อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอย ต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

INFLUENCE OF FREE LIME IN FLY ASH ON PROPERTIES OF MORTAR BLENDED WITH FLY ASH AND LIMESTONE POWDER

พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ

PROMPONG CHALATTUNYAKIJ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอย ต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2553

INFLUENCE OF FREE LIME IN FLY ASH ON PROPERTIES OF MORTAR BLENDED WITH FLY ASH AND LIMESTONE POWDER

PROMPONG CHALATTUNYAKIJ

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

2010

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายพร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ

COPYRIGHT © 2010 ลิขสิทธิ์ พ.ศ.2553
FACULTY OF ENGINEERING คณะวิศวกรรมศาสตร์
RAJAMANKALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน INFLUENCE OF FREE LIME IN FLY ASH ON PROPERTIES OF MORTAR BLENDED WITH FLY ASH AND LIMESTONE POWDER
ชื่อนักศึกษา	นายพร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ
รหัสประจำตัว	115070401012-5
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
วัน เดือน ปี ที่สอบ	30 กันยายน 2553
สถานที่สอบ	ห้อง E404 อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ ..... ประธานกรรมการ

(ดร. วีระศักดิ์ ละอองจันทร์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)

จตุพล ตั้งปกาศิต ..... กรรมการ

(ดร. จตุพล ตั้งปกาศิต)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร)

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน
ชื่อนักศึกษา	นายพร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ
รหัสประจำตัว	115070401012-5
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติศานต์ กร้ำมาตร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ในเถ้าลอยต่อคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ และคุณสมบัติด้านความคงทน (การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ การเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ การซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์) ของเพสต์และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน (ทำการแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตอย่างเหมาะสม โดยใช้เถ้าลอยตั้งต้นจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่เติมแคลเซียมออกไซด์ให้มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระแตกต่างกัน

จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เถ้าลอย การก่อตัวของเพสต์ผงหินปูนและเพสต์เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ (ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110±5) ของมอร์ต้าร์ผงหินปูน มอร์ต้าร์เถ้าลอย และมอร์ต้าร์เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของเพสต์หรือมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผงหินปูนและเพสต์เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ และการก่อตัวของเพสต์เถ้าลอย มีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผงหินปูน ที่อายุต้นมีค่ามากกว่า แต่ที่อายุมากขึ้นกลับมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ขณะที่มอร์ต้าร์เถ้าลอยมีค่ากำลังอัดประลัยที่อายุต้นน้อยกว่า แต่เมื่ออายุมากขึ้นกลับมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้พบว่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ผงหินปูนและมอร์ต้าร์เถ้าลอย มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนมอร์ต้าร์เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่าการหดตัวแห้งใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน การเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ขณะที่เพสต์เถ้าลอยและเพสต์เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่ามีการเก็บกักคลอไรด์ใกล้เคียงกับเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่ของมอร์ต้าร์

เถ้าลอยและมอร์ต้าร์เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุต้นมีค่าความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์น้อยกว่า แต่เมื่ออายุมากขึ้นกลับมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน สุดท้ายการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตพบว่า มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ผงหินปูนมีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยและมอร์ต้าร์เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน จะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย กล่าวคือ การแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO สูง ในปริมาณการแทนที่ต่ำ มีแนวโน้มของค่าการขยายตัวมากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน แต่เมื่อแทนที่ในปริมาณสูงกลับมีค่าการขยายตัวน้อยกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน ขณะที่การแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ต่ำ ไม่ว่าจะแทนที่ในปริมาณสูงหรือต่ำ ก็ให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้นพบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ขณะที่มอร์ต้าร์เถ้าลอยมีค่ามากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผงหินปูนและมอร์ต้าร์เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่าใกล้เคียงกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

จากผลการศึกษายังพบว่า แคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ในเถ้าลอยที่มีปริมาณแตกต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ ปริมาณน้ำที่ใช้ (ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110±5) ของมอร์ต้าร์ และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ แต่ส่งผลให้เวลาการก่อตัวของเพสต์มีแนวโน้มเร็วขึ้น และปริมาณ fCaO ที่แตกต่างกันในเถ้าลอยไม่มีผลต่อ การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ การเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ การซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

คำสำคัญ : แคลเซียมออกไซด์อิสระ/เถ้าลอย/ผงหินปูน/คุณสมบัติด้านซีเมนต์/ความคงทน

Thesis Title:	INFLUENCE OF FREE LIME IN FLY ASH ON PROPERTIES OF MORTAR BLENDED WITH FLY ASH AND LIMESTONE POWDER
Student Name:	Mr. Prompong Chalattunyakij
Student ID:	115070401012-5
Degree Award:	Master of Engineering
Study Program:	Civil Engineering (Structural Engineering)
Academic Year:	2010
Thesis Advisor:	Assistant Professor Dr. Pitisan Krammart

ABSTRACT

This thesis was aimed to study the influence of free lime (fCaO) content in fly ash on cementitious properties and durability properties (drying shrinkage of mortar, chloride binding of paste, chloride penetration resistance of mortar and sulfate resistance of mortar) of paste and mortar with fly ash and limestone powder (replacing in OPC type I). It was beneficial to select fly ash for mixing in concrete work properly. The original fly ash from Mae Moh power plant was added with free lime in order to get different free lime content of fly ash.

From test results, it revealed that the normal consistency of fly ash paste, the setting time of limestone powder paste and paste incorporating cement, fly ash and limestone powder, the water requirement (flow = 110±5%) of limestone powder mortar, fly ash mortar and mortar incorporating cement, fly ash and limestone powder were lower than those of OPC type I paste or mortar. The normal consistency of limestone powder paste and paste incorporating cement, fly ash and limestone powder and setting time of fly ash paste were higher than those of OPC type I paste. The compressive strength of limestone powder mortar at early age was higher than OPC type I mortar, but be lower than at longer age. While, the compressive strength of fly ash mortar at early age was lower than OPC type I mortar, but became higher at longer age. The compressive strength of mortar incorporating cement, fly ash and limestone powder was lower than OPC type I mortar. In addition, it was found that drying shrinkages of limestone powder mortar and fly ash mortar were lower than OPC type I mortar. While, mortar incorporating cement, fly ash and limestone powder had drying shrinkage close to OPC type I mortar. The chloride binding of limestone powder paste was lower than OPC type I paste while fly ash paste and paste incorporating cement, fly ash and limestone powder had chloride binding close to OPC type I paste. For chloride penetration resistance of

limestone powder mortar was lower than OPC type I mortar. At early age, the chloride penetration resistances of fly ash mortar and mortar incorporating cement, fly ash and limestone powder were lower than OPC type I mortar, but be higher at longer age. Finally, the expansion in sodium sulfate solution was found that OPC type I mortar was higher than that of OPC type V mortar. The expansion of limestone powder mortar was similar to OPC type V mortar. It was also found that the expansion of fly ash mortar and mortar incorporating cement, fly ash and limestone powder depended on fly ash content and fly ash type. For example, mixture with small replacement ratio of high CaO fly ash yielded higher expansion than those of OPC type I mortar and OPC type V mortar. On the contrary, at higher replacement ratio of high CaO fly ash, the expansion of mortar became lower than those of OPC type I mortar and OPC type V mortar. While, mortar with low CaO fly ash at all replacement ratio had small expansion than those of OPC type I mortar and OPC type V mortar. For weight loss in magnesium sulfate solution, it was found that weight loss of OPC type I mortar was higher than that of OPC type V mortar. While weight loss of fly ash mortar was higher than those of OPC type I mortar and OPC type V mortar. The weight losses of limestone powder mortar and mortar incorporating cement, fly ash and limestone powder were close to OPC type V mortar.

The results also revealed that the content of free lime (fCaO) in fly ash had no effect on normal consistency of pastes, water requirement of mortar (flow = 110±5%) and compressive strength of mortar. But, setting time of paste was likely faster. The content of fCaO in fly ash had no effect on drying shrinkage of mortar, chloride binding of paste, chloride penetration resistance of mortar and sulfate resistance of mortar.

Keywords: Free lime/Fly ash/Limestone powder/Cementitious properties/Durability

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วง หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผศ. ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาพร้อมแนะนำแนวคิดแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และวิธีการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันได้แก่ ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์ ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความเมตตา ความเข้าใจ พร้อมทั้งความรู้อันมีประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย ขอขอบคุณ คุณกฤติยา แก้วมณี ซึ่งได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนเอื้อเฟื้อจัดหาวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประสบการณ์อันมีค่ายิ่งในการดำเนินชีวิต

ท้ายสุด สำคัญยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ยุพิน คุณพ่อสมพ่วง ฉลาดธัญญกิจ ที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่างในชีวิตลูก แม้สิ่งต่างๆ เหล่านั้นจะได้มาอย่างยากลำบาก และด้วยหยาดเหงื่อของท่าน ให้โอกาสลูก จนมีโอกาสศึกษาเล่าเรียนจนถึงระดับนี้

พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ

13 กันยายน 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	33
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	33
3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา	34
3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์และมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา	50
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์	58
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	58
4.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	63
4.3 คุณสมบัติทางด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์วัสดุประสาน	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	111
5.1 สรุปผลการทดลอง	111
5.2 ข้อเสนอแนะ	113
เอกสารอ้างอิง	114
ภาคผนวก	117
ก. ตารางแสดงขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุที่ใช้ทดสอบ	117

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ข. ตารางและรูป แสดงการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสาน และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน 125

ค. ตารางแสดงการหาการไหลแผ่และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน 153

ง. ตารางแสดงการหาค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน 182

จ. ตารางแสดงการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์วัสดุประสาน และปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์วัสดุประสาน 209

ฉ. ตารางแสดงค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน และค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน 212

ช. ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ 217

ประวัติผู้เขียน 232

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ	14
2.2	ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	15
2.3	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618	20
2.4	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545	21
2.5	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ	21
2.6	ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้	25
2.7	ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ ASTM C1202	28
2.8	สภาวะของซัลเฟต	30
2.9	ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต	32
3.1	ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในตัวอย่างเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา	33
3.2	สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาค่าความข้นเหลวปกติและการก่อตัวของตัวอย่างเพสต์	51
3.3	สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาค่าการไหลแผ่	52
3.4	สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหากำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์	52
3.5	สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์	53
3.6	สัดส่วนผสมของเพสต์ที่ใช้ในการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของตัวอย่างเพสต์	54
3.7	สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์	55
3.8	สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์	56
4.1	ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน	58
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน	63
4.3	ชนิดของตัวอย่างเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา	63
4.4	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์และเวลาก่อตัวของเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา	65
4.5	ค่าการไหลแผ่และปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5	68
4.6	ค่าปริมาณคลอไรด์ในเนื้อเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 91 วัน	86
4.7	ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ	94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์วัสดุประสาน	94
4.9 สรุปผลการศึกษาพฤติกรรมของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ในเถ้าลอยต่อคุณสมบัติต่างๆของเพสต์และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน	110

