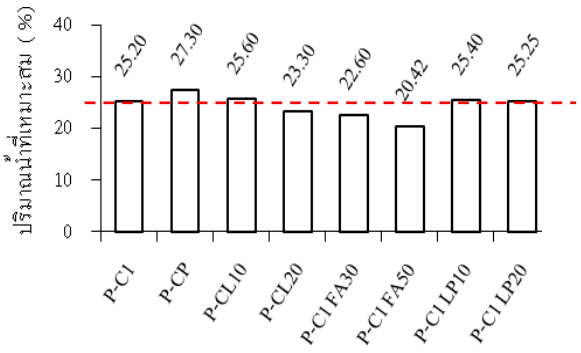
รูปที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน



รูปที่ 4.5 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน



รูปที่ 4.6 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่ด้วยเถ้าลอย



รูปที่ 4.7 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน

4.2.2 เวลาการก่อตัวของเพสต์

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8 ถึง 4.12 แสดงเวลาการก่อตัวของเพสต์ที่ศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 27 สัดส่วนผสม โดยเปรียบเทียบระหว่างเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 และการแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ดังกล่าว โดยศึกษาทั้งเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่า 90 และ 152 นาที ตามลำดับ ส่วนเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (188 นาที) มากกว่าทั้งกรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งการทำปฏิกริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน สำหรับเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กล่าวคือ 127 และ 120 นาที ตามลำดับ แสดงว่าการบดผสมผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์มีผลต่อเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้การก่อตัวช้าลง

ส่วนกรณีของเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (รูปที่ 4.9) พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีเวลาการก่อตัวเริ่มต้นที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้นจะทำให้เวลาการก่อตัวเริ่มต้นยิ่งเพิ่มขึ้นกล่าวคือเมื่อแทนที่ร้อยละ 30 และ 50 เท่ากับ 175 และ 195 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 จะให้เวลาการก่อตัวเริ่มต้นไม่แตกต่างกับกรณีเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คือ 90 และ 95

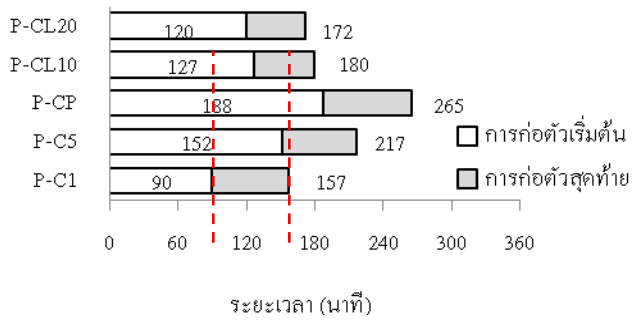
นาที ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะให้ผลไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

สำหรับเวลาการก่อตัวของเพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (รูปที่ 4.10) จะให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีของเพสต์ที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กล่าวคือเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นในขณะที่การแทนที่ด้วยผงหินปูน (ในปริมาณที่ศึกษาในครั้งนี้) ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และการแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนจะให้ค่าการก่อตัวที่ไม่แตกต่างกับกรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

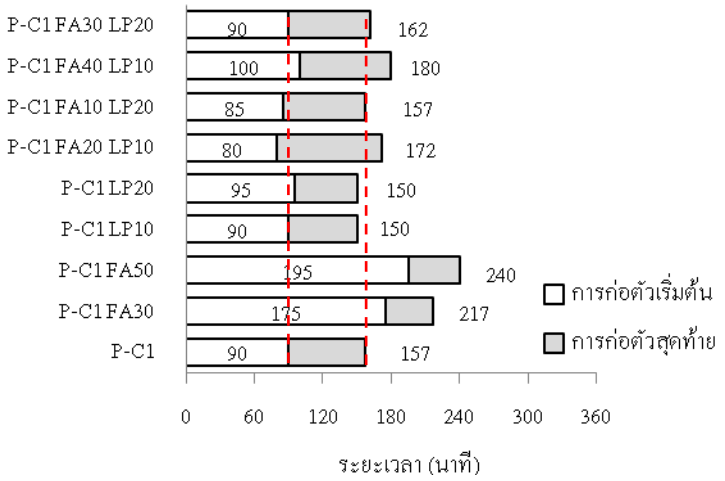
รูปที่ 4.11 เป็นเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยพบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกันคือที่การแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 จะให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นไม่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ระหว่างการบดผสมและการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ซึ่งพบว่าการบดผสมและการแทนที่ของเถ้าลอยให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นไม่แตกต่างกันแต่เพสต์ของการบดผสมผงหินปูนจะให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมากกว่าเพสต์ที่แทนที่ด้วยผงหินปูน

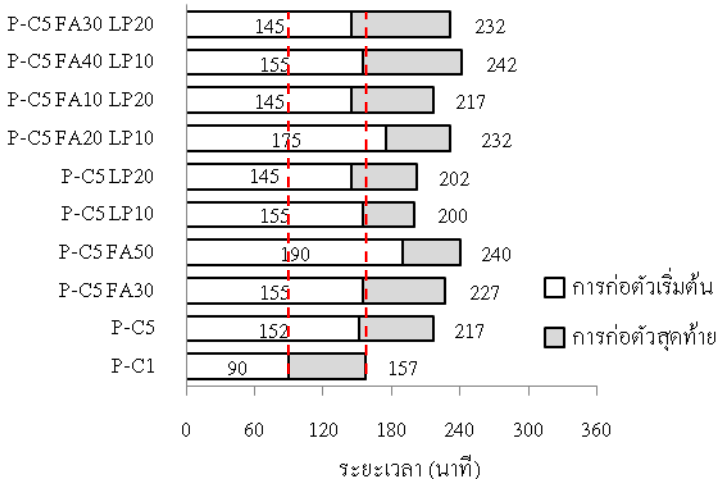
สำหรับเวลาการก่อตัวสุดท้ายในการศึกษาครั้งนี้ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับเวลาการก่อตัวเริ่มต้นแต่มีค่าระยะเวลาในการก่อตัวที่มากกว่า



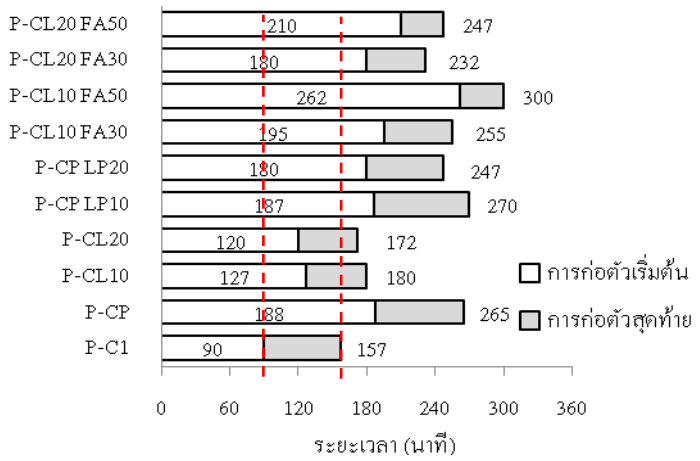
รูปที่ 4.8 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20



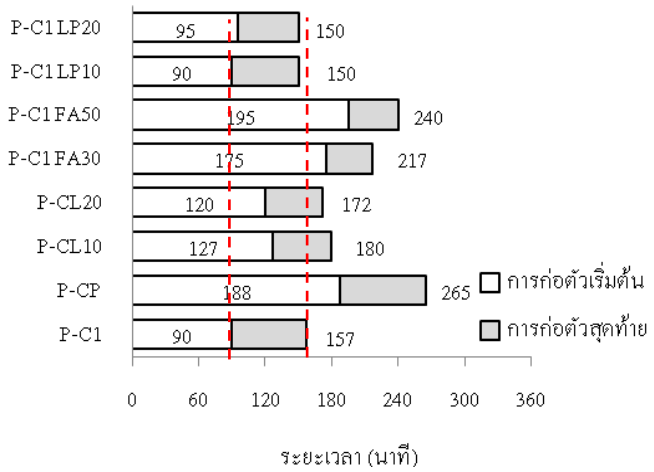
รูปที่ 4.9 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน



รูปที่ 4.10 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน



รูปที่ 4.11 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่ด้วยเถ้าลอย



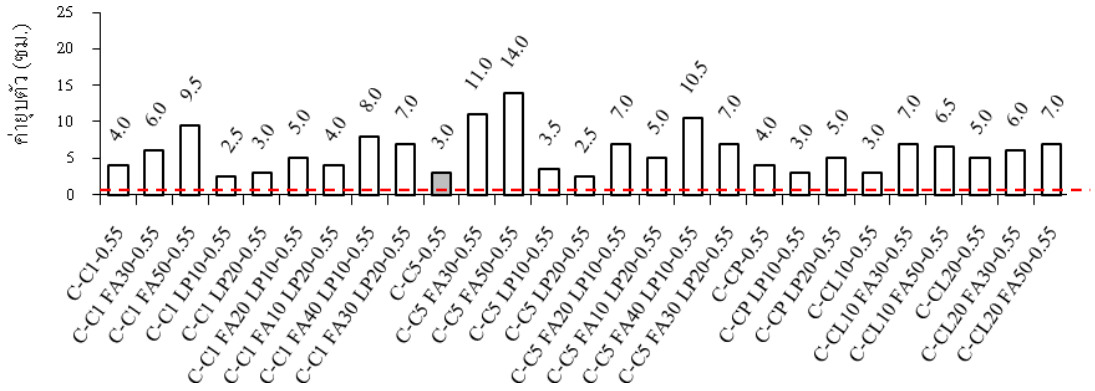
รูปที่ 4.12 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน

4.2.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

สำหรับค่ายุบตัวของคอนกรีตในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาเฉพาะคอนกรีตเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.13 แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 27 สัดส่วนผสม ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 และปูนซีเมนต์แทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

ตารางที่ 4.4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 ที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	คอนกรีต	ค่าการยุบตัว (ซม.)
1	C-C1-0.55	4.0
2	C-C1 FA30-0.55	6.0
3	C-C1 FA50-0.55	9.5
4	C-C1 LP10-0.55	2.5
5	C-C1 LP20-0.55	3.0
6	C-C1 FA20 LP10-0.55	5.0
7	C-C1 FA10 LP20-0.55	4.0
8	C-C1 FA40 LP10-0.55	8.0
9	C-C1 FA30 LP20-0.55	7.0
10	C-C5-0.55	3.0
11	C-C5 FA30-0.55	11.0
12	C-C5 FA50-0.55	14.0
13	C-C5 LP10-0.55	3.5
14	C-C5 LP20-0.55	2.5
15	C-C5 FA20 LP10-0.55	7.0
16	C-C5 FA10 LP20-0.55	5.0
17	C-C5 FA40 LP10-0.55	10.5
18	C-C5 FA30 LP20-0.55	7.0
19	C-CP-0.55	4.0
20	C-CP LP10-0.55	3.0
21	C-CP LP20-0.55	5.0
22	C-CL10-0.55	3.0
23	C-CL10 FA30-0.55	7.0
24	C-CL10 FA50-0.55	6.5
25	C-CL20-0.55	5.0
26	C-CL20 FA30-0.55	6.0
27	C-CL20 FA50-0.55	7.0



รูปที่ 4.13 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน

จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าใกล้เคียงกันคือ 4 และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่ายุบตัว (4 เซนติเมตร) ซึ่งใกล้เคียงกับทั้งกรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 สำหรับคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กล่าวคือเท่ากับ 3 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงว่าการแทนที่ผงหินปูน (บดผสมในปริมาณที่ศึกษาในครั้งนี้) ไม่มีผลต่อค่าการยุบตัว ส่วนกรณีของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าจะมีค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้นจะทำให้ค่าการยุบตัวยิ่งเพิ่มขึ้นกล่าวคือเมื่อแทนที่ร้อยละ 30 และ 50 เท่ากับ 6 และ 9.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอยที่กลมดังที่กล่าวมาแล้ว และการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 จะให้ค่าการยุบตัวน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คือ 2.5 และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบค่าการยุบตัวของคอนกรีตระหว่างการบดผสมและ การแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะให้ค่าการยุบตัวมากกว่าการบดผสมด้วยเถ้าลอย ในขณะที่การแทนที่และการบดผสมผงหินปูนให้ค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนการแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนดังกล่าวมาแล้ว กล่าวคือมีแนวโน้มจะให้ค่าการยุบตัวที่มากกว่าเนื่องจากผลของเถ้าลอย

สำหรับคอนกรีตของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จะให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั่นคือ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะเพิ่มค่าการยุบตัว ในขณะที่การแทนที่ด้วยผงหินปูน (ในปริมาณที่ศึกษาในครั้งนี้) ค่าการยุบตัวมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ส่วนคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยพบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกันคือ การแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีค่าการยุบตัวที่เพิ่มขึ้น ในขณะการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 จะให้ค่าการยุบตัวไม่แตกต่างกัน

4.2.4 ความพรุนของคอนกรีต

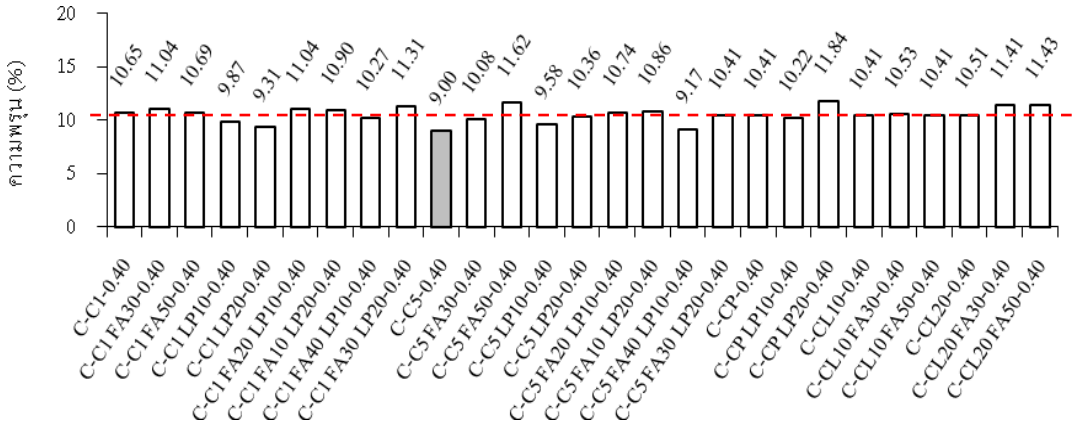
ตารางที่ 4.5 และ 4.6 และรูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงความพรุนของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ โดยศึกษาความพรุนของตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 10x10x10 ซม.^{3}) ซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 และการแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55โดยศึกษาที่อายุของตัวอย่างคอนกรีตที่ 28 วัน

ตารางที่ 4.5 ความพรุนของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 (W/B=0.40)

ลำดับที่	คอนกรีต	ความพรุน (%)
1	C-C1-0.40	10.65
2	C-C1 FA30-0.40	11.04
3	C-C1 FA50-0.40	10.69
4	C-C1 LP10-0.40	9.87
5	C-C1 LP20-0.40	9.31
6	C-C1 FA20 LP10-0.40	11.04
7	C-C1 FA10 LP20-0.40	10.90
8	C-C1 FA40 LP10-0.40	10.27
9	C-C1 FA30 LP20-0.40	11.31
10	C-C5-0.40	9.00
11	C-C5 FA30-0.40	10.08
12	C-C5 FA50-0.40	11.62
13	C-C5 LP10-0.40	9.58
14	C-C5 LP20-0.40	10.36

ตารางที่ 4.5 ความพรุนของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 (W/B=0.40) (ต่อ)

ลำดับที่	คอนกรีต	ความพรุน (%)
15	C-C5 FA20 LP10-0.40	10.74
16	C-C5 FA10 LP20-0.40	10.86
17	C-C5 FA40 LP10-0.40	9.17
18	C-C5 FA30 LP20-0.40	10.41
19	C-CP-0.40	10.41
20	C-CP LP10-0.40	10.22
21	C-CP LP20-0.40	11.84
22	C-CL10-0.40	10.41
23	C-CL10 FA30-0.40	10.53
24	C-CL10 FA50-0.40	10.41
25	C-CL20-0.40	10.51
26	C-CL20 FA30-0.40	11.41
27	C-CL20 FA50-0.40	11.43



รูปที่ 4.14 ความพรุนที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 (W/B=0.40) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน

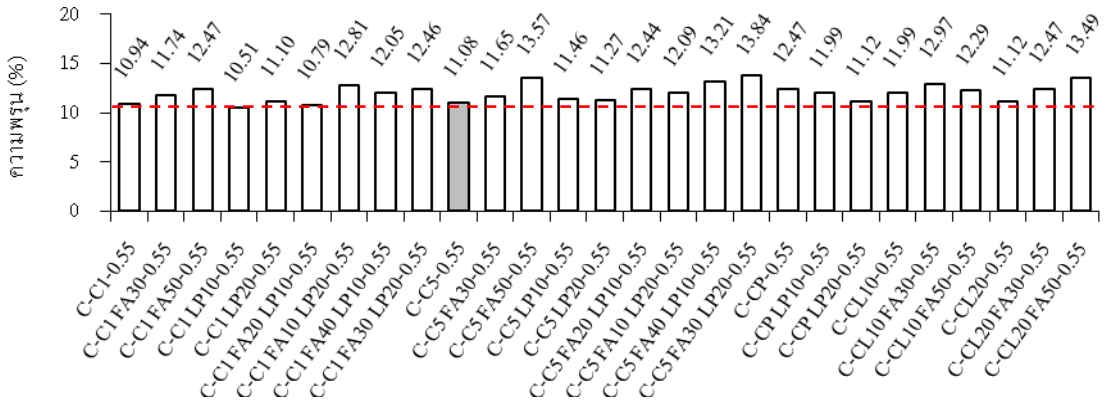
จากรูปที่ 4.14 แสดงความพรุนที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 พบว่าความพรุนของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ล้วน มีค่าเท่ากับร้อยละ 10.65 มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งเท่ากับร้อยละ 9.00 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีค่าความพรุนร้อยละ 10.41 ซึ่งใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีค่าความพรุนไม่แตกต่างจากคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน กล่าวคือร้อยละ 10.41 และ 10.51 ตามลำดับแสดงว่าการแทนที่ผงหินปูนไม่มีผลต่อความพรุนของคอนกรีต ส่วนกรณีของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีความพรุนที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน กล่าวคือเมื่อแทนที่ร้อยละ 30 และ 50 เท่ากับร้อยละ 11.04 และ 10.69 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานที่อายุ 28 วันยังเกิดน้อยจึงทำให้ความพรุนมีมาก และการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 จะให้ค่าความพรุนที่ลดลงคือร้อยละ 9.87 และ 9.31 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนนั้นมีความละเอียดมากไปช่วยเติมเต็มจึงทำให้ความพรุนมีน้อย สำหรับการเปรียบเทียบความพรุนของคอนกรีตระหว่างการบดผสมและการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนนั้น พบว่า ความพรุนของคอนกรีตที่บดผสมและการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ให้ค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนจะให้ค่าความพรุนที่ 28 วัน น้อยกว่าการบดผสมผงหินปูน ส่วนการแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะให้ผลสอดคล้องกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนดังกล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4.6 ความพรุนของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 (W/B=0.55)

ลำดับที่	คอนกรีต	ความพรุน (%)
1	C-C1-0.55	10.94
2	C-C1 FA30-0.55	11.74
3	C-C1 FA50-0.55	12.47
4	C-C1 LP10-0.55	10.51
5	C-C1 LP20-0.55	11.1
6	C-C1 FA20 LP10-0.55	10.79
7	C-C1 FA10 LP20-0.55	12.81
8	C-C1 FA40 LP10-0.55	12.05
9	C-C1 FA30 LP20-0.55	12.46
10	C-C5-0.55	11.08

ตารางที่ 4.6 ความพรุนของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 (W/B=0.55) (ต่อ)

ลำดับที่	คอนกรีต	ความพรุน (%)
11	C-C5 FA30-0.55	11.65
12	C-C5 FA50-0.55	13.57
13	C-C5 LP10-0.55	11.46
14	C-C5 LP20-0.55	11.27
15	C-C5 FA20 LP10-0.55	12.44
16	C-C5 FA10 LP20-0.55	12.09
17	C-C5 FA40 LP10-0.55	13.21
18	C-C5 FA30 LP20-0.55	13.84
19	C-CP-0.55	12.47
20	C-CP LP10-0.55	11.99
21	C-CP LP20-0.55	11.12
22	C-CL10-0.55	11.99
23	C-CL10 FA30-0.55	12.97
24	C-CL10 FA50-0.55	12.29
25	C-CL20-0.55	11.12
26	C-CL20 FA30-0.55	12.47
27	C-CL20 FA50-0.55	13.49



รูปที่ 4.15 ความพรุนที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน

สำหรับคอนกรีตของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จะให้ผลในทิศทางเดียวกันกับกรณีแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นั่นคือ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยความพรุนจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่การแทนที่ด้วยผงหินปูน (ในปริมาณที่ศึกษาในครั้งนี้) ความพรุนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

ส่วนคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยพบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกันคือที่การแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีความพรุนที่เพิ่มขึ้น ในขณะการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 จะให้ค่าความพรุนที่ลดลง

สำหรับคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 (รูปที่ 4.15) ให้ผลในทิศทางเดียวกันแต่มีค่าความพรุนที่มากกว่าของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40

4.2.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ตารางที่ 4.7 และ 4.8 และรูปที่ 4.16 ถึง 4.21 แสดงกำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ของคอนกรีตที่ศึกษาในครั้งนี้ โดยศึกษากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 10x10x10 ซม.^{3}) ซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.55 โดยศึกษาที่อายุของตัวอย่างคอนกรีตที่ 28 วัน และ 365 วัน

จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (623 กก./ซม.^{2}) มากกว่าประเภทที่ 1 ล้วน (519 กก./ซม.^{2}) ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนกำลังอัดประลัยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีแนวโน้มจะน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยปริมาณมาก (ร้อยละ 50) เป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดน้อยในคอนกรีตอายุน้อย สำหรับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน กลับพบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนที่มีความละเอียดมาก (3 ไมโครเมตร) สามารถเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีตได้ดีทำให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้น สุดท้ายเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน จะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตสอดคล้องกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน และเช่นเดียวกันที่อายุ 365 วัน กำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะให้ผลในทิศทางเดียวกับที่อายุ 28 วัน

ส่วนกรณีเมื่อแทนที่เถ้าลอย แทนที่ผงหินปูน และแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (รูปที่ 4.17) พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตทั้งอายุ 28 วัน และ 365 วัน มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

จากรูปที่ 4.18 แสดงเปรียบเทียบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ล้วน รวมทั้งปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่เถ้าลอย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน พบว่ากำลังอัดประลัยของปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มากกว่าปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน แต่เมื่อแทนที่ผงหินปูนร้อยละ 20 กลับให้ค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกำลังอัดประลัยของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 มีแนวโน้มจะมากกว่า ขณะที่เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยปริมาณมาก (ร้อยละ 50) จะมีแนวโน้มน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนล้วน เป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดน้อยในคอนกรีตอายุน้อย

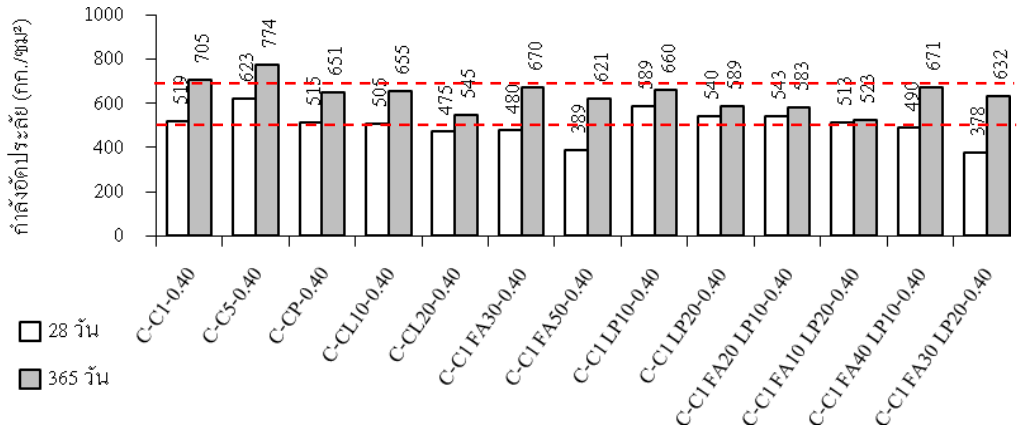
ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 รูปที่ 4.19 ถึง 4.21 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะให้ผลที่มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 แต่มีค่ากำลังอัดประลัยที่น้อยกว่าอยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 (W/B=0.40) ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน

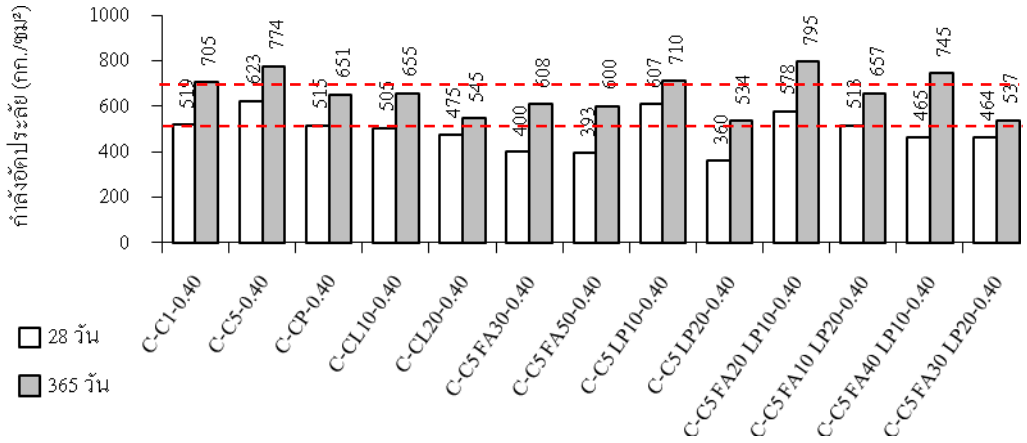
ลำดับที่	คอนกรีต	กำลังอัดประลัย (กก./ซม.^{2})	
		บ่มน้ำ 28 วัน	บ่มน้ำ 365 วัน
1	C-C1-0.40	519	705
2	C-C1 FA30-0.40	480	670
3	C-C1 FA50-0.40	389	621
4	C-C1 LP10-0.40	589	660
5	C-C1 LP20-0.40	540	589
6	C-C1 FA20 LP10-0.40	543	583
7	C-C1 FA10 LP20-0.40	513	523
8	C-C1 FA40 LP10-0.40	490	671
9	C-C1 FA30 LP20-0.40	378	632
10	C-C5-0.40	623	774
11	C-C5 FA30-0.40	400	608
12	C-C5 FA50-0.40	393	600

ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 (W/B=0.40) ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน (ต่อ)

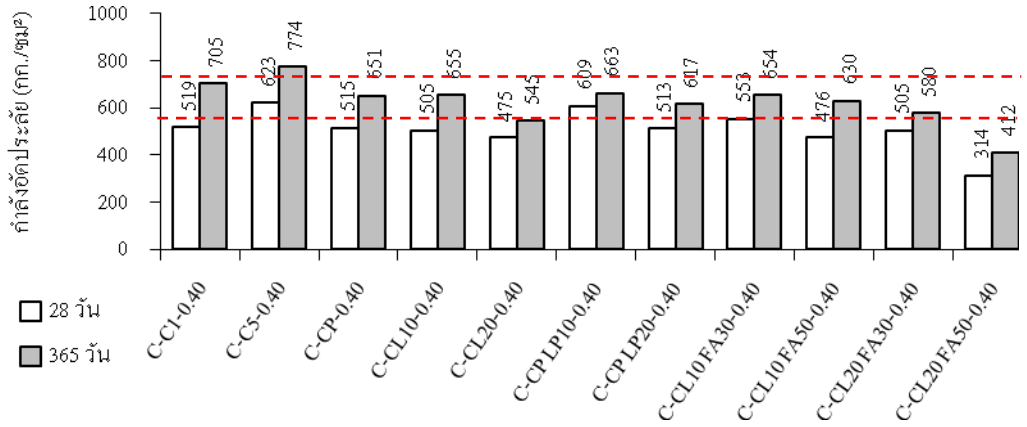
ลำดับที่	คอนกรีต	กำลังอัดประลัย (กก./ซม.^{2})	
		บ่มน้ำ 28 วัน	บ่มน้ำ 365 วัน
13	C-C5 LP10-0.40	607	710
14	C-C5 LP20-0.40	360	534
15	C-C5 FA20 LP10-0.40	578	795
16	C-C5 FA10 LP20-0.40	513	657
17	C-C5 FA40 LP10-0.40	465	745
18	C-C5 FA30 LP20-0.40	464	537
19	C-CP-0.40	515	651
20	C-CP LP10-0.40	609	663
21	C-CP LP20-0.40	513	617
22	C-CL10-0.40	505	655
23	C-CL10 FA30-0.40	553	654
24	C-CL10 FA50-0.40	476	630
25	C-CL20-0.40	475	545
26	C-CL20 FA30-0.40	505	580
27	C-CL20 FA50-0.40	314	412



รูปที่ 4.16 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 (W/B=0.40) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน



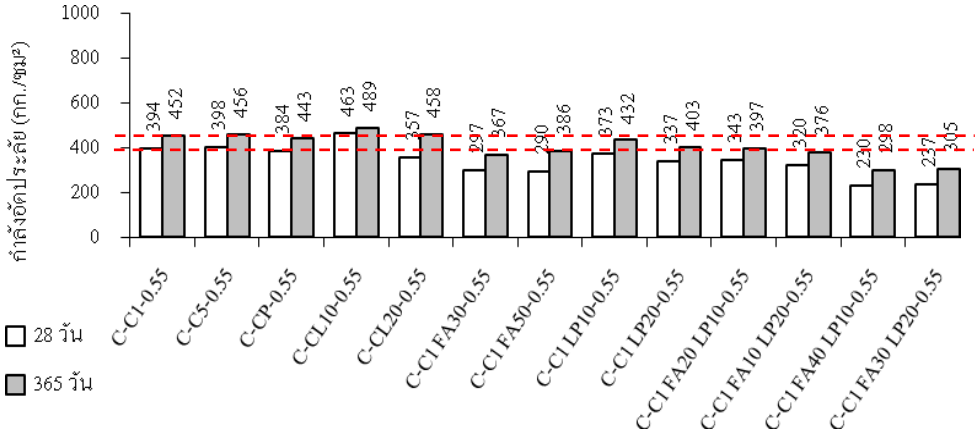
รูปที่ 4.17 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 (W/B=0.40) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365วัน



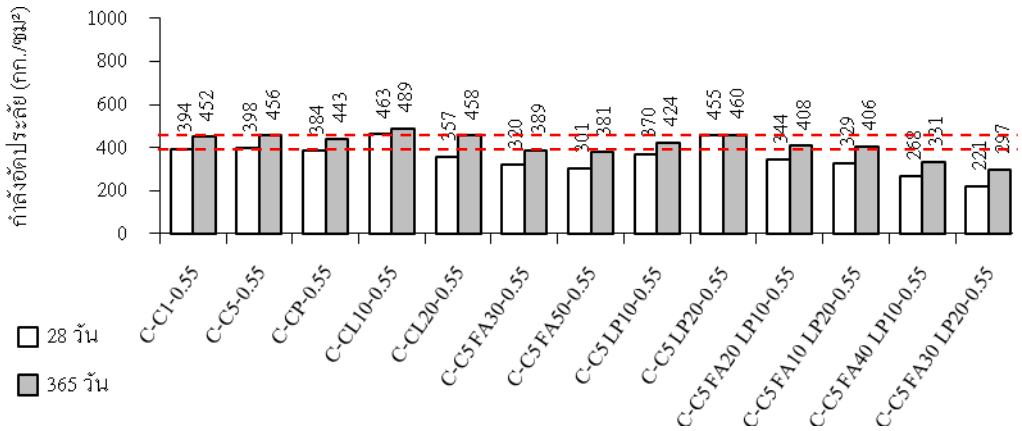
รูปที่ 4.18 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 (W/B=0.40) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน

ตารางที่ 4.8 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 (W/B=0.55) ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน

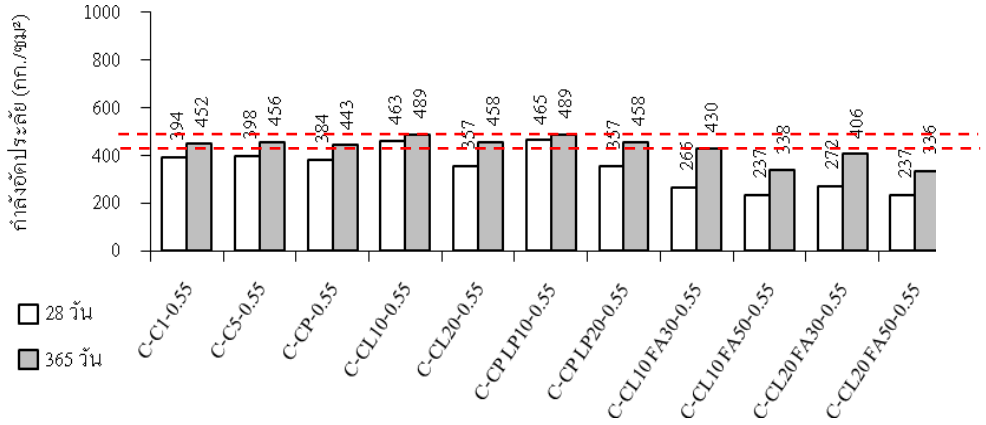
ลำดับที่	คอนกรีต	กำลังอัดประลัย (กก./ซม.^{2})	
		บ่มน้ำ 28 วัน	บ่มน้ำ 28 วัน
1	C-C1-0.55	394	452
2	C-C1 FA30-0.55	297	367
3	C-C1 FA50-0.55	290	386
4	C-C1 LP10-0.55	373	432
5	C-C1 LP20-0.55	337	403
6	C-C1 FA20 LP10-0.55	343	397
7	C-C1 FA10 LP20-0.55	320	376
8	C-C1 FA40 LP10-0.55	230	298
9	C-C1 FA30 LP20-0.55	237	305
10	C-C5-0.55	398	456
11	C-C5 FA30-0.55	320	389
12	C-C5 FA50-0.55	301	381
13	C-C5 LP10-0.55	370	424
14	C-C5 LP20-0.55	455	460
15	C-C5 FA20 LP10-0.55	344	408
16	C-C5 FA10 LP20-0.55	329	406
17	C-C5 FA40 LP10-0.55	268	331
18	C-C5 FA30 LP20-0.55	221	297
19	C-CP-0.55	384	443
20	C-CP LP10-0.55	465	489
21	C-CP LP20-0.55	357	458
22	C-CL10-0.55	463	489
23	C-CL10 FA30-0.55	266	526
24	C-CL10 FA50-0.55	237	338
25	C-CL20-0.55	357	458
26	C-CL20 FA30-0.55	272	406
27	C-CL20 FA50-0.55	237	336



รูปที่ 4.19 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน



รูปที่ 4.20 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน



รูปที่ 4.21 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่อายุ 28 วัน และ 365 วัน