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ขวดมาตรฐานเลอชาเตอร์ลิเยร์	34
3.2 เครื่องมือหาความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์	35
3.3 เครื่องมือไวแคท	36
3.4 โต๊ะทดสอบการไหล	36
3.5 เครื่อง UTM (Universal Testing Machine)	37
3.6 เครื่องวัดความยาว	36
3.7 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแห้ง	38
3.8 การวัดความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน	38
3.9 ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30±2 °C	39
3.10 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างเพสต์ที่ใช้ทดสอบความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์	39
3.11 การแช่ชิ้นตัวอย่างเพสต์ในน้ำเกลือ	40
3.12 เครื่อง UTM (Universal Testing Machine)	41
3.13 เครื่องมือรีดสารละลาย	41
3.14 การติดตั้งเครื่องมือรีดสารละลาย	42
3.15 สารละลายที่ถูกรีดออกจากภายในโพรงของชิ้นตัวอย่างเพสต์	42
3.16 แบบจำลองวิธีการศึกษาการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์	43
3.17 ชุดเครื่องมือทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน	43
3.18 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์	44
3.19 การประกอบชิ้นตัวอย่างเข้ากับ Cell เพื่อเตรียมทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์	45
3.20 การประกอบ Cell เข้ากับชุดทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน	45
3.21 รายละเอียดการจัดชุดทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน	46
3.22 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต	47
3.23 ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตเพื่อทดสอบการขยายตัว	48
3.24 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม	49
3.25 แบบหล่อและตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต	49
4.1 ภาพขยายขนาด 2500 เท่าของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	ขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน	60
4.3	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม	65
4.4	เวลาการก่อตัวระยะต้นและเวลาการก่อตัวระยะปลายของเพสต์วัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม	67
4.5	ปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน	69
4.6	กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10	70
4.7	กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ20, ร้อยละ 40 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10	71
4.8	กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20	72
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20	73
4.10	กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40	74
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.12 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 75

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 75

4.14 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 76

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 77

4.16 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน 79

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยและผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 79

4.18 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร้อยละ 30 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน 80

4.19 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน 81

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยและผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.21 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร้อยละ 50 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน 82

4.22 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน 83

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยและผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 83

4.24 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน 84

4.25 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน 85

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยและผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 85

4.27 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน 86

4.28 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยผงหินปูน ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน 88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.29 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน 89

4.30 คลอไรด์เก็บกัก และอัตราส่วนคลอไรด์เก็บกักของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน 90

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์เก็บกักและคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน 91

4.32 คลอไรด์เก็บกัก และอัตราส่วนคลอไรด์เก็บกักของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน 92

4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์เก็บกักและคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน 93

4.34 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 7 วัน 95

4.35 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 7 วัน 96

4.36 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 28 วัน 97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.37 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 28 วัน 98

4.38 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 91 วัน 99

4.39 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 28 วัน 100

4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุบ่มของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน 101

4.41 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 20 103

4.42 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 104

4.43 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 40 105

4.44 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.45	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 20 และร้อยละ 40	107
4.46	การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร่วมกับผงหินปูน	108
4.47	รูปถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 90 สัปดาห์	109

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
$AgNO_3$	Silver Nitrate
Al_2O_3	Aluminium oxide
$CaCO_3$	Calcium Carbonate
$Ca(OH)_2$	Calcium hydroxide
CaO	Calcium Oxide
$CaSO_4$	Calcium sulfate
$CaSO_4.2H_2O$	Gypsum or Dihydrate Calcium Sulfate
Cl^-	Chloride Ion
C_2S	Dicalcium Silicate
C_3A	Tricalcium Aluminate
C_3S	Tricalcium Silicate
C_4AF	Tetracalcium Alumino Ferrite
Fe_2O_3	Ferric Oxide
fCaO	Free Lime or Free Calcium Oxide
H_2O	Water
H_2SO_4	Sulfuric Acid
K_2O	Potassium Oxide
MgO	Magnesium Oxide
$MgSO_4$	Magnesium Sulfate
NaCl	Sodium Chloride
NaOH	Sodium Hydroxide
Na_2O	Sodium Oxide
$NaSO_4$	Sodium Sulfate
P_2O_5	Phosphorus Pentoxide
SiO_2	Silicon Dioxide
SO_3	Sulfur Trioxide
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
B.S.	British Standards

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

CAH	Calcium Aluminate Hydrates
C-A-H	Calcium Aluminate Hydrates
CH	Calcium hydroxide
COCO	Cogeneration Company Limited
CSH	Calcium Silicate Hydrate
C-S-H	Calcium Silicate Hydrate
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
MH	Magnesium Hydroxide
M-S-H	Magnesium Silicate Hydrate
SCC	Self Compacting Concrete
SEM	Scanning Electron Microscope
XRD	X-Ray Diffraction
XRF	X-Ray Fluorescence

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 1
บทนำ

สำหรับบทนำเป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

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

สำหรับประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนมาใช้ผลิตคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างแพร่หลาย ปริมาณเถ้าลอยที่มีอยู่ในประเทศไทยโดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีปริมาณสูงถึง 3,000,000 ล้านตันต่อปี [2,3] หากนำมาใช้จะเกิดประโยชน์ต่อประเทศอย่างมาก ซึ่งในอดีตการใช้เถ้าลอยยังคงมีปัญหาเรื่องการควบคุมคุณภาพและความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ในปี พ.ศ. 2533 เป็นต้นมาได้มีการปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติของเถ้าลอยให้มีความสม่ำเสมอทำให้เริ่มมีการนำเถ้าลอยมาใช้อย่างจริงจัง เถ้าลอยจึงกลายเป็นสินค้าที่ต้องสั่งข้ามปีและได้เข้ามามีบทบาทแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ประเทศลดการใช้ปูนซีเมนต์ปีละกว่า 2,000 พันล้านตัน ประหยัดเงินได้ปีละนับ 1,000 ล้านบาท [3,4] ปลายปี พ.ศ. 2543 ขีดความสามารถในการขนถ่ายเถ้าลอยแม่เมาะที่กำลังผลิตเต็มที่อยู่ที่ประมาณ 6,600 ตันต่อวัน ซึ่งโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้มีการติดตามคุณภาพเถ้าลอยโดยสุ่มตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C 311 และทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยจำนวน 4 ตัวอย่าง ในรอบ 24 ชั่วโมง โดยควบคุมให้เถ้าลอยที่ขนถ่ายนำไปใช้ประโยชน์ให้มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์

(SO_3) สูงสุดไม่เกินร้อยละ 4.0 และปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) สูงสุดไม่เกินร้อยละ 2.0[5]

นอกจากใช้เถ้าลอยผสมคอนกรีตแล้ว ปัจจุบันยังมีการนำผงหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) มาใช้ในในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ผงหินปูนเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยหิน ซึ่งปกติแล้วจะถูกเก็บไว้ในบริเวณแหล่งย่อยหิน เนื่องจากผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระกว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร จึงก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อทางเดินหายใจของผู้อยู่อาศัยในบริเวณใกล้กับแหล่งย่อยหินนั้นๆ ผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เมื่อแทนที่ผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้ [6,7,8,9] จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าวทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น

อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในระยะต้นจะค่อนข้างช้า แต่ในระยะยาวแล้วกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะดีและสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน [2,10,11,12] ในทางตรงกันข้ามคอนกรีตที่ผสมผงหินปูนจะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะต้นเร็ว ดังนั้นการพัฒนาวัสดุประสานร่วมระหว่างปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ประโยชน์ซึ่งจะทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งประเทศไทยยังมีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มากกว่าหนึ่งชนิดน้อยมาก

เมื่อนำเถ้าลอยไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าปูนขาวอิสระหรือแคลเซียมออกไซด์อิสระ (free lime or fCaO) เป็นสารประกอบหนึ่งที่อยู่ในเถ้าลอย ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ ได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 1.1

$$CaO+H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \qquad (1.1)$$

โดยปัจจุบันเถ้าลอยที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีแนวโน้มของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระสูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเพสต์และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ทั้งคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์และด้านความคงทน ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระดังกล่าว เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการใช้งานเถ้าลอยในงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีจุดประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นส่วนผสม

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อ การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ การเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ การซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดยใช้วัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นส่วนผสม

1.2.4 เพื่อศึกษาปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระที่เหมาะสมในเถ้าลอย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการคัดเลือกเถ้าลอยที่ใช้ในงานคอนกรีตต่อไป

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาของวิทยาพนธ์ครั้งนี้ ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติวัสดุประสาน 3 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน ทั้งในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติด้านซีเมนต์ และคุณสมบัติด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์ รวมทั้งศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อคุณสมบัติดังกล่าวในบางประการ 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 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ การก่อตัวของเพสต์ การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ และกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์

1.3.4 ความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์วัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม โดยศึกษาในด้านการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ การเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ การซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

1.3.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี ของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) รวมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสมทั้งด้านซีเมนต์และด้านความคงทน

1.3.6 พิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์และด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์วัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่

1.4.1 เพื่อทราบถึงผลกระทบของการใช้เถ้าลอย และผงหินปูนในการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ ต่อ คุณสมบัติในด้านต่างๆของเพสต์และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.4.2 เพื่อทราบถึงอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอย ต่อ คุณสมบัติด้านต่างๆของเพสต์และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

1.4.3 เพื่อให้สามารถ นำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการคัดเลือกเถ้าลอย สำหรับนำไปใช้ในงานคอนกรีตประเภทต่างๆได้อย่างมีคุณภาพ

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นงานวิจัยที่ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำผงหินปูนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย ส่วนที่สองเป็นงานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอย คุณสมบัติของผงหินปูน และตัวแปรที่มีผลกระทบ ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำผงหินปูนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร่วมกับเถ้าลอย

Paul (1976) ได้ศึกษาการผสมปูนขาว (lime) กับวัสดุปอซโซลาน (เถ้าแกลบ) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าแกลบมาใช้ในงานก่อสร้าง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ต้าร์ปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบ เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมกับปูนขาว และเถ้าแกลบ ซึ่งมีการใช้สารผสมเพิ่มคือโซเดียมอลูมิเนต เพื่อช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนัก จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อปูนขาวที่ทำปฏิกิริยาดีที่สุดในด้านการพัฒนากำลังรับน้ำหนักมีอัตราส่วนเท่ากับ 1 ต่อ 2 นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถนำเถ้าแกลบไปใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์และปูนขาวในการผลิตอิฐบล็อกได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนลดลงถึงร้อยละ 13 ถึง 34 เมื่อเทียบกับอิฐบล็อกปูนซีเมนต์ผสมทรายที่ปริมาตรเท่ากัน

Wojciech G. (1990) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลและผลกระทบของผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็มหรือวัสดุหล่อลื่น (filler) ต่อความต้านทานเกลือซัลเฟต เมื่อพิจารณาผลทางด้านกายภาพ พบว่าเมื่อผสมผงหินปูนลงในคอนกรีตจะส่งผลให้คอนกรีตมีช่องว่างลดลงทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากขึ้น ทำให้เกลือซัลเฟตเข้าไปทำลายยากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ปริมาณน้ำอิสระน้อยลงถึงร้อยละ 20 ถึง 25 โดยน้ำหนักของน้ำอิสระที่อยู่ในคอนกรีต

Rubio (1996) ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุเชื่อมประสานจากปูนขาวกับเถ้าแกลบ และวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ได้แก่ เถ้าลอย และดินเหนียวคาร์โอลิไนท์ (kaolinite) จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปอซโซลานในปูนซีเมนต์ที่ทำจากปูนขาวกับเถ้าแกลบ ส่งผลให้การก่อตัวช้าลง แต่อย่างไรก็ตามยังคงอยู่ในข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับน้ำหนักจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างที่ทำจากปูนซีเมนต์ที่ทำจากปูนขาวและเถ้าแกลบ และยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดได้ดีขึ้น