4.3 คุณสมบัติด้านความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

คุณสมบัติด้านความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ประเมินความต้านทานซัลเฟต 2 ลักษณะคือการขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายซัลเฟตที่ผสมกันระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ในส่วนของคอนกรีตนั้นจะศึกษาเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

4.3.1 การขยายตัวของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาการขยายตัว (Expansion) ของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม.^{3} ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต ได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการขยายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน คือ ผลกระทบจากชนิดและการแทนที่ของวัสดุประสาน และผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟต

1) <u>ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการขยายตัว</u>

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 เถ้าลอย และผงหินปูน โดยการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสม

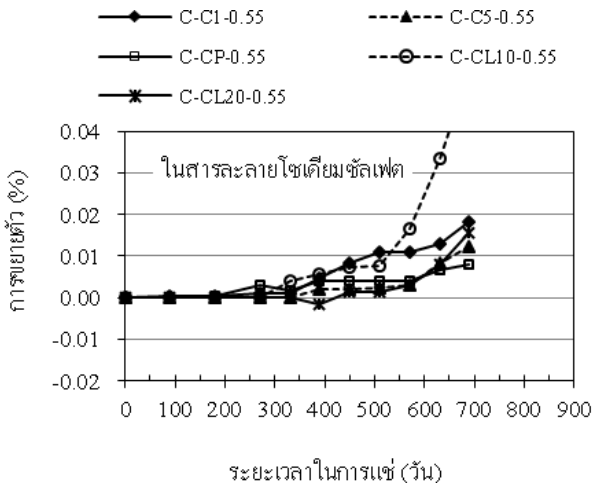
ผงหินปูนร้อยละ 20 ซึ่งแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ส่วนผงหินปูนจะใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก สำหรับการแทนที่ทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 นั้น เป็นดังนี้ คือแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ถัดมาแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 ถัดมาเป็นการแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (โดยทุกสัดส่วนการแทนที่ใช้แทนโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

ก. กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

- เมื่อวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน

รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งพบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณ C_3A สูงกว่า ทำให้เกิด Ettringite มากกว่า การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างจึงมากกว่า [7,16,17] ขณะที่การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะสารปอซโซลานในปูนซีเมนต์ ปอซโซลานไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง ส่วนการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ขณะที่การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วนมีแนวโน้มการขยายตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ปริมาณร้อยละ 10 ของผงหินปูนซึ่งละเอียดมาก (3 ไมโครเมตร) เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีตทำให้ช่องว่างมีน้อยเมื่อเกิด Ettringite จึงทำให้เกิดการขยายตัวมาก

ถ้าพิจารณาจากภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลา 690 วัน หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (รูปที่ 4.23) พบว่าการทำลายของสารละลายซัลเฟตต่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแตกต่างไม่ชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณการขยายตัวยังน้อย



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

C-C1-0.55 C-C5-0.55 C-CP-0.55

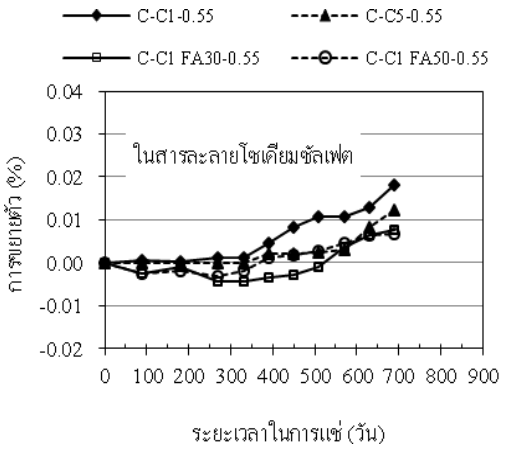
รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ระยะเวลา 690 วัน

C-CL10-0.55

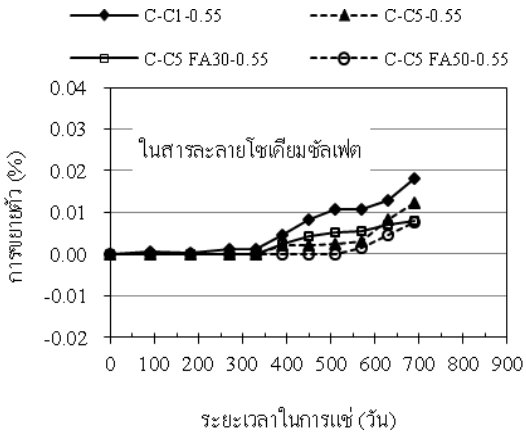
C-CL20-0.55

รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ระยะเวลา 690 วัน (ต่อ)

● วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

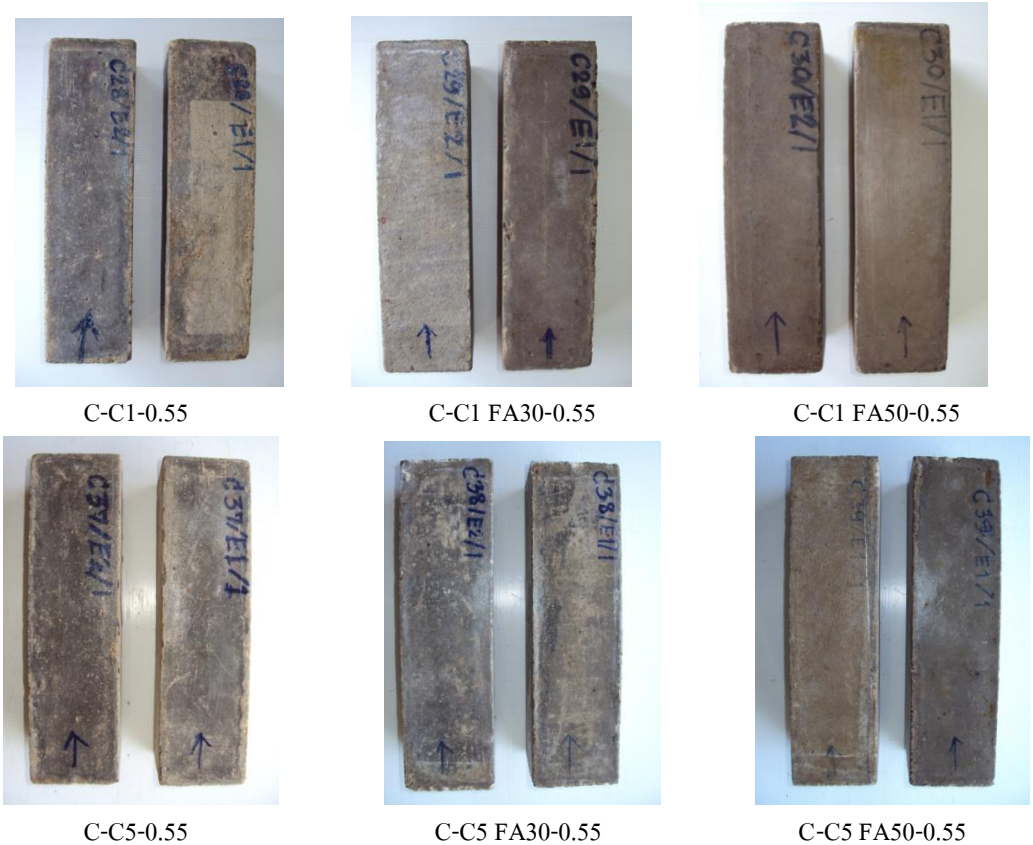


ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

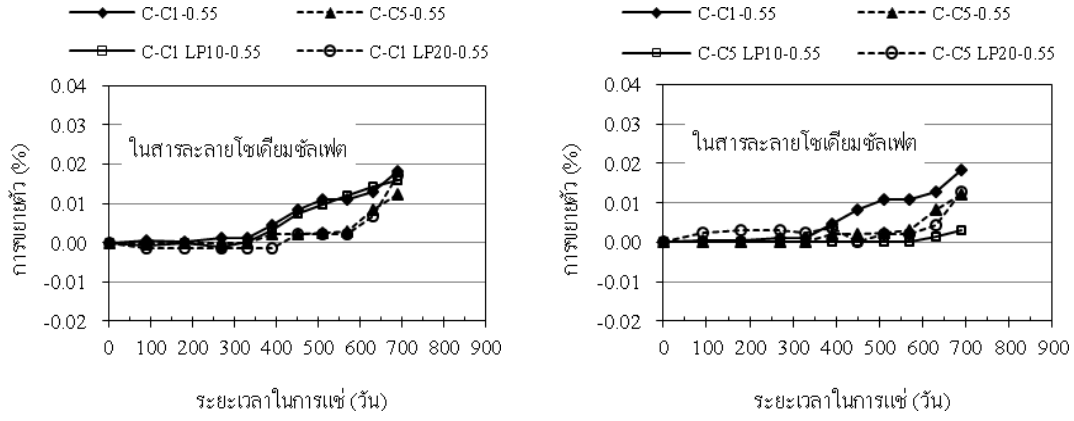
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอย กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งพบว่า การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่เถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 30 และ 50) ทั้งของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มน้อยกว่ากรณีคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่ใกล้เคียงกับกรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง

รูปที่ 4.25 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน ซึ่งลักษณะการทำลายมองด้วยตาเปล่ายังไม่อาจแยกความแตกต่างได้ชัดเจนเพราะการขยายตัวยังมีค่าน้อย



รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน

● วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

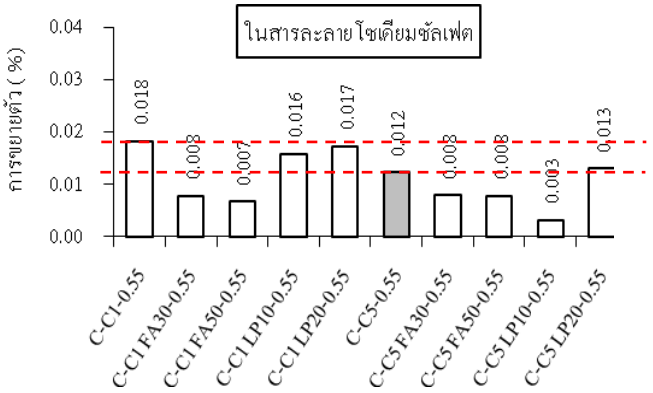


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ผงหินปูน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งพบว่า การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อแทนด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 กลับมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 20 เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่เป็นการเติมเต็ม รวมทั้งเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่า (รูปที่ 4.26 ก)) ในขณะที่เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ทั้งร้อยละ 10 และ 20 มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือน้อยกว่ากรณีปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน (รูปที่ 4.26 ข)) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนซึ่งมีความละเอียดมาก เข้าไปเติมเต็มช่องว่างทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าทำลายคอนกรีตได้ยากขึ้น อีกทั้งการแทนที่ด้วย ผงหินปูนซึ่งเป็นการไปลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ซึ่งมี C_3A น้อย) ลงด้วย จึงทำให้ลดปฏิกิริยาทางเคมีของอิออนซัลเฟต

อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่ไม่แทนที่และแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต จึงได้แสดงดังรูปที่ 4.27 ซึ่งได้แสดงการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55) โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอย ร้อยละ 30 และ 50 และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 เมื่อระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 690 วัน



รูปที่ 4.27 การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูนเมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 690 วัน

● วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) กรณีเมื่อแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20

รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ล้วน และการแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

รูปที่ 4.28 ก) เมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตทุกสัดส่วนของการแทนที่ในครั้งนี้ จะมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยไม่แตกต่างกับค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นตัวอย่างคอนกรีตเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 ซึ่งให้ค่าการขยายตัวค่อนข้างมากอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบ

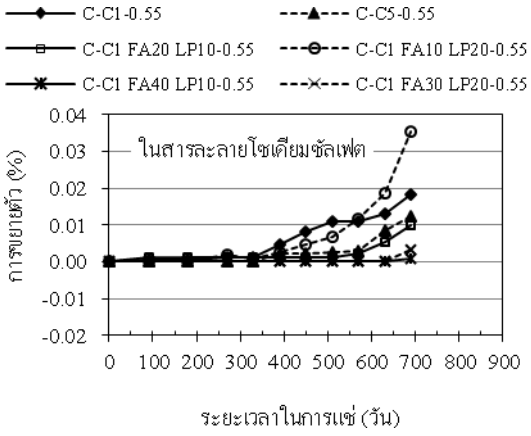
กับตัวอย่างคอนกรีตสัดส่วนผสมอื่น ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงๆ (13.63%) ในปริมาณการแทนที่ต่ำ (ร้อยละ 10) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดน้อย ทำให้ลด $Ca(OH)_2$ ได้น้อยจึงทำให้เกิดเอททริงไจท์ มากขึ้น แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่สูง ปฏิกิริยา ปอซโซลานเกิดมากสามารถลด $Ca(OH)_2$ ได้มาก การขยายตัวจึงน้อยลง ซึ่งก็สอดคล้องกับการศึกษาของ ปิติศานต์ [14]

สำหรับการแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (รูปที่ 4.28 ข)) พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับกรณีคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยน้อยกว่ากรณีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

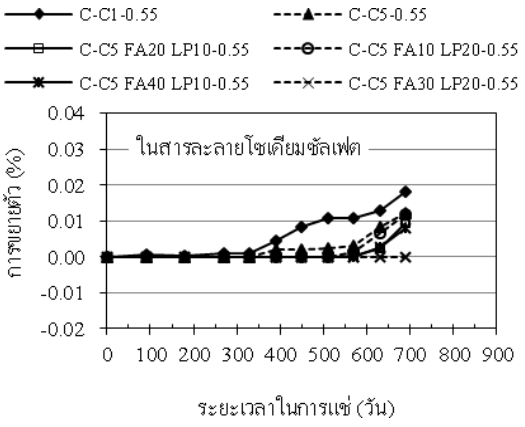
ส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (รูปที่ 4.28 ค)) การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตของการแทนที่ผงหินปูนทั้งร้อยละ 10 และ 20 ในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วนทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนซึ่งมีความละเอียดมาก (3 ไมโครเมตร) เป็นการช่วยในการเติมเต็มช่องว่าง และช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง

สุดท้ายเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่แทนที่ในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 (รูปที่ 4.28 ง) และ จ)) ให้ผลเช่นเดียวกันคือ การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ด้วย เถ้าลอยไม่ว่าร้อยละ 30 และร้อยละ 50 ทั้งในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน เพราะสารปอซโซลานไปช่วยลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ลง

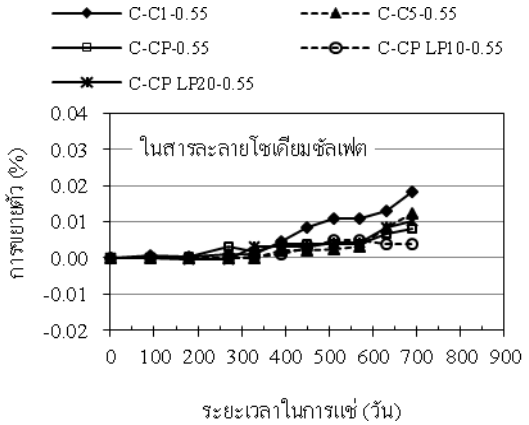
อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่ไม่แทนที่ และแทนที่ทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต จึงได้แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวดังรูปที่ 4.29 ซึ่งได้เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ของตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าว เมื่อระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน



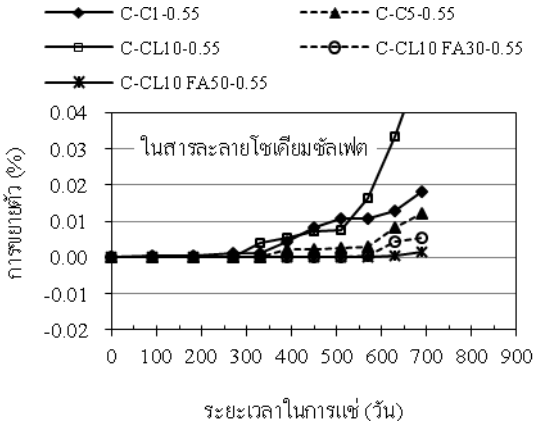
ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



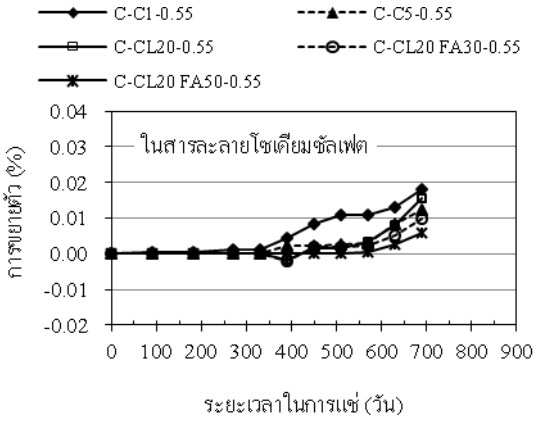
ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



ค) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

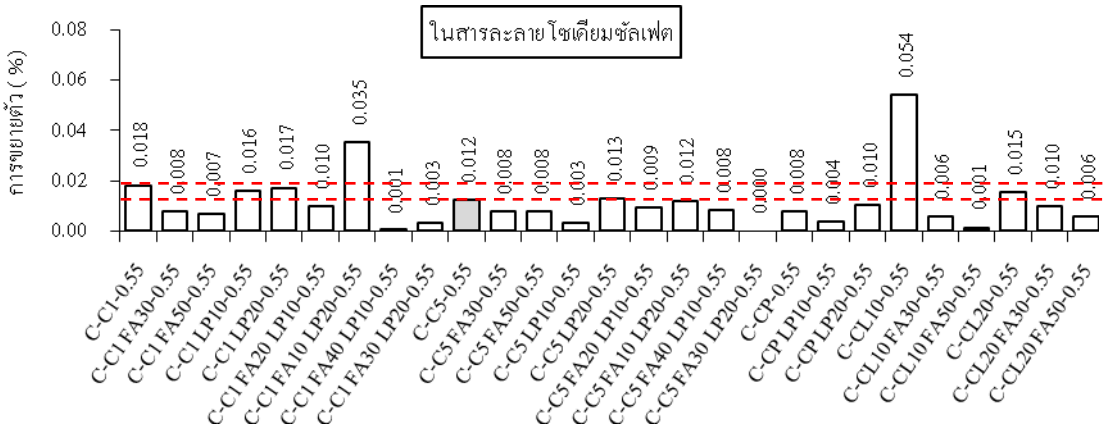


ง) แทนในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10



จ) แทนในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 4.29 การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าและผงหินปูนในสารละลายโซเดียม ซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน

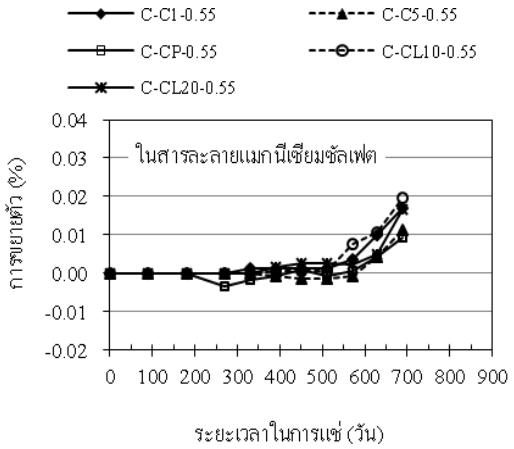
ข. กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

● เมื่อวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน

รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งพบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทุกชนิดที่กล่าวมีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคอนกรีตนั้น เป็นในลักษณะทำลายโครงสร้างที่ผิวของตัวอย่างซึ่งเป็นการเปลี่ยน (CSH) ให้เป็น (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ไม่เหมือนกับกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต ซึ่งจะขยายตัวเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากเกิด Ettringite อย่างไรก็ตามเมื่ออายุตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นการขยายตัวของตัวอย่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และของปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 มีแนวโน้มว่าจะมีมากกว่าของปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งก็ให้ผลในทิศทางเดียวกับเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตดังที่กล่าวมาแล้ว

ถ้าพิจารณาจากภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ที่ระยะเวลา 690 วัน ในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (รูปที่ 4.31) เช่นกันยังไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ แต่มีข้อสังเกตว่า กลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีตนั้น จะเปลี่ยน

ผลผลิตของคอนกรีตจาก (CSH) เป็น (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ไม่เหมือนกับกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ทำให้เกิด Ettringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัว ดังที่กล่าวมาแล้ว [7, 17] ดังนั้นการเปรียบเทียบการต้านทานซัลเฟตของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต โดยการวัดค่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จึงน่าจะไม่เหมาะสมมากนัก โดยน่าจะใช้การประเมินในลักษณะอื่นควบคู่ไปด้วย เช่น วัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ควบคู่กันไปด้วย



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต(W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ล้วน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

C-C1-0.55

C-C5-0.55

C-CP-0.55

C-CL10-0.55

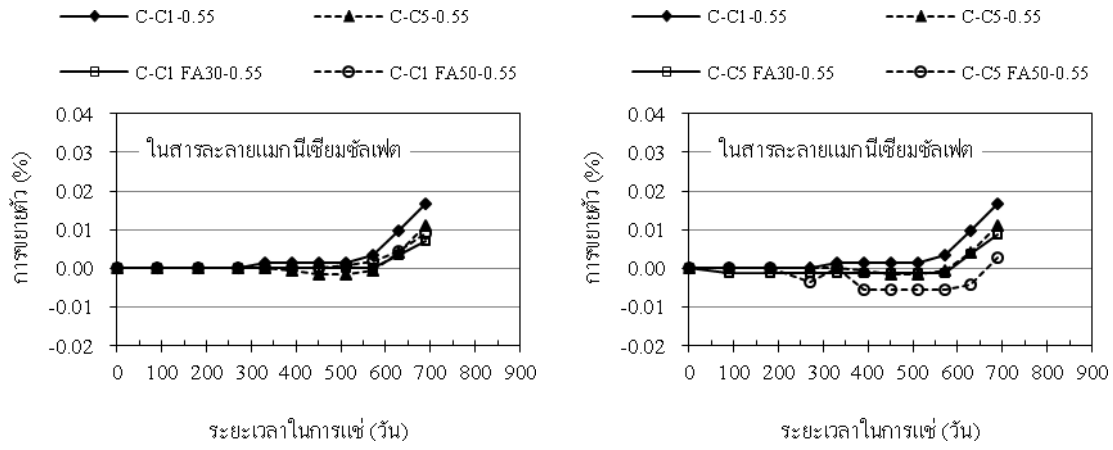
C-CL20-0.55

รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน

● วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอย กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งพบว่า การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่เถ้าลอย ทั้งของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จึงทำให้เกิดยิปซัมน้อยลง นอกจากนี้ ปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยให้

คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นเป็นผลให้การเข้าทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ยากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณการแทนที่เถ้าลอยระหว่างร้อยละ 30 และ 50 พบว่าการแทนที่ด้วยปริมาณเถ้าลอยที่น้อยกว่า (ร้อยละ 30) มีแนวโน้มค่าการขยายตัวมากกว่าเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากกว่า (ร้อยละ 50)

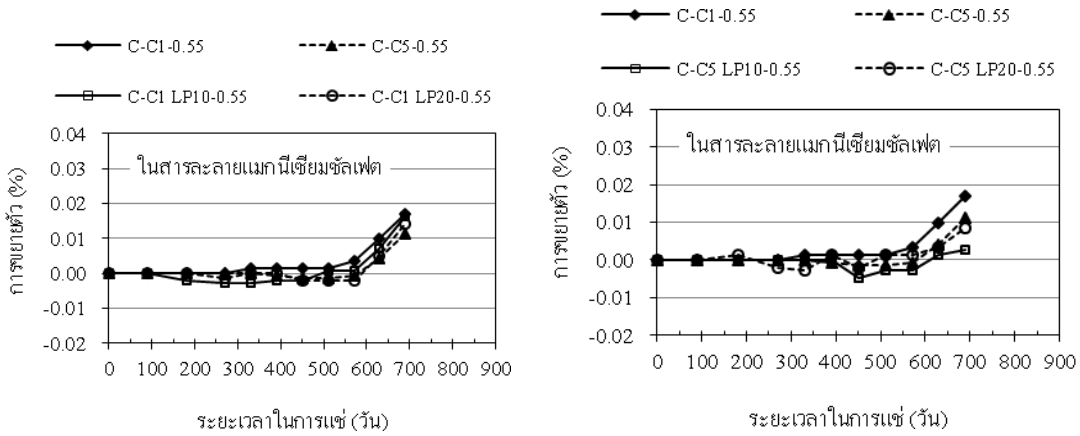


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

● วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

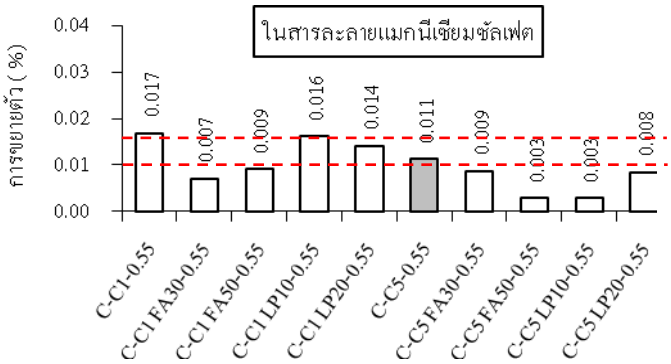
รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ผงหินปูน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ก็ยังคงให้ผลทิศทางแนวโน้มเดียวกับกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือ การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ผงหินปูน ของการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งร้อยละ 10 และ 20 มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (รูปที่ 4.33 ก)) ในขณะที่เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ทั้งร้อยละ 10 และ 20 มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือน้อยกว่ากรณีปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน (รูปที่ 4.33 ข))



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

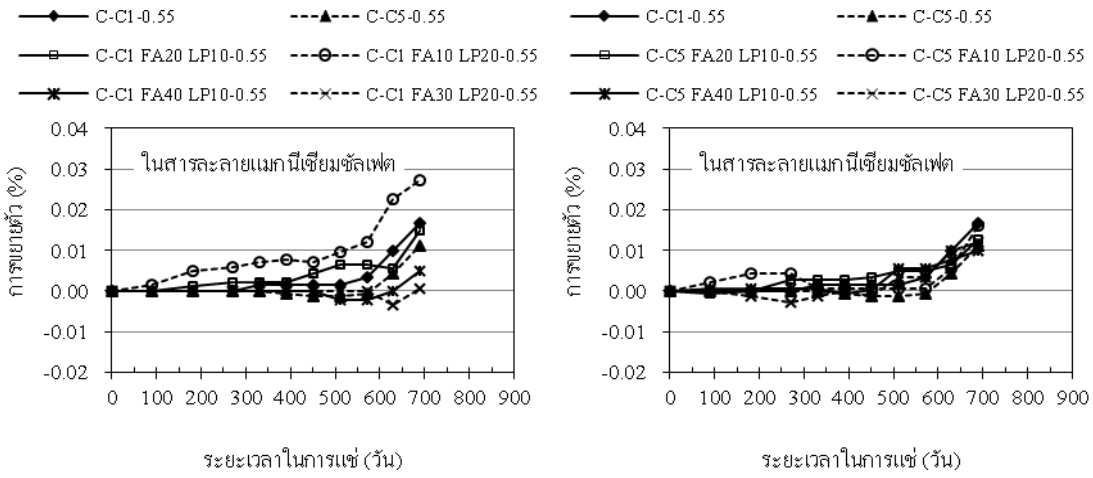
อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่ไม่แทนที่และแทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จึงได้แสดงดังรูปที่ 4.34 ซึ่งได้แสดงการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 และคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูน ร้อยละ 10 และ 20 เมื่อระยะเวลาของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 690 วัน



รูปที่ 4.34 การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน เมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 690 วัน

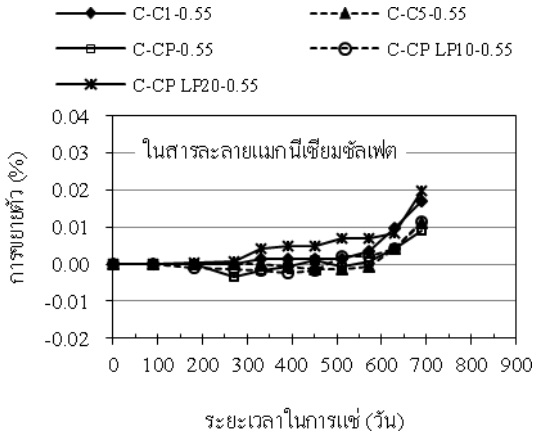
● วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) กรณีเมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20

รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ล้วน และแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งพบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตทุกสัดส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นมีค่าไม่ค่อยแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะกลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตจะเป็นการเปลี่ยน (CSH) ให้เป็น (MSH) (ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน) ไม่เหมือนกับกรณีของโซเดียมซัลเฟตซึ่งจะทำให้เกิด Ettringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัวได้ชัดเจน [7,17] ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออายุของตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้น ก็มีแนวโน้มว่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมากกว่าสัดส่วนอื่นๆ ยกเว้นสัดส่วนการแทนที่เถ้าลอยในปริมาณน้อย (ร้อยละ 10) มีแนวโน้มว่าจะมีค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตมากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน

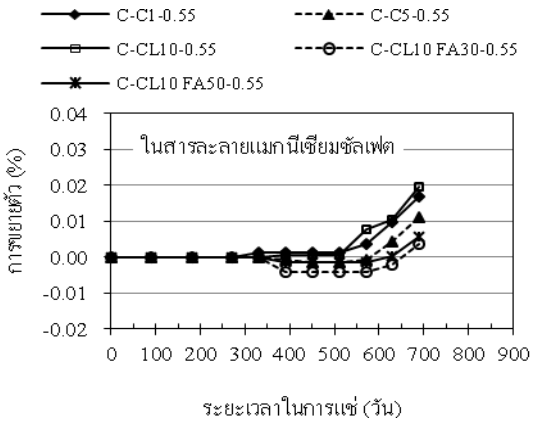


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

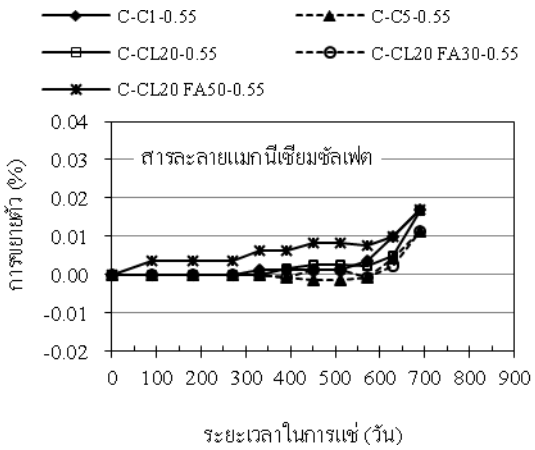
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ค) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน



ง) แทนในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10

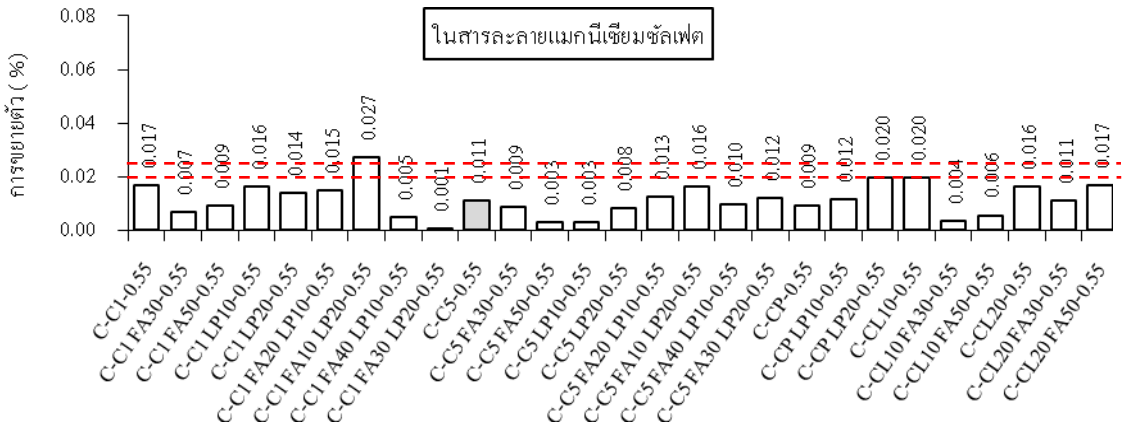


จ) แทนในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (ต่อ)

อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่ไม่แทนที่ และแทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต จึงได้แสดงการขยายตัวดังกล่าวดังรูปที่ 4.36 ซึ่งได้เปรียบเทียบการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน

ร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย เมื่อระยะเวลาของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 690 วัน



รูปที่ 4.36 การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน

ค. กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต

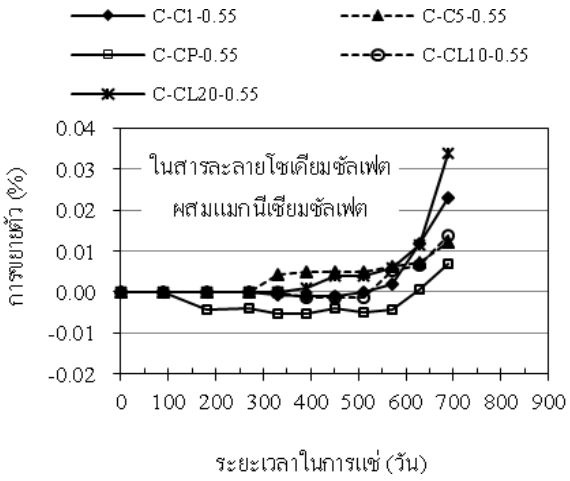
สำหรับสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น ใช้อัตราส่วนผสมโซเดียมซัลเฟตต่อแมกนีเซียมซัลเฟต 3:1 โดยน้ำหนัก

● เมื่อวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลานปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน

รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 ล้วน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ซึ่งพบว่าการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน เช่นเดียวกับกรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ส่วนการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสม

ผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ขณะที่การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วนมีแนวโน้มการขยายตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ซึ่งไปในทิศทางเดียวกับกรณีโซเดียมซัลเฟต

ถ้าพิจารณาจากภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ที่ระยะเวลา 690 วัน ในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3: 1) (รูปที่ 4.38) พบว่าการทำลายของสารละลายซัลเฟตต่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีต จะเห็นความไม่แตกต่างไม่ชัดเจนมากนัก อย่างไรก็ตามกลไกการทำลายของสารละลายที่ผสมกันระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟต จะเป็นไปในลักษณะการขยายตัวร่วมกับการถูกทำลายการยึดประสานตามลักษณะของกลไกการ ทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ ดังที่ได้อธิบายมาแล้ว