N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis and S. Tsivilis (2005) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านซีเมนต์ระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ผงหินปูน, ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเอง

ตามธรรมชาติ (natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan) ในที่นี้คือเถ้าลอย ผลจากการทดลองพบว่า ซีเมนต์ผสมผงหินปูนให้ค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นสูงขึ้น ตรงกันข้ามกับซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นลดลง แต่เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุช่วง 90 ถึง 540 วันพบว่าซีเมนต์ผสมปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือซีเมนต์ผสมเถ้าลอย จะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าทั้งซีเมนต์ปกติ และซีเมนต์ผสมผงหินปูน ซีเมนต์ผสมผงหินปูนจะมีความต้องการน้ำน้อยกว่าเมื่อเทียบกับซีเมนต์ผสมปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และซีเมนต์ผสมเถ้าลอย

วิศิษฎ์ เดชพันธ์ (2542) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงหินปูนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบคอนกรีตผสมผงหินปูน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์เป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายจะเร็วขึ้น เนื่องจากผลของความเร่งทางกายภาพ (physical acceleration) เกิดขึ้นในกรณีที่ผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้อนุภาคปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความเร่งทางเคมี (chemical acceleration) เพราะผงหินปูนทำให้ค่าความเป็นด่างของน้ำสูงขึ้นทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น จากผลการทดลองยังพบอีกว่า ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากอนุภาคของผงหินปูนเป็นเหลี่ยมมาก อีกทั้งการแทนที่ด้วยผงหินปูนยังทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตผสมผงหินปูนจึงควรผสมสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer)

ปิติ เสรเมธากุล (2545) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ และแนวทางการนำผงหินปูนเพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ และการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ มุ่งหมายเพื่อนำผงหินปูนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ และ/หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน ผลจากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผงที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น หรือเป็นผลมาจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจสรุปได้เป็น 3 ปัจจัยด้วยกัน ปัจจัยแรกคือ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของสารประกอบ ปัจจัยที่สองคือ ความสามารถในการทำปฏิกิริยา และ/หรือความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของสารประกอบ ปัจจัยสุดท้ายคือ ปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี สารประกอบดังที่ได้กล่าวมาได้แก่ ปริมาณร้อยละหรือความเข้มข้นของ ซิลิกอนออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ ที่ว่องไวและอยู่ในสภาพที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ ซึ่งอาจมีแคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ปืนตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาด้วย ซึ่งจากการทดสอบพบว่าปริมาณสารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์ในสัดส่วนผสมระหว่างร้อยละ 0.5 ถึง 3.0 มีผลให้การพัฒนากำลังในช่วง 7 วันแรกดีขึ้น นอกจากนี้ยังสรุปแนวทางการประยุกต์ใช้ผงหินปูน และ/หรือผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอซโซลานในงานประเภทต่างๆ ดังนี้

1. อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ประยุกต์ใช้โดย ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบใช้บดหรือผสมร่วมภายหลังเพื่อผลิตมอร์ต้าร์สำเร็จรูป และ/หรือเพื่อการผลิตปูนซีเมนต์ราคาถูกที่เหมาะแก่งานก่อสร้างขนาดเล็ก (dry mortar and/or economic – mixed cement)

2. อุตสหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ประยุกต์ใช้โดย ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อยไม่เกินร้อยละ 35 เพื่อให้ทำหน้าที่วัสดุเติมเต็ม และ/หรือให้คุณสมบัติในการเชื่อมประสานในภายหลัง (filler and/or cementitious replacement material) หรืออาจใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก กล่าวคือปริมาณเกินกว่าร้อยละ 35 เพื่อให้ได้คุณสมบัติบางประการ เช่น คุณสมบัติคอนกรีตความร้อนต่ำ เป็นต้น

3. ประยุกต์ใช้งานในฐานะวัสดุปรับปรุงเสถียรภาพชั้นดินอ่อนและงานดินถมบดอัด

สุรชัย อำนวยพรเลิศ (2547) ได้ทำศึกษาผลของผงหินปูน และเถ้าลอยที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยกำหนดปริมาณการแทนที่ผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 18 ถึง 36 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.24, 0.27 และ 0.30 อัตราส่วนปริมาณเพสต์ต่อปริมาณช่องว่างต่ำสุดของมวลรวมที่อัดแน่นเท่ากับ 1.10, 1.20 และ 1.30 และค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตเท่ากับ 6.0 ± 2.0 ซ.ม. จากผลการทดลองพบว่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมฝุ่นหินปูน และ/หรือเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดที่อายุเริ่มต้นจนถึง 28 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปจะให้กำลังเทียบเท่ากับคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมที่มีการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตผสมผงหินปูน และ/หรือเถ้าลอย มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา และมาตรฐาน ACI 318

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเถ้าลอย คุณสมบัติของผงหินปูน และตัวแปรที่มีผลกระทบ ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผสมผงหินปูน

K. Torii, K. Taniguchi and M. Kawamura (1994) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความยาว และกำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (10% $NaSO_4$) จากผลการศึกษาพบว่าการผสมคอนกรีตด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ช่วยปรับปรุงความสามารถต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตได้อย่างมาก และพบว่าหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายซัลเฟต 2 ปีตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยปริมาณมากจะให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นอย่างชัดเจน และไม่พบการเสื่อมสภาพ และจากผลการวิเคราะห์ทางเคมีชี้ให้เห็นว่าการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณมากให้ผลเป็นที่น่าพอใจเนื่องจากการขัดขวางการซึมผ่านของซัลเฟตไอออนเข้าสู่เนื้อคอนกรีต และเป็นผลมาจากเกิดยิปซั่ม และ/หรือแอททริงไจท์น้อยนั่นเอง

E.E. Hekal, E. Kishar and H. Mostafa (1999) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของซีเมนต์เพสต์ผสม โดยใช้อัตราส่วน W/S เท่ากับ 0.30 แช่ตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ภายใต้ภาวะที่แตกต่างกัน (อุณหภูมิห้อง, อุณหภูมิ 60°C และภาวะเปียกสลับแห้งที่อุณหภูมิ 60°C) จากการศึกษาพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ช่วยให้เพสต์เพิ่มความต้านทานต่อแมกนีเซียมซัลเฟต ภาวะเปียกสลับแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เร่งให้ซัลเฟตเข้าทำลายง่ายขึ้น

Cengiz Duran Atis, Alaettin Kilic and Umur Korkut Sevim (2002) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัด และการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.40 จากผลการศึกษาพบว่าการผสมเถ้าลอยทำให้การหดตัวแห้งลดลงประมาณร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าซีเมนต์ล้วน และกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสม เถ้าลอยร้อยละ 10 และ 20 ให้ค่าเทียบเท่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วน

P. Chindaprasirt, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak and H.T. Cao (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมปอซโซลาน (เถ้าลอยชนิด F และเถ้าแกลบ) ใช้อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตัวอย่างที่ใช้วัดการขยายตัวจะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 และทำการตรวจสอบค่า pH ของสารละลาย จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยและเถ้าแกลบช่วยลดการขยายตัวของมอร์ต้าร์ และค่า pH นอกจากนี้ยังพบว่าเถ้าแกลบมีประสิทธิภาพมากกว่าเถ้าลอย จากผลการทดสอบ SEM ที่ผิวตัวอย่างที่แตกร้าวหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตชี้ให้เห็นว่าการทำลายโดยซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย หรือเถ้าแกลบถูกยับยั้งโดยการลดแคลเซียมออกไซด์ และอัตราส่วน C/S ของ CSH เจล เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าซีเมนต์ล้วนพบว่ามอร์ต้าซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีแคลเซียมซัลเฟตน้อยกว่า และเกิดแอททริงไจท์น้อยกว่าอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับในกรณีมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยก็จะน้อยกว่ามอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วน แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีมากกว่ามอร์ต้าซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปอซโซลานทั้งสองชนิดนี้ในอัตราการแทนที่ถึงร้อยละ 40 เพื่อสร้างซีเมนต์ผสมที่มีความต้านทานซัลเฟตดี

E.F. Irassar (2005) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตเมื่อผงหินปูนถูกใช้เป็นส่วนประกอบในปูนซีเมนต์ หรือถูกใช้แทนที่ทรายในคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (SCC) โดยศึกษาตัวอย่าง เพสต์, มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ซึ่งถูกแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่มีความเข้มข้นต่างๆกัน และที่อุณภูมิต่างกัน โดยใช้ปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบต่างๆกัน นอกจากนี้ส่วนผสมและอัตราการแทนที่ผงหินปูนยังถูกออกแบบให้แตกต่างกันอีกด้วย จากผลการศึกษาพบว่าการเสื่อมสภาพเนื่องจากซัลเฟตส่วนใหญ่ส่งผลมาจากอัตราส่วน W/C และปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ การแตกร้าวของผิวถูกควบคุมโดยการใช้อัตราส่วน W/C ต่ำ และมีปริมาณ C_3A ต่ำ ในส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตพบว่าอุณหภูมิต่ำส่งผลให้เพิ่มระดับความเสื่อมสภาพมากขึ้น

W. Chalee and C. Jaturapitakkul (2007) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัตถุผง และความละเอียดของเถ้าลอย ต่อ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคลอไรด์ (D_c) ของคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล ตัวอย่างถูกเตรียมโดยใช้เถ้าลอยคัดขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุผง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในสภาวะน้ำทะเลขึ้น-ลง จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ D_c ของทุกตัวอย่างคอนกรีตมีค่าลดลงตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วน W/B ลดลงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ D_c ลดลงตามไปด้วย เมื่ออัตราส่วน W/B ลดลงจะส่งผลให้คอนกรีตปกติมีสัมประสิทธิ์ D_c ลดลงมากกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอย การใช้เถ้าลอยที่ละเอียดจะลดการซึมผ่านคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีต นอกจากนี้ความละเอียดของเถ้าลอยจะส่งผลต่อการลดลงของสัมประสิทธิ์ D_c ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วน W/B สูง มากกว่าในกรณีคอนกรีตมีอัตราส่วน W/B ต่ำ

Kamile Tosun, Burak F., B. Baradan and I. Akin Altun (2009) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผงหินปูน ตัวอย่างถูกเตรียมด้วยปูนซีเมนต์ 2 ชนิดซึ่งอัตราส่วน C_3S/C_2S แตกต่างกัน ใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5, 10, 20 และ 40 ตัวอย่างจะถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต 3 สถานะคือ โซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) ที่อุณหภูมิ 20°C และ 5°C แมกนีเซียมออกไซด์ ($MgSO_4$) ที่อุณหภูมิ 5°C ผลจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่า อัตราส่วนการแทนที่ผงหินปูนและอุณหภูมิที่ต่ำส่งผลเสียต่อความต้านทานซัลเฟต นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_3S/C_2S สูงมีแนวโน้มถูกซัลเฟตทำลายง่ายโดยจะถูกทำลายมากขึ้นเมื่อมีปริมาณผงหินปูนเพิ่มขึ้น ในตัวอย่างที่มีอัตราการแทนที่ผงหินปูนสูงการทดสอบ XRD และ SEM/EDS แสดงให้เห็นว่าแอททริงไจท์เป็นผลผลิตที่ส่งผลเสียต่อตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ส่วนยิปซั่ม และเทอว์มาไซท์ (thaumasite) เป็นผลผลิตที่ส่งผลเสียต่อตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