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

C-C1-0.55

C-C5-0.55

C-CP-0.55

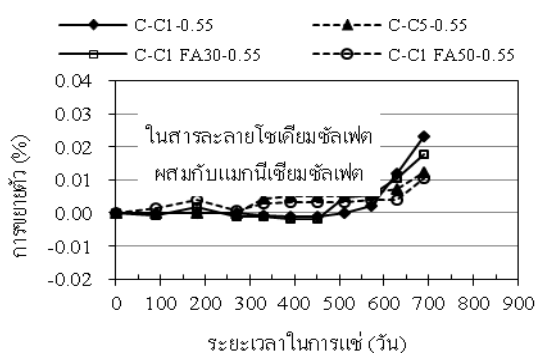
C-CL10-0.55

C-CL20-0.55

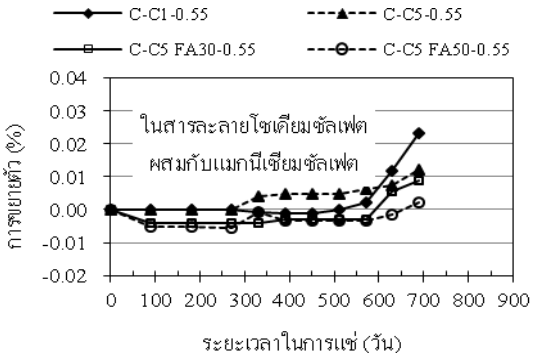
รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่ระยะเวลา 690 วัน

● วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4.39 ก) และ ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่เถ้าลอย กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ซึ่งพบว่า การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่เถ้าลอย ทั้งของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน เช่นเดียวกับกรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



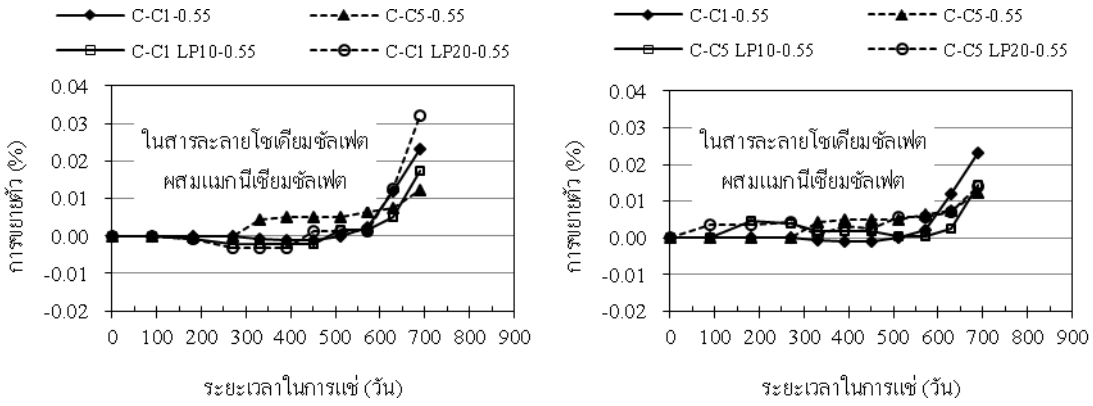
ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 50 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)

● วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

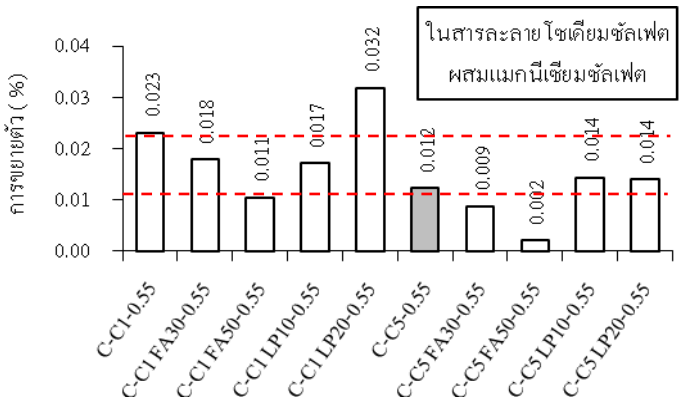
รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ผงหินปูน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ซึ่งพบว่า การขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือน้อยกว่ากรณีปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน จากแนวโน้มการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ผงหินปูนที่ใกล้เคียงหรือน้อยกว่ากรณีตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ในปริมาณพอเหมาะด้วยผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร ซึ่งมีความละเอียดมาก เข้าไปเติมเต็มช่องว่างทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าทำลายคอนกรีตได้ยากขึ้น (รูปที่ 4.40 ก)และ ข)) ดังที่กล่าวมาแล้ว

อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่ไม่แทนที่และแทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูนใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต จึงได้แสดงค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าว ดังรูปที่ 4.41 เมื่อระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 690 วัน



ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และ 20 กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)



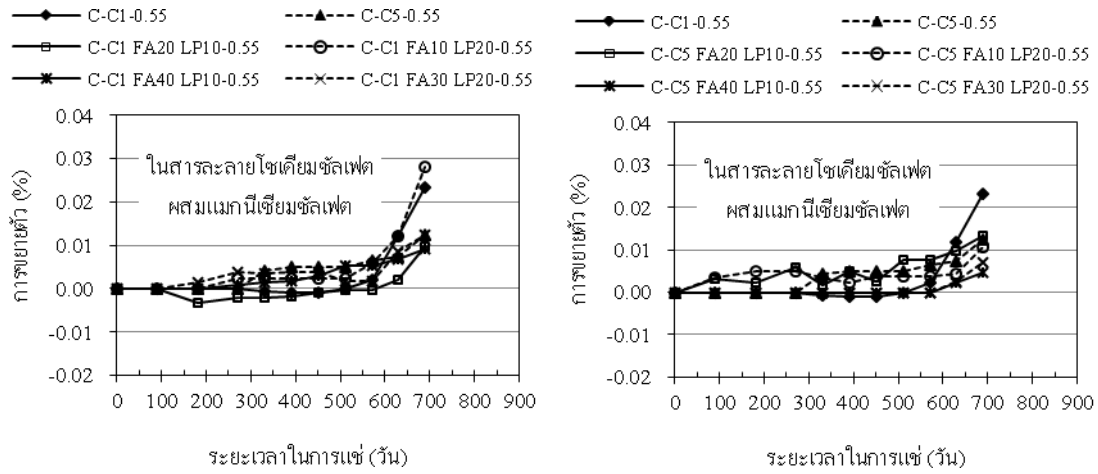
รูปที่ 4.41 การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน เมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) 690 วัน

● วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) กรณีเมื่อแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20

รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน และ

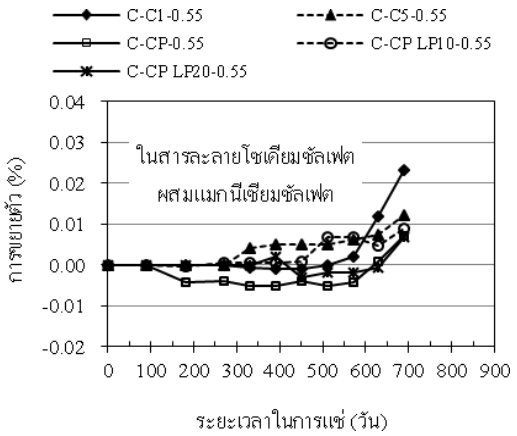
แทนที่เถ้าลอย แทนที่ผงหินปูน และแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ซึ่งพบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ก็มีแนวโน้มว่าทุกสัดส่วนของการใช้วัสดุร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) จะมีค่าการขยายตัวน้อยกว่ากรณีตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยไม่แตกต่างกับค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นตัวอย่างคอนกรีตเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งให้ค่าการขยายตัวค่อนข้างมากอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตสัดส่วนผสมอื่น ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตามในกรณีแทนที่วัสดุในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับกรณีคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งเหตุผลเป็นดังที่กล่าวมาแล้ว

อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตทั้งที่ไม่แทนที่ และแทนที่ทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่ระยะเวลาการแช่ 690 วัน จึงได้แสดงการขยายตัวดังกล่าวในรูปที่ 4.43

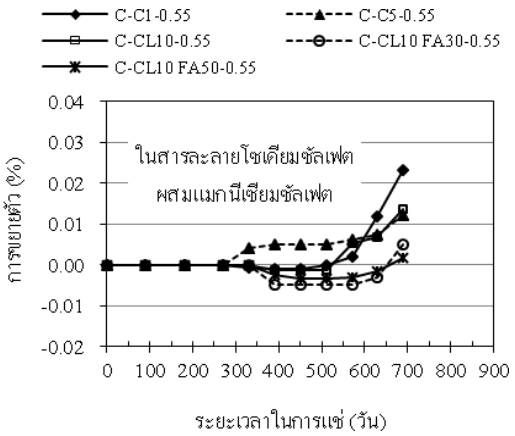


ก) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

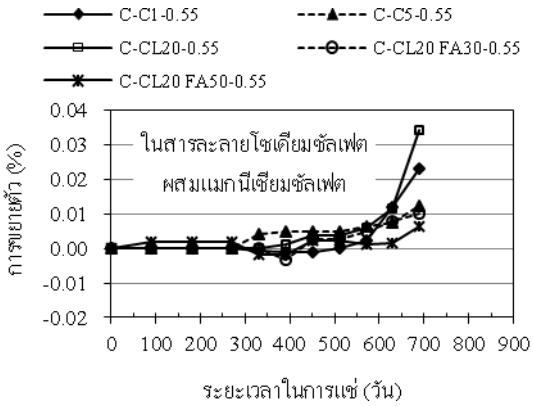
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)



ค) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

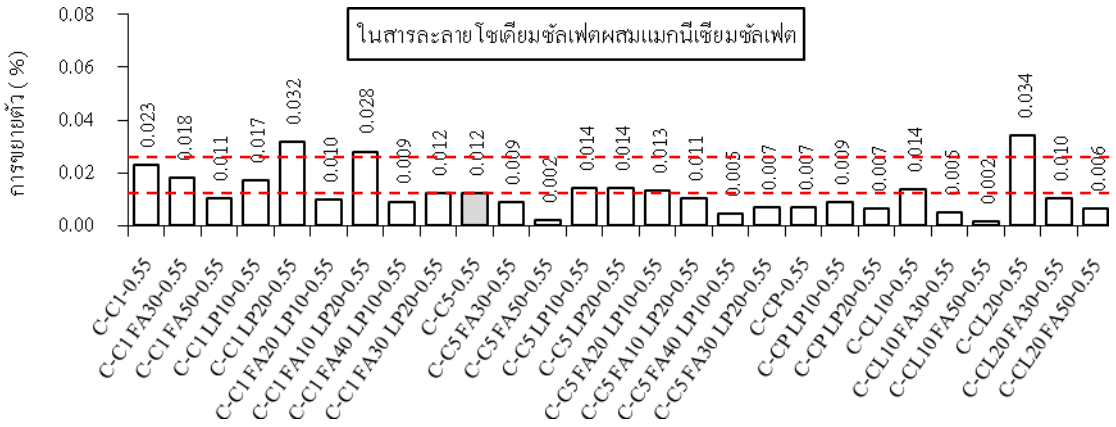


ง) แทนในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10



จ) แทนในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) (ต่อ)



รูปที่ 4.43 การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่ระยะเวลา 690 วัน

2) <u>ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัว</u>

สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สารละลายซัลเฟต 3 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตนั้น จึงได้พิจารณาถึงผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 กรณี ที่มีต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

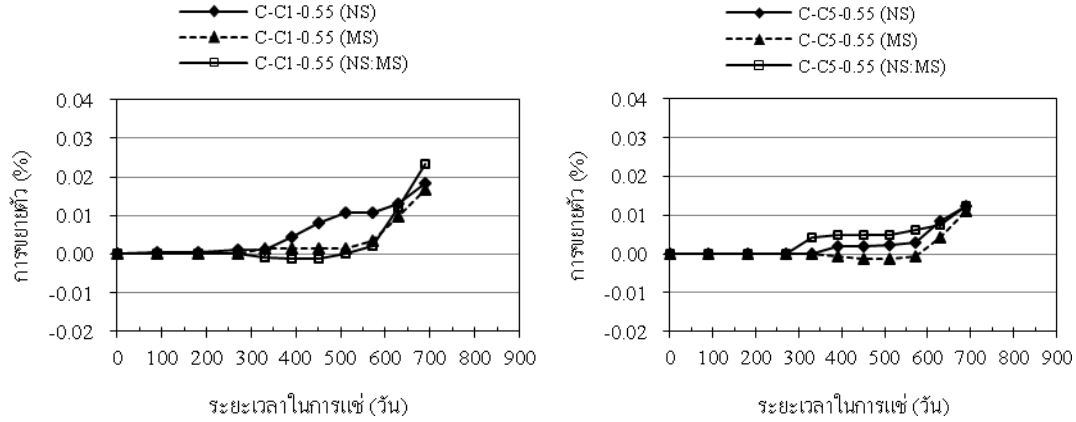
● เมื่อวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลานปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน

รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายซัลเฟต เพื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต

จากผลการศึกษาเรื่องการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต ขณะที่พิจารณา (ระยะเวลาของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 690 วัน) ยังมีค่าไม่สูงนัก จึงทำให้เห็นถึงความแตกต่างของการขยายตัวคอนกรีตในแต่ละชนิดของสารละลายซัลเฟตยังไม่ชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม กรณี

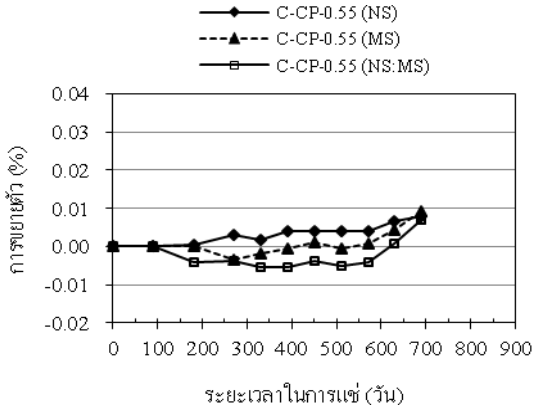
ของตัวอย่างของคอนกรีต เช่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C-C1-0.55) หรือของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน (C-CL10-0.55) ซึ่งมีค่าการขยายตัวมากระดับหนึ่ง พบว่าแนวโน้มการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมากกว่าในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ทั้งนี้เป็นเพราะกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็นการทำให้เกิด Ettringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัว ส่วนกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น จะทำให้ไม่มีความเสถียรภาพภายในโครงสร้างของมอร์ต้าร์ โดยจะเปลี่ยนผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชัน (CSH) ให้เป็น (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยจะทำให้ชิ้นตัวอย่างยุ่ย มีการหลุดร่อนของผิวหรือโครงสร้างของตัวอย่าง มีการสูญเสียน้ำหนัก [7,13,17] จึงทำให้ชิ้นตัวอย่างมีการขยายตัวที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ส่วนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตกับในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่ามีค่าไม่ค่อยแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการขยายตัวยังมีค่าน้อย ส่วนกลไกการทำลายก็มีส่วนที่ใกล้เคียงกันจึงให้ผลของการขยายตัวที่ไม่ค่อยแตกต่างกัน

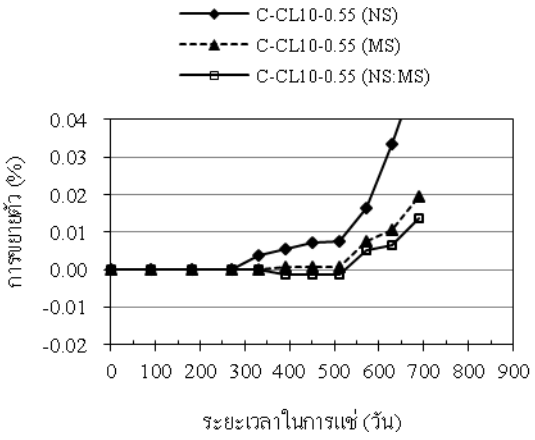


ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

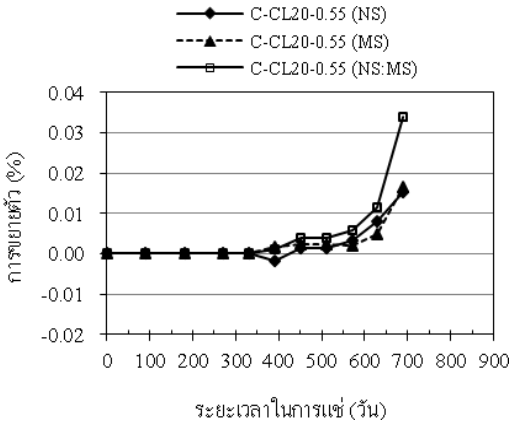
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน



ค) ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน



ง) ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10



ง) ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน (ต่อ)

ส่วนรูปที่ 4.45 แสดงถึงภาพถ่ายของตัวอย่างคอนกรีตที่เปรียบเทียบของการแช่ในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด ที่ศึกษาในครั้งนี้ จึงพอจะสังเกตได้ถึงความแตกต่างระหว่างการทำลายของสารละลายซัลเฟตทั้งสาม กล่าวคือการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะทำลายที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีต ทำให้ผิวของตัวอย่างเสียหายในลักษณะหลุดร่อนออก ซึ่งต่างกับกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีตไม่มีความเสียหาย ทั้งนี้เป็นเพราะกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซียมซัลเฟตและสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่แตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว กล่าวคือในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะผลิต Ettringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัว ในขณะที่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะสร้าง MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน[7,13,17]

ส่วนกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) นั้น ผลของการถูกทำลายจะอยู่ระหว่างกลไกการของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต แต่แนวโน้มของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเด่นชัด กล่าวคือสังเกตจากความเสียหายที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีต

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-C1-0.55

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-C5-0.55

รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-CP-0.55

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-CL10-0.55

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

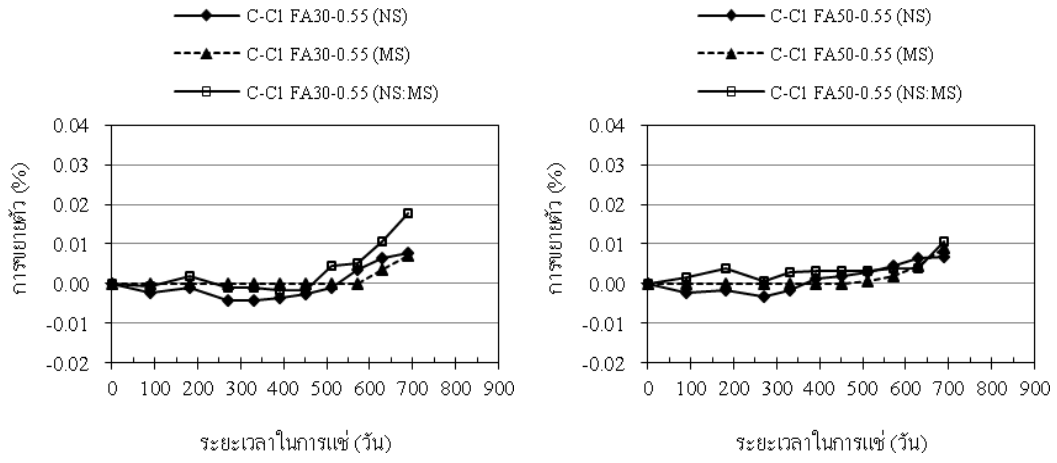
โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-CL20-0.55

รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 690 วัน (ต่อ)

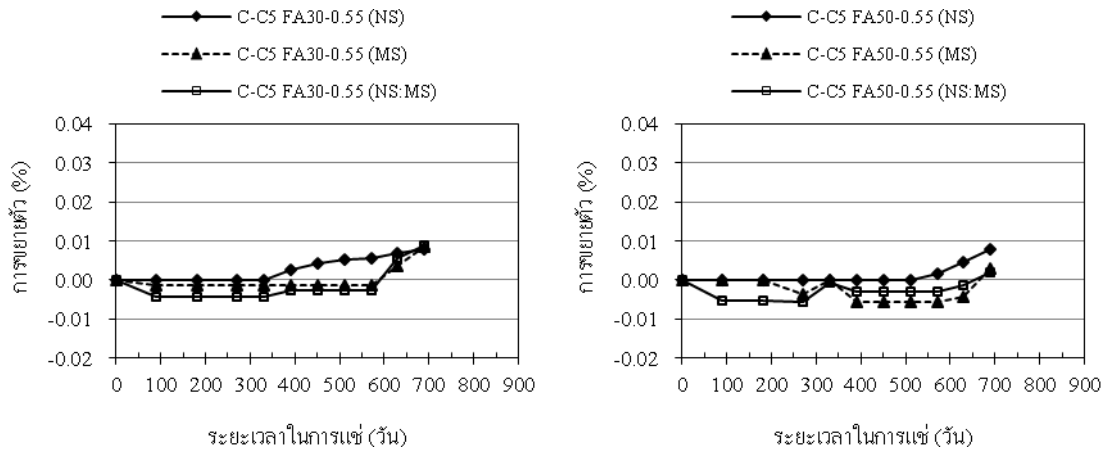
● วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4.46 และรูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 30 และ 50) กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายซัลเฟต เพื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต พบว่าชนิดของสารละลายซัลเฟตมีผลกระทบต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 ชนิด มีค่าน้อยมาก จึงทำให้การขยายตัวมีค่าไม่ค่อยแตกต่างกัน



ก) แทนที่ร้อยละ 30 ข) แทนที่ร้อยละ 50

รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต

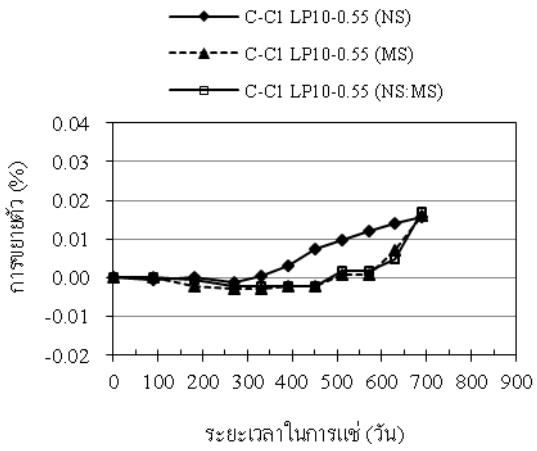


ก) แทนที่ร้อยละ 30 ข) แทนที่ร้อยละ 50

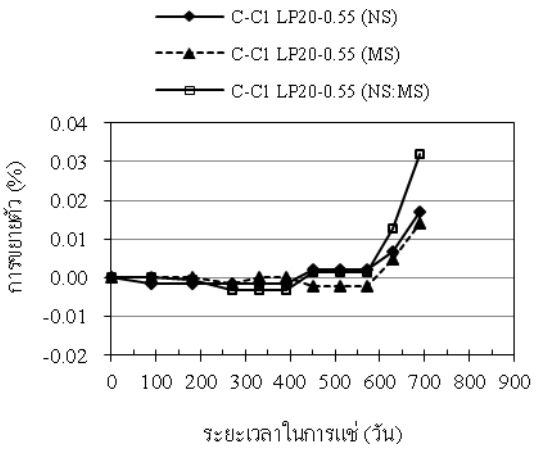
รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต

● วัสดุประสานร่วมสองชนิด (Binary) กรณีเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

รูปที่ 4.48 ถึงรูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายซัลเฟต เพื่อใช้ประกอบในการพิจารณาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต ซึ่งผลของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวมีค่าน้อยมากหรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีผลกระทบ ทั้งนี้เพราะการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าน้อยในทุกสัดส่วนของการแทนที่ (กรณีที่ศึกษาในครั้งนี้)

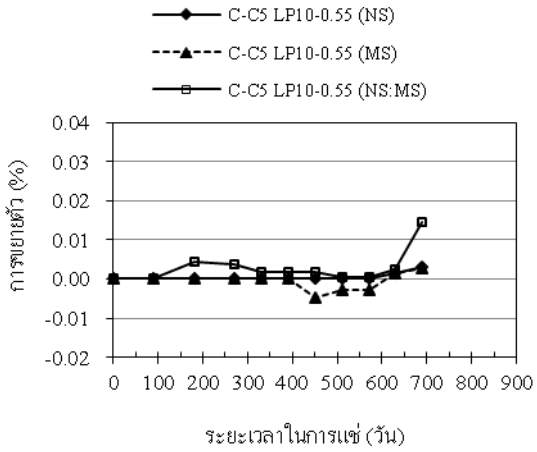


ก) แทนที่ร้อยละ 10

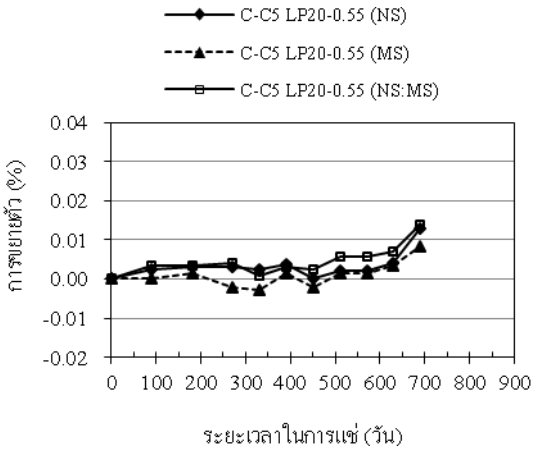


ข) แทนที่ร้อยละ 20

รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต



ก) แทนที่ร้อยละ 10



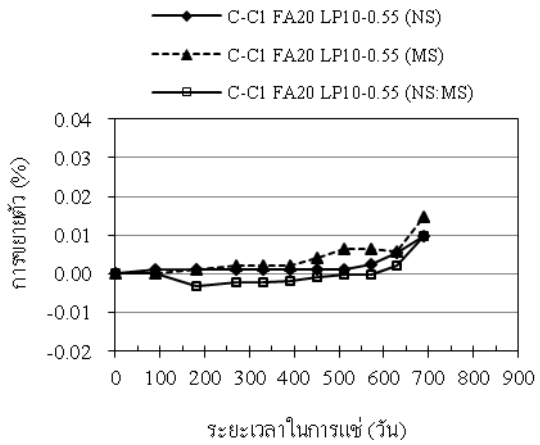
ข) แทนที่ร้อยละ 20

รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต

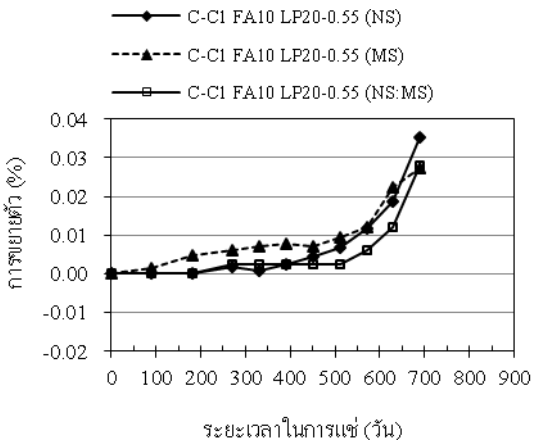
● วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) กรณีเมื่อแทนที่เถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

รูปที่ 4.50 ถึงรูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนแทนที่เถ้าลอย กับระยะเวลาของการแช่ในสารละลายซัลเฟต

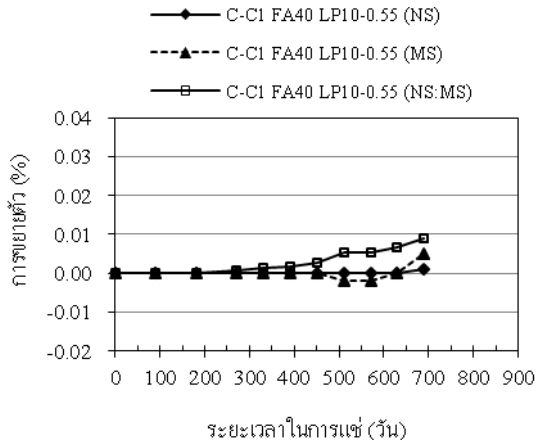
ให้ผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ผลของชนิดสารละลายซัลเฟตไม่มีผลกับการขยายตัวของคอนกรีต ซึ่งเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



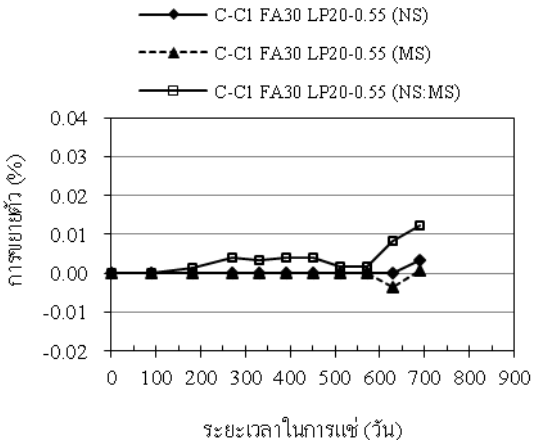
ก) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 ผงหินปูนร้อยละ 10



ข) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 10 ผงหินปูนร้อยละ 20



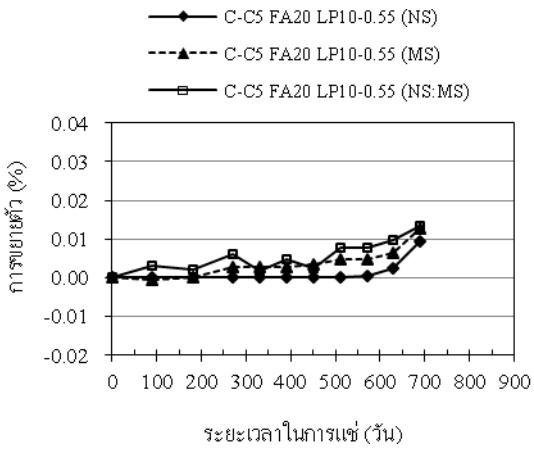
ค) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40 ผงหินปูนร้อยละ 10



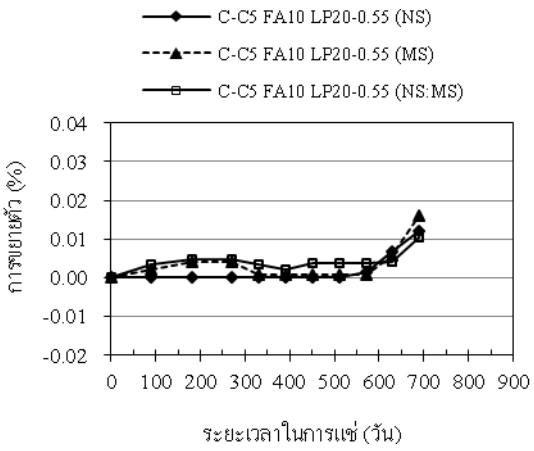
ง) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 ผงหินปูนร้อยละ 20

รูปที่ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต

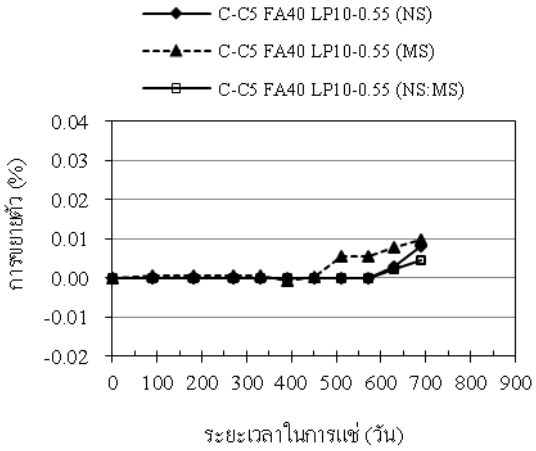
สำหรับผลกระทบของชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของกรณีชิ้นตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ให้ผลในทิศทางเดียวกับกรณีแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



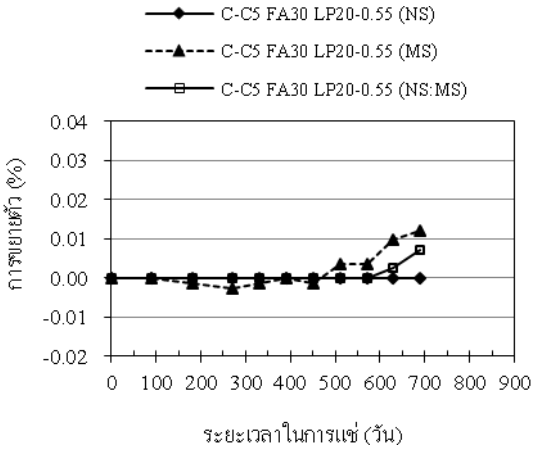
ก) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 ผงหินปูนร้อยละ 10



ข) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 10 ผงหินปูนร้อยละ 20



ค) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40 ผงหินปูนร้อยละ 10

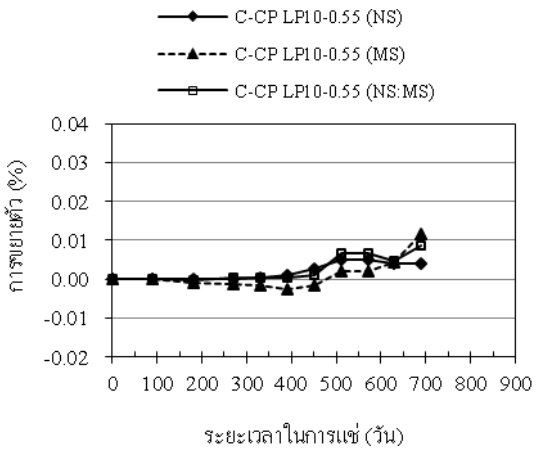


ง) แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 ผงหินปูนร้อยละ 20

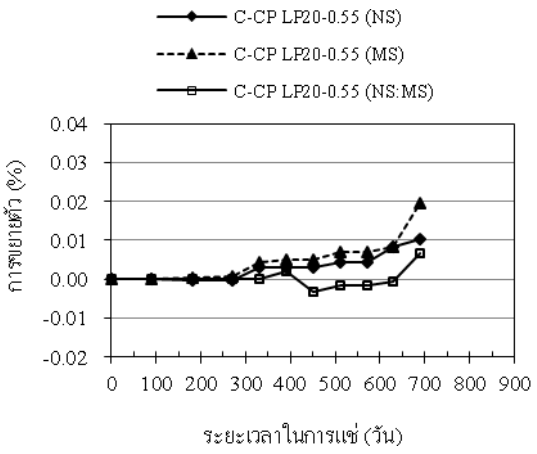
รูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต

● วัสดุประสานร่วมสามชนิด (Ternary) กรณีเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอซโซลาน และแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20

ผลของชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตก็ยังคงให้ผลเหมือนกันกับที่กล่าวมาแล้วคือ ชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการขยายตัวไม่มีผลกระทบนั่นเอง (รูปที่ 4.52 ถึง 4.54)

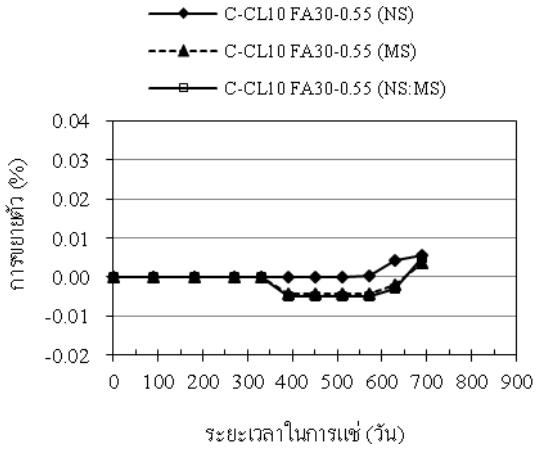


ก) แทนที่ร้อยละ 10

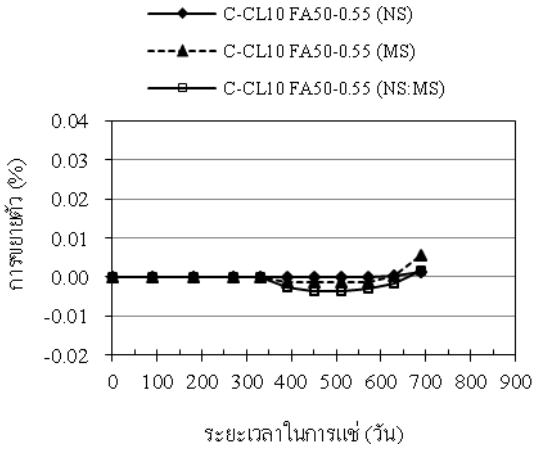


ข) แทนที่ร้อยละ 20

รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต

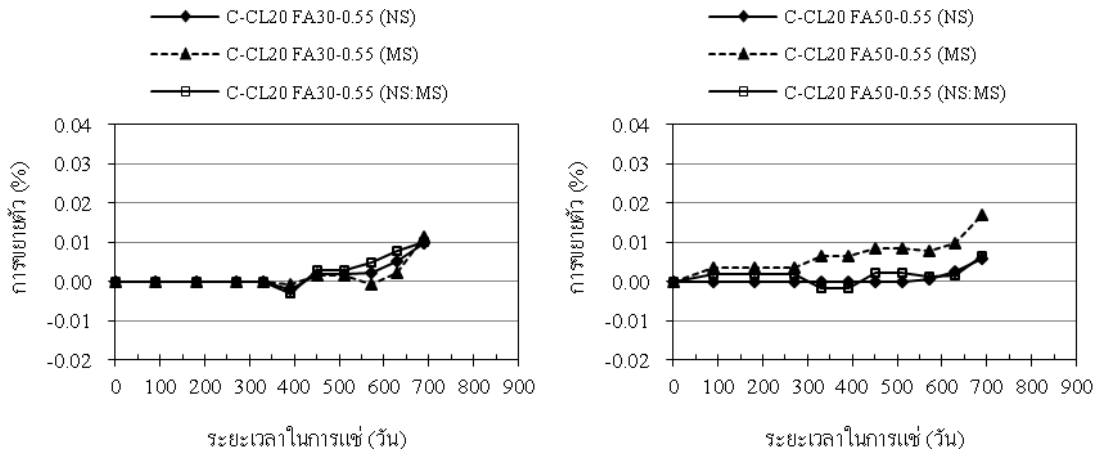


ก) แทนที่ร้อยละ 30



ข) แทนที่ร้อยละ 50

รูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต



ก) แทนที่ร้อยละ 30 ข) แทนที่ร้อยละ 50

รูปที่ 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายซัลเฟต

4.3.2 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต

การประเมินผลการต้านทานซัลเฟตโดยการวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10x10x10 ซม.^{3} ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่อการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตแทนที่เถ้าลอย และผงหินปูน โดยแสดงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่วัสดุประสาน และผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) <u>ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนัก</u>

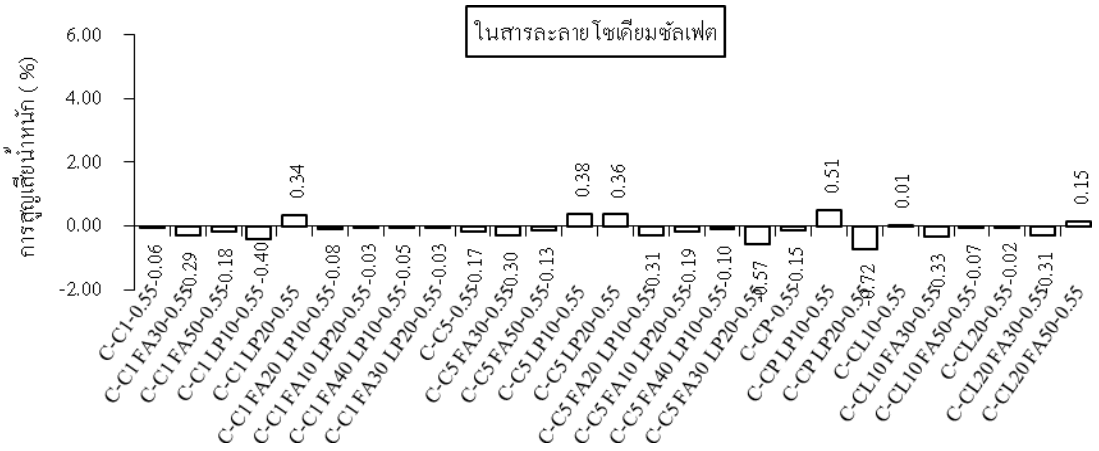
สำหรับชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน ที่ใช้พิจารณาถึงผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสานต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายซัลเฟตนั้น ใช้เหมือนกับกรณีของการขยายตัวของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตดังที่กล่าวมาแล้ว คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 และการแทนที่เถ้าลอย แทนที่ผงหินปูน (ความละเอียด 3 ไมโครเมตร) และแทนที่ทั้งเถ้าลอยและผงหินปูน โดยใช้ปริมาณการแทนที่เหมือนกรณีของการขยายตัวทุกประการ

ก. กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

รูปที่ 4.55 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 และการแทนที่เถ้าลอย แทนที่ผงหินปูน และแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อ

ระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 800 วัน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมีค่าไม่แตกต่างกัน หรือแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้นมีค่าน้อยมาก เนื่องจากกลไกการทำลายมิได้เป็นการทำให้สูญเสียเนื้อเพสต์ไป จึงทำให้ไม่เห็นข้อแตกต่างของค่าการสูญเสียน้ำหนัก

รูปที่ 4.56 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ที่ระยะเวลา 800 วัน ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ก็ให้ผลสอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตจากที่กล่าวมาแล้ว คือเห็นการสูญเสียน้ำหนักที่ไม่แตกต่างกันหรือยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนักแต่อย่างใด



รูปที่ 4.55 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน

C-C1-0.55

C-C5-0.55

C-CP-0.55

C-CL10-0.55

C-CL20-0.55

รูปที่ 4.56 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน

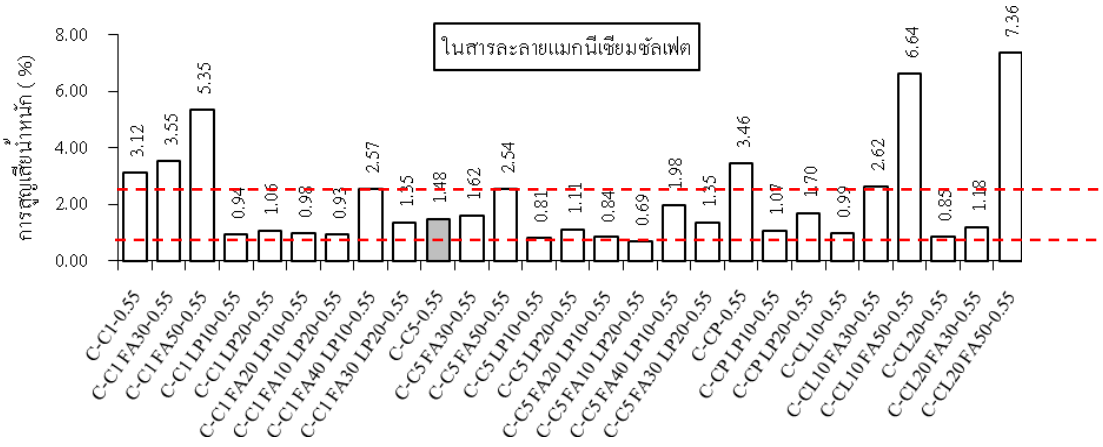
ข. กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 4.57 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 และการแทนที่เถ้าลอย แทนที่ผงหินปูน และแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 800 วัน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (3.12%) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (1.48%) ทั้งนี้เพราะปริมาณที่น้อยของ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่ากรณีไม่ผสมเถ้าลอย ทั้งนี้ก็เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความด่างในคอนกรีตน้อยลง (ลด $Ca(OH)_2$) จึงทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้ CSH เปลี่ยนเป็น MSH ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยเฉพาะการแทนที่ในปริมาณที่สูงขึ้นการสูญเสียน้ำหนักจะเพิ่มมากขึ้น แต่ข้อสังเกตว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตของเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประภทที่ 5 จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ส่วนการแทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 กลับพบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างดังกล่าวมีค่าน้อยกว่ากรณีไม่แทนที่เห็นได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูนซึ่งมีความละเอียดมากที่ใช้ในครั้งนี้ (ขนาด 3 ไมโครเมตร) สามารถไปเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีต จึงทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น ทำให้การถูกทำลายที่ผิวน้อยลง และในส่วนของปูนซีเมนต์ปอซโซลานมีแนวโน้มว่าไม่แตกต่างจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมากกว่าประเภทที่ 5 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 นั้นก็ให้ค่าไม่แตกต่างจากกรณีการแทนที่ในปูนซีเมนต์ โดยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน อย่างชัดเจน ซึ่งเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตเมื่อมีการบดผสมร่วมกับการแทนที่ หรือกรณีแทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้น พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตให้ค่าน้อยกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยปริมาณเถ้าลอยในปริมาณสูง แนวโน้มจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีค่ามากขึ้นโดยจะมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ทั้งนี้เพราะผลจากเถ้าลอยที่ในกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4.58 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลา 800 วัน ในการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับกรณีการสูญเสียน้ำหนัก (รูปที่ 4.57) ที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.57 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน

C-C1-0.55

C-C5-0.55

C-CP-0.55

C-CL10-0.55

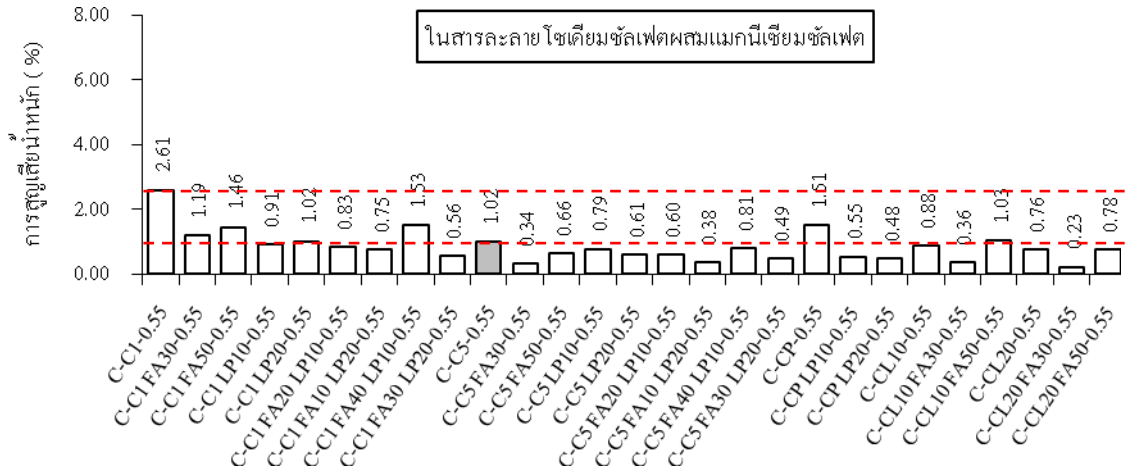
C-CL20-0.55

รูปที่ 4.58 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน

ค. กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1

รูปที่ 4.59 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 และการแทนที่เถ้าลอย แทนที่ผงหินปูน และแทนที่ทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1 เท่ากับ 800 วัน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตแต่ละสัดส่วนจะให้ผลที่มีแนวโน้มว่าไปในทิศทางเดียวกับกรณีของการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แต่สังเกตว่าในกรณีการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1 นั้น ทุกสัดส่วนที่ศึกษาในครั้งนี้จะมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ล้วน และเกือบทุกสัดส่วนจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน จะมีบางสัดส่วนที่การแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าหรือใกล้เคียงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งหมดนี้เป็นกลไกการทำลายของสารละลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตจะอยู่ระหว่างกลไกการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับแมกนีเซียมซัลเฟตนั่นเอง จึงทำให้ได้ค่าการสูญเสียน้ำหนักดังกล่าว

รูปที่ 4.60 แสดงภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ที่ระยะเวลา 800 วัน ในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1 ก็ให้ผลที่สอดคล้องกับกรณีการสูญเสียน้ำหนัก (รูปที่ 4.59)



รูปที่ 4.59 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่ระยะเวลา 800 วัน

C-C1-0.55

C-C5-0.55

C-CP-0.55

C-CL10-0.55

C-CL20-0.55

รูปที่ 4.60 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1) ที่ระยะเวลา 800 วัน

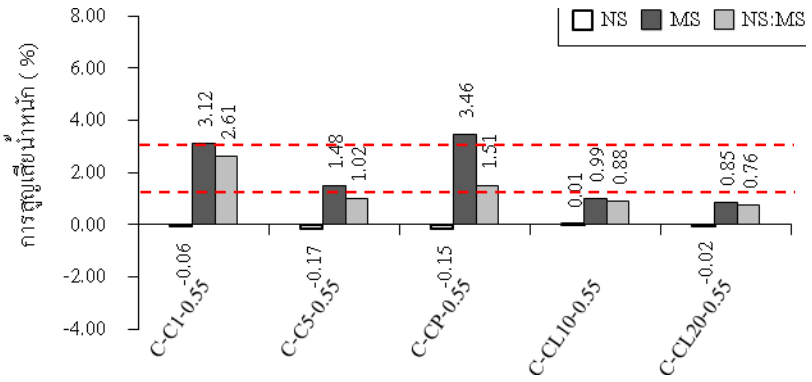
2) <u>ผลกระทบจากชนิดของสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนัก</u>

ในการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ได้พิจารณาถึงผลกระทบของสารละลายซัลเฟตทั้ง 3 กรณี สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เช่นเดียวกับการขยายตัวของชิ้นตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังนี้

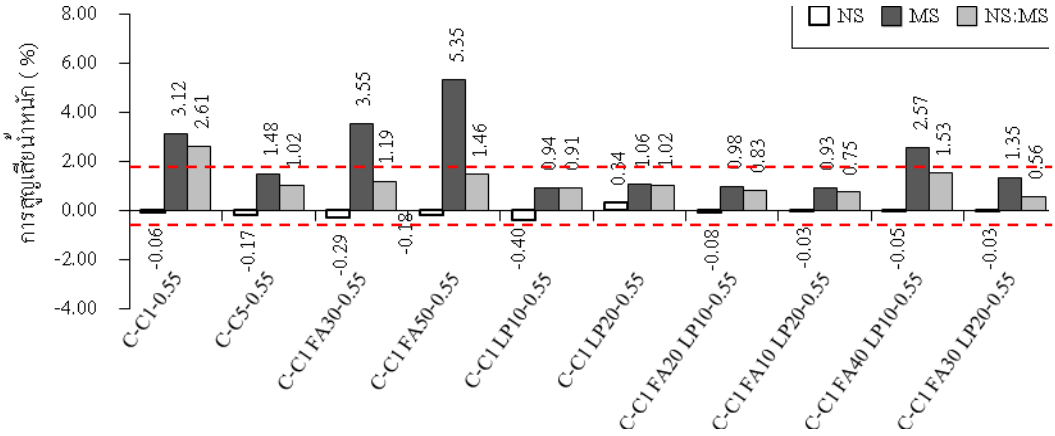
รูปที่ 4.61 ถึงรูปที่ 4.64 แสดงการเปรียบเทียบการการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน และการแทนที่เถ้าลอย ผงหินปูน และทั้งเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน เมื่อระยะเวลาของการแช่ในสารละลายซัลเฟต 800 วัน ซึ่งจากพิจารณาผลกระทบของชนิดสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น จะมีแนวโน้มให้ค่ามากที่สุด ถัดมาเป็นกรณีในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1 ส่วนชิ้นตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น ค่อยข้างน้อยมากหรือบางสัดส่วนผสมคอนกรีตกลับมีน้ำหนักเพิ่ม ทั้งนี้เป็นเพราะการถูกทำลายชิ้นตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียม

ซัลเฟตจะมีลักษณะที่เสื่อมสภาพของผิวชิ้นตัวอย่าง เนื่องจากกลไกการทำลายจะไปลดความยึดประสานของโครงสร้างของเพสต์ ไม่เหมือนกับกรณีของโซเดียมซัลเฟตซึ่งจะทำให้เกิด Ettringite ในโครงสร้างของเพสต์ผลทำให้เกิดการขยายตัวในชิ้นตัวอย่าง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1 จะเห็นได้ว่าชิ้นตัวอย่างที่ถูกทำลายนั้นจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ระหว่างของโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต แต่แนวโน้มการทำลายนั้นจะไปในลักษณะของกลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตมากกว่า กล่าวคือในสารละลายที่ผสมกันดังกล่าว แมกนีเซียมมีแนวโน้มว่าจะมีศักยภาพการทำลายมากกว่า

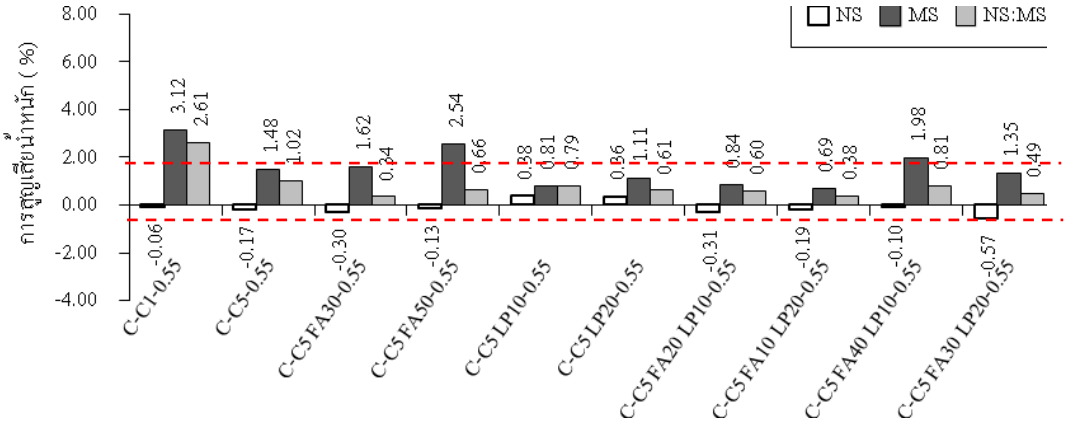
ถ้าพิจารณาจากภาพถ่ายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ระยะเวลา 800 วัน จากการแช่ในสารละลายซัลเฟต (รูปที่ 4.65) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบลักษณะของการทำลายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต และโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตในอัตราส่วน 3:1 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ลักษณะการถูกทำลายของชิ้นตัวอย่างคอนกรีตจะไปในทิศทางเดียวกับการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (รูปที่ 4.61 ถึงรูปที่ 4.64) ทั้งนี้ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



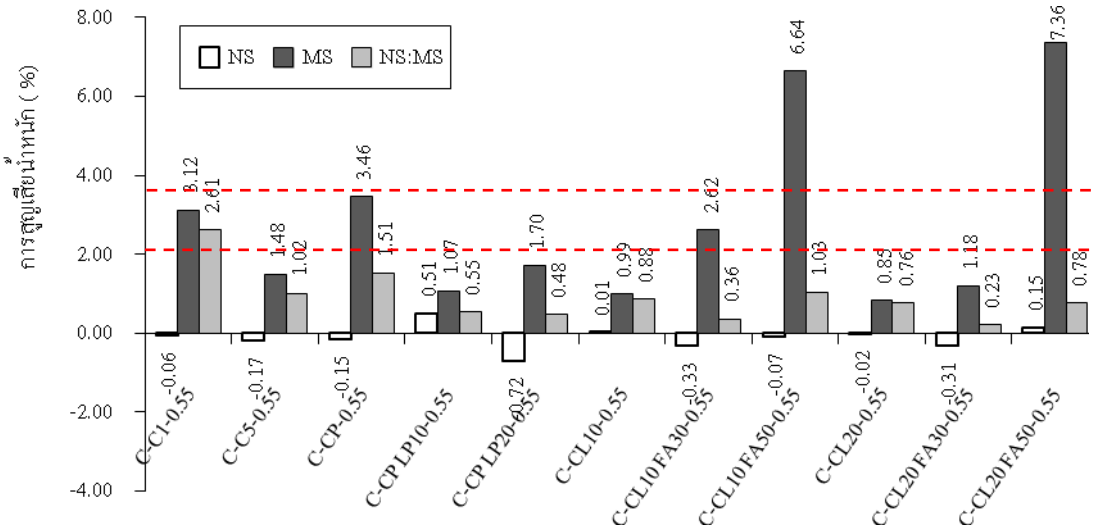
รูปที่ 4.61 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน



รูปที่ 4.62 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน



รูปที่ 4.63 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอย แทนที่ด้วยผงหินปูน และแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน



รูปที่ 4.64 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ปูนซีเมนต์ปอซโซลานแทนที่ด้วยผงหินปูน และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-C1-0.55

โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-C5-0.55

รูปที่ 4.65 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-CP-0.55

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-CL10-0.55

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-CL20-0.55

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-C1 FA50-0.55

รูปที่ 4.65 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน (ต่อ)

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-C1 LP20-0.55

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-C1 FA10 LP20-0.55

โซเดียมซัลเฟต

แมกนีเซียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต

C-C1 FA40 LP10-0.55

รูปที่ 4.65 ภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างคอนกรีต (W/B=0.55) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน ในสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 800 วัน (ต่อ)

4.4 สรุปผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต

จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตดังตารางที่ 4.9 ถึงตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของเพสต์และคอนกรีตเมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

วัสดุประสานที่ใช้		ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	การก่อตัว	ค่ายุบตัว	ความพรุน	กำลังอัดประลัย 28 วัน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	แทนที่เถ้าลอย	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
	แทนที่ผงหินปูน	เทียบเท่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	มากกว่า
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	แทนที่เถ้าลอย	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
	แทนที่ผงหินปูน	มากกว่า	น้อยกว่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	น้อยกว่า
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	ล้วน	มากกว่า	มากกว่า	เทียบเท่า	มากกว่า	เทียบเท่า
	แทนที่ผงหินปูน	มากกว่า	มากกว่า	เทียบเท่า	มากกว่า	มากกว่า
ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน	ล้วน	เทียบเท่า	มากกว่า	เทียบเท่า	มากกว่า	น้อยกว่า
	แทนที่เถ้าลอย	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาการขยายตัวของคอนกรีตและเมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายซัลเฟตโดยเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

วัสดุประสานที่ใช้		ความต้านทานซัลเฟต เมื่อพิจารณาการขยายตัว (ที่ระยะเวลา 690วัน)			ความต้านทานซัลเฟต เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนัก (ที่ระยะเวลา 800 วัน)		
		NS	MS	NS:MS (3:1)	NS	MS	NS:MS (3:1)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	แทนที่เถ้าลอย	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	แย่ลง	ดีขึ้น
	แทนที่ผงหินปูน	ดีขึ้น	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	ดีขึ้น	ดีขึ้น
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	เทียบเท่า	ดีขึ้น	ดีขึ้น
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	แทนที่เถ้าลอย	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	เทียบเท่า	แย่ลง	ดีขึ้น
	แทนที่ผงหินปูน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	แย่ลง	แย่ลง	ดีขึ้น	ดีขึ้น
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	ดีขึ้น	เทียบเท่า	ดีขึ้น	เทียบเท่า	ดีขึ้น	ดีขึ้น
ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	ล้วน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	แย่ลง	ดีขึ้น
	แทนที่ผงหินปูน	ดีขึ้น	เทียบเท่า	ดีขึ้น	เทียบเท่า	ดีขึ้น	ดีขึ้น
ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน	ล้วน	แย่ลง	เทียบเท่า	เทียบเท่า	เทียบเท่า	ดีขึ้น	ดีขึ้น
	แทนที่เถ้าลอย	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น	เทียบเท่า	แย่ลง	ดีขึ้น

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลกระทบของการแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ต่อความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาทั้งการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต โดยเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

วัสดุประสานที่ใช้		ความต้านทานซัลเฟตเมื่อพิจารณาทั้งการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก		
		NS	MS	NS:MS (3:1)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	แทนที่เถ้าลอย	ดีขึ้น	แย่ลง	ดีขึ้น
	แทนที่ผงหินปูน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	แทนที่เถ้าลอย	ดีขึ้น	แย่ลง	ดีขึ้น
	แทนที่ผงหินปูน	แย่ลง	ดีขึ้น	ดีขึ้น
	แทนที่เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น
ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน	ล้วน	ดีขึ้น	แย่ลง	ดีขึ้น
	แทนที่ผงหินปูน	ดีขึ้น	ดีขึ้น	ดีขึ้น
ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูน	ล้วน	แย่ลง	ดีขึ้น	ดีขึ้น
	แทนที่เถ้าลอย	ดีขึ้น	แย่ลง	ดีขึ้น

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากผลการศึกษา สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เทียบเท่ากับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.2 เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย และเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนจะมีระยะเวลาการก่อตัวที่มากขึ้น ในขณะที่การก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยผงหินปูนจะมีระยะเวลาการก่อตัวที่ใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

5.1.3 ค่ายุบตัวของคอนกรีต พบว่าจะไปในทิศทางผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

5.1.4 ความพรุนของคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าให้ค่าความพรุนของคอนกรีตน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.5 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอย และเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าเมื่อไม่แทนที่ โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง ส่วนเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

5.1.6 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตไม่ว่าบดผสมหรือแทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 (ที่ศึกษาในครั้งนี้) ให้ค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เภทที่ 1 ล้วน โดยให้ค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ค่าการขยายตัวมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.7 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตไม่ว่าบดผสมหรือแทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ให้ค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยให้ค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของเถ้าลอยผสมร่วมกับผงหินปูน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูง ในขณะที่คอนกรีตผงหินปูนจะมีการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.8 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตพบว่า ตัวอย่างคอนกรีตมีแนวโน้มการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักทิศทางเดียวกับกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต และเมื่อพิจารณาที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีต พบว่ามีการถูกทำลายในลักษณะผุกร่อน พองตัวและหลุดร่อน

5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

จากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ มีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 เนื่องจากการทำลายซัลเฟตต่อตัวอย่างคอนกรีตต้องใช้เวลานาน ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟตน่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อจะได้ใช้เวลาในการศึกษาน้อยลง

5.2.2 การศึกษา Microstructure ของการทำลายโดยซัลเฟตต่อคอนกรีต น่าจะเป็นวิธีการที่สนับสนุนถึงกลไกการทำลายของสารละลายซัลเฟตต่อคอนกรีตได้ดี

เอกสารอ้างอิง

[1] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, "ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต," พิมพ์ครั้งที่ 2, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552.

[2] ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, "การต้านทานซัลแฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน," การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550.

[3] Vogelis et al., "Portland-limestone cement. Their properties and hydration compared to those of other composite cements," Cement & Concrete Composites (Electronic), 2005, Vol. 27, pp. 191-196. Available: Elsevier/Science Direct (3 may 2009).

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

[5] Kadri et al., "Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration," RILEM (Electronic), 2009, pp. 5-6. Available: RILEM Union/RILEM (3 may 2009).

[6] LIN Zongshou and ZHAO Qian, "Strength of Limestone-based Non-calcined Cement and its Properties," Journal of Wuhan University of Technolotgy-Mater, 2009.

[7] Al-Amoudi, O.S.B., "Mechanisms of Sulfate in Plain and Blended Cement. a Review," Proceeding of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, UK., 1999.

[8] American Society for Testing and Material, **Annual Book of ASTM Standard,** V 04.02, Easton, Md., USA., 1996.

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

[10] กระทรวงอุตสาหกรรม, "**กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เถ้าลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต**," มาตรฐาน มอก.2135-2545. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2546. หน้า 3.

[11] สหลาภ หอมวุฒิวงค์, ดิลก คูรัตนเวช และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, "การทดสอบและแปรผลการทดสอบต่อคุณสมบัติต่อเถ้าถ่านหิน," **การสัมมนาทางวิชาการเรื่องการนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต**, ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจุลจอมเกล้าธนบุรี.

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

[13] Pitisan Krammart and Somnuk Tangtermsirikul “Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution,” ASEAN Journal on Science & Technology for Delvelopment, V 21, 2004, pp. 373-390.

[14] Al-Amoudi O.S.B., Maslehuddin M., Saadi, M.M., 1995, “Effect of magnesium and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements, ACI Materials Journal 92: pp.15-24.

[15] Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Zahrani M.M., Sharif A.M., Shameem M., Ibrahim M., 2003. “Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate,” Cement & Concrete Composites 25: Article in press.

[16] สุขชัย สุขยานุดิษฐ์ และคณะ, “ผลกระทบของผงหินปูนต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต,” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี, ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552, นครราชสีมา, 2552.

[17] Somnuk Tangtermsirikul, “Durability and Mix Design of Concrete,” Printing House Thammasat University Rangsit Campus, 2003, pp. 86-87.

ภาคผนวก ก
ตารางแสดงขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ ก.1 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.01
0.07	0.08	0.075	0.01	0.02
0.08	0.09	0.085	0.02	0.04
0.09	0.11	0.100	0.05	0.09
0.11	0.13	0.120	0.10	0.20
0.13	0.15	0.140	0.20	0.39
0.15	0.17	0.160	0.35	0.75
0.17	0.20	0.185	0.59	1.33
0.20	0.23	0.215	0.91	2.24
0.23	0.27	0.250	1.26	3.50
0.27	0.31	0.290	1.52	5.02
0.31	0.36	0.335	1.58	6.60
0.36	0.42	0.390	1.47	8.07
0.42	0.49	0.455	1.33	9.40
0.49	0.58	0.535	1.15	10.55
0.58	0.67	0.625	0.92	11.46
0.67	0.78	0.725	0.72	12.16
0.78	0.91	0.845	0.60	12.79
0.91	1.06	0.985	0.51	13.30
1.06	1.24	1.150	0.46	13.76
1.24	1.44	1.340	0.45	14.21
1.44	1.68	1.560	0.46	14.67
1.68	1.95	1.815	0.51	15.18
1.95	2.28	2.115	0.61	15.78
2.28	2.65	2.465	0.76	16.55
2.65	3.09	2.870	0.99	17.53
3.09	3.60	3.345	1.28	18.82
3.60	4.19	3.895	1.54	20.45
4.19	4.88	4.535	2.04	22.49
4.88	5.69	5.285	2.45	24.95
5.69	6.63	6.160	2.86	27.81
6.63	7.72	7.175	3.25	31.06
7.72	9.00	8.360	3.62	34.67
9.00	10.48	9.740	3.95	38.63
10.48	12.21	11.345	4.27	42.90
12.21	14.22	13.215	4.58	47.48
14.22	16.57	15.395	4.67	52.35
16.57	19.31	17.940	5.15	57.50
19.31	22.49	20.900	5.38	62.67

ตารางที่ ก.1 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
22.49	26.20	24.345	5.55	68.43
26.20	30.53	28.365	5.69	74.12
30.53	35.56	33.045	5.52	79.64
35.56	41.43	38.495	5.12	84.76
41.43	48.27	44.850	4.51	89.25
48.27	56.23	52.250	3.72	92.99
56.23	65.51	60.870	2.85	95.83
65.51	76.32	70.915	1.98	97.82
76.32	88.91	82.615	1.23	99.05
88.91	103.58	96.245	0.66	99.70
103.58	120.67	112.125	0.30	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.2 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.01	0.01
0.09	0.11	0.100	0.02	0.03
0.11	0.13	0.120	0.04	0.07
0.13	0.15	0.140	0.09	0.16
0.15	0.17	0.160	0.19	0.35
0.17	0.20	0.185	0.38	0.73
0.20	0.23	0.215	0.67	1.39

ตารางที่ ก.2 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.23	0.27	0.250	1.03	2.43
0.27	0.31	0.290	1.34	3.77
0.31	0.36	0.335	1.44	5.21
0.36	0.42	0.390	1.36	6.57
0.42	0.49	0.455	1.23	7.80
0.49	0.58	0.535	1.08	8.88
0.58	0.67	0.625	0.85	9.73
0.67	0.78	0.725	0.68	10.38
0.78	0.91	0.845	0.53	10.91
0.91	1.06	0.985	0.44	11.35
1.06	1.24	1.150	0.38	11.73
1.24	1.44	1.340	0.36	12.09
1.44	1.68	1.560	0.35	12.45
1.68	1.95	1.815	0.39	12.85
1.95	2.28	2.115	0.48	13.32
2.28	2.65	2.465	0.62	13.94
2.65	3.09	2.870	0.84	14.78
3.09	3.60	3.345	1.15	15.93
3.60	4.19	3.895	1.55	17.47
4.19	4.88	4.535	2.03	19.50
4.88	5.69	5.285	2.58	22.08
5.69	6.63	6.160	3.15	25.23
6.63	7.72	7.175	3.75	28.99
7.72	9.00	8.360	4.34	33.33
9.00	10.48	9.740	4.89	38.22
10.48	12.21	11.345	5.39	43.61
12.21	14.22	13.215	5.82	49.43
14.22	16.57	15.395	6.17	55.60
16.57	19.31	17.940	6.45	62.05
19.31	22.49	20.900	6.88	68.74
22.49	26.20	24.345	6.53	75.27
26.20	30.53	28.365	6.11	81.38
30.53	35.56	33.045	5.42	86.80
35.56	41.43	38.495	4.52	91.32
41.43	48.27	44.850	3.50	94.82
48.27	56.23	52.250	2.49	97.31
56.23	65.51	60.870	1.57	98.88
65.51	76.32	70.915	0.82	99.70
76.32	88.91	82.615	0.30	100.00
88.91	103.58	96.245	0.00	100.00

ตารางที่ ก.2 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.00	0.01
0.09	0.11	0.100	0.01	0.02
0.11	0.13	0.120	0.03	0.05
0.13	0.15	0.140	0.07	0.12
0.15	0.17	0.160	0.17	0.29
0.17	0.20	0.185	0.35	0.64
0.20	0.23	0.215	0.66	1.29
0.23	0.27	0.250	1.08	2.37
0.27	0.31	0.290	1.46	3.83
0.31	0.36	0.335	1.60	5.43
0.36	0.42	0.390	1.54	6.96
0.42	0.49	0.455	1.43	8.40
0.49	0.58	0.535	1.30	9.70
0.58	0.67	0.625	1.07	10.76
0.67	0.78	0.725	0.88	11.65
0.78	0.91	0.845	0.76	12.41
0.91	1.06	0.985	0.69	13.09
1.06	1.24	1.150	0.65	13.74
1.24	1.44	1.340	0.66	14.41
1.44	1.68	1.560	0.70	15.11