กำธร อรุณรัศมีโสภา (2540) ได้ศึกษาอิทธิพลของแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าถ่านหินต่อคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.50 และค่ายุบตัวเท่ากับ 7.5±2 ซ.ม. ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยองที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์แตกต่างกัน 3 ระดับตัวอย่างคือ ร้อยละ 1.58, 10.39, 23.64 ใช้ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุผง จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เท่ากับร้อยละ 23.64 ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น และมีค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงเท่ากับร้อยละ 23.64 ในปริมาณร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน น้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาเพียงร้อยละ 0.19 เท่านั้น แต่ที่อายุ 90 วันให้ค่ามากกว่าถึงร้อยละ 3.07 ส่วนการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น และการใช้เถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำ จะช่วยลดการหดตัว

เนื่องจากการสูญเสียน้ำได้ สำหรับผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 10 ต่อกำลังอัดที่อายุ 90 วัน พบว่าสามารถทนผลกระทบจากสารละลายได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

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

ธีรวัฒน์ สินศิริ (2548) ได้ศึกษาผลกระทบของความละเอียด รูปร่างของเถ้าลอยและวัสดุเฉื่อย ต่อกำลัง ขนาดโพรง การกระจายขนาดโพรง และการซึมผ่านอากาศในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยนำเถ้าลอยทั้งที่ไม่ได้แยกขนาด และแยกขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 จากการศึกษาพบว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยคัดขนาดให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยที่ไม่คัดขนาด การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยไม่ได้คัดขนาดในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เพสต์มีปริมาณโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้นแต่ขนาดโพรงโดยเฉลี่ยจะลดลง ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยขนาดเล็กจะส่งผลให้ทั้งปริมาณโพรงทั้งหมด และขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง เมื่อตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าการแทนที่เถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ลดลงมากกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่หยาบกว่า นอกจากนี้ยังศึกษาเพสต์ที่ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.35 และเพสต์ที่ควบคุมให้มีปริมาณน้ำที่ความข้นเหลวปกติ ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และโรงไฟฟ้า COCO มาคัดแยก 3 ตัวอย่างคือ เถ้าลอยที่ไม่

คัดแยกขนาด เถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0-45 และ 0-10 ไมครอน ใช้ทรายแม่น้ำที่บดให้มีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าลอย โดยนำเถ้าลอยหรือทรายแม่น้ำแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าปริมาณโพรงของเพสต์เถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้เถ้าลอยขนาดเล็กลงจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลง การซึมผ่านอากาศในเพสต์จะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและใช้เถ้าลอยมีความละเอียดขึ้น นอกจากนี้พบว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศสูงกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เนื่องจากเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า COCO มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีความพรุน และความเป็นผลึกมากว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยกว่า นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเพสต์ผสมวัสดุเฉื่อยที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้ปริมาณโพรงลดลงมากกว่าการผสมด้วยวัสดุเฉื่อยที่หยาบกว่า และเมื่อเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยวัสดุเฉื่อยและเถ้าลอยแม่เมาะที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน และที่อัตราการแทนที่เดียวกัน พบว่าปริมาณโพรงและการซึมผ่านอากาศของเพสต์ผสมวัสดุเฉื่อยสูงกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยแม่เมาะเป็นวัสดุปอซโซลานจึงสามารถลดขนาดโพรงจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลจากการอัดตัวแน่นของอนุภาคที่มีขนาดเล็กขณะที่วัสดุเฉื่อยสามารถลดปริมาณโพรงได้เนื่องจากการอัดตัวแน่นของอนุภาคที่มีขนาดเล็กเท่านั้น

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2549) 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 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบมอร์ต้ารปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกันมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่ลงกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล (2549) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยบางส่วน โดยการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต จากการศึกษาพบว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตการขยายตัวของมอร์ต้าร์แทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 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

เอกศักดิ์ ฤกษมหาลิขิต, ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ (2552) ได้ศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ที่แทนที่บางส่วนของวัสดุประสานด้วยเถ้าลอยฝุ่นหินปูนและสารขยายตัวโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 จากการศึกษาพบว่ามอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่ามอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ขณะที่มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยและมอร์ต้าร์ที่ผสมสารขยายตัวมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ซีเมนต์ล้วน ส่วนมอร์ต้าร์ที่ผสมฝุ่นหินปูนให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ลดลง สำหรับมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยและฝุ่นหินปูนที่บางอัตราส่วนผสมและมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยและสารขยายตัวให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

ศักดิ์ประยุทธ สินธุภิญโญ และสุรชัย วังรัตนชัย (2552) ได้ตรวจสอบคุณสมบัติของผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่ผสมผงหินปูน เพื่อศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนไประหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จากการศึกษาพบว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และกลไกการเกิดปฏิกิริยามีข้อแตกต่างกัน โดยปูนซีเมนต์ผสมผงหินปูนทำให้เกิดเฟส Monocarboaluminate ซึ่งไม่พบในปูนซีเมนต์ปกติ เกิด Nucleation Effect ในระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เกิดการเติมเต็มช่องว่างและการอัดตัวแน่น (filling/packing effect) ของผงหินปูนระหว่างเนื้อปูนซีเมนต์ ซึ่งจากผลทั้งสามส่วนดังกล่าวเป็นสาเหตุให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ในระยะต้นสูงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามประโยชน์ที่ได้จากการหินปูนบดละเอียดนี้จะอยู่ในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเท่านั้น และข้อควรระวังในการใช้ผงหินปูนในปริมาณมากอาจจะทำให้เกิด false set ในปูนซีเมนต์ได้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผงที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย และผงหินปูน รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานทางด้านความคงทนของคอนกรีตได้แก่ การหดตัวแห้ง การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ การกัดกร่อนโดยซัลเฟต โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (portland cement) หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้จากการเผาส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยหินปูน (calcareous) ดินเหนียวประเภท Argillaceous ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก แล้วนำมาบดเป็นผงละเอียด

2.2.1.1 <u>ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภท แต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่ C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, CaO และ MgO ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.1 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C. 150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 15 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 cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 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 [13]

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

2.2.1.2 <u>องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลัก และสารประกอบออกไซด์รอง ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

ก. สารประกอบออกไซด์หลัก (major oxides)

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

ข. สารประกอบออกไซด์รอง (minor oxides)

สารประกอบออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล ((Na$_2$O) และ(K$_2$O)) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO$_3$)

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (insoluble residue)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [14]

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$_2$O$_3$
ไอออนออกไซด์ (ferric oxide)	0.5 - 6.0	Fe$_2$O$_3$
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (sulfer trioxide)	1.0 - 3.0	SO$_3$
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide)	0.1 - 0.4	MgO
อัลคาไลท์ (alkalies)	0.2 - 1.3	Na$_2$O
ไททาเนียมออกไซด์ (titanium oxide)	0.2 - 1.3	K$_2$O

2.2.1.3 <u>สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์</u>

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผา และการเย็นลงของเม็ดปูน ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

ก. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3CaO.SiO$_2$ หรือ C$_3$S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึกสีเทาแก่ คุณสมบัติของไตรแคลเซียมซิลิเกตนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัว และแข็งตัวให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะ 7 วันแรก โดยปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 45 ถึง 55

ข. ไดแคลเซียมซิลิเกต (2CaO.SiO$_2$ หรือ C$_2$S)

ไดแคลเซียมซิลิเกตมีหลายรูปแบบ โดยที่อุณภูมิปกติ C$_2$S จะอยู่ในรูปเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต (βC$_2$S) ไดแคลเซียมซิลิเกตมีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีคุณสมบัติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดอย่างค่อนข้างช้าและช้ากว่า C$_3$S มาก แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับ C$_3$S 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) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วภายในไม่กี่นาที แต่กำลังค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่า C_3A โดยปริมาณของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5 ถึง 10

การคำนวณปริมาณสารประกอบทั้ง 4 ชนิด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถหาได้จากสูตรการคำนวณ Bogue's Equation โดยแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1: $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$

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

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

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

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

กรณีที่ 1: $Al_2O_3/Fe_2O_3 \geq 0.64$

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

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

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

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

2.2.1.4 <u>ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (hydration reaction) ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

ก. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, $3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide : $Ca(OH_2)$ หรือ CH) ดังสมการที่ 2.9

$$2\left(3CaO.SiO_2\right)+6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_23H_2O+3Ca\left(OH\right)_2 \quad (2.9)$$

ข. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.10

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

ค. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.11

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

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิปซั่มเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (clinker) โดยยิปซั่ม (gypsum : $CaSO4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆของแอทริงไจท์ (ettringite : $3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.31H_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.12

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

ง. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิปซั่ม ดังสมการที่ 2.13

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

เนื่องจากปูนซีเมนต์มี C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก 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 และซัลโฟเฟอไรท์แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.2.2 วัสดุปอซโซลาน

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

2.2.2.1 <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) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

ข. ปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟูม (silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

2.2.2.1 <u>ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน</u>

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่

ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ ดังสมการที่ 2.14 ถึง 2.15

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

2.2.3 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือ เถ้าลอย (fly ash หรือ pulverized) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (electrostatic precipiation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนเนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้า

2.2.3.1 <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 มาจากแร่ดินเหนียวและควอรตซ์ 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 [13]

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

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

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก.2135-2545 [15]

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 [16]

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

2.2.3.2 <u>องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย</u>

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ไอออนออกไซด์ (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

2.2.3.3 ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (hydration) ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.10 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_23H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี้คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ดังสมการที่ 2.14 และ/หรือสมการที่ 2.15 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2.2.4 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

2.2.4.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี

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

$$CaCO_3 + H_2O + heat \longrightarrow Ca(OH)_2 + CO_2 \quad (2.16)$$

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

2.2.4.2 <u>วัสดุที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี</u>

ในกรณีที่มีการนำส่วนของวัสดุที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีมาใช้ผสมเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ สารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พร้อมในการทำปฏิกิริยาจะรวมตัวกับน้ำ ดังสมการที่ 2.18

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 \qquad (2.18)$$

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

การนำเอาผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานมาใช้ในฐานะวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จึงมีความเป็นไปได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาว อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานผงหินปูน และวัสดุปอซโซลานจากแหล่งต่างๆ เมื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสาน ซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าร์ และคอนกรีต ที่มีส่วนผสมของวัสดุทั้งสองให้แน่ชัดก่อนการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2.2.5 การหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) เกิดจากการที่คอนกรีตอยู่ในภาวะอากาศที่มีความชื้นต่ำ ทำให้คอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศสูญเสียน้ำและเกิดการหดตัว โดยที่การหดตัวที่เกิดขึ้นนั้น บางส่วนไม่อาจกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แม้ว่าจะทำให้คอนกรีตเกิดการเปียกชื้นขึ้นมาใหม่

การหดตัวแบบแห้งและการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง มีกลไกการเกิดเช่นเดียวกับการเกิดรอยแตกร้าวแบบพลาสติก นั่นคือในคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสกับอากาศมีความชื้นต่ำ ส่วนความชื้นในช่องคะปิลลารี (capillary pore) มาก จึงเกิดการหดตัวเนื่องจากสูญเสียน้ำอิสระ (free water) ไปสู่อากาศได้ด้วยการระเหย ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในช่องว่างคะปิลลารี ประกอบกับปริมาตรของคอนกรีตลดลง หรือหดตัวลงเนื่องจากการสูญเสียน้ำ ถ้าการหดตัวนี้ถูกยึดรั้ง ไม่ว่าด้วยโครงสร้างที่อยู่รอบข้าง หรือด้วยเนื้อคอนกรีตภายในที่ไม่มีการสูญเสียความชื้น รอยแตกร้าวก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้าการยึดรั้งนี้ก่อให้เกิดหน่วยแรงยึดรั้งที่มีค่าสูงกว่ากำลังแรงดึงของคอนกรีตในขณะนั้น การแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะแตกต่างกับการแตกร้าวแบบพลาสติกตรงที่ช่วงเวลาการเกิด การแตกร้าวแบบพลาสติก จะเกิดในช่วงที่คอนกรีตอยู่ในช่วงพลาสติก ส่วนการแตกร้าวที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