ตารางที่ ก.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
1.68	1.95	1.815	0.77	15.88
1.95	2.28	2.115	0.89	16.77
2.28	2.65	2.465	1.07	17.84
2.65	3.09	2.870	1.31	19.15
3.09	3.60	3.345	1.61	20.76
3.60	4.19	3.895	1.97	22.73
4.19	4.88	4.535	2.35	25.08
4.88	5.69	5.285	2.73	27.83
5.69	6.63	6.160	3.13	30.96
6.63	7.72	7.175	3.53	34.49
7.72	9.00	8.360	3.93	38.41
9.00	10.48	9.740	4.34	42.75
10.48	12.21	11.345	4.76	47.52
12.21	14.22	13.215	5.19	52.71
14.22	16.57	15.395	5.61	58.32
16.57	19.31	17.940	5.99	64.31
19.31	22.49	20.900	6.35	70.66
22.49	26.20	24.345	6.27	76.93
26.20	30.53	28.365	5.86	82.79
30.53	35.56	33.045	5.13	87.92
35.56	41.43	38.495	4.18	92.10
41.43	48.27	44.850	3.15	95.25
48.27	56.23	52.250	2.17	97.42
56.23	65.51	60.870	1.35	98.77
65.51	76.32	70.915	0.73	99.85
76.32	88.91	82.615	0.34	100.00
88.91	103.58	96.245	0.15	100.00
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.4 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.01	0.01
0.09	0.11	0.100	0.02	0.03
0.11	0.13	0.120	0.05	0.18
0.13	0.15	0.140	0.11	0.19
0.15	0.17	0.160	0.23	0.42
0.17	0.20	0.185	0.45	0.87
0.20	0.23	0.215	0.79	1.66
0.23	0.27	0.250	1.24	2.90
0.27	0.31	0.290	1.62	4.52
0.31	0.36	0.335	1.76	6.27
0.36	0.42	0.390	1.68	7.95
0.42	0.49	0.455	1.57	9.52
0.49	0.58	0.535	1.42	10.94
0.58	0.67	0.625	1.17	12.11
0.67	0.78	0.725	0.97	13.08
0.78	0.91	0.845	0.85	13.93
0.91	1.06	0.985	0.76	14.69
1.06	1.24	1.150	0.72	15.41
1.24	1.44	1.340	0.73	16.14
1.44	1.68	1.560	0.76	16.90
1.68	1.95	1.815	0.83	17.73
1.95	2.28	2.115	0.95	18.68
2.28	2.65	2.465	1.13	19.82
2.65	3.09	2.870	1.38	21.20
3.09	3.60	3.345	1.70	22.90
3.60	4.19	3.895	2.07	24.97
4.19	4.88	4.535	2.47	27.44
4.88	5.69	5.285	2.86	30.29
5.69	6.63	6.160	3.23	33.52
6.63	7.72	7.175	3.58	37.10
7.72	9.00	8.360	3.90	41.00
9.00	10.48	9.740	4.20	49.68
10.48	12.21	11.345	4.48	54.43
12.21	14.22	13.215	4.75	59.43
14.22	16.57	15.395	5.00	64.67
16.57	19.31	17.940	5.24	70.13
19.31	22.49	20.900	5.46	75.58
22.49	26.20	24.345	5.45	80.83

ตารางที่ ก.4 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
26.20	30.53	28.365	5.25	85.65
30.53	35.56	33.045	4.83	89.86
35.56	41.43	38.495	4.21	93.32
41.43	48.27	44.850	3.45	95.96
48.27	56.23	52.250	2.64	97.82
56.23	65.51	60.870	1.86	99.00
65.51	76.32	70.915	1.18	99.67
76.32	88.91	82.615	0.00	100.00
88.91	103.58	96.245	0.00	100.00
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.5 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.01	0.01
0.09	0.11	0.100	0.02	0.04
0.11	0.13	0.120	0.06	0.10
0.13	0.15	0.140	0.13	0.23
0.15	0.17	0.160	0.27	0.51
0.17	0.20	0.185	0.50	1.01
0.20	0.23	0.215	0.83	1.83
0.23	0.27	0.250	1.21	3.05
0.27	0.31	0.290	1.53	4.58
0.31	0.36	0.335	1.41	6.24
0.36	0.42	0.390	1.22	7.85

ตารางที่ ก.5 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.42	0.49	0.455	1.05	9.38
0.49	0.58	0.535	0.95	10.79
0.58	0.67	0.625	0.88	12.00
0.67	0.78	0.725	0.94	13.06
0.78	0.91	0.845	1.05	14.01
0.91	1.06	0.985	1.23	14.89
1.06	1.24	1.150	1.47	15.74
1.24	1.44	1.340	1.78	16.62
1.44	1.68	1.560	2.14	17.56
1.68	1.95	1.815	2.52	18.60
1.95	2.28	2.115	2.88	19.83
2.28	2.65	2.465	3.18	21.30
2.65	3.09	2.870	3.40	23.08
3.09	3.60	3.345	3.55	25.22
3.60	4.19	3.895	3.69	27.74
4.19	4.88	4.535	3.76	30.62
4.88	5.69	5.285	3.85	33.80
5.69	6.63	6.160	3.99	37.20
6.63	7.72	7.175	4.18	40.75
7.72	9.00	8.360	4.40	44.38
9.00	10.48	9.740	4.62	48.07
10.48	12.21	11.345	4.75	51.83
12.21	14.22	13.215	4.71	55.68
14.22	16.57	15.395	4.44	59.67
16.57	19.31	17.940	3.94	63.85
19.31	22.49	20.900	3.27	68.25
22.49	26.20	24.345	2.49	72.88
26.20	30.53	28.365	1.71	77.63
30.53	35.56	33.045	1.04	82.33
35.56	41.43	38.495	0.54	86.77
41.43	48.27	44.850	0.23	90.71
48.27	56.23	52.250	0.00	93.98
56.23	65.51	60.870	0.00	96.46
65.51	76.32	70.915	0.00	98.18
76.32	88.91	82.615	0.00	99.22
88.91	103.58	96.245	0.00	99.77
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00

ตารางที่ ก.5 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.6 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอย

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.00	0.00
0.07	0.08	0.075	0.00	0.00
0.08	0.09	0.085	0.01	0.01
0.09	0.11	0.100	0.02	0.03
0.11	0.13	0.120	0.04	0.07
0.13	0.15	0.140	0.09	0.16
0.15	0.17	0.160	0.19	0.35
0.17	0.20	0.185	0.34	0.69
0.20	0.23	0.215	0.56	1.25
0.23	0.27	0.250	0.83	2.07
0.27	0.31	0.290	1.05	3.13
0.31	0.36	0.335	1.15	4.28
0.36	0.42	0.390	1.14	5.42
0.42	0.49	0.455	1.11	6.53
0.49	0.58	0.535	1.06	7.59
0.58	0.67	0.625	0.94	8.53
0.67	0.78	0.725	0.84	9.37
0.78	0.91	0.845	0.75	10.13
0.91	1.06	0.985	0.69	10.81
1.06	1.24	1.150	0.64	11.46
1.24	1.44	1.340	0.63	12.08
1.44	1.68	1.560	0.64	12.73
1.68	1.95	1.815	0.70	13.43
1.95	2.28	2.115	0.82	14.25
2.28	2.65	2.465	1.01	15.26

ตารางที่ ก.6 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอย (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
2.65	3.09	2.870	1.28	16.54
3.09	3.60	3.345	1.62	18.16
3.60	4.19	3.895	2.00	20.16
4.19	4.88	4.535	2.38	22.54
4.88	5.69	5.285	2.72	25.26
5.69	6.63	6.160	2.99	28.25
6.63	7.72	7.175	3.19	31.44
7.72	9.00	8.360	3.32	34.76
9.00	10.48	9.740	3.38	38.14
10.48	12.21	11.345	3.41	41.55
12.21	14.22	13.215	3.43	44.98
14.22	16.57	15.395	3.46	48.44
16.57	19.31	17.940	3.50	51.94
19.31	22.49	20.900	3.56	55.50
22.49	26.20	24.345	3.62	59.12
26.20	30.53	28.365	3.69	62.82
30.53	35.56	33.045	3.76	66.58
35.56	41.43	38.495	3.82	70.40
41.43	48.27	44.850	3.87	74.27
48.27	56.23	52.250	3.85	78.12
56.23	65.51	60.870	3.75	81.87
65.51	76.32	70.915	3.28	85.43
76.32	88.91	82.615	2.91	88.72
88.91	103.58	96.245	2.48	91.62
103.58	120.67	112.125	2.04	94.10
120.67	140.58	130.625	1.61	96.14
140.58	163.77	152.175	1.18	97.75
163.77	190.80	177.285	0.75	98.93
190.80	222.26	206.530	0.32	99.68
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

ตารางที่ ก.7 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของผงหินปูน

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
0.05	0.06	0.055	0.00	0.00
0.06	0.07	0.065	0.01	0.01
0.07	0.08	0.075	0.02	0.03
0.08	0.09	0.085	0.04	0.07
0.09	0.11	0.100	0.07	0.15
0.11	0.13	0.120	0.14	0.29
0.13	0.15	0.140	0.25	0.54
0.15	0.17	0.160	0.44	0.98
0.17	0.20	0.185	0.72	1.70
0.20	0.23	0.215	1.11	2.80
0.23	0.27	0.250	1.57	4.38
0.27	0.31	0.290	1.98	6.35
0.31	0.36	0.335	2.18	8.53
0.36	0.42	0.390	2.22	10.75
0.42	0.49	0.455	2.27	13.02
0.49	0.58	0.535	2.32	15.34
0.58	0.67	0.625	2.30	17.64
0.67	0.78	0.725	2.36	20.01
0.78	0.91	0.845	2.49	22.49
0.91	1.06	0.985	2.65	25.14
1.06	1.24	1.150	2.84	27.97
1.24	1.44	1.340	3.05	31.02
1.44	1.68	1.560	3.24	34.26
1.68	1.95	1.815	3.40	37.66
1.95	2.28	2.115	3.55	41.22
2.28	2.65	2.465	3.72	44.93
2.65	3.09	2.870	3.91	48.84
3.09	3.60	3.345	4.14	52.98
3.60	4.19	3.895	4.38	57.36
4.19	4.88	4.535	4.59	61.95
4.88	5.69	5.285	4.76	66.71
5.69	6.63	6.160	4.90	71.60
6.63	7.72	7.175	4.84	76.44
7.72	9.00	8.360	4.65	81.09
9.00	10.48	9.740	4.33	85.42
10.48	12.21	11.345	3.88	89.30
12.21	14.22	13.215	3.33	92.62
14.22	16.57	15.395	2.70	95.32
16.57	19.31	17.940	2.04	97.37
19.31	22.49	20.900	1.42	98.79
22.49	26.20	24.345	0.88	99.66

ตารางที่ ก.7 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของผงหินปูน (ต่อ)

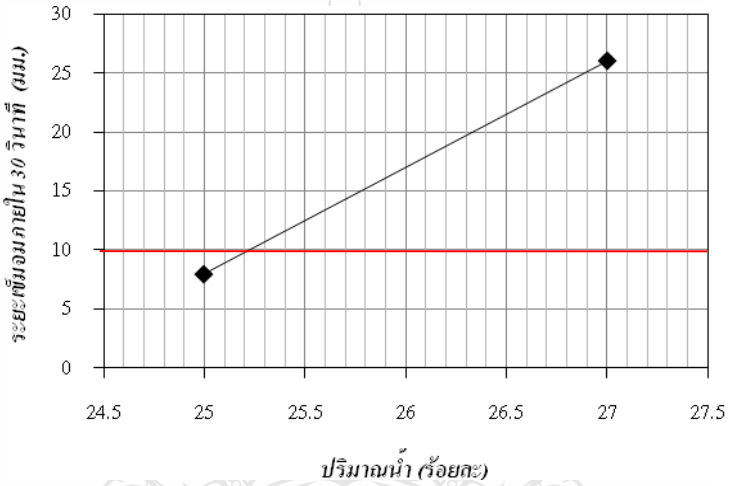
ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
26.20	30.53	28.365	0.34	100.00
30.53	35.56	33.045	0.00	100.00
35.56	41.43	38.495	0.00	100.00
41.43	48.27	44.850	0.00	100.00
48.27	56.23	52.250	0.00	100.00
56.23	65.51	60.870	0.00	100.00
65.51	76.32	70.915	0.00	100.00
76.32	88.91	82.615	0.00	100.00
88.91	103.58	96.245	0.00	100.00
103.58	120.67	112.125	0.00	100.00
120.67	140.58	130.625	0.00	100.00
140.58	163.77	152.175	0.00	100.00
163.77	190.80	177.285	0.00	100.00
190.80	222.26	206.530	0.00	100.00
222.26	258.95	240.605	0.00	100.00
258.95	301.68	280.315	0.00	100.00
301.68	351.46	326.570	0.00	100.00
351.46	409.45	380.455	0.00	100.00
409.45	477.01	443.230	0.00	100.00
477.01	555.71	516.360	0.00	100.00
555.71	647.41	601.560	0.00	100.00
647.41	754.23	700.820	0.00	100.00
754.23	878.67	816.450	0.00	100.00

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ภาคผนวก ข
ตารางและรูปแสดงการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสาน และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน

ตารางที่ ข.1 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (P-C1)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	25.0	8.0
2	100	-	-	27.0	26.0

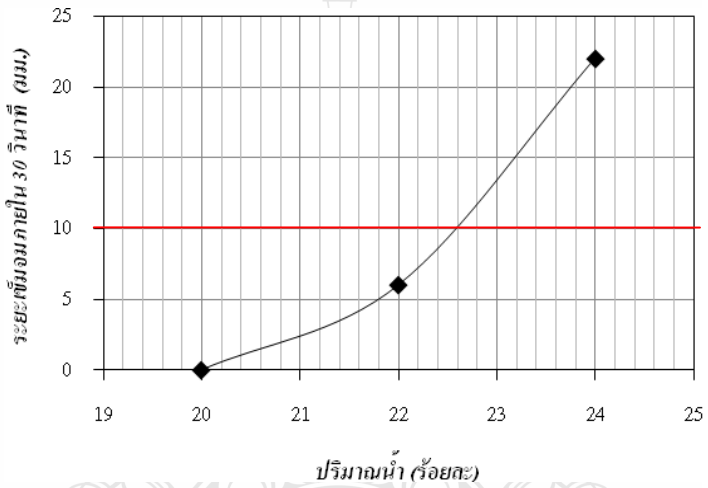


รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.20 %

ตารางที่ ข.2 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (P-C1 FA30)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	30	-	20.0	0.0
2	70	30	-	22.0	6.0
3	70	30	-	24.0	22.0

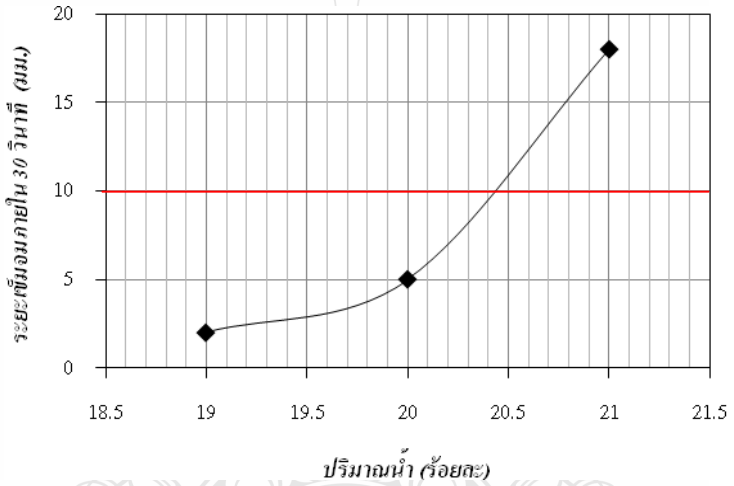


รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 22.60 %

ตารางที่ ข.3 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (P-C1 FA50)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	50	-	19.0	2.0
2	50	50	-	20.0	5.0
3	50	50	-	21.0	18.0

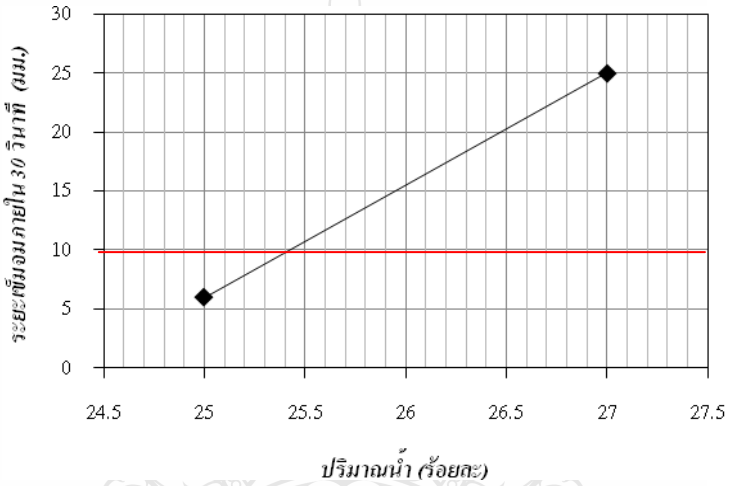


รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 20.42 %

ตารางที่ ข.4 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C1 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	90	-	10	25.0	6.0
2	90	-	10	27.0	25.0

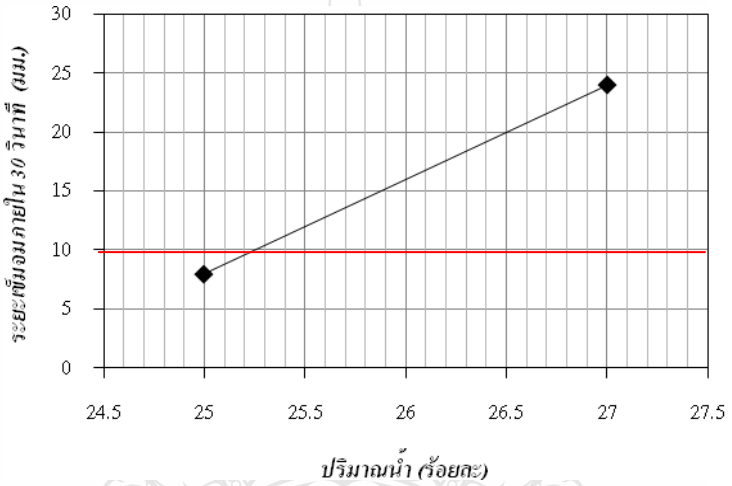


รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.40 %

ตารางที่ ข.5 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C1 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	80	-	20	25.0	8.0
2	80	-	20	27.0	24.0

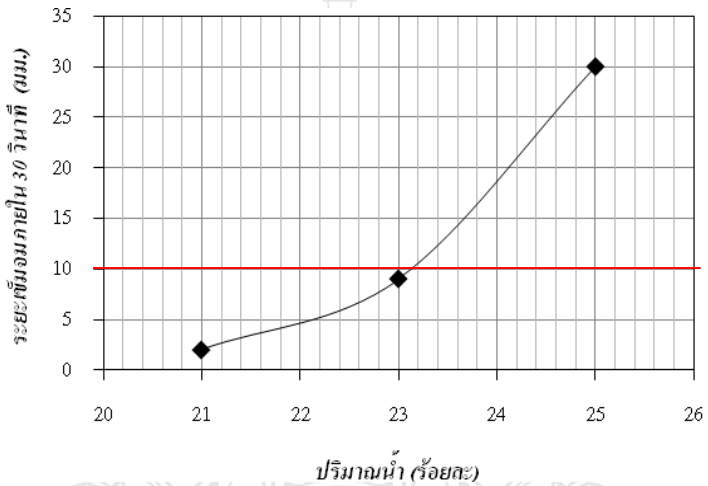


รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.25 %

ตารางที่ ข.6 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C1 FA20 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	20	10	21.0	2.0
2	70	20	10	23.0	9.0
3	70	20	10	25.0	30.0

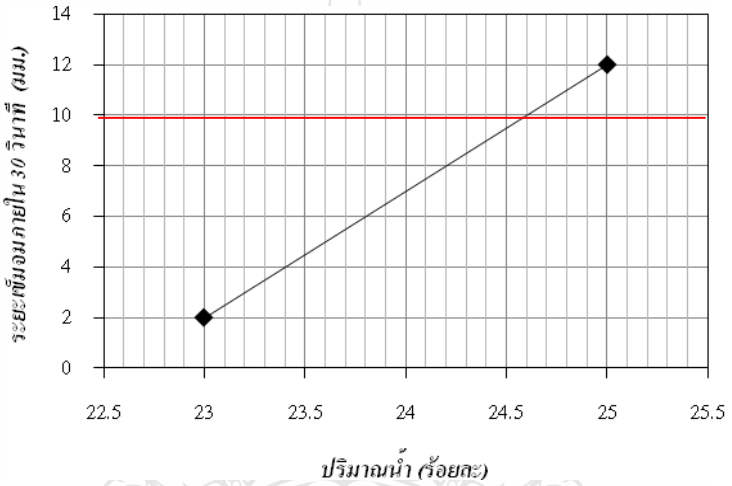


รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.10 %

ตารางที่ ข.7 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C1 FA10 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	10	20	23.0	2.0
2	70	10	20	25.0	12.0

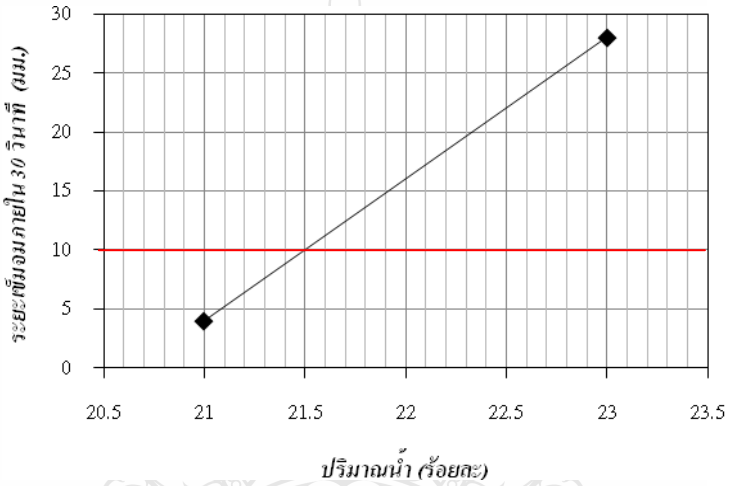


รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 24.60 %

ตารางที่ ข.8 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C1 FA40 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	40	10	21.0	4.0
2	50	40	10	23.0	28.0

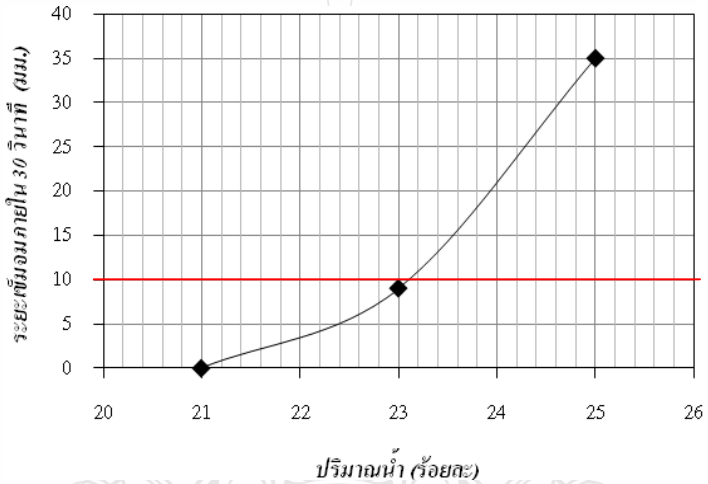


รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 21.50 %

ตารางที่ ข.9 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C1 FA30 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	30	20	21.0	0.0
2	50	30	20	23.0	9.0
3	50	30	20	25.0	35.0

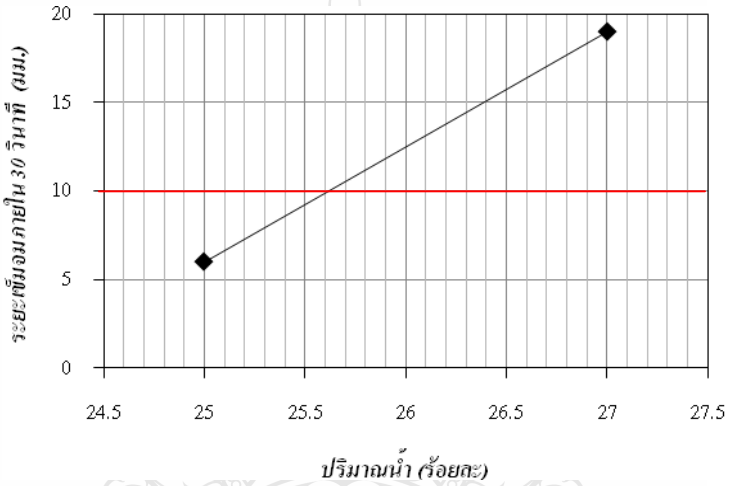


รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.10 %

ตารางที่ ข.10 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (P-C5)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	25.0	5.0
2	100	-	-	27.0	19.0

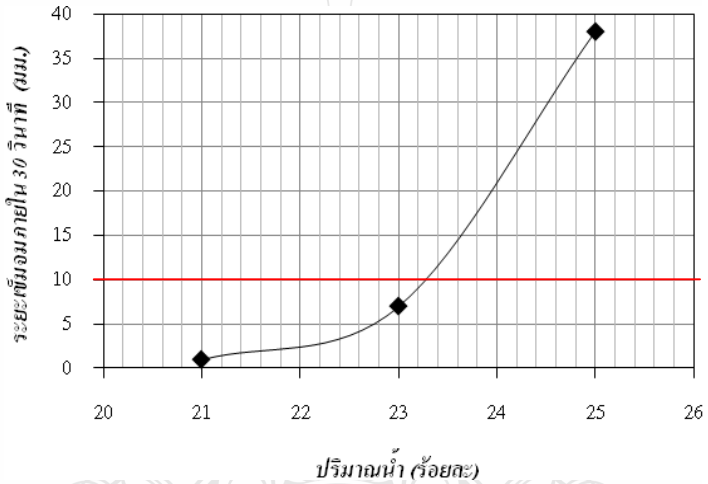


รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.60 %

ตารางที่ ข.11 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (P-C5 FA30)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	30	-	21.0	1.0
2	70	30	-	23.0	7.0
3	70	30	-	25.0	38.0

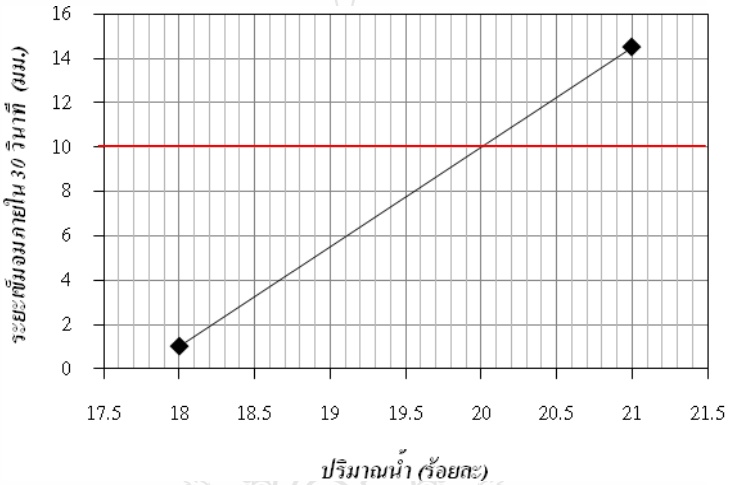


รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.25 %

ตารางที่ ข.12 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (P-C5 FA50)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	50	-	18.0	1.0
2	50	50	-	21.0	14.50

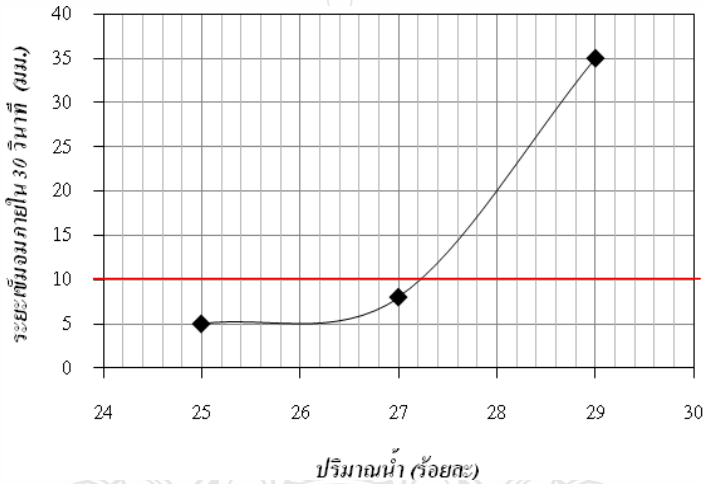


รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 20.00 %

ตารางที่ ข.13 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C5 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	90	-	10	25.0	5.0
2	90	-	10	27.0	8.0
3	90	-	10	29.0	35.0

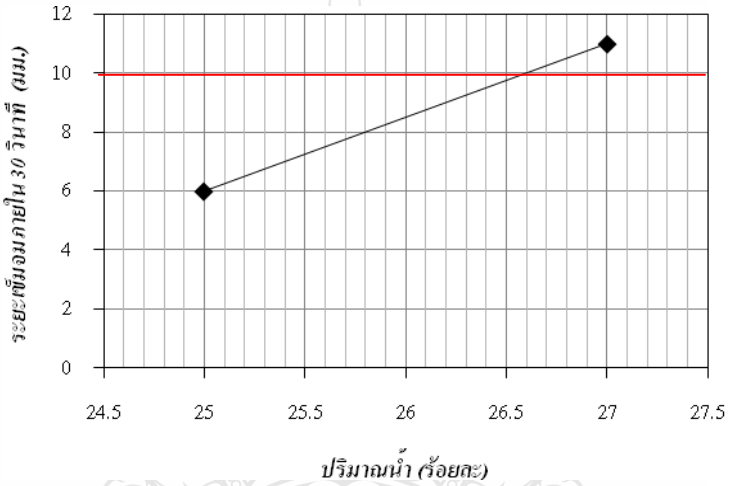


รูปที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 27.28 %

ตารางที่ ข.14 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C5 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	80	-	20	25.0	6.0
2	80	-	20	27.0	11.0

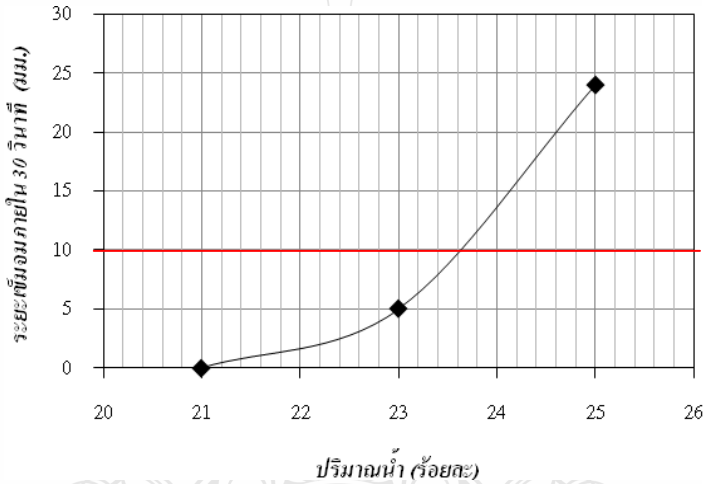


รูปที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 26.60 %

ตารางที่ ข.15 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C5 FA20 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	20	10	21.0	0.0
2	70	20	10	23.0	5.0
3	70	20	10	25.0	24.0

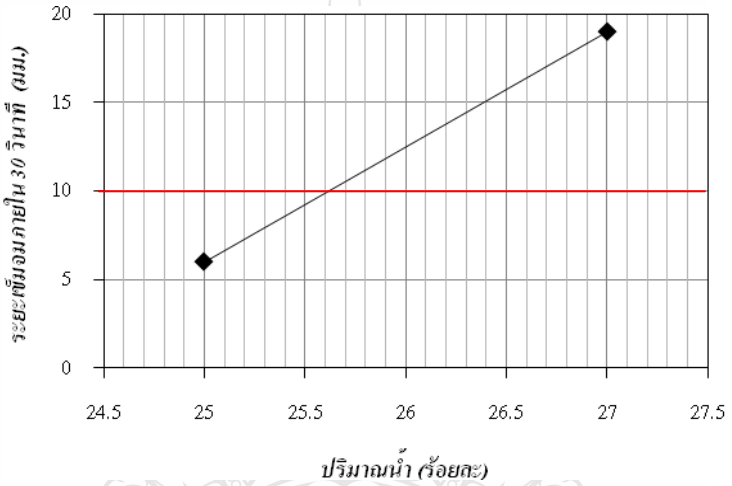


รูปที่ ข.15 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.60 %

ตารางที่ ข.16 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C5 FA10 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	10	20	25.0	6.0
2	70	10	20	27.0	19.0

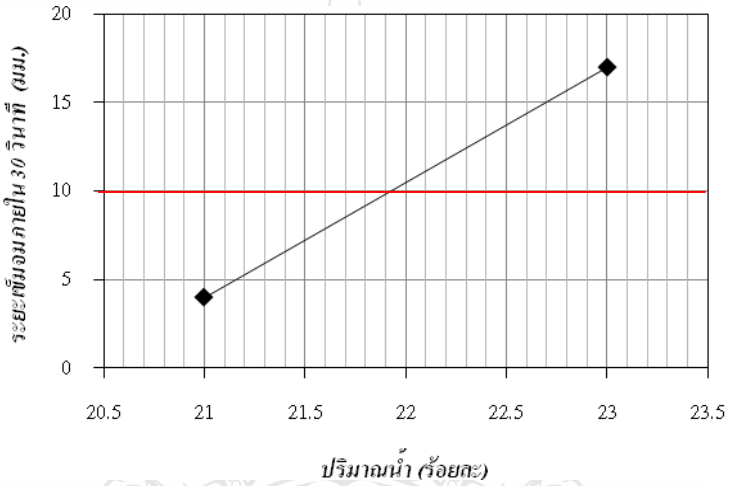


รูปที่ ข.16 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.63 %

ตารางที่ ข.17 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C5 FA40 LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	40	10	21.0	4.0
2	50	40	10	23.0	17.0

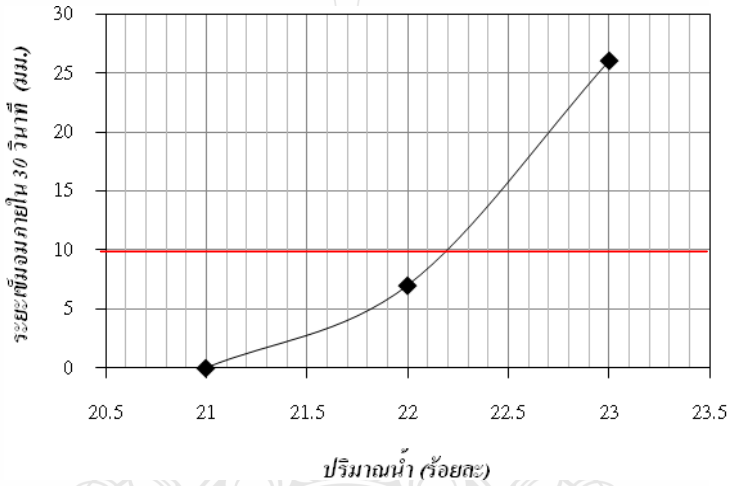


รูปที่ ข.17 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 21.90 %

ตารางที่ ข.18 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C5 FA30 LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	30	20	21.0	0.0
2	50	30	20	22.0	7.0
3	50	30	20	23.0	26.0

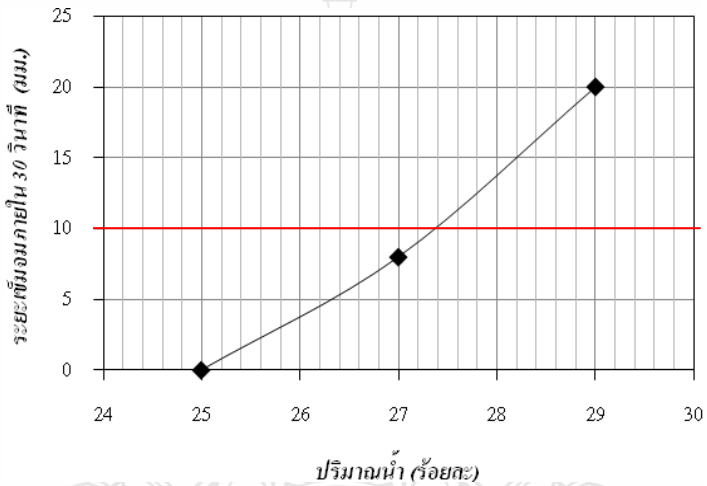


รูปที่ ข.18 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 22.20 %

ตารางที่ ข.19 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน (P-CP)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	25.0	0.0
2	100	-	-	27.0	8.0
3	100	-	-	29.0	20.0

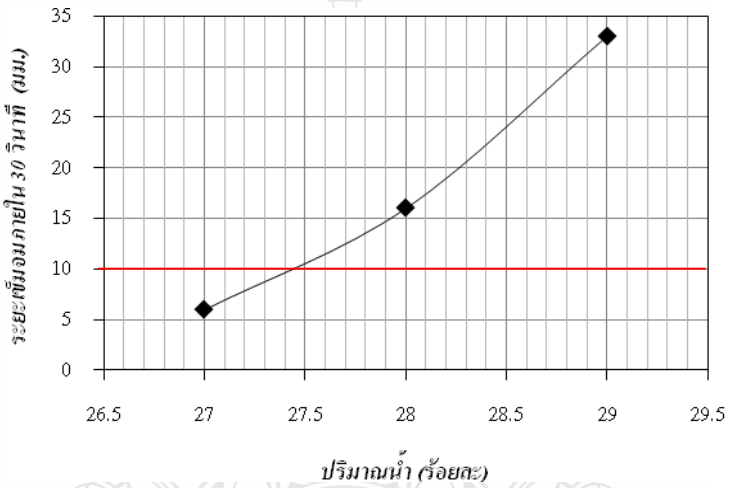


รูปที่ ข.19 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 27.30 %

ตารางที่ ข.20 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (P-CP LP10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	90	-	10	27.0	6.0
2	90	-	10	28.0	16.0
3	90	-	10	29.0	33.0

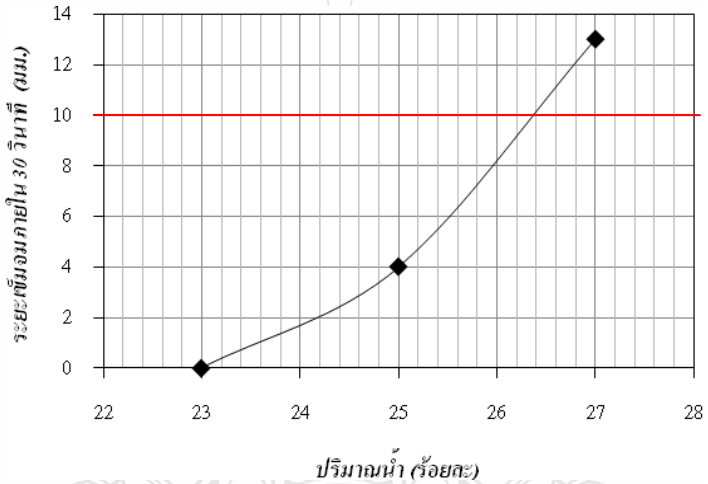


รูปที่ ข.20 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 27.40 %

ตารางที่ ข.21 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (P-CP LP20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	80	-	20	23.0	0.0
2	80	-	20	25.0	4.0
3	80	-	20	27.0	13.0

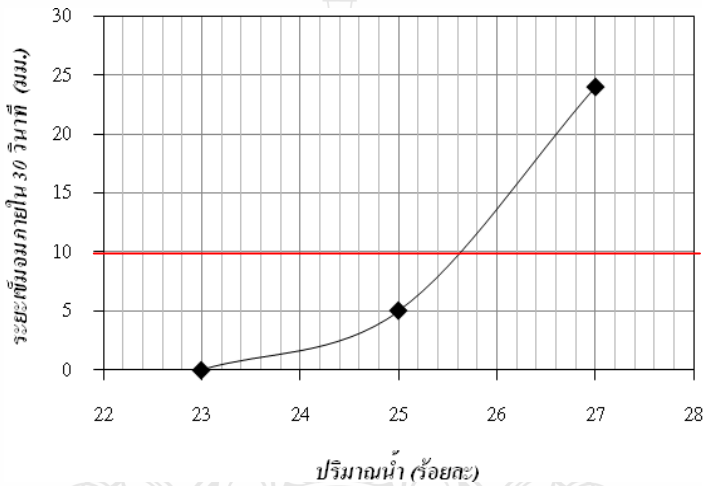


รูปที่ ข.21 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 26.30 %

ตารางที่ ข.22 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน (P-CL10)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	23.0	0.0
2	100	-	-	25.0	5.0
3	100	-	-	27.0	24.0

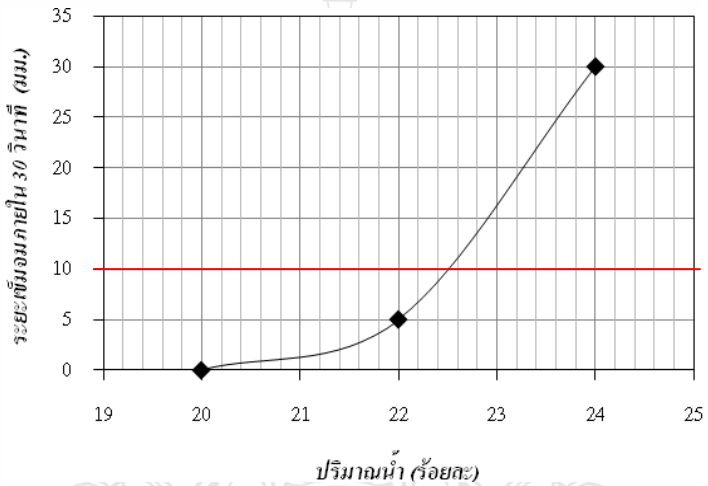


รูปที่ ข.22 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 25.60 %

ตารางที่ ข.23 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (P-CL10 FA30)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	30	-	20.0	0.0
2	70	30	-	22.0	5.0
3	70	30	-	24.0	30.0

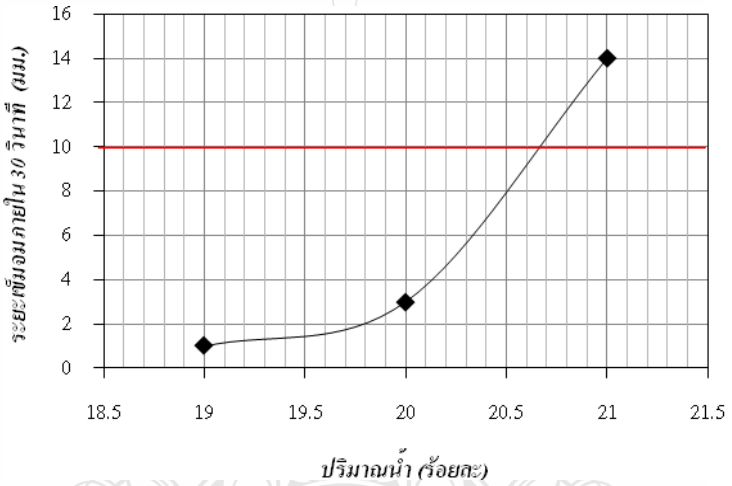


รูปที่ ข.23 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 22.48 %

ตารางที่ ข.24 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (P-CL10 FA50)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	50	-	19.0	1.0
2	50	50	-	20.0	3.0
3	50	50	-	21.0	14.0

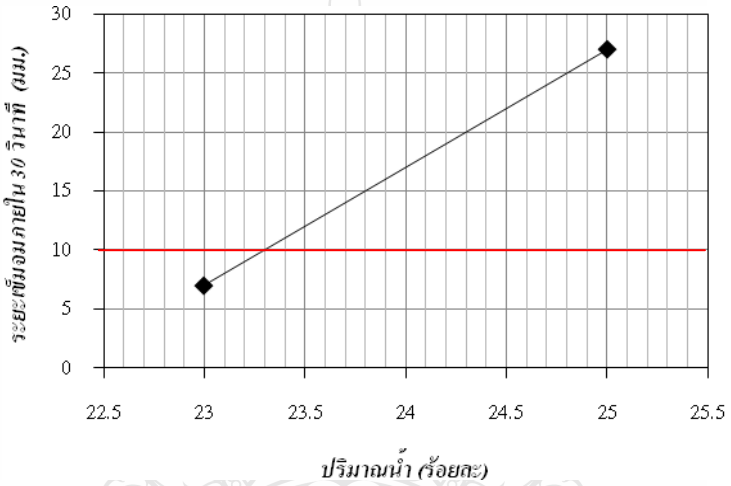


รูปที่ ข.24 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 20.65 %

ตารางที่ ข.25 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน (P-CL20)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	100	-	-	23.0	7.0
2	100	-	-	25.0	27.0

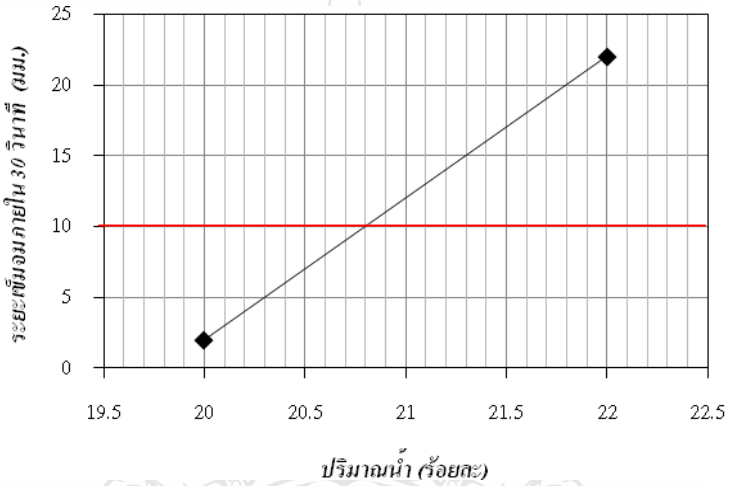


รูปที่ ข.25 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.30 %

ตารางที่ ข.26 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (P-CL20 FA30)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	70	30	-	20.0	2.0
2	70	30	-	22.0	22.0

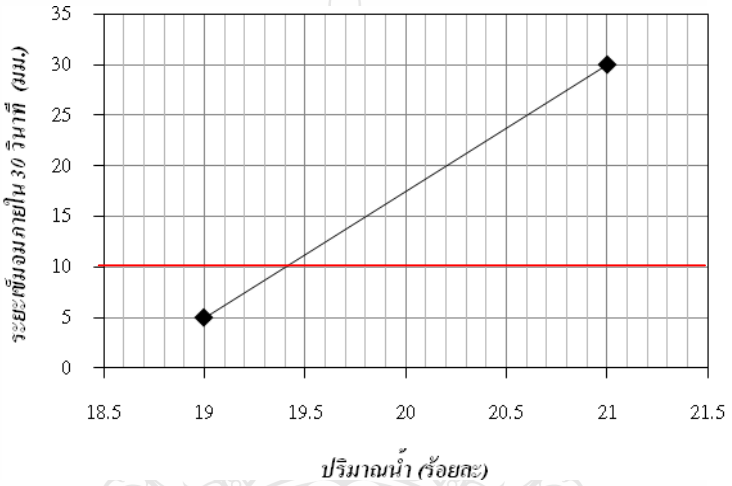


รูปที่ ข.26 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 20.80 %

ตารางที่ ข.27 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (P-CL20 FA50)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
1	50	50	-	19.0	5.0
2	50	50	-	21.0	30.0



รูปที่ ข.27 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 19.40 %

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน

P-C1		P-C1 FA30		P-C1 FA50	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	60	40	90	40
45	40	75	40	105	40
60	40	90	40	120	40
75	35	105	40	135	40
90	25	120	39	150	39
105	18	135	38	165	36
120	12	150	35	180	32
135	7	165	29	195	25
150	2	180	22	210	17
157	0	195	14	217	13
-	-	210	5	232	5
-	-	217	0	240	0
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
90.00	157.00	175.50	217.00	195.00	240.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

P-C1 LP10		P-C1 LP20		P-C1 FA20 LP10	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	30	40	30	40
45	40	45	40	45	40
60	40	60	40	60	37
75	34	75	37	75	28
90	25	90	29	90	19
105	18	105	17	105	13
120	11	120	9	120	9
135	5	135	4	135	6
150	0	150	0	150	3
-	-	-	-	165	1
-	-	-	-	172	0
-	-	-	-	-	-
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
90.00	150.00	95.00	150.00	80.00	172.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

P-C1 FA10 LP20		P-C1 FA40 LP10		P-C1 FA30 LP20	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	30	40	30	40
45	40	45	40	45	40
60	40	60	40	60	40
75	35	75	38	75	40
90	25	90	33	90	25
105	18	105	21	105	12
120	12	120	14	120	8
135	7	135	9	135	5
150	2	150	5	150	2
157	0	165	2	162	0
-	-	180	0	-	-
-	-	-	-	-	-
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
85.00	157.00	100.00	180.00	90.00	162.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

P-C5		P-C5 FA30		P-C5 FA50	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
60	40	60	40	75	40
75	40	75	40	90	40
90	39	90	40	105	40
105	37	105	38	120	40
120	34	120	30	135	40
135	30	135	25	150	39
150	26	150	20	165	37
165	20	165	15	180	33
180	14	180	10	195	20
195	8	195	6	210	10
210	2	210	2	225	2
217	0	217	0	240	0
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
152.00	217.00	135.00	217.00	190.00	240.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

P-C5 LP10		P-C5 LP20		P-C5 FA20 LP10	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
45	40	45	40	75	40
60	40	60	40	90	40
75	40	75	40	105	40
90	40	90	40	120	40
105	40	105	40	135	40
120	39	120	39	150	38.5
135	35	135	35	165	33.5
150	28	150	20	180	20
165	20	165	11	195	10
180	11	180	5	210	4
195	2	195	1	225	1
200	0	202	0	232	0
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
155.00	200.00	145.50	202.00	175.00	232.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

P-C5 FA10 LP20		P-C5 FA40 LP10		P-C5 FA30 LP20	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
60	40	75	40	75	40
75	40	90	40	90	40
90	40	105	40	105	40
105	40	120	40	120	40
120	40	135	37	135	37
135	34	150	28	150	20
150	21	165	20	165	14
165	12	180	14	180	10
180	7	195	8	195	7
195	4	210	4	210	4
210	1	225	1	225	1
217	0	242	0	232	0
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
145.00	217.00	155.00	242.00	145.00	232.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

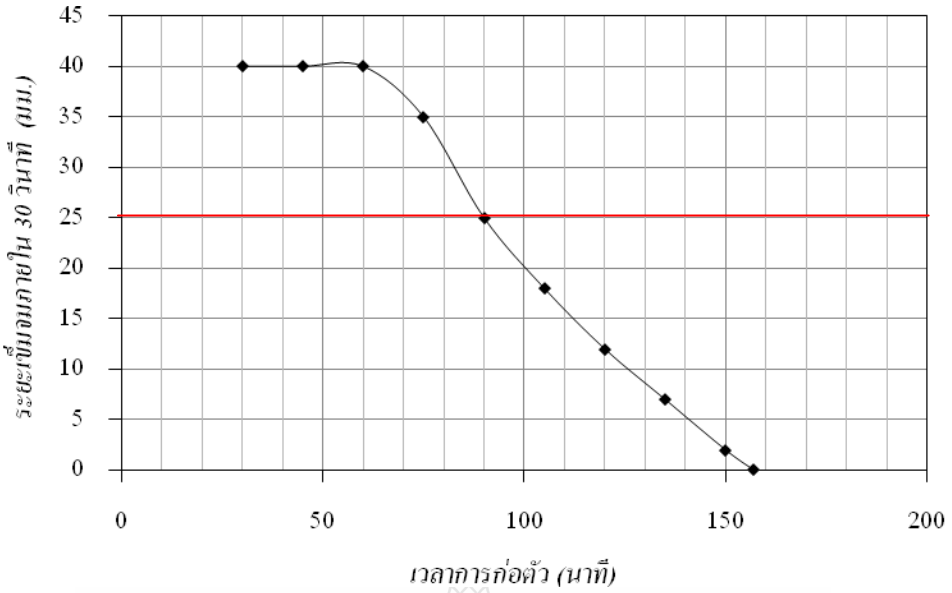
P-CP		P-CP LP10		P-CP LP20	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
90	40	90	40	75	40
105	40	105	40	90	40
120	40	120	40	105	40
135	39	135	39	120	40
150	38	150	38	135	39
165	36	165	36	150	37
180	31	180	31	165	33
195	19	195	19	180	25
210	11	210	11	195	16
225	6	225	6	210	10
240	3	240	3	225	5
265	0	270	0	247	0
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
188.00	265.00	187.00	270.00	180.00	247.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

P-CL10		P-CL10 FA30		P-CL10 FA50	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	90	40	135	40
45	40	105	40	150	40
60	40	120	40	165	40
75	40	135	39	180	39
90	40	150	38	195	38
105	37	165	36	210	37
120	30	180	32	225	36
135	19	195	25	240	33
150	12	210	15	255	26
165	6	225	8	270	12
180	0	240	4	285	3
-	-	255	0	300	0
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
127.00	180.00	195.00	255.00	262.00	300.00

ตารางที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

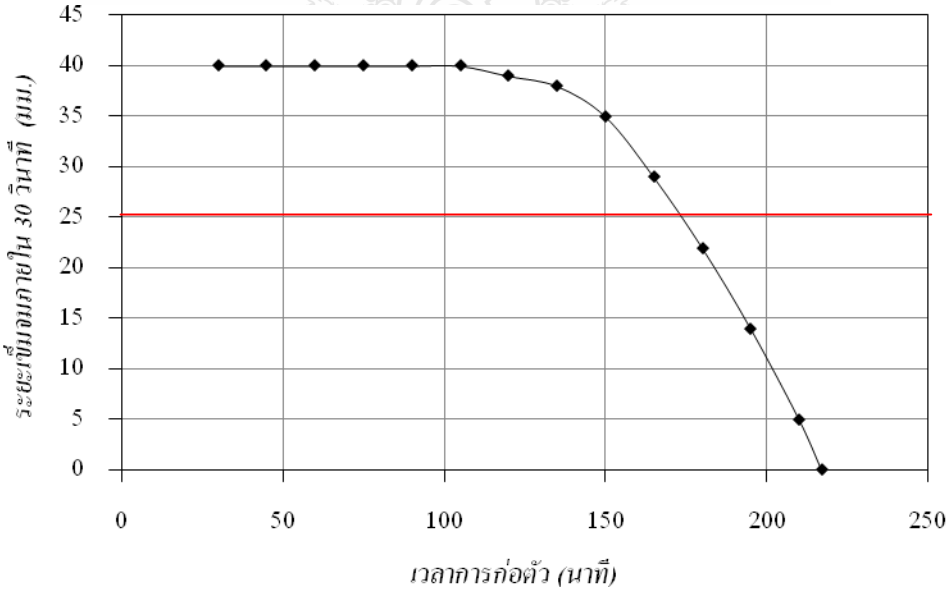
P-CL20		P-CL20 FA30		P-CL20 FA50	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30	40	75	40	75	40
45	40	90	40	90	40
60	40	105	40	105	40
75	40	120	40	120	40
90	40	135	39	135	40
105	37	150	37	150	40
120	25	165	33	165	39
135	16	180	25	180	36
150	9	195	16	195	32
165	3	210	9	210	25
172	0	225	3	225	9
-	-	232	0	247	0
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)	การก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	การก่อตัวสุดท้าย (นาที)
120.00	172.00	180.00	232.00	210.00	247.00



รูปที่ ข.28 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (P-C1)

การก่อตัวเริ่มต้น = 90.00 นาที

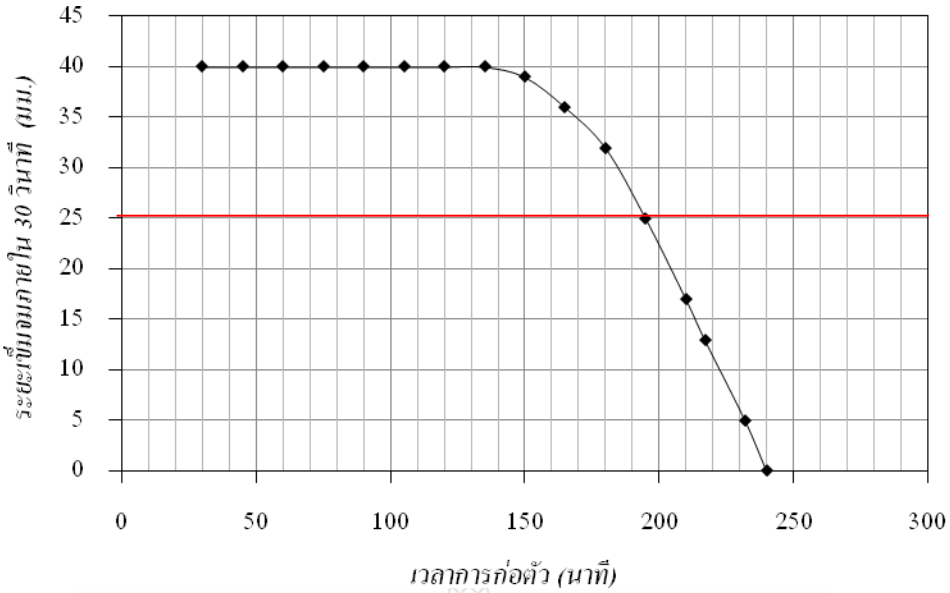
การก่อตัวสุดท้าย = 157.00 นาที



รูปที่ ข.29 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (P-C1 FA30)

การก่อตัวเริ่มต้น = 175.00 นาที

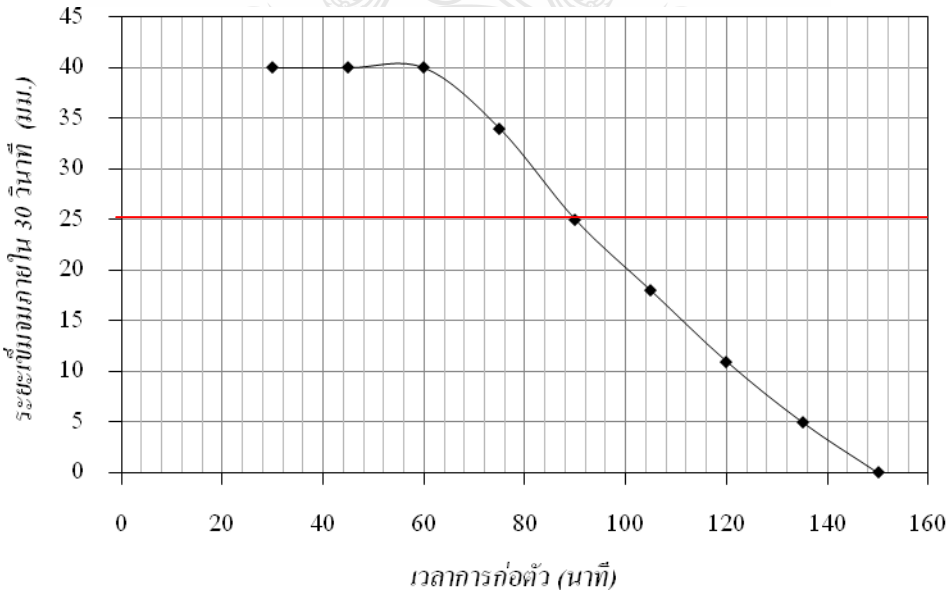
การก่อตัวสุดท้าย = 217.00 นาที



รูปที่ ข.30 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (P-C1 FA50)

การก่อตัวเริ่มต้น = 195.00 นาที

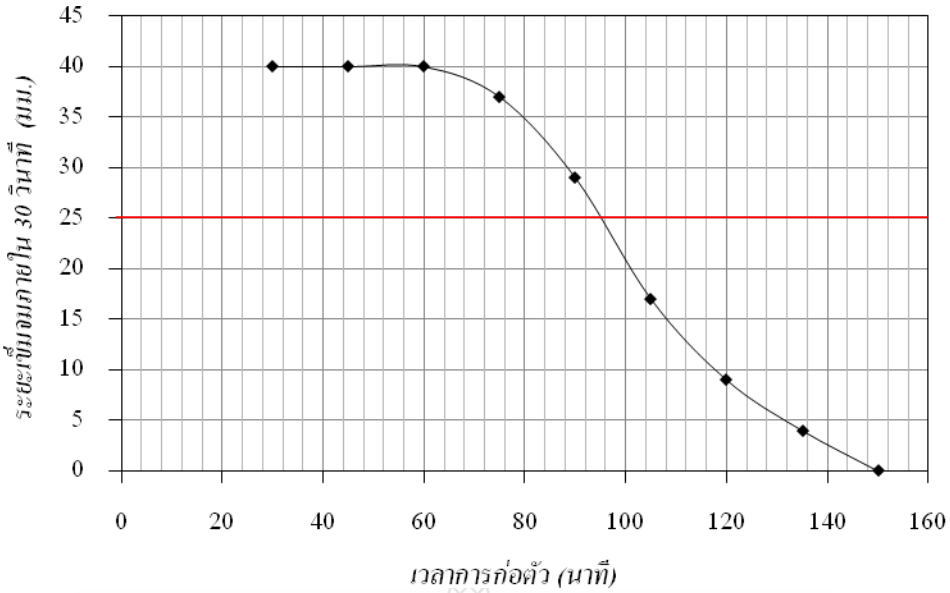
การก่อตัวสุดท้าย = 240.00 นาที



รูปที่ ข.31 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C1 LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 90.00 นาที

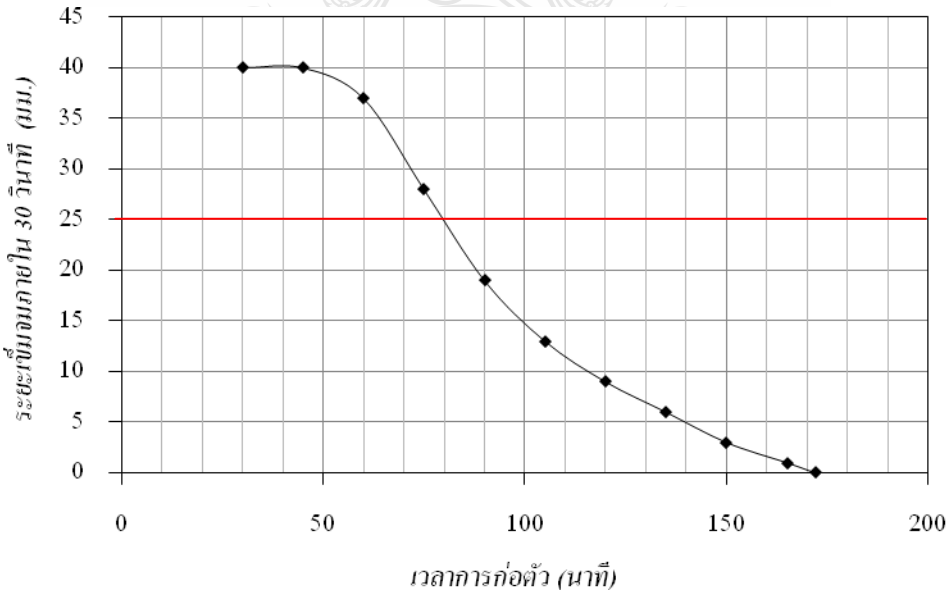
การก่อตัวสุดท้าย = 150.00 นาที



รูปที่ ข.32 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C1 LP20)

การก่อตัวเริ่มต้น = 95.00 นาที

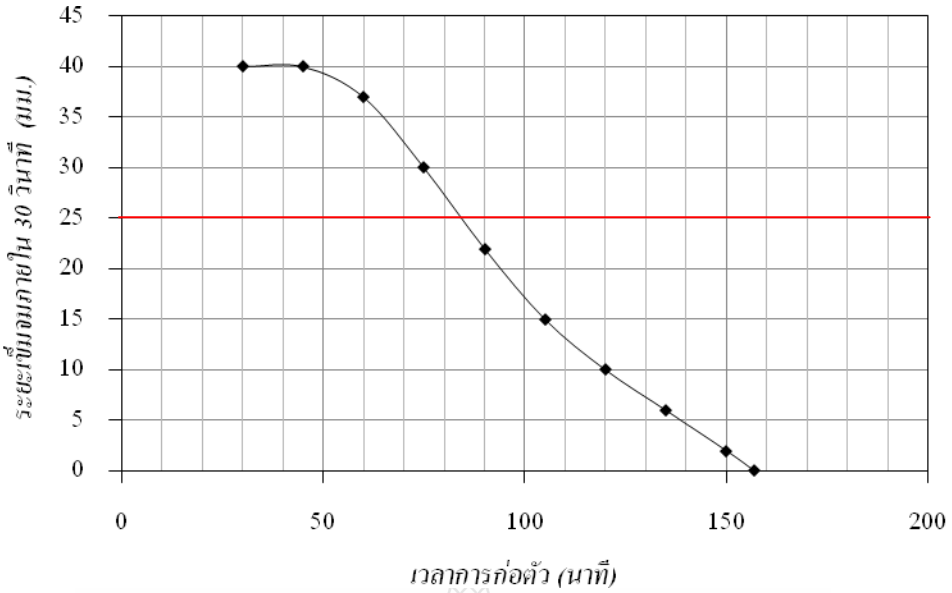
การก่อตัวสุดท้าย = 150.00 นาที



รูปที่ ข.33 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C1 FA20 LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 80.00 นาที

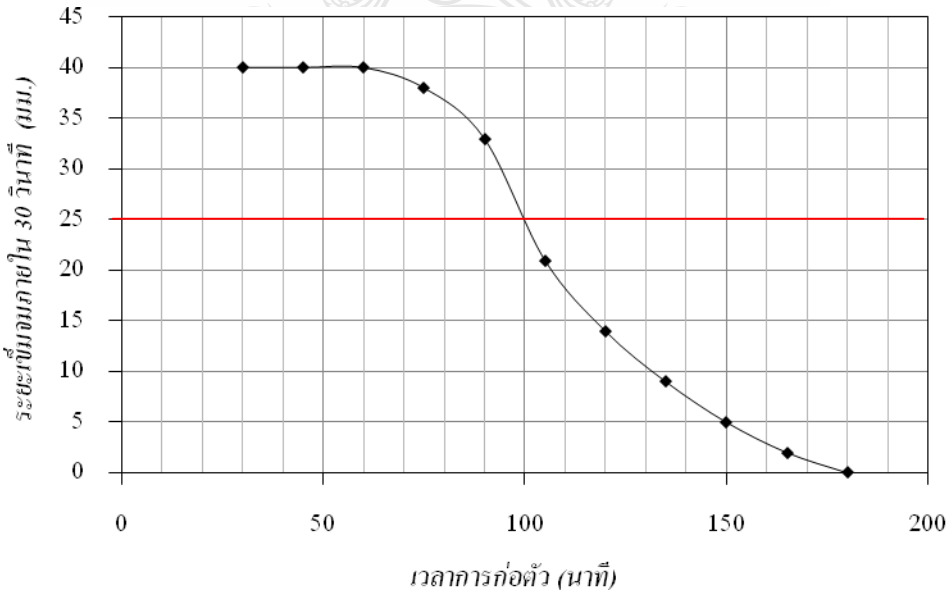
การก่อตัวสุดท้าย = 172.00 นาที



รูปที่ ข.34 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C1 FA10 LP20)

การก่อตัวเริ่มต้น = 85.00 นาที

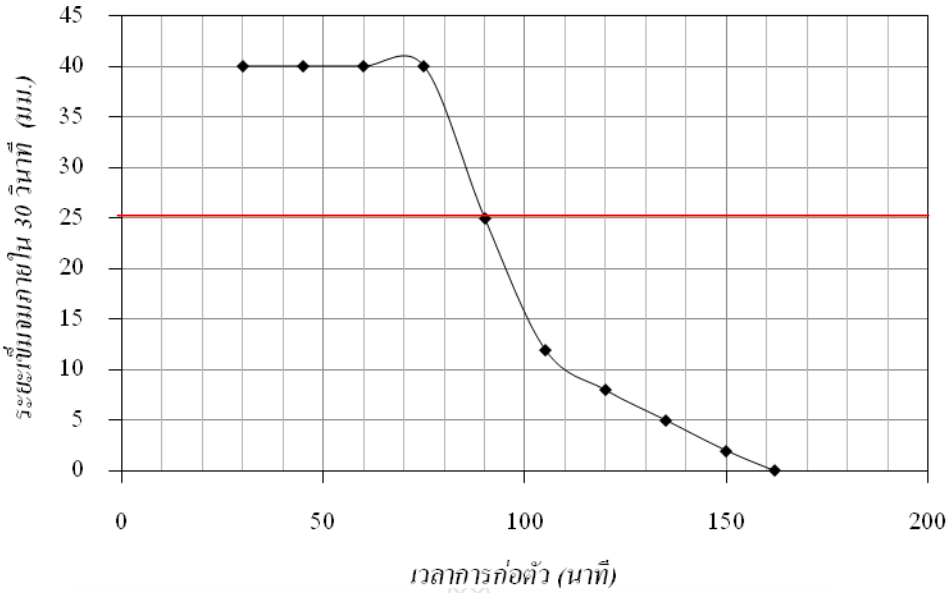
การก่อตัวสุดท้าย = 157.00 นาที



รูปที่ ข.35 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C1 FA40 LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 100.00 นาที

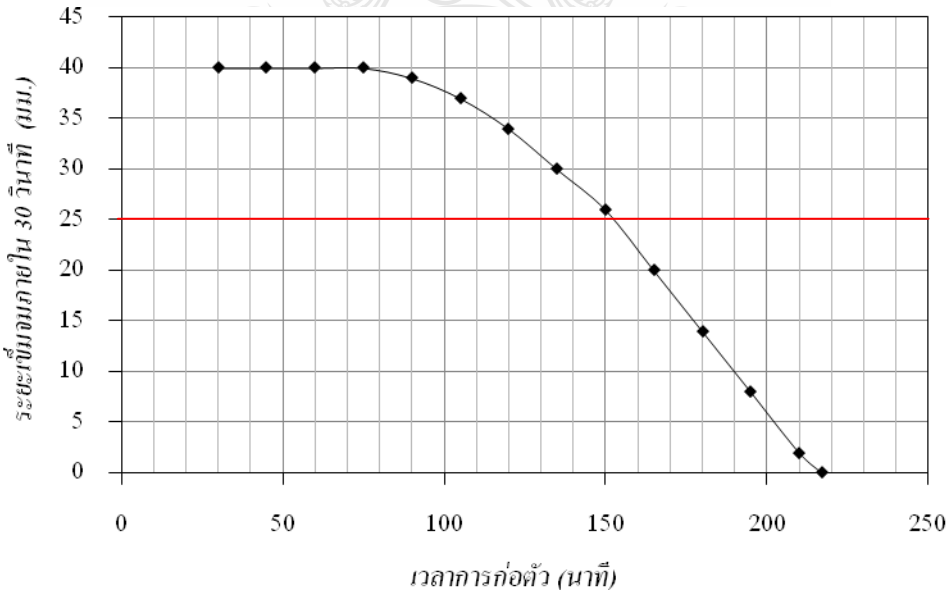
การก่อตัวสุดท้าย = 180.00 นาที



รูปที่ ข.36 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C1 FA30 LP20)