2.2.5.1 <u>บริเวณที่มักจะเกิดรอยแตกร้าวและช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง</u>

การหดตัวแบบแห้งมักจะเกิดขึ้นให้เห็นตรงบริเวณผิวคอนกรีตสัมผัสกับอากาศ บางครั้งถ้าเป็นผนังบางก็อาจมีรอยแตกข้ามไปถึงพื้นผิวอีกด้านหนึ่งได้ ในกรณีของผิวถนนก็มักจะเห็นรอยแตกตามขวางหรือตามยาว ช่วงเวลาที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งมักจะเป็นช่วงเวลาที่หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเป็นต้นไป รอยแตกร้าวนี้อาจจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ แม้แต่อายุคอนกรีตจะมากจนเป็นปีแล้วก็ตาม แต่ส่วนมากแล้วจะเริ่มเกิดให้เห็นในช่วง 2-3 เดือนแรกหลังสิ้นสุดการบ่ม

2.2.5.2 <u>ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้ง</u>

ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อการสูญเสียความชื้นออกจากคอนกรีต จึงมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งทั้งสิ้น ปัจจัยดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

ก. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงจะทำให้มีช่องว่างคะปิลลารีมาก ปริมาณน้ำอิสระก็จะมากไปด้วยการที่คอนกรีตมีช่องว่างคะปิลลารีมากจะทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตได้สะดวก

ข. ปริมาณมวลรวม โดยปกติแล้วการหดตัวจะเกิดในซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณเพสต์น้อยหรือ อีกนัยหนึ่งมีปริมาณมวลรวมมาก ก็ทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง

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

ง. ชนิดและปริมาณของวัสดุผสม การใช้ปอซโซลาน หรือวัสดุผงบางชนิด ก็มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต เช่น เถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต และเถ้าลอยบางชนิดก็ยังมีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตขยายตัวเล็กน้อย ทำให้ชดเชยการหดตัวได้บางส่วน การใช้ผงซิลิกาฟูมก็สามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งได้ เนื่องจากช่วยเพิ่มความแน่นให้คอนกรีต การใช้ผงหินปูนก็อาจสามารถช่วยลดการหดตัวแบบแห้งด้วย

จ. อุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะทำให้คอนกรีตสูญเสียน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งมากขึ้น

ฉ. มิติและรูปร่างลักษณะของโครงสร้างคอนกรีต โครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากก็จะสูญเสียความชื้นได้เร็ว จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้งได้ง่าย

2.2.6 การเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยอิออนของคลอไรด์ (chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้วถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

2.2.6.1 <u>แหล่งที่มาของคลอไรด์</u>

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว อย่างไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่มาจากส่วนผสมแต่ละชนิด (ไม่รวมที่ซึมผ่านเข้ามาจากสิ่งแวดล้อม) โดยจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณคลอไรด์รวมที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีตที่ยอมให้ [17]

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

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

อย่างไรก็ตาม ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้นส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (de-icing salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

ก. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (capillary suction)

ข. การแพร่ของอิออนของคลอไรด์ (chloride ions) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต

ค. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

โดยทั่วๆไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานักความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ(splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีต เป็นช่องว่างอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อยถึงแม้ว่าจะมีปริมาณออกซิเจนมาก ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัด โดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจน ผ่านช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

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

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

2.2.6.2 สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (fixed chloride) โดยกลไกดังต่อไปนี้

ก. Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เช่น ผลผลิตของ C_3A และC_4AF ในรูปของ $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (Fridel's Salt) หรือ $3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ (calcium chloroferrite) หรือแม้แต่อยู่ในโครงสร้างของผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

ข. Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชั่น เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยาเช่น มวลรวม หรือ ผงหินปูนได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (free chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

2.2.6.3 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณใกล้ผิวที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม คลอไรด์ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเล เป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

ก. ในกรณีของสภาวะเปียกสลับกับแห้งด้วยน้ำทะเล ในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ทิ้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้า สู่สภาวะเปียกน้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆรอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

ข. ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชั่น เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบ

เข้าไปได้ อย่างไรก็ดีในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ว่าในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดิน ซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมี มากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้

การแทรกซึมของคลอไรด์อิออนเข้าสู่คอนกรีต โดยธรรมชาติเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นค่อนข้างช้า จึงมีความพยายามหาวิธีทดสอบที่ใช้ระยะเวลาในการทดสอบน้อย วิธีทดสอบที่นิยมใช้วิธีหนึ่ง คือการเร่งให้เกิดการแทรกซึมเร็วขึ้นด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งเรียกว่า Migration Test ซึ่งการทดสอบหลายมาตรฐานใช้วิธีการทดสอบลักษณะดังกล่าว ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะ การทดสอบการต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน (ASTM C1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์

การทดสอบการต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน เป็นวิธีการทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออนให้เร็วขึ้น โดยให้ชิ้นตัวอย่างอยู่ภายในสนามไฟฟ้าด้วยการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงให้ พัฒนาโดย Whiting ในปี ค.ศ.1981 มักเรียกวิธีการทดสอบนี้ในอีกชื่อคือ Rapid Chloride Permeability Test ใช้ค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นตัวอย่าง เพื่อนำไปประเมินระดับการซึมผ่านได้ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ ASTM C1202 [13]

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

2.2.7 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 สำหรับการกัดกร่อนทางเคมีพบว่าเกลือในรูปของสารละลายจะสามารถทำลายคอนกรีตได้เพราะจะซึมเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์ได้ สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรง คือแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ส่วนเกลือแกง (NaCl) กับโปตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งพบมากในน้ำทะเลเช่นกันจะทำให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมได้ง่าย ในน้ำใต้ดินบริเวณที่มีแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$) มักมีซัลเฟตปนอยู่เสมอ โดยทั่วไปดินมีซัลเฟตอยู่เล็กน้อยคือประมาณร้อยละ 0.01 ถึง 0.05 ของน้ำหนัก แต่จะเพิ่มสูงมากขึ้นเนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยธรรมชาติ

การศึกษาการกัดกร่อนของซัลเฟตต่อคอนกรีตเป็นสิ่งที่น่าสนใจและจำเป็นอย่างมาก เพราะถ้าไม่ป้องกันผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในตอนเริ่มแรกของการก่อสร้างแล้วคอนกรีตอาจเสียหายได้ในอนาตคอันใกล้ ทำให้ต้องซ่อมแซมคอนกรีตและการซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟตจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

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

ตารางที่ 2.8 สภาวะของซัลเฟต [17]

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

2.2.7.1 <u>แหล่งของเกลือซัลเฟต</u>

เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเล หรือในดินทั่วไปเกลือซัลเฟตชนิดที่พบมากที่สุด มักจะเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต รองลงมาก็คือแมกนีเซียมซัลเฟต เกลือซัลเฟตยังมักจะอยู่ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อนธรรมชาติ

2.2.7.2 <u>กลไกการกัดกร่อนโดยโซเดียมซัลเฟต</u>

การกัดกร่อนของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ขึ้นอยู่กับปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยกลไกเริ่มจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายน้ำและมีความเป็นกรดเป็นด่างสูง ดังสมการที่ 2.19

$$Ca(OH)_2 + Na_2 2SO_4 \longrightarrow \text{ยิปซั่ม} + NaOH \qquad (2.19)$$

ยิปซั่มที่ได้จากสมการที่ 2.19 จะทำปฏิกิริยากับโมโนซัลเฟตหรือไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ทำให้ได้ Secondary Ettringite เกิดเป็นชั้นบริเวณผิวด้านนอก ดังสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$\text{C-A-H} + \text{ยิปซั่ม} \longrightarrow \text{Ettringite} + Ca(OH)_2 \qquad (2.20)$$

$$C_3A + \text{ยิปซั่ม} \longrightarrow \text{Ettringite} \qquad (2.21)$$

ยิปซั่มและ Ettringite ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นกว่า 2 เท่า โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลปฏิกิริยาไฮเดรชั่นชนิดอื่นมากจึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำละลายโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต

2.2.7.3 <u>กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต</u>

เริ่มจากการทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ยิปซั่มและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ดังสมการที่ 2.22

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 \longrightarrow \text{ยิปซั่ม} + Mg(OH)_2 \qquad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 ปฏิกิริยานี้ทำให้ความเป็นด่าง (pH) ของสารละลายลดลงซึ่งส่งผลให้เกิดการไม่อยู่ตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) โดยจะเกิดการสลายตัวเพื่อทำให้ความเป็นด่าง (pH) สูงขึ้น ดังสมการที่ 2.23

$$C\text{-}S\text{-}H \longrightarrow \text{สารละลาย } SiO_2 + Ca(OH)_2 \qquad (2.23)$$

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

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.22 ถึง 2.23 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมากและค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างไม่สูง จึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettingite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังสมการที่ 2.25

จากสมการที่ 2.24 และ 2.25 ทั้ง C-S-H_2 และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย C-S-H_2 จะถูกสะสมในช่องว่าง (pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิก้าเจล (S_2H) ดังแสดงในสมการที่ 2.26 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย ดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม C-S-H_2 โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต

$$CH + MS + 2H \longrightarrow C\text{-}S\text{-}H_2 + MH \qquad (2.24)$$

$$C_XS_YH_Z + XMS + (3X+0.5Y-Z)H \longrightarrow XC\text{-}S\text{-}H_2 + XMH + 0.5yS_2H \qquad (2.25)$$

$$4MH + SH_{11} \longrightarrow M_4SH_{8.5} + (n-4.5)H \qquad (2.26)$$

2.2.7.4 <u>ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต</u>

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_2A และ C_3S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

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

2.2.7.5 <u>วิธีการป้องกันการทำลายของซัลเฟต</u>

ก. ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และและอัตราส่วน 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 2.9 แสดงให้เห็นถึงข้อแนะนำของสมาคมคอนกรีตในสหรัฐอเมริกาสำหรับการเลือกใช้วัสดุประสาน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีต ในสภาวะที่มีซัลเฟตอยู่ในระดับรุนแรงต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 2.9 ข้อแนะนำสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมซัลเฟต [17]

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

บทที่ 3
วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาจะกล่าวถึง วัสดุที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดวิธีการศึกษา และสัดส่วนผสมของเพสต์และมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ผงหินปูน ทราย น้ำ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 80-2517 โดยเป็นปูนซีเมนต์ที่ใหม่ไม่จับตัวเป็นก้อน

2. เถ้าลอย ใช้เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ต่างๆกันดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในตัวอย่างเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

เถ้าลอย	fCaO (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	SO_3 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ตัวอย่าง A	0.83	1.86
ตัวอย่าง B	2.43	
ตัวอย่าง C	3.81	
ตัวอย่าง D	2.11	5.08
ตัวอย่าง E	3.11	
ตัวอย่าง F	4.51	