การก่อตัวเริ่มต้น = 90.00 นาที

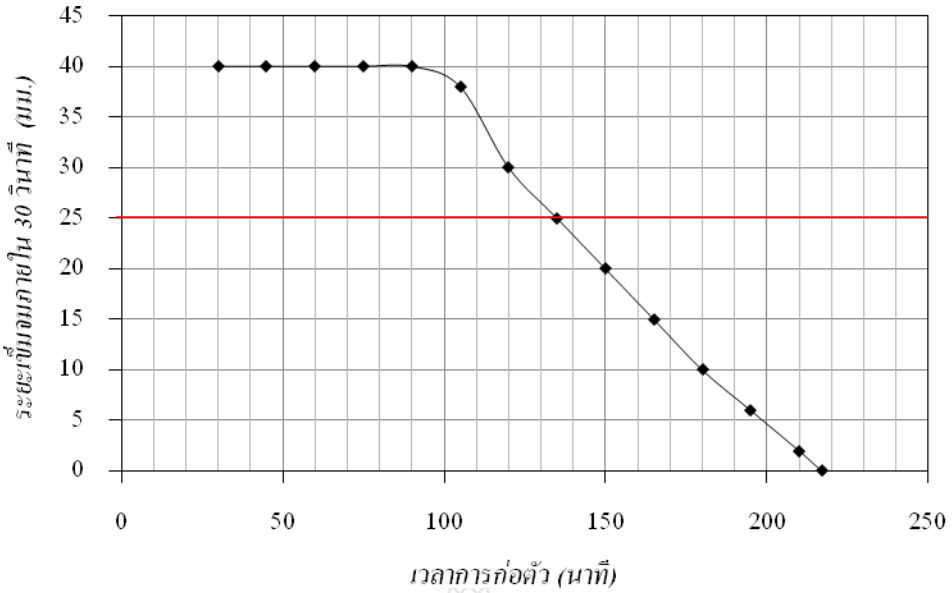
การก่อตัวสุดท้าย = 162.00 นาที



รูปที่ ข.37 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (P-C5)

การก่อตัวเริ่มต้น = 152.00 นาที

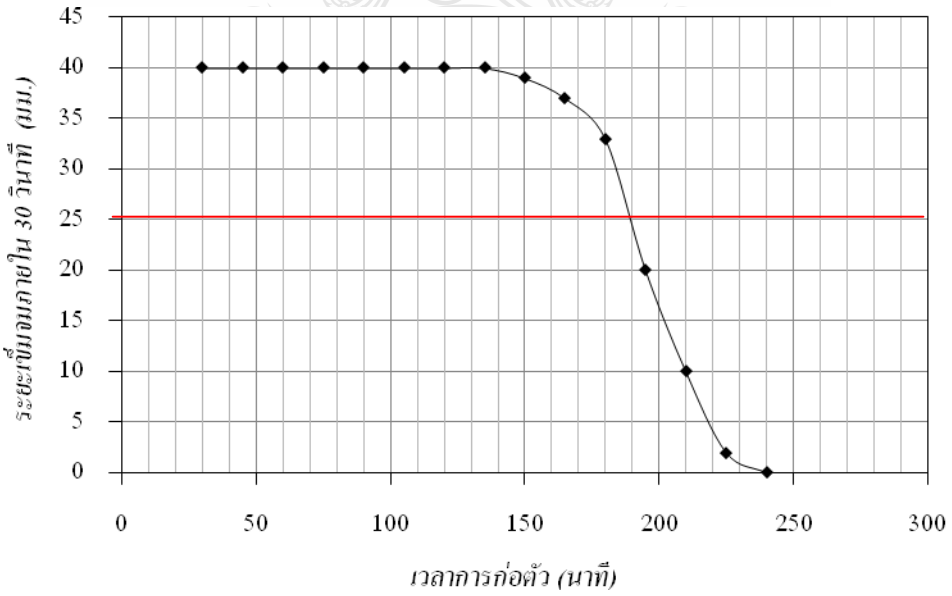
การก่อตัวสุดท้าย = 217.00 นาที



รูปที่ ข.38 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (P-C5 FA30)

การก่อตัวเริ่มต้น = 135.00 นาที

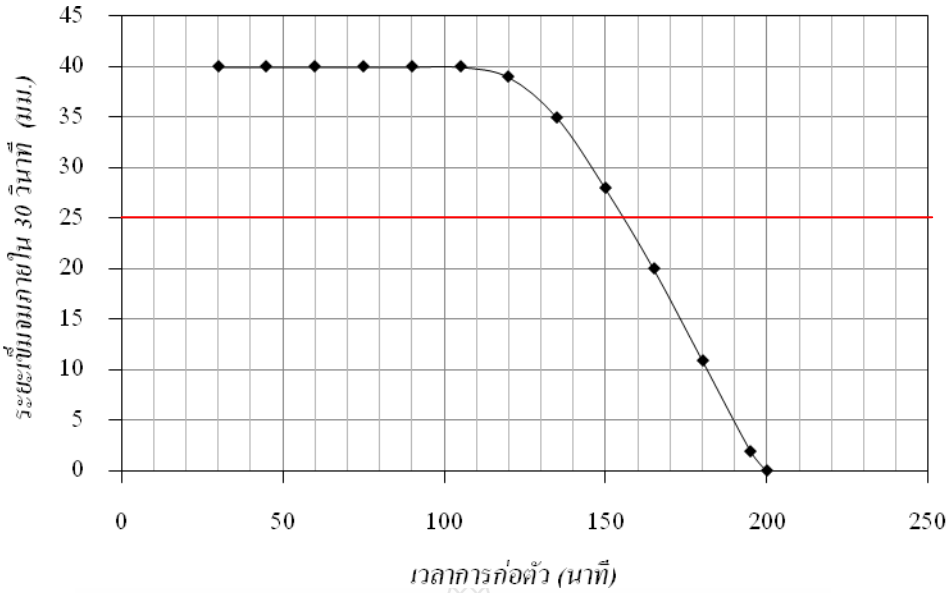
การก่อตัวสุดท้าย = 217.00 นาที



รูปที่ ข.39 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (P-C5 FA50)

การก่อตัวเริ่มต้น = 190.00 นาที

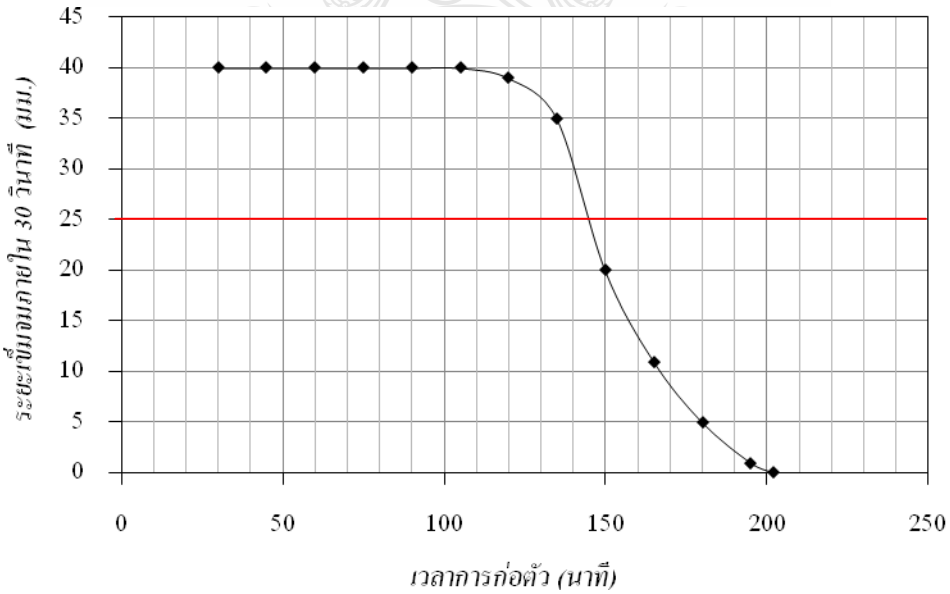
การก่อตัวสุดท้าย = 240.00 นาที



รูปที่ ข.40 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C5 LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 155.00 นาที

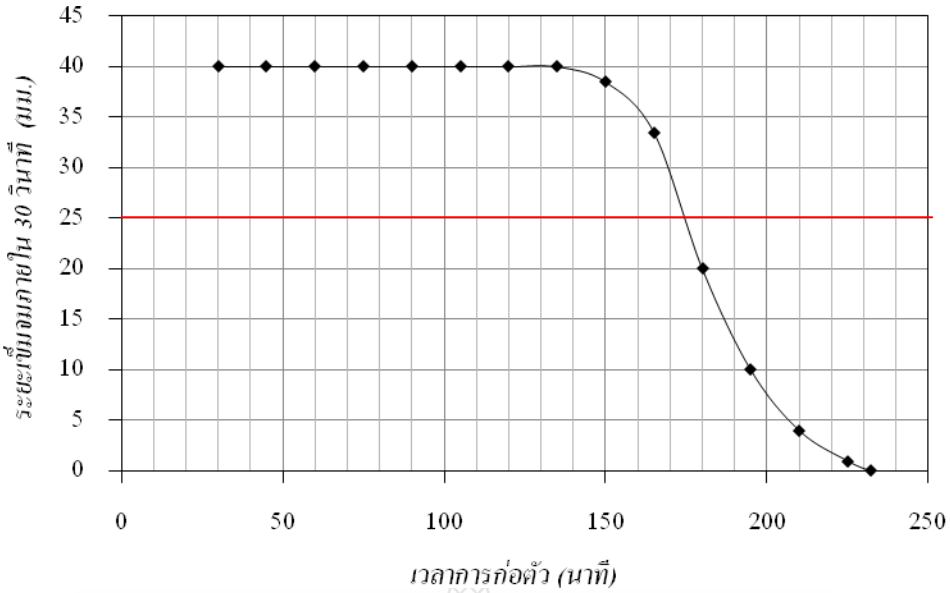
การก่อตัวสุดท้าย = 200.00 นาที



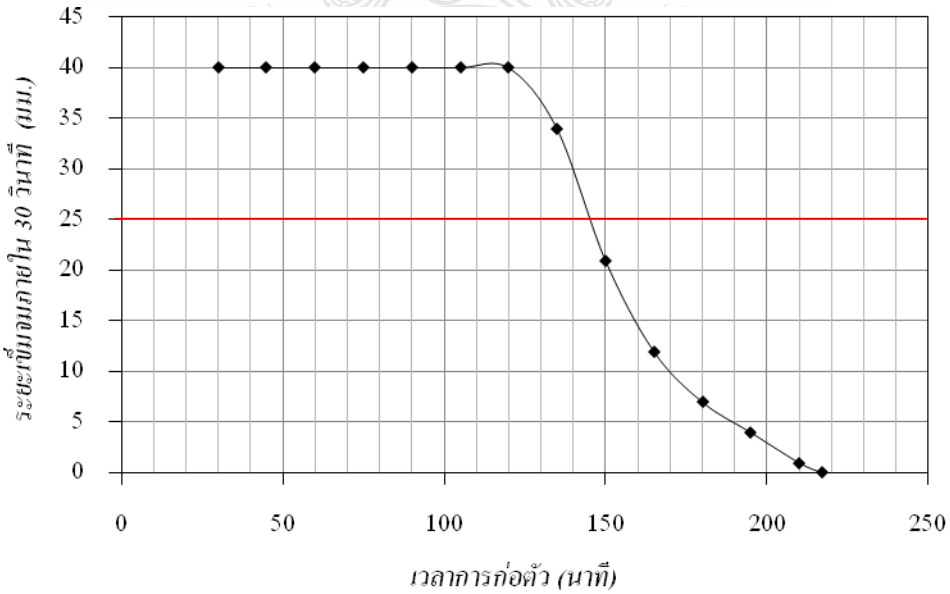
รูปที่ ข.41 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C5 LP20)

การก่อตัวเริ่มต้น = 145.00 นาที

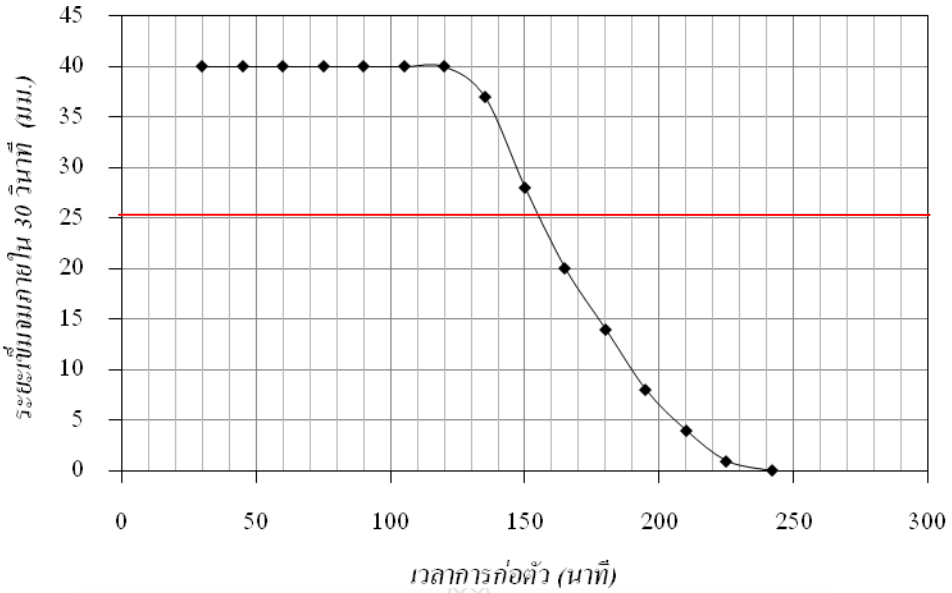
การก่อตัวสุดท้าย = 202.00 นาที



รูปที่ ข.42 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C5 FA20 LP10)
การก่อตัวเริ่มต้น = 175.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 232.00 นาที



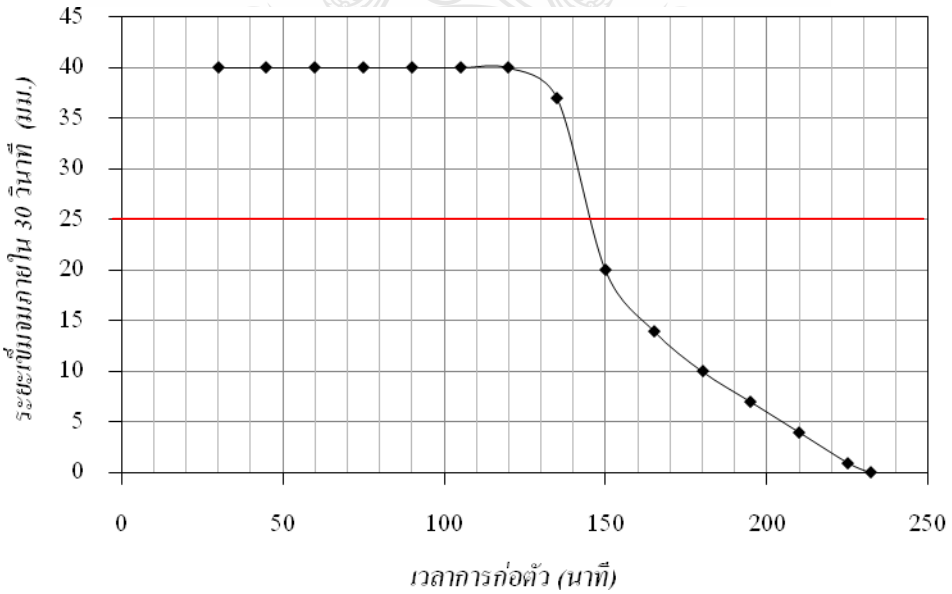
รูปที่ ข.44 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10
ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C5 FA10 LP20)
การก่อตัวเริ่มต้น = 145.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 217.00 นาที



รูปที่ ข.45 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (P-C5 FA40 LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 155.00 นาที

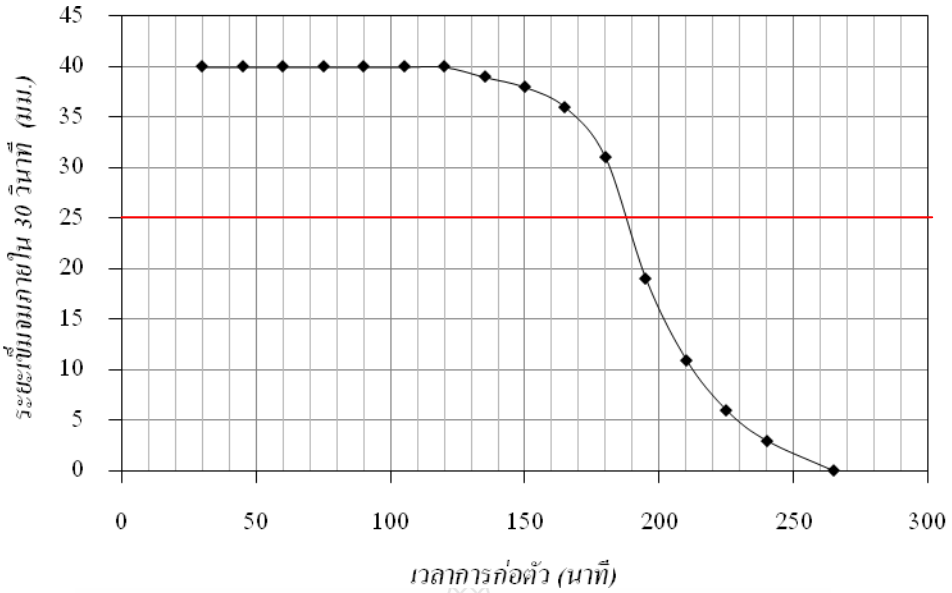
การก่อตัวสุดท้าย = 242.00 นาที



รูปที่ ข.46 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (P-C5 FA30 LP20)

การก่อตัวเริ่มต้น = 145.00 นาที

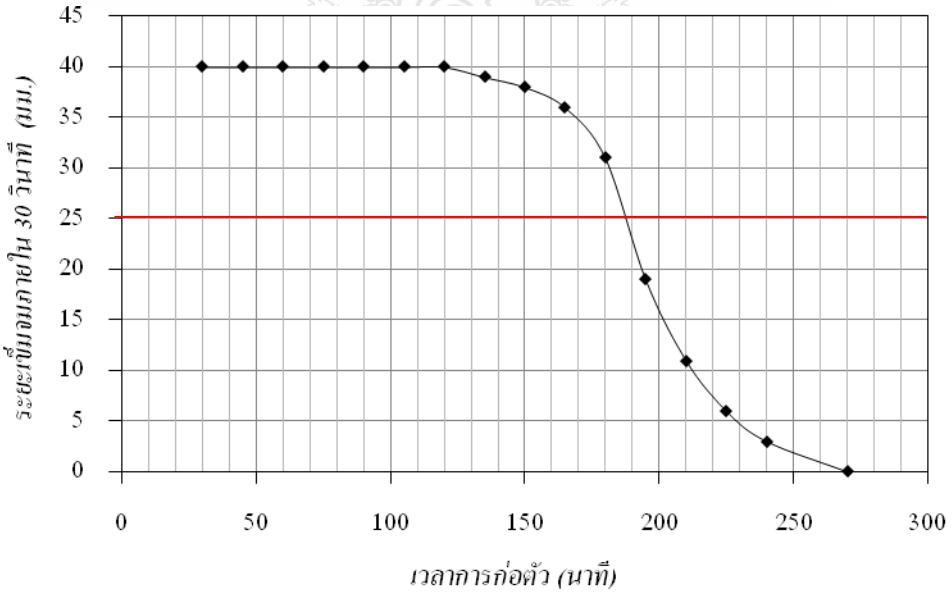
การก่อตัวสุดท้าย = 232.00 นาที



รูปที่ ข.47 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลานล้วน (P-CP)

การก่อตัวเริ่มต้น = 188.00 นาที

การก่อตัวสุดท้าย = 256.00 นาที

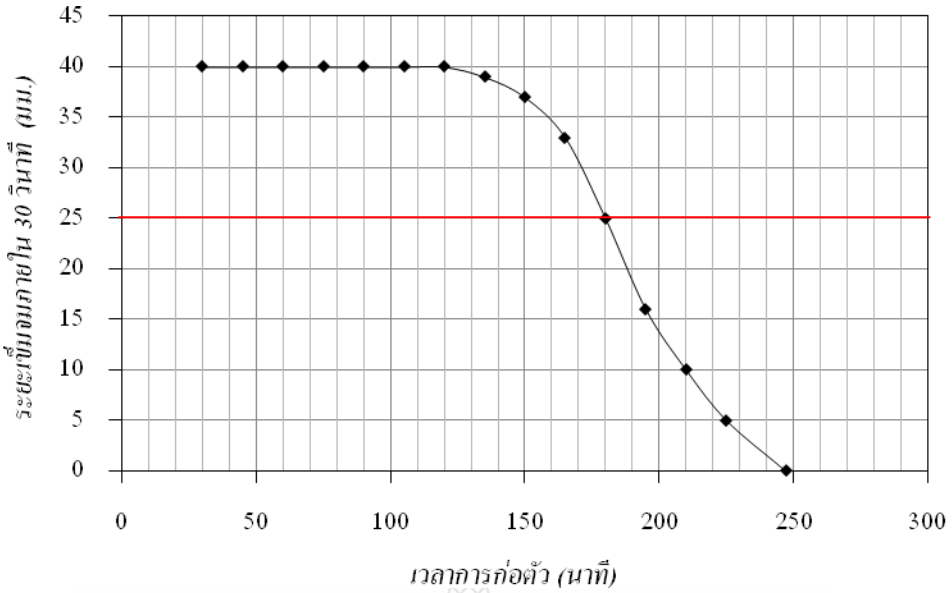


รูปที่ ข.48 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน

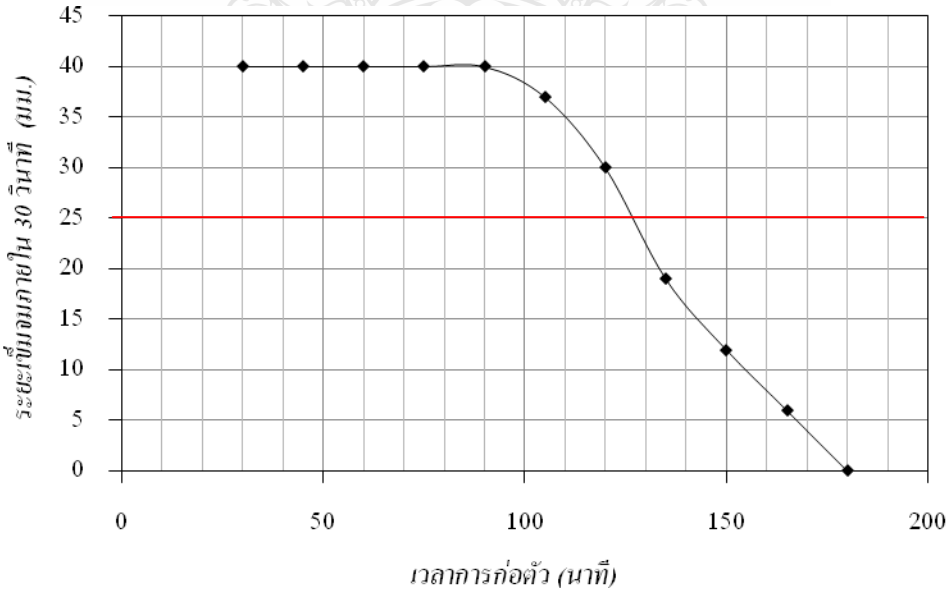
แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (P-CP LP10)

การก่อตัวเริ่มต้น = 187.00 นาที

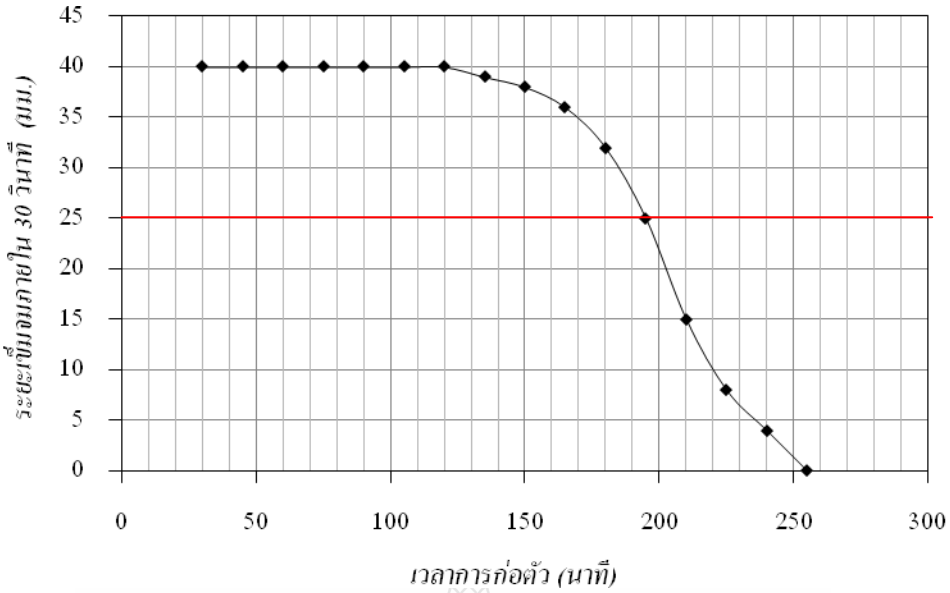
การก่อตัวสุดท้าย = 270.00 นาที



รูปที่ ข.49 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน
แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 (P-CP LP20)
การก่อตัวเริ่มต้น = 180.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 247.00 นาที



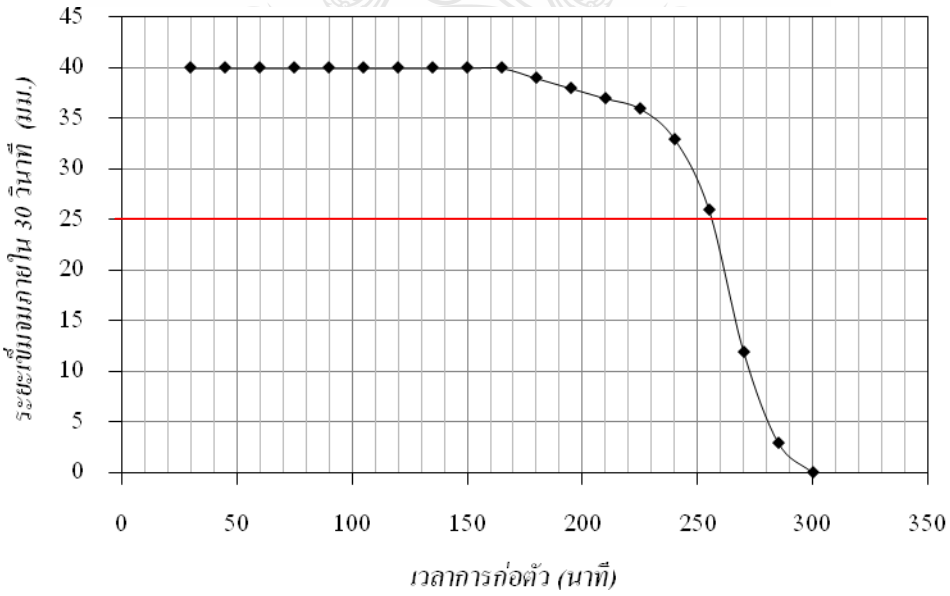
รูปที่ ข.50 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 ล้วน (P-CL10)
การก่อตัวเริ่มต้น = 127.00 นาที
การก่อตัวสุดท้าย = 180.00 นาที



รูปที่ ข.51 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (P-CL10 FA30)

การก่อตัวเริ่มต้น = 195.00 นาที

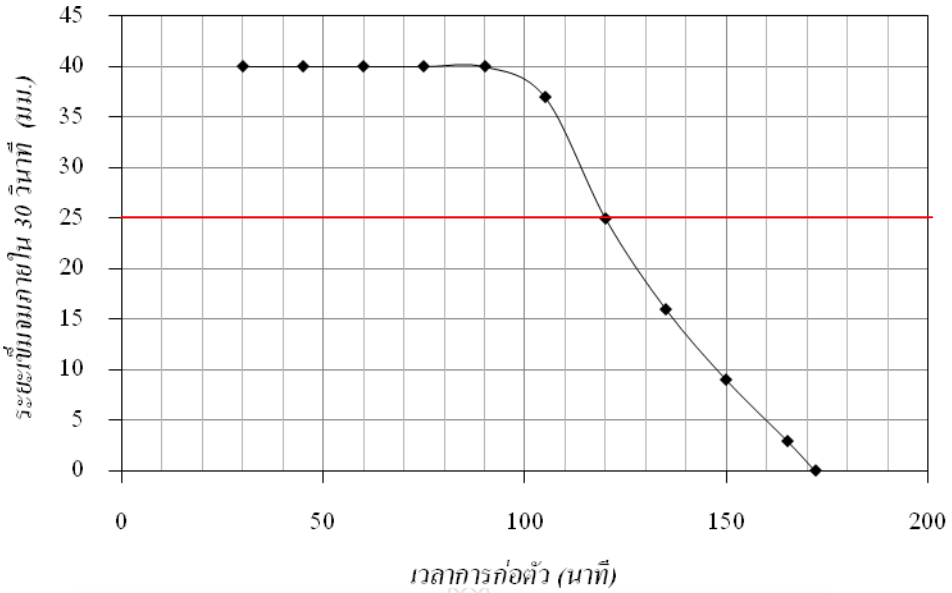
การก่อตัวสุดท้าย = 255.00 นาที



รูปที่ ข.52 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (P-CL10 FA50)

การก่อตัวเริ่มต้น = 262.00 นาที

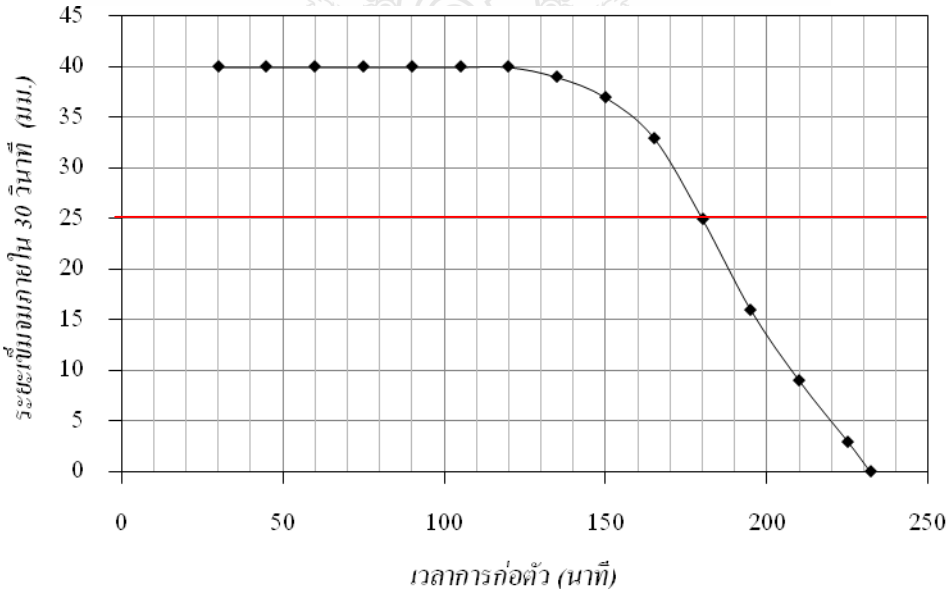
การก่อตัวสุดท้าย = 300.00 นาที



รูปที่ ข.53 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 ล้วน (P-CL20)

การก่อตัวเริ่มต้น = 120.00 นาที

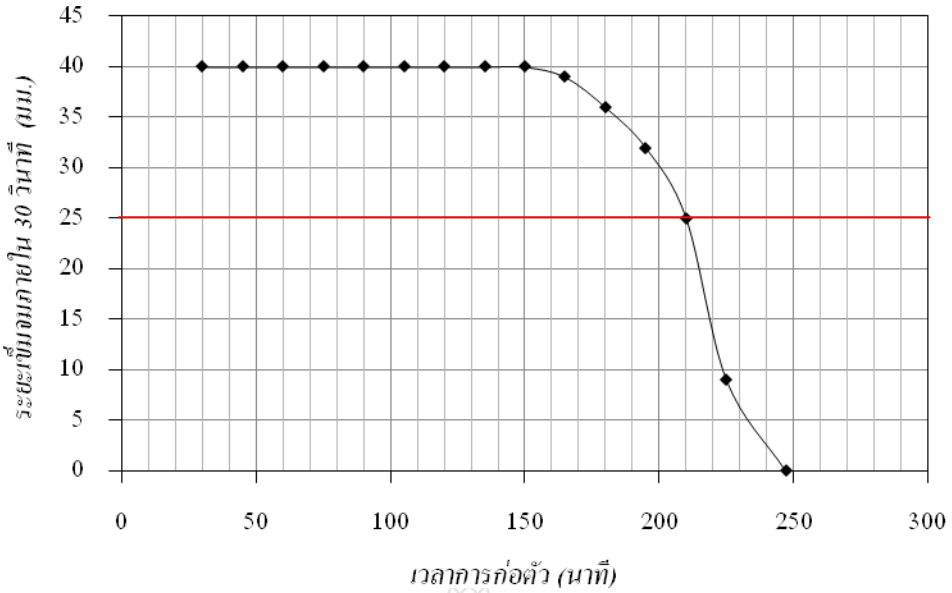
การก่อตัวสุดท้าย = 172.00 นาที



รูปที่ ข.54 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (P-CL20 FA30)