หมายเหตุ:
- ตัวอย่างเถ้าลอย A และตัวอย่างเถ้าลอย D ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- ตัวอย่างเถ้าลอย B และตัวอย่างเถ้าลอย C ได้จากการเติมผงแคลเซียมออกไซด์ (quick lime powder) ลงในเถ้าลอยตัวอย่าง A ให้ได้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระเท่ากับร้อยละ 2.43 และ 3.81 ตามลำดับ
- ตัวอย่างเถ้าลอย E และตัวอย่างเถ้าลอย F ได้จากการเติมผงแคลเซียมออกไซด์ (quick lime powder) ลงในเถ้าลอยตัวอย่าง D ให้ได้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระเท่ากับร้อยละ 3.11 และ 4.51 ตามลำดับ

3. ผงหินปูน ใช้ผงหินปูนที่ได้รับการควบคุมคุณภาพในการผลิต มีสิ่งเจือปนน้อย และผลิตเพื่อจำหน่ายเป็นอุตสาหกรรม โดยมีความละเอียด 3 ไมโครเมตร

4. ผงแคลเซียมออกไซด์ (quick lime powder)

5. ทราย ใช้ทรายน้ำจืดนำมาล้างด้วยน้ำเอาส่วนที่เป็นดินและสิ่งเจือปนต่างๆออกจนสะอาด นำไปอบและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และปรับทรายให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

6. น้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำประปา

7. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

8. โซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

3.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

สำหรับรายละเอียดวิธีการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาหรือทดสอบคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา และคุณสมบัติทางด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอย และผงหินปูน) ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.1.1 <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. ความละเอียดของวัสดุประสานโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 204-00 ด้วยเครื่องมือแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์ (air permeability apparatus) (รูปที่ 3.2)

รูปที่ 3.2 เครื่องมือหาความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนด์

3.2.1.2 <u>คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา</u>

สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

3.2.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย ความข้นเหลวปกติของเพสต์ ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.2.1 <u>ความข้นเหลวปกติของเพสต์</u>

ความข้นเหลวปกติของเพสต์ (normal consistency) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 187-98 ด้วยเครื่องมือไวแคท (vicat apparatus) (รูปที่ 3.3)

3.2.2.2 <u>ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์</u>

ระยะเวลาการก่อตัว (setting time) ของเพสต์ ซึ่งทำการทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวระยะต้น (initial setting ime) และระยะเวลาก่อตัวระยะปลาย (final setting time) กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 191-99 ด้วยเครื่องมือไวแคท

รูปที่ 3.3 เครื่องมือไวแคท

3.2.2.3 <u>การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์</u>

การไหลแผ่ (flow value) ของมอร์ต้าร์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 109-99 ด้วยโต๊ะทดสอบการไหล (flow table) (รูปที่ 3.4)

รูปที่ 3.4 โต๊ะทดสอบการไหล

3.2.2.3 <u>กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์</u>

กำลังอัดประลัย (compressive strength) ของมอร์ต้าร์ ประยุกต์ใช้มาตรฐาน ASTM C 109 ที่อายุ 3, 7, 28 และ 91 วัน ด้วยเครื่อง UTM (universal testing machine) (รูปที่ 3.5)

รูปที่ 3.5 เครื่อง UTM (universal testing machine)

3.2.3 คุณสมบัติด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์วัสดุประสาน

สำหรับคุณสมบัติทางด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์วัสดุประสานที่ศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

3.2.3.1 <u>การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์</u>

การหดตัวแห้ง (drying shrinkage) ของมอร์ต้าร์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 596-96 ด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) (รูปที่ 3.6) โดยมีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความยาว

ก. การเตรียมตัวอย่าง

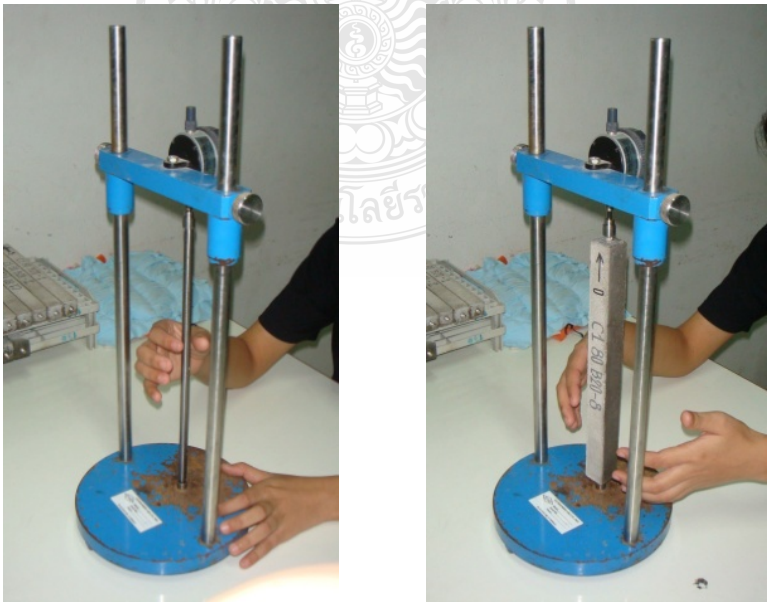
การทดสอบการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. ดังรูปที่ 3.7 โดยในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์จำนวณ 4 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยการหดตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์

(ก) แบบหล่อ (ข) ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแห้ง

รูปที่ 3.7 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการหดตัวแห้ง

ข. อายุการบ่มและอายุทดสอบการหดตัวแห้ง

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ โดยถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมงแล้วนำไปบ่มในน้ำ 7 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2 °C เมื่อเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำ นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานดังรูปที่ 3.8 ซึ่งค่าที่วัดได้ ณ ขณะนี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างบ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30±2 °C โดยวางชิ้นตัวอย่างบนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว ดังรูปที่ 3.9 หลังจากนั้นทำการวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานที่อายุบ่มในอากาศต่างๆ คือ 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 42 และ 91 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่อายุบ่มต่างๆกัน



รูปที่ 3.8 การวัดความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน

รูปที่ 3.9 ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่บ่มในอากาศที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30±2 °C

ค. การคำนวณร้อยละของการหดตัวแห้ง

ค่าความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น ที่ได้จากการวัดครั้งแรกหลังจากบ่มในน้ำ 7 วัน และค่าที่วัดได้ในช่วงอายุบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ จะนำไปคำนวณค่าร้อยละของการหดตัวแห้ง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (3.1)

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

โดย ΔL คือ ค่าการหดตัวแห้ง (%)

L_x คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานหลังจากบ่มในอากาศที่อายุต่างๆ (มม.)

L_i คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มม.)

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มม.

3.2.3.2 <u>ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์</u>

สำหรับการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (chloride binding capacity) ของเพสต์มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

ก. การเตรียมตัวอย่าง

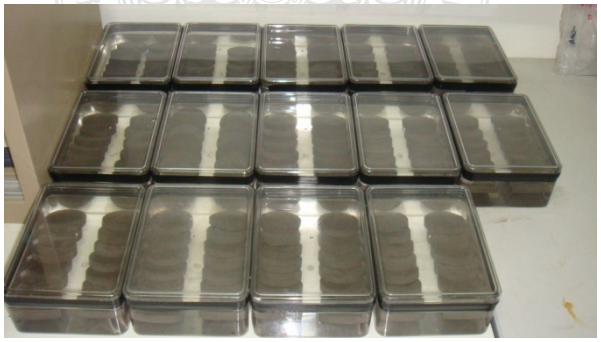
การทดสอบความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของตัวอย่างเพสต์ ใช้ชิ้นตัวอย่างเพสต์ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม. หนา 10 มม. ดังรูปที่ 3.10 ในแต่ละสัดส่วนผสมของเพสต์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 13 ชิ้น แบ่งเป็น 10 ชิ้นสำหรับรีดเอาสารละลายภายในโพรงของชิ้นตัวอย่างเพสต์ และอีก 3 ชิ้นสำหรับหาค่าการดูดซึมน้ำ

(ก) แบบหล่อ (ข) ชิ้นตัวอย่างเพสต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม. หนา 10 มม.

รูปที่ 3.10 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างเพสต์ที่ใช้ทดสอบความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์

ข. อายุการบ่มและอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์หรือน้ำเกลือ

ภายหลังหล่อชิ้นตัวอย่างเพสต์ทั้ง 13 ชิ้นเสร็จแล้ว หุ้มชิ้นตัวอย่างเพสต์ด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำสู่สภาวะแวดล้อม เมื่อชิ้นตัวอย่างมีอายุครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วบ่มในน้ำ 7 วัน ที่อุณหภูมิการบ่มเท่ากับ 30±2°C หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน นำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวด้วยกระดาษชำระ หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (น้ำเกลือ) ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนร้อยละ 5 (50 กรัม/ลิตร) โดยใช้ระยะเวลาแช่ในสารละลาย 91 วัน รูปที่ 3.11 แสดงการแช่ชิ้นตัวอย่างเพสต์ในน้ำเกลือ อุณหภูมิในระหว่างแช่ชิ้นตัวอย่างในน้ำเกลือเท่ากับ 30±2°C



รูปที่ 3.11 การแช่ชิ้นตัวอย่างเพสต์ในน้ำเกลือ

ค. การคำนวณหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์

เมื่อครบอายุแช่ในน้ำเกลือ 91 วัน นำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำเกลือและทำให้ผิวแห้งด้วยกระดาษชำระ หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างเพสต์ 10 ชิ้นมารีดเอาสารละลายในโพรงของชิ้นตัวอย่าง (pore solution) ออกมาโดยใช้เครื่องทดสอบ UTM (universal testing machine) ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งใช้ร่วมกับเครื่องมือที่ออกแบบมาโดยเฉพาะดังรูปที่ 3.13 ทำการติดตั้งเข้ากับแท่นกดของเครื่อง UTM ดังรูปที่ 3.14 โดยใช้แรงอัดประมาณ 500 MPa ทำการอัดประมาณ 2 ถึง 3 รอบ เพื่อให้ได้สารละลายในโพรงของชิ้นตัวอย่าง 3 ถึง 5 ลบ.ซม. ดังรูปที่ 3.15 ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างเพสต์สามารถหาได้จากการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเพสต์ 3 ชิ้นหลังจากอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างเพสต์ที่หามาได้นี้จะใช้ในการหาคลอไรด์อิสระในชิ้นตัวอย่างเพสต์ต่อไป

รูปที่ 3.12 เครื่อง UTM (universal testing machine)