การก่อตัวเริ่มต้น = 180.00 นาที

การก่อตัวสุดท้าย = 232.00 นาที



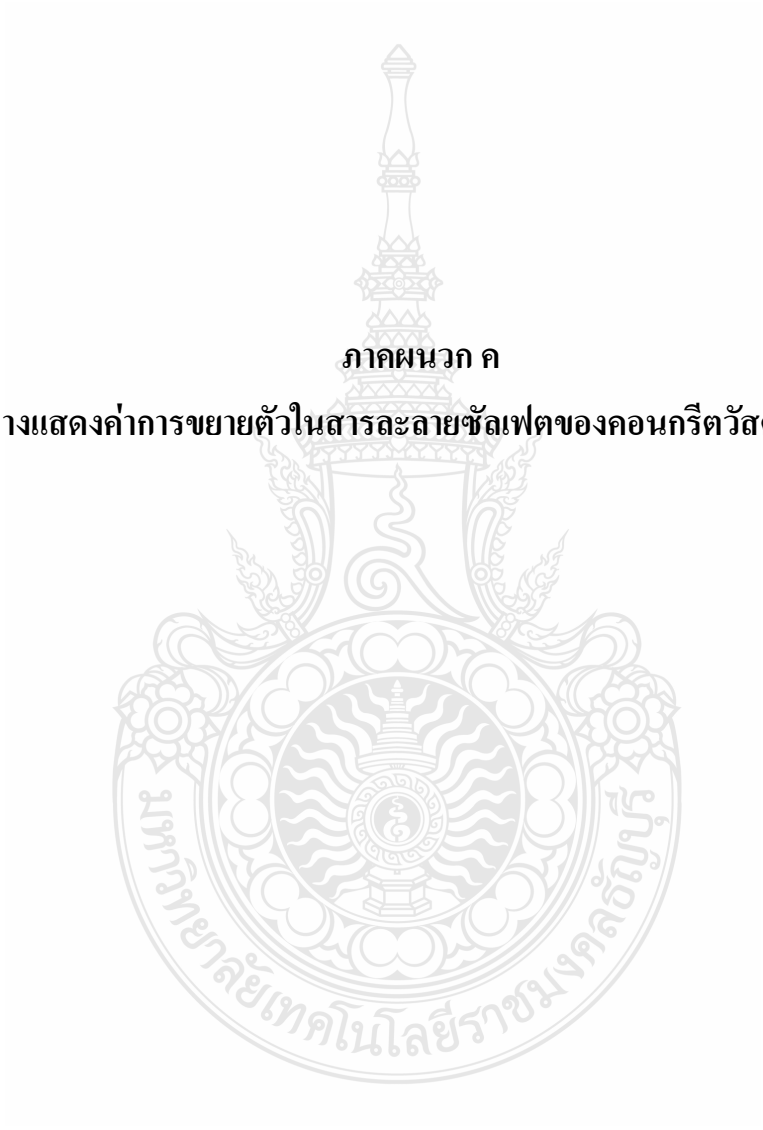
รูปที่ ข.55 เวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 (P-CL20 FA50)

การก่อตัวเริ่มต้น = 210.00 นาที

การก่อตัวสุดท้าย = 247.00 นาที

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน



ตารางที่ ค.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)									
	90	180	270	330	390	450	510	570	630	690
C-C1-0.55 (NS)	0.001	0.000	0.001	0.001	0.005	0.008	0.011	0.011	0.013	0.018
C-C1 FA30-0.55 (NS)	-0.002	-0.001	-0.004	-0.004	-0.004	-0.003	-0.001	0.004	0.006	0.008
C-C1 FA50-0.55 (NS)	-0.002	-0.002	-0.003	-0.002	0.001	0.002	0.003	0.005	0.006	0.007
C-C1 LP10-0.55 (NS)	-0.001	0.000	-0.001	0.000	0.003	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016
C-C1 LP20-0.55 (NS)	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.002	0.002	0.002	0.007	0.017
C-C1 FA20 LP10-0.55 (NS)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005	0.010
C-C1 FA10 LP20-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.002	0.001	0.002	0.005	0.007	0.012	0.019	0.035
C-C1 FA40 LP10-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
C-C1 FA30 LP20-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003

ตารางที่ ค.2 ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน (ต่อ)

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)									
	90	180	270	330	390	450	510	570	630	690
C-C5-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.003	0.008	0.012
C-C5 FA30-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008
C-C5 FA50-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.005	0.008
C-C5 LP10-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003
C-C5 LP20-0.55 (NS)	0.002	0.003	0.003	0.002	0.004	0.000	0.002	0.002	0.004	0.013
C-C5 FA20 LP10-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.009
C-C5 FA10 LP20-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.012
C-C5 FA40 LP10-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.008
C-C5 FA30 LP20-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ค.3 ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน (ต่อ)

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)									
	90	180	270	330	390	450	510	570	630	690
C-CP-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.003	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004	0.006	0.008
C-CP LP10-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.005	0.005	0.004	0.004
C-CP LP20-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.008	0.010
C-CL10-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.004	0.006	0.007	0.008	0.016	0.033	0.054
C-CL10 FA30-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.006
C-CL10 FA50-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
C-CL20-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	0.001	0.001	0.003	0.008	0.015
C-CL20 FA30-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	0.002	0.002	0.002	0.005	0.010
C-CL20 FA50-0.55 (NS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.006

ตารางที่ค.4 ค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)									
	90	180	270	330	390	450	510	570	630	690
C-C1-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.010	0.017
C-C1 FA30-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.007
C-C1 FA50-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.005	0.009
C-C1 LP10-0.55 (MS)	0.000	-0.002	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	0.001	0.001	0.007	0.016
C-C1 LP20-0.55 (MS)	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	-0.002	-0.002	-0.002	0.005	0.014
C-C1 FA20 LP10-0.55 (MS)	0.000	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.006	0.006	0.006	0.015
C-C1 FA10 LP20-0.55 (MS)	0.001	0.005	0.006	0.007	0.008	0.007	0.009	0.012	0.022	0.027
C-C1 FA40 LP10-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.002	0.000	0.005
C-C1 FA30 LP20-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.004	0.001

ตารางที่ ค.5 ค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน (ต่อ)

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)									
	90	180	270	330	390	450	510	570	630	690
C-C5-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.010	0.017
C-C5 FA30-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.007
C-C5 FA50-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.005	0.009
C-C5 LP10-0.55 (MS)	0.000	-0.002	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	0.001	0.001	0.007	0.016
C-C5 LP20-0.55 (MS)	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	-0.002	-0.002	-0.002	0.005	0.014
C-C5 FA20 LP10-0.55 (MS)	0.000	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.006	0.006	0.006	0.015
C-C5 FA10 LP20-0.55 (MS)	0.001	0.005	0.006	0.007	0.008	0.007	0.009	0.012	0.022	0.027
C-C5 FA40 LP10-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.002	0.000	0.005
C-C5 FA30 LP20-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.004	0.001

ตารางที่ ค.6 ค่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน (ต่อ)

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)									
	90	180	270	330	390	450	510	570	630	690
C-CP-0.55 (MS)	0.000	0.000	-0.004	-0.002	-0.001	0.001	-0.001	0.001	0.004	0.009
C-CP LP10-0.55 (MS)	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	0.002	0.002	0.004	0.012
C-CP LP20-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.001	0.004	0.005	0.005	0.007	0.007	0.008	0.020
C-CL10-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.008	0.011	0.020
C-CL10 FA30-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.002	0.004
C-CL10 FA50-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.006
C-CL20-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.005	0.016
C-CL20 FA30-0.55 (MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.001	0.001	-0.001	0.002	0.011
C-CL20 FA50-0.55 (MS)	0.004	0.004	0.004	0.006	0.006	0.008	0.008	0.008	0.010	0.017

ตารางที่ ค.7 ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)									
	90	180	270	330	390	450	510	570	630	690
C-C1-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.002	0.012	0.023
C-C1 FA30-0.55 (NS:MS)	-0.001	0.002	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	0.005	0.005	0.011	0.018
C-C1 FA50-0.55 (NS:MS)	0.001	0.004	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.011
C-C1 LP10-0.55 (NS:MS)	0.000	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.002	0.002	0.005	0.017
C-C1 LP20-0.55 (NS:MS)	0.000	-0.001	-0.003	-0.003	-0.003	0.001	0.001	0.001	0.013	0.032
C-C1 FA20 LP10-0.55 (NS:MS)	0.000	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	0.000	0.000	0.002	0.010
C-C1 FA10 LP20-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.006	0.012	0.028
C-C1 FA40 LP10-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.005	0.007	0.009
C-C1 FA30 LP20-0.55 (NS:MS)	0.000	0.001	0.004	0.004	0.004	0.004	0.002	0.002	0.008	0.012

ตารางที่ ค.8 ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน (ต่อ)

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)									
	90	180	270	330	390	450	510	570	630	690
C-C5-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.004	0.005	0.005	0.005	0.006	0.007	0.012
C-C5 FA30-0.55 (NS:MS)	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	0.006	0.009
C-C5 FA50-0.55 (NS:MS)	-0.005	-0.005	-0.006	-0.001	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.001	0.002
C-C5 LP10-0.55 (NS:MS)	0.000	0.005	0.004	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000	0.002	0.014
C-C5 LP20-0.55 (NS:MS)	0.004	0.004	0.004	0.001	0.003	0.002	0.006	0.006	0.007	0.014
C-C5 FA20 LP10-0.55 (NS:MS)	0.003	0.002	0.006	0.002	0.005	0.002	0.008	0.008	0.010	0.013
C-C5 FA10 LP20-0.55 (NS:MS)	0.004	0.005	0.005	0.004	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004	0.011
C-C5 FA40 LP10-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.005
C-C5 FA30 LP20-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.007

ตารางที่ ค.9 ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน (ต่อ)

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)									
	90	180	270	330	390	450	510	570	630	690
C-CP-0.55 (NS:MS)	0.000	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.004	-0.005	-0.004	0.001	0.007
C-CP LP10-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.007	0.005	0.009
C-CP LP20-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	-0.003	-0.002	-0.002	-0.001	0.007
C-CL10-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	0.005	0.007	0.014
C-CL10 FA30-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.003	0.005
C-CL10 FA50-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.003	-0.004	-0.004	-0.003	-0.002	0.002
C-CL20-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.004	0.006	0.012	0.034
C-CL20 FA30-0.55 (NS:MS)	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.003	0.003	0.003	0.005	0.008	0.010
C-CL20 FA50-0.55 (NS:MS)	0.002	0.002	0.002	-0.002	-0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.006

ภาคผนวก ง
ตารางแสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน

ตารางที่ ง.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายซัลเฟต 800 วัน		
	โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)
C-C1-0.55	-0.06	3.12	2.61
C-C1 FA30-0.55	-0.29	3.55	1.19
C-C1 FA50-0.55	-0.18	5.35	1.46
C-C1 LP10-0.55	-0.40	0.94	0.91
C-C1 LP20-0.55	0.34	1.06	1.02
C-C1 FA20 LP10-0.55	-0.08	0.98	0.83
C-C1 FA10 LP20-0.55	-0.03	0.93	0.75
C-C1 FA40 LP10-0.55	-0.05	2.57	1.53
C-C1 FA30 LP20-0.55	-0.03	1.35	0.56

ตารางที่ ง.2 ค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน (ต่อ)

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายซัลเฟต 800 วัน		
	โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)
C-C5-0.55	-0.17	1.48	1.02
C-C5 FA30-0.55	-0.30	1.62	0.34
C-C5 FA50-0.55	-0.13	2.54	0.66
C-C5 LP10-0.55	0.38	0.81	0.79
C-C5 LP20-0.55	0.36	1.11	0.61
C-C5 FA20 LP10-0.55	-0.31	0.84	0.60
C-C5 FA10 LP20-0.55	-0.19	0.69	0.38
C-C5 FA40 LP10-0.55	-0.10	1.98	0.81
C-C5 FA30 LP20-0.55	-0.57	1.35	0.49

ตารางที่ ง.3 ค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตวัสดุประสาน (ต่อ)

คอนกรีต	อายุแช่ในสารละลายซัลเฟต 800 วัน		
	โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	โซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต (3:1)
C-CP-0.55	-0.15	3.46	1.51
C-CP LP10-0.55	0.51	1.07	0.55
C-CP LP20-0.55	-0.72	1.70	0.48
C-CL10-0.55	0.01	0.99	0.88
C-CL10 FA30-0.55	-0.33	2.62	0.36
C-CL10 FA50-0.55	-0.07	6.64	1.03
C-CL20-0.55	-0.02	0.85	0.76
C-CL20 FA30-0.55	-0.31	1.18	0.23
C-CL20 FA50-0.55	0.15	7.36	0.78

ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

คุณสมบัติด้านซีเมนต์และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน
Cementitious Properties and Expansion in Sodium Sulfate Solution of Concrete with Fly Ash and Limestone Powder

ยงยุทธ วัฒนกุล[1] ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2] อิทธิพร ศิริสวัสดิ์[3] และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล[4]

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัวของเพสต์ การยุบตัว และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต) และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ (ทั้งประเภทที่ 1 และ 5) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนเพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะมีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมใกล้เคียงกับกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่การก่อตัวของเพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีต นั้นมีแนวโน้มที่จะผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ และนอกจากนี้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนกรณีแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่แตกต่างกับกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีแนวโน้มมากกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการขยายตัวของคอนกรีตเถ้าลอย และคอนกรีตผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างจากกรณีปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับการใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) พบว่า การขยายตัวของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงในปริมาณต่ำจะทำให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้น แต่ถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงๆ จะให้ค่าการขยายตัวน้อยลง

คำสำคัญ : คุณสมบัติด้านซีเมนต์, เถ้าลอย, ผงหินปูน, การขยายตัว

Abstract

This research is emphasized on the cementitious properties including normal consistency, setting time of paste, slump and compressive strength of concrete. Moreover, the expansion test of concrete bar exposed to sodium sulfate solution of concrete with fly ash and limestone powder was observed. It was found that the normal consistency of cement paste, cement (type I and V) partially replaced with fly ash, was lower than those of the control mixes. On the other hand, limestone powder replacing cement paste showed equivalent normal consistency to those of the control mixes. Setting time of fly ash cement paste was longer than those of cement only and limestone powder cement pastes. Concrete slump had a tendency to vary inversely with normal consistency of paste. The fly ash concrete exhibited lower strength than limestone concrete and control concrete. Besides, the

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี yongyut.w@hotmail.com
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3]นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[4]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

expansion of concrete sample made with type I cement was larger than that of type V cement and concrete with fly ash and limestone powder. For all ternary binder (cement, fly ash and limestone powder), it was found that the expansion exposed to the sodium sulfate solution of concrete sample with the high CaO fly ash at low replacing content exhibited the large expansion. On the contrary, at the high replacing content of fly ash, the expansion of concrete reduced.

Keywords : cementitious, fly ash, limestone powder, expansion

1. บทนำ

การใช้เถ้าลอย (Fly Ash) แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในเพสต์ลดลง และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น อย่างเช่นทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตได้ดีขึ้น [1] ส่วนข้อเสียของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน คือทำให้ก่อตัวช้า และกำลังรับแรงในตอนต้นลดลง จึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยในงานที่ต้องการกำลังรับแรงในตอนต้นหรือต้องการถอดแบบเร็ว ในขณะที่การใช้ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างทำให้กำลังรับแรงในตอนต้นมีค่าเพิ่มขึ้น [2] อย่างไรก็ตามการใช้ผงหินปูนยังไม่แพร่หลายถึงแม้ว่าราคาจะถูกกว่าปูนซีเมนต์ก็ตาม การพัฒนาวัสดุประสานร่วมซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยเฉพาะปัจจุบันประเทศไทยใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีผลผลิต (By product) ที่เหลือใช้เป็นเถ้าลอยของถ่านหิน (Fly Ash) ในขณะที่ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตนอกจากจะมุ่งเน้นถึงคุณสมบัติด้านกำลังอัดแล้ว สิ่งสำคัญอีกอย่างที่ต้องคำนึงถึงคือความคงทนของคอนกรีต โครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต โดยคอนกรีตจะเกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าว ไม่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบ

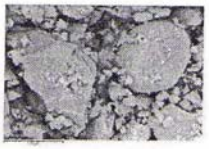
ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ศึกษาถึงคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน พร้อมทั้งการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้คอนกรีตดังกล่าวให้เหมาะสม

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

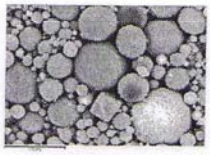
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 เถ้าลอย (จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง) และผงหินปูนความละเอียดขนาด 3 ไมโครเมตร ส่วนมวลรวมใช้ทรายแม่น้ำ และหินเบอร์ 2 และสารโซเดียมซัลเฟต ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเป็นภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) กำลังขยาย 3,500 เท่า และ ภาพที่ 2 ซึ่งแสดงการกระจายขนาดสะสม (Size Distribution) ของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยพิจารณาที่การกระจายขนาดร้อยละ 50 พบว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ประเภท

ที่ 5 เถ้าลอย และผงหินปูน มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค (Mean Particle Size) เท่ากับ 15.14, 14.43, 17.74 และ 4.46 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

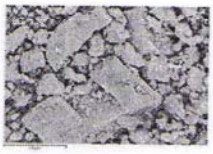


(ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

(ข) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

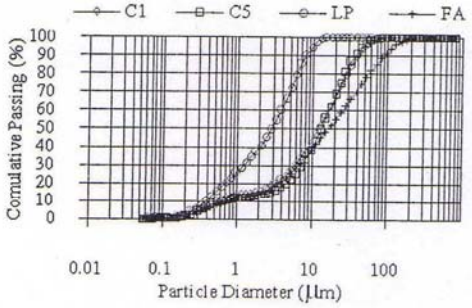


(ค) เถ้าลอย



(ง) ผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร

ภาพที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคของวัสดุประสาน ซึ่งเป็นภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า



ภาพที่ 2 การกระจายขนาดของอนุภาคของวัสดุประสาน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสาน

รายการ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 5	เถ้าลอย	ผงหินปูน 3ต
SiO_2, %	19.50	21.87	40.93	0.46
Al_2O_3, %	4.97	3.87	22.42	0.06
Fe_2O_3< %	3.78	4.34	13.64	0.03
CaO, %	65.38	64.56	13.63	55.25
MgO, %	1.08	1.11	2.93	0.37
Na_2O, %	<0.01	<0.01	0.89	<0.01
K_2O, %	0.47	0.24	2.39	0.01
SO_3, %	2.16	2.08	1.92	<0.01
TiO_2, %	0.25	0.21	0.43	<0.01
P_2O_5, %	0.07	0.05	0.15	0.01
Free Lime, %	1.00	0.76	0.22	-
LOI, %	2.27	1.59	0.46	43.79
Insoluble Residue %	0.28	0.23	-	-
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	3.18	2.46	2.79
ความละเอียด, cm^2/g	3,250	3,340	3,550	12,160

2.2 สัดส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในครั้งนี้ได้ใช้สัดส่วนผสมคอนกรีตจำนวน 18 รูปแบบ กล่าวคือวัสดุประสานนั้นประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (C1) และประเภทที่ 5 (C5) ล้วน และเมื่อใช้วัสดุประสานร่วม 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 (C1 FA30, C5 FA30) และ 50 (C1 FA50, C5 FA50) และแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (C1 LP10, C5 LP10) และ 20 (C1 LP20, C5 LP20) และใช้เมื่อวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิด แทนที่ทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 คือ เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (C1 FA20 LP10, C5 FA20 LP10) เถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (C1 FA10 LP20, C5 FA10 LP20) เถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (C1 FA40 LP10, C5 FA40 LP10)

และเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 (C1 FA30 LP20, C5 FA30 LP20) โดยรายละเอียดของรูปแบบส่วนผสมคอนกรีตดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ศึกษา

สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม. โดยน้ำหนัก (กก.)					
	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ผงหินปูน	ทราย	หิน	น้ำ
C1	332	0	0	790	1080	182
C5	332	0	0	790	1080	182
C1 FA30	233	99	0	790	1080	182
C1 FA50	166	166	0	790	1080	182
C1 LP10	299	0	33	790	1080	182
C1 LP20	266	0	66	790	1080	182
C5 FA30	233	99	0	790	1080	182
C5 FA50	166	166	0	790	1080	182
C5 LP10	299	0	33	790	1080	182
C5 LP20	266	0	66	790	1080	182
C1 FA20 LP10	233	33	66	790	1080	182
C1 FA10 LP20	233	66	33	790	1080	182
C1 FA40 LP10	166	133	33	790	1080	182
C1 FA30 LP20	166.5	99	66.5	790	1080	182
C5 FA20 LP10	233	33	66	790	1080	182
C5 FA10 LP20	233	66	33	790	1080	182
C5 FA40 LP10	166	133	33	790	1080	182
C5 FA30 LP20	166.5	99	66.5	790	1080	182

หมายเหตุ
C1 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน
C5 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน
C1 FA30 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30
C1 LP10 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10
C1 FA20 LP10 หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

2.3 รายละเอียดของการศึกษา

2.3.1 คุณสมบัติด้านซีเมนต์

สำหรับคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาในครั้งนี้มีดังนี้

1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Normal Consistency) และการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 187 และ ASTM C191

2) ค่ายุบตัว (Slump) ของคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 143

3) กำลังอัดประลัย (Compressive Strength) ของคอนกรีตกระทำตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881 โดยใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ซม.^{3} ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ 1 ปี

2.3.2 การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

การศึกษาการขยายตัว (Expansion) ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างคอนกรีตโดยใช้ขนาดตัวอย่าง 7.5x7.5x28.5 ซม.^{3} ทดสอบที่อายุ 4, 8, 13, 26, 38 สัปดาห์และทุกๆ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

สำหรับสารละลายโซเดียมซัลเฟตใช้ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก กล่าวคือใช้สารโซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร โดยการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

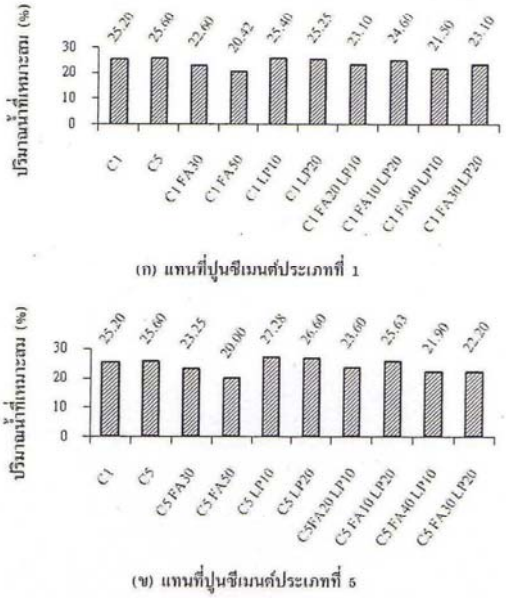
3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

3.1.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

จากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ (ภาพที่ 3) สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีของเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่ำกว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้นจะได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่ำลง ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะของอนุภาคที่กลมของเถ้าลอยช่วยในการไหลลื่น ทำให้มีความต้องการน้ำน้อย ส่วนกรณีแทนที่ด้วยผงหินปูนพบว่าจะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมใกล้เคียงกับกรณีปูนซีเมนต์ล้วน หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับ

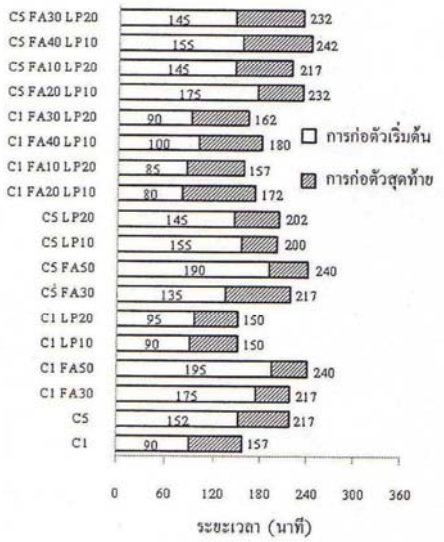
ผงหินปูนนั้นมีแนวโน้มว่าจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เพราะผลจากเถ้าลอยที่เป็นส่วนผสมร่วม



ภาพที่ 3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของวัสดุประสาน

3.1.2 การก่อตัวของเพสต์

ภาพที่ 4 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ทั้งการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาการก่อตัว (ทั้งเริ่มต้นและสุดท้าย) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ช้ากว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนเพสต์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะให้ระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวยิ่งช้าขึ้น ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งการทำปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น สำหรับการแทนที่ด้วยผงหินปูน (ร้อยละ 10 และ 20) ในปูนซีเมนต์ (ทั้งปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5) นั้น ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ล้วน อย่างไรก็ตามการก่อตัวของเพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนให้แนวโน้มว่าจะช้ากว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เพราะผลจากเถ้าลอยที่เป็นส่วนผสมร่วม โดยเฉพาะกรณีแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น



ภาพที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของเพสต์

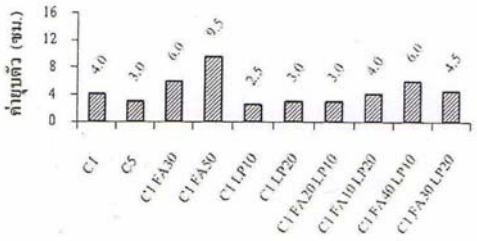
3.1.3 ค่ายุบตัวของคอนกรีต

ตารางที่ 4 และภาพที่ 5 แสดงค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน พบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 4 และ 3 ซม. ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อแทนที่เถ้าลอยจะได้ค่ายุบตัวที่มากกว่ากรณีไม่แทนที่ โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะลักษณะของอนุภาคที่กลมของ

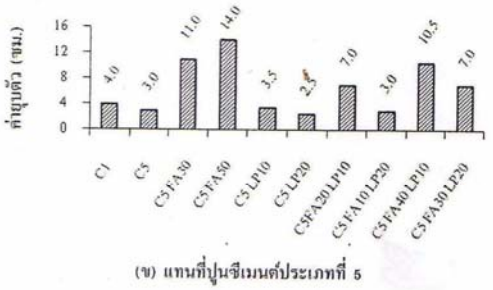
เถ้าลอยช่วยในการไหลลื่นทำให้ค่าการยุบตัวมากเพิ่มขึ้น สำหรับค่ายุบตัวของคอนกรีตปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยผงหินปูนพบว่า จะให้ค่าใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความละเอียดของผงหินปูนที่มีมากกว่าของปูนซีเมนต์จึงต้องการน้ำมากกว่า ในขณะที่คอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีแนวโน้มว่าจะมากกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากเถ้าลอยที่เป็นส่วนผสมร่วมโดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น

ตารางที่ 4 ค่ายุบตัว และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งมีส่วนผสมในรูปแบบต่างๆ

อัตราส่วนผสม	ค่ายุบตัว (ซม.)	กำลังอัดประลัย (กก./ซม.^{2})	
		28 วัน	1 ปี
C1	4	394	452
C1 FA30	6	297	465
C1 FA50	9.5	290	449
C1 LP10	2.5	373	429
C1 LP20	3	337	365
C1 FA20LP10	3	343	436
C1 FA10LP20	4	320	376
C1 FA40LP10	6	271	405
C1 FA30LP20	4.5	276	413
C5	3	453	566
C5 FA30	11	320	528
C5 FA50	14	301	456
C5 LP10	3.5	370	551
C5 LP20	2.5	347	486
C5 FA20LP10	7	344	501
C5 FA10LP20	3	329	408
C5 FA40LP10	10.5	293	438
C5 FA30LP20	7	306	459



(ก) แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

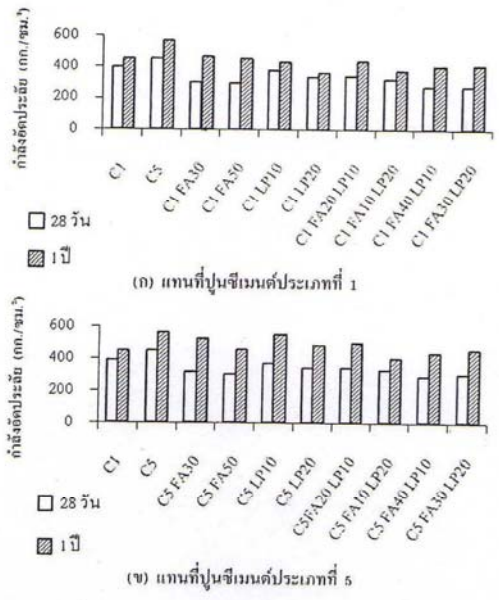


(ข) แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 5 ค่ายุบตัวของคอนกรีต

3.1.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กรณีกำลังอัดประลัยที่ 28 วัน และ 1 ปี ของคอนกรีต (ตารางที่ 4 และภาพที่ 6) พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน มีมากกว่าคอนกรีตซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ ให้ค่ากำลังอัดประลัย (อายุ 28 วัน) น้อยกว่ากรณีไม่แทนที่โดยเฉพาะกรณีแทนที่ในปริมาณมากขึ้นค่ากำลังอัดยิ่งลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการลดปริมาณปูนซีเมนต์รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดช้า อย่างไรก็ตามเมื่ออายุ 1 ปี จะเห็นได้ว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าลอยมีการพัฒนาใกล้เคียงกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เพราะผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยผงหินปูนในปูนซีเมนต์พบว่ากำลังอัดประลัยใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่แทนที่ อย่างไรก็ตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนให้แนวโน้มว่า เมื่ออายุต้น (28 วัน) กำลังอัดจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน แต่เมื่ออายุมากขึ้น (1 ปี) มีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ล้วน ผลจากเถ้าลอยซึ่งเป็นส่วนผสมร่วมโดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่ได้พัฒนากำลังของตัวอย่างคอนกรีตตามลำดับ



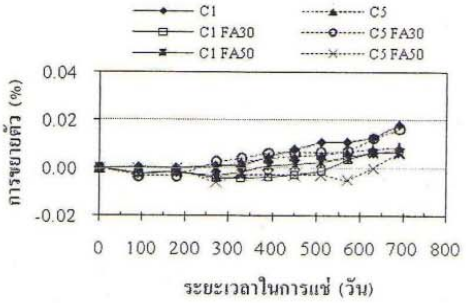
ภาพที่ 6 กำลังอัดประลัยที่อายุ 28 วัน และ 1 ปี (เมื่อบ่มในน้ำ)

3.2 การขยายตัวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

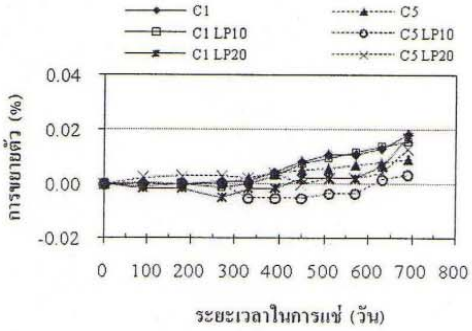
ผลการทดสอบค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของแท่งตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ศึกษาครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตกับระยะเวลาการในแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟตโดย ภาพที่ 7 (ก) เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 30 และ 50) พบว่า ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนมีแนวโน้มมากกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน เป็นเพราะปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มี C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ทำให้เกิด เอททริงไจท์ (Ettringite) น้อยกว่า ส่วนการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5) มีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะช่วยลดปริมาณ C_3A และปริมาณ $Ca(OH)_2$ จึงทำให้เกิดเอททริงไจท์น้อยลง

สำหรับคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (ภาพที่ 7 (ข)) พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีค่าไม่แตกต่างจากกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีแนวโน้มว่าจะใกล้เคียงหรือน้อยกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

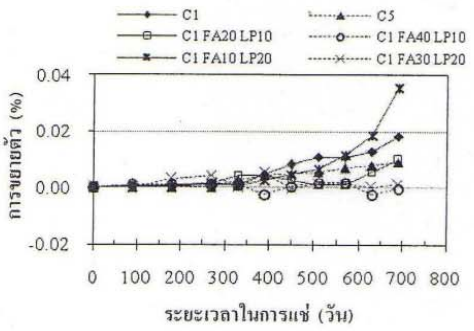
กรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ภาพที่ 7 (ค) และ (ง)) ซึ่งเป็นการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และที่ 5 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตามลำดับ พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ก็มีแนวโน้มว่าทุกสัดส่วนของการใช้วัสดุร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) จะมีค่าการขยายตัวน้อยกว่ากรณีตัวอย่างคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยไม่แตกต่างกับค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นตัวอย่างคอนกรีตเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งให้ค่าการขยายตัวค่อนข้างมากอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตสัดส่วนผสมอื่น ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงๆ (13.63%) ในปริมาณการแทนที่ต่ำ (ร้อยละ 10) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดน้อย ทำให้ลด $Ca(OH)_2$ จึงทำให้เกิดเอททริงไจท์ มากขึ้น แต่เมื่อแทนที่เถ้าลอยดังกล่าวในปริมาณที่สูง ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมาก สามารถลด $Ca(OH)_2$ ได้มาก การขยายตัวจึงน้อยลง ซึ่งก็สอดคล้องกับการศึกษาของ ปิติสานต์ [3] แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีแทนที่วัสดุในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 พบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกันและมีค่าใกล้เคียงกับกรณีคอนกรีตที่ใช้ปูซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน



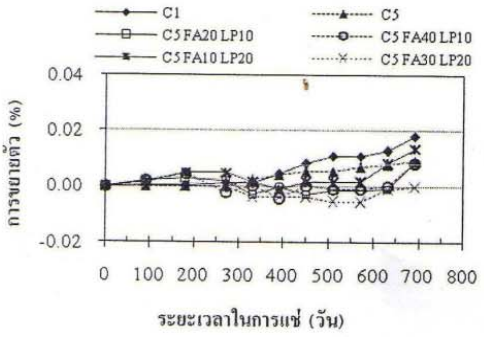
(ก) วัสดุประสานร่วม 2 ชนิด เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าลอย



(ข) วัสดุประสานร่วม 2 ชนิด เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ด้วยผงหินปูน



(ค) วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



(ง) วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนกับระยะเวลาในการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

4. สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ (ทั้งประเภทที่ 1 และ 5) ด้วยเถ้าลอยใน จะมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่แทนที่ ส่วนปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะมีค่าใกล้เคียงกับการไม่แทนที่ หรือมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ของวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) ก็มีแนวโน้มที่จะต่ำกว่ากรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน

2. การก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย พบว่าจะช้ากว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การก่อตัวของเพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะมีค่าไม่แตกต่างกับเพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน และกรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด การก่อตัวของเพสต์ดังกล่าวมีแนวโน้มว่าจะช้ากว่าเพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนโดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง

3. ค่ายุบตัวของคอนกรีตพบว่า จะไปในทิศทางผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ กล่าวคือ ถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์มีค่าต่ำจะส่งผลให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตมากขึ้น และถ้าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าสูงจะส่งผลให้ค่ายุบตัวน้อยลง

4. กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีจะค่าน้อยกว่าเมื่อไม่แทนที่ โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง ส่วนเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่แตกต่างกับกรณีไม่แทนที่ และเมื่อใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด กำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะต่ำกว่ากรณีปูนซีเมนต์ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น

5. จากกราฟตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตพบว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนมีแนวโน้มที่มากกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (ร้อยละ 30 และ 50) หรือแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน (ร้อยละ 10 และ 20) จะทำให้การขยายตัวที่ไม่แตกต่างกับการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน หรือปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) มีแนวโน้มว่า การขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตจะต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง ในปริมาณต่ำ ร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มจะให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้น โดยจะมากกว่าทั้งกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Krammart P. and Tangtermsisrikul S., 2002. "Strength Reduction and Expansion of Mortar with Fly Ash," Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand, V. 13, No. 3, 2002, pp. 9-16.

[2] Voglis N.,Kakali G., Chanitakis E., Tsivilis S., 2005. Portland-Limestone cement Their properties and hydration compared to those of other composite cements. Cement & Concrete Composites, V.27:pp.191-196.

[3] Krammart P. and Tangtermsisrikul S., 2004. "Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution," ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT, V12.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายยงยุทธ วัฒนกุล
วัน เดือน ปีเกิด	22 พฤษภาคม 2519
ที่อยู่	53 หมู่ 2 ต.บ้านโพธิ์ อ.บ้านโพธิ์ จ.ฉะเชิงเทรา 24140
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ. 2549

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ยงยุทธ วัฒนกุล, ปิติศานต์ กร้ำมาตร และคณะ, **คุณสมบัติด้านซีเมนต์ และขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน**, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมงคลธัญบุรี ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม - ธันวาคม) 2553