รูปที่ 3.13 เครื่องมือรีดสารละลาย

รูปที่ 3.14 การติดตั้งเครื่องมือรีดสารละลาย

รูปที่ 3.15 สารละลายที่ถูกรีดออกจากภายในโพรงของชิ้นตัวอย่างเพสต์

รูปที่ 3.16 แสดงแบบจำลองวิธีการศึกษาการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ โดยคลอไรด์ไอออนทั้งหมด (total Cl^-) หาค่าได้จากผลคูณของปริมาตรน้ำเกลือกับค่าผลต่างระหว่างคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นของน้ำเกลือก่อนแช่ชิ้นตัวอย่างและคลอไรด์ไอออนของน้ำเกลือหลังแช่ชิ้นตัวอย่างเพสต์เป็นเวลา 91 วัน ส่วนคลอไรด์ไอออนอิสระ (free Cl^-) สามารถหาค่าได้จากความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนของสารละลายที่ถูกรีดออกมาจากในโพรงของชิ้นตัวอย่างเพสต์คูณกับค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างเพสต์ สุดท้ายค่าคลอไรด์ไอออนของตัวอย่างเพสต์ที่ถูกยึดจับไว้ (fixed Cl^-) สามารถหาค่าได้จากผลต่างระหว่างคลอไรด์ไอออนทั้งหมดกับคลอไรด์ไอออนอิสระ ความเข้มข้นของคลอไรด์ทุกๆค่าวิเคราะห์หาค่าได้จากการไตรเตรทด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) ส่วนวิธีการคำนวณหาค่าคลอไรด์ไอออนที่ถูกยึดจับไว้สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (3.2) ถึง (3.4)

$$\text{Total } Cl^- = \{[Cl^-]_i - [Cl^-]_f\} * V \quad (3.2)$$

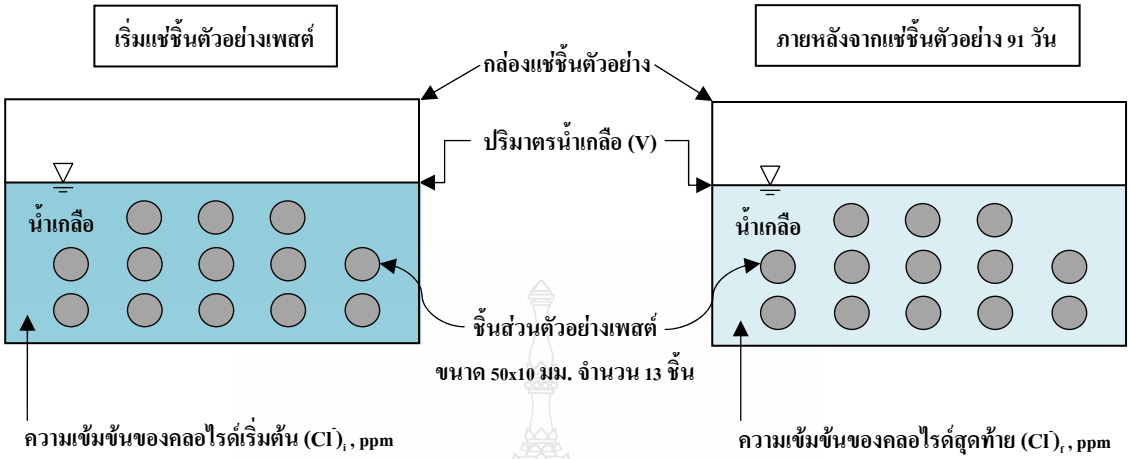
$$\text{Free } Cl^- = \text{หาได้จากสารละลายในโพรงของตัวอย่างเพสต์และค่าการดูดซึมน้ำ} \quad (3.3)$$

$$\text{Fixed } Cl^- = \text{Total } Cl^- - \text{Free } Cl^- \quad (3.4)$$

โดย $[Cl^-]_i$ คือ คลอไรด์ไอออนเริ่มต้นของน้ำเกลือก่อนแช่ชิ้นตัวอย่าง

$[Cl^-]_f$ คือ คลอไรด์ไอออนของน้ำเกลือหลังแช่ชิ้นตัวอย่าง

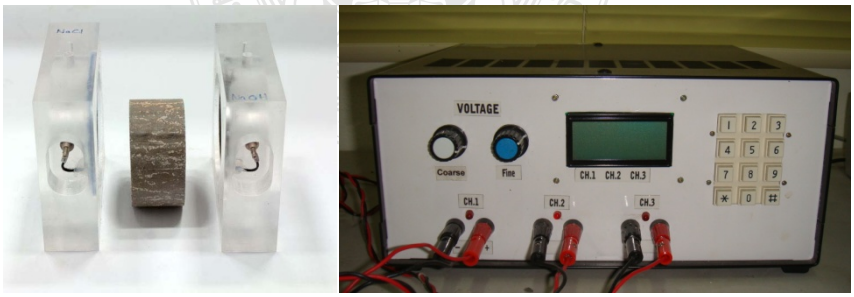
V คือ ปริมาตรน้ำเกลือ



รูปที่ 3.16 แบบจำลองวิธีการศึกษาการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์

3.2.3.3 <u>ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์</u>

สำหรับการศึกษาความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ (chloride penetration resistance) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1202 – 97 ด้วยชุดเครื่องมือทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน (รูปที่ 3.17) โดยมีรายละเอียด วิธีการศึกษาดังนี้



(ก) Cell (ข) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าออก 60 ± 0.1 V

รูปที่ 3.17 ชุดเครื่องมือทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน

ก. การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. หนา 50 มม. ดังรูปที่ 3.18 ในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้งหมด 9 ชิ้น แบ่งชิ้นตัวอย่างออกเป็น 3 ชุด เพื่อทดสอบการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่อายุบ่มต่างๆกัน โดยในแต่ละอายุการบ่มทดสอบใช้ตัวอย่างชุดละ 3 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์

(ก) แบบหล่อ (ข) ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. หนา 50 มม.

รูปที่ 3.18 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์

ข. อายุการบ่มทดสอบการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์

ภายหลังหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์เสร็จแล้ว ทำการหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำสู่สภาวะแวดล้อม โดยแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์มีชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 9 ชิ้น หลังจากที่อายุชิ้นตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วบ่มในน้ำที่อุณหภูมิระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2°C โดยแบ่งตัวอย่างทดสอบเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ชิ้นตัวอย่าง โดยแต่ละกลุ่มมีระยะเวลาบ่ม 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ

ค. การเตรียมสารละลาย

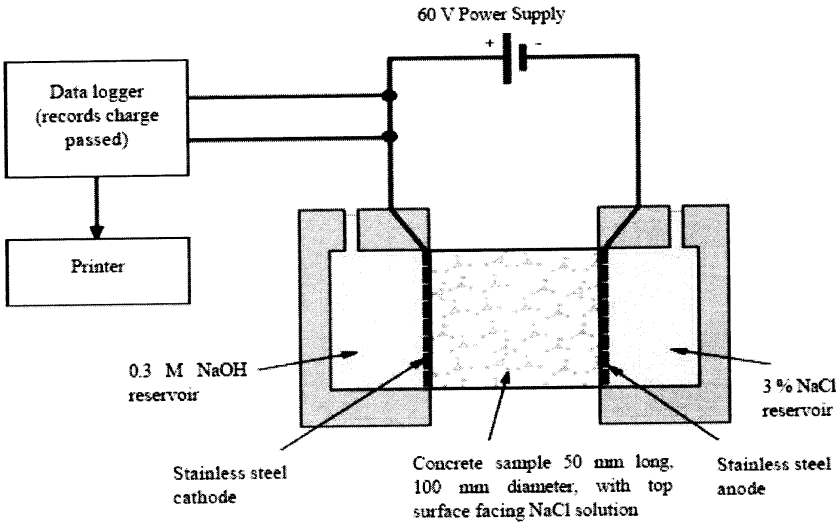
สารละลายที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลายโซเดียมไฮดรอคไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ สำหรับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เตรียมโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ 30 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอคไซด์ เตรียมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 กรัมละลายในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 1000 กรัม เพื่อให้ได้สารละลายที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์

ง. การหาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์

เมื่อครบอายุบ่ม 7, 28 และ 91 วัน นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ 3 ชิ้นที่เตรียมไว้ทดสอบที่อายุบ่มดังกล่าวขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มาประกอบเข้ากับ Cell โดยทำการเคลือบรอบๆผิวชิ้นตัวอย่างด้วยกาวโพลียูรีเทนดังรูปที่ 3.19 เมื่อกาวแห้งจึงเติมสารละลาย NaCl ลงใน Cell ด้านขั้วลบ และเติมสารละลาย NaOH ลงใน Cell ด้านขั้วบวก เมื่อเติมสารละลายเสร็จนำประกอบเข้ากับชุดทดสอบดังรูปที่ 3.20 ซึ่งการจัดชุดทดสอบมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.21 หลังจากนั้นปล่อยแรงดันไฟฟ้าขนาด 60±0.1 โวลต์ผ่านชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ เครื่องมือจะทำการอ่านค่ากระแสไฟที่ผ่านตัวอย่างทดสอบของแต่ละ Cell ซึ่งจะทำการบันทึกค่าโดยอัตโนมัติทุกๆ 30 นาที ใช้เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง โดยแสดงผลการทดสอบเป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างทดสอบ (total charge passed) มีหน่วยเป็น Coulombs

รูปที่ 3.19 การประกอบชิ้นตัวอย่างเข้ากับ Cell เพื่อเตรียมทดสอบการซึมผ่านคลอไรด์

รูปที่ 3.20 การประกอบ Cell เข้ากับชุดทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน



รูปที่ 3.21 รายละเอียดการจัดชุดทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์อิออน

3.2.3.4 <u>ความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์</u>

สำหรับการวัดความต้านทานซัลเฟต (sulfate resistance) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ได้ใช้วิธีการประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดการขยายตัว (expansion) ของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ในกรณีที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ส่วนการสูญเสียน้ำหนัก (weight loss) ของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ประเมินกรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

โดยสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ใช้มีความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33800 ppm กรณีสารละลายโซเดียมซัลเฟตใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร จะได้ปริมาณอิออนซัลเฟตเท่ากับ 33800 ppm ส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแยกเตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณอิออนซัลเฟตที่เท่ากันคือ 33800 ppm โดยเตรียมสารละลายแต่ละชนิดไว้ล่วงหน้า 1 วัน อุณหภูมิสารละลายขณะแช่ตัวอย่างประมาณ 30±2°C ในการแช่ชิ้นตัวอย่างใช้อัตราส่วนปริมาตรสารละลายต่อปริมาตรตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ประมาณ 4 ต่อ 1 และจัดให้มีระบบการหมุนเวียนสารละลายในถัง โดยสารละลายซัลเฟตที่ใช้แช่ตัวอย่างจะมีทำการเปลี่ยนทุกๆอายุแช่ตัวอย่าง 2 เดือน

สำหรับรายละเอียดวิธีศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ มีรายละเอียดดังนี้

ก. การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1012 – 97 ด้วยเครื่องวัดความยาว (length comparator) (รูปที่ 3.6) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ซึ่งเตรียมขึ้นโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. ดังรูปที่ 3.22 ในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 4 ชิ้น

(ก) แบบหล่อ (ข) ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม.

รูปที่ 3.22 แบบหล่อและชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

- อายุการบ่มและอายุทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างแล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์ 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2°C หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้ง 4 ชิ้นของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์จะถูกนำขึ้นจากน้ำแล้วเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์วัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานดังรูปที่ 3.8 ซึ่งค่าที่วัดได้ ณ ขณะนี้จะใช้เป็นค่าความยาวเริ่มต้น เมื่อวัดค่าความยาวเสร็จชิ้นตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นจะถูกนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เพื่อหาค่าเฉลี่ยการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่อายุแช่ในสารละลายครบ 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ60 สัปดาห์ ตามลำดับ รูปที่ 3.23 แสดงชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเพื่อทดสอบการขยายตัว

รูปที่ 3.23 ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเพื่อทดสอบการขยายตัว

- การหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

เมื่อครบที่อายุแช่ในสารละลาย (2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ 60 สัปดาห์) นำชิ้นตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นขึ้นจากสารละลายซัลเฟตเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้า หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้นำไปหาค่าการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้จากสมการที่ (3.5)

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \qquad (3.5)$$

โดย ΔL คือ ค่าการขยายตัว (%)

L_x คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุแช่ในสารละลายซัลเฟตต่างๆ (มม.)

L_i คือ ค่าความยาวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานเริ่มต้น (มม.)

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 285 มม.

ข. การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ทำการทดสอบด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัม (รูปที่ 3.24) โดยการหาการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

รูปที่ 3.24 เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.01 กรัม

- การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ใช้ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ซึ่งเตรียมโดยแบบหล่อตัวอย่างขนาด 50x50x50 มม. ดังรูปที่ 3.25 ในแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 3 ชิ้น

(ก) แบบหล่อ (ข) ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม.

รูปที่ 3.25 แบบหล่อและตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

- อายุการบ่มและอายุทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

หลังจากหล่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์แล้ว ทำการถอดแบบที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (saturated lime water) เป็นเวลา 28 วัน อุณหภูมิในระหว่างการบ่มเท่ากับ 30±2°C หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้ง 3 ชิ้นของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ขึ้นจากน้ำแล้วล้างทำความสะอาดเอาปูนขาวและสิ่งสกปรกที่อาจติดอยู่ที่ผิวของชิ้นตัวอย่างออกแล้วเช็ดผิวชิ้นตัวอย่างด้วยผ้า

เมื่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง นำชิ้นตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักที่ชั่งได้ ณ ขณะนี้จะใช้เป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างมอร์ต้าร์ หลังจากชั่งน้ำหนักเสร็จแล้ว นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อหาค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่อายุแช่ในสารละลายครบ 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ 60 สัปดาห์ ตามลำดับ ซึ่งในกรณีการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์จะประเมินเฉพาะในกรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น

- การหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

เมื่อครบที่อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52 และ 60 สัปดาห์) นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ทั้ง 3 ชิ้นของแต่ละสัดส่วนผสมมอร์ต้าร์ขึ้นจากสารละลายซัลเฟต หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มาปัดผิวด้วยแปรงเพื่อให้เศษมอร์ต้าร์ที่อาจเสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตหลุดออกและซับผิวให้แห้งด้วยผ้า เมื่อชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์อยู่ในสถาวะอิ่มตัวผิวแห้งนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าไปหาการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้จากสมการ (3.6)

$$\Delta W = \frac{W_x - W_i}{W_i} \times 100 \qquad (3.6)$$

โดย ΔW คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (%)

W_x คือ ค่าน้ำหนักที่อายุต่างๆที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (กรัม)

W_i คือ ค่าน้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)

3.3 สัดส่วนผสมของเพสต์และมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนผสมของเพสต์และมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แยกตามคุณสมบัติต่างๆที่ได้ศึกษา โดยมีรายละเอียดของสัดส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

3.3.1 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาค่าความข้นเหลวปกติและการก่อตัวของเพสต์ แสดงดังตารางที่ 3.2

3.3.2 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 2.75 แสดงดังตารางที่ 3.3

3.3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 2.75 แสดงดังตารางที่ 3.4

3.3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้หาการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 2.75 แสดงดังตารางที่ 3.5

3.3.4 สัดส่วนผสมของเพสต์ที่ใช้ในการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 แสดงดังตารางที่ 3.6

3.3.5 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 2.75 แสดงดังตารางที่ 3.7

3.3.6 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 2.75 แสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาค่าความข้นเหลวปกติและการก่อตัวของตัวอย่างเพสต์

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
			A	B	C	D	E	F	
1	PC	100	-	-	-	-	-	-	-
2	PC 10L	90	-	-	-	-	-	-	10
3	PC 20FA	80	20	-	-	-	-	-	-
4	PC 20FB	80	-	20	-	-	-	-	-
5	PC 20FC	80	-	-	20	-	-	-	-
6	PC 20FD	80	-	-	-	20	-	-	-
7	PC 20FE	80	-	-	-	-	20	-	-
8	PC 20FF	80	-	-	-	-	-	20	-
9	PC 10FA 10L	80	10	-	-	-	-	-	10
10	PC 10FB 10L	80	-	10	-	-	-	-	10
11	PC 10FC 10L	80	-	-	10	-	-	-	10
12	PC 10FD 10L	80	-	-	-	10	-	-	10
13	PC 10FE 10L	80	-	-	-	-	10	-	10
14	PC 10FF 10L	80	-	-	-	-	-	10	10

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาค่าการไหลแผ่

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	W/B	S/B
			A	B	C	D	E	F			
1	MC	100	-	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
2	MC 10L	90	-	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
3	MC 20FA	80	20	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
4	MC 20FB	80	-	20	-	-	-	-	-	0.55	2.75
5	MC 20FC	80	-	-	20	-	-	-	-	0.55	2.75
6	MC 20FD	80	-	-	-	20	-	-	-	0.55	2.75
7	MC 20FE	80	-	-	-	-	20	-	-	0.55	2.75
8	MC 20FF	80	-	-	-	-	-	20	-	0.55	2.75
9	MC 10FA 10L	80	10	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
10	MC 10FB 10L	80	-	10	-	-	-	-	10	0.55	2.75
11	MC 10FC 10L	80	-	-	10	-	-	-	10	0.55	2.75
12	MC 10FD 10L	80	-	-	-	10	-	-	10	0.55	2.75
13	MC 10FE 10L	80	-	-	-	-	10	-	10	0.55	2.75
14	MC 10FF 10L	80	-	-	-	-	-	10	10	0.55	2.75

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหากำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	W/B	S/B
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	A	B	C	D	E	F			
1	MC	100	-	-	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
2	MC5	-	100	-	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
3	MC 10L	90	-	-	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
4	MC 20FA	80	-	20	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
5	MC 20FB	80	-	-	20	-	-	-	-	-	0.55	2.75
6	MC 20FC	80	-	-	-	20	-	-	-	-	0.55	2.75
7	MC 20FD	80	-	-	-	-	20	-	-	-	0.55	2.75
8	MC 20FE	80	-	-	-	-	-	20	-	-	0.55	2.75
9	MC 20FF	80	-	-	-	-	-	-	20	-	0.55	2.75
10	MC 10FA 10L	80	-	10	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
11	MC 10FB 10L	80	-	-	10	-	-	-	-	10	0.55	2.75
12	MC 10FC 10L	80	-	-	-	10	-	-	-	10	0.55	2.75

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหากำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	W/B	S/B
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	A	B	C	D	E	F			
13	MC 10FD 10L	80	-	-	-	-	10	-	-	10	0.55	2.75
14	MC 10FE 10L	80	-	-	-	-	-	10	-	10	0.55	2.75
15	MC 10FF 10L	80	-	-	-	-	-	-	10	10	0.55	2.75
16	MC 40FA	60	-	40	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
17	MC 40FB	60	-	-	40	-	-	-	-	-	0.55	2.75
18	MC 40FC	60	-	-	-	40	-	-	-	-	0.55	2.75
19	MC 40FD	60	-	-	-	-	40	-	-	-	0.55	2.75
20	MC 40FE	60	-	-	-	-	-	40	-	-	0.55	2.75
21	MC 40FF	60	-	-	-	-	-	-	40	-	0.55	2.75
22	MC 30FA 10L	60	-	30	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
23	MC 30FB 10L	60	-	-	30	-	-	-	-	10	0.55	2.75
24	MC 30FC 10L	60	-	-	-	30	-	-	-	10	0.55	2.75
25	MC 30FD 10L	60	-	-	-	-	30	-	-	10	0.55	2.75
26	MC 30FE 10L	60	-	-	-	-	-	30	-	10	0.55	2.75
27	MC 30FF 10L	60	-	-	-	-	-	-	30	10	0.55	2.75

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	W/B	S/B
			A	B	C	D	E	F			
1	MC	100	-	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
2	MC 10L	90	-	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
3	MC 30FA	70	30	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
4	MC 30FB	70	-	30	-	-	-	-	-	0.55	2.75
5	MC 30FC	70	-	-	30	-	-	-	-	0.55	2.75
6	MC 30FD	70	-	-	-	30	-	-	-	0.55	2.75
7	MC 30FE	70	-	-	-	-	30	-	-	0.55	2.75
8	MC 30FF	70	-	-	-	-	-	30	-	0.55	2.75
9	MC 50FA	50	50	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
10	MC 50FB	50	-	50	-	-	-	-	-	0.55	2.75
11	MC 50FC	50	-	-	50	-	-	-	-	0.55	2.75

ตารางที่ 3.5 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	W/B	S/B
			A	B	C	D	E	F			
12	MC 50FD	50	-	-	-	50	-	-	-	0.55	2.75
13	MC 50FE	50	-	-	-	-	50	-	-	0.55	2.75
14	MC 50FF	50	-	-	-	-	-	50	-	0.55	2.75
15	MC 20FA 10L	70	20	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
16	MC 20FB 10L	70	-	20	-	-	-	-	10	0.55	2.75
17	MC 20FC 10L	70	-	-	20	-	-	-	10	0.55	2.75
18	MC 20FD 10L	70	-	-	-	20	-	-	10	0.55	2.75
19	MC 20FE 10L	70	-	-	-	-	20	-	10	0.55	2.75
20	MC 20FF 10L	70	-	-	-	-	-	20	10	0.55	2.75
21	MC 40FA 10L	50	40	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
22	MC 40FB 10L	50	-	40	-	-	-	-	10	0.55	2.75
23	MC 40FC 10L	50	-	-	40	-	-	-	10	0.55	2.75
24	MC 40FD 10L	50	-	-	-	40	-	-	10	0.55	2.75
25	MC 40FE 10L	50	-	-	-	-	40	-	10	0.55	2.75
26	MC 40FF 10L	50	-	-	-	-	-	40	10	0.55	2.75

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนผสมของเพสต์ที่ใช้ในการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของตัวอย่างเพสต์

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	W/B
			A	B	C	D	E	F		
1	PC	100	-	-	-	-	-	-	-	0.55
2	PC 10L	90	-	-	-	-	-	-	10	0.55
3	PC 30FA	70	30	-	-	-	-	-	-	0.55
4	PC 30FB	70	-	30	-	-	-	-	-	0.55
5	PC 30FC	70	-	-	30	-	-	-	-	0.55
6	PC 30FD	70	-	-	-	30	-	-	-	0.55
7	PC 30FE	70	-	-	-	-	30	-	-	0.55
8	PC 30FF	70	-	-	-	-	-	30	-	0.55
9	PC 20FA 10L	70	20	-	-	-	-	-	10	0.55
10	PC 20FB 10L	70	-	20	-	-	-	-	10	0.55
11	PC 20FC 10L	70	-	-	20	-	-	-	10	0.55

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนผสมของเพสต์ที่ใช้ในการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของตัวอย่างเพสต์ (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	W/B
			A	B	C	D	E	F		
12	PC 20FD 10L	70	-	-	-	20	-	-	10	0.55
13	PC 20FE 10L	70	-	-	-	-	20	-	10	0.55
14	PC 20FF 10L	70	-	-	-	-	-	20	10	0.55

ตารางที่ 3.7 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างมอร์ต้าร์

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูนขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	W/B	S/B
			A	B	C	D	E	F			
1	MC	100	-	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
2	MC 10L	90	-	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
3	MC 30FA	70	30	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
4	MC 30FB	70	-	30	-	-	-	-	-	0.55	2.75
5	MC 30FC	70	-	-	30	-	-	-	-	0.55	2.75
6	MC 30FD	70	-	-	-	30	-	-	-	0.55	2.75
7	MC 30FE	70	-	-	-	-	30	-	-	0.55	2.75
8	MC 30FF	70	-	-	-	-	-	30	-	0.55	2.75
9	MC 20FA 10L	70	20	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
10	MC 20FB 10L	70	-	20	-	-	-	-	10	0.55	2.75
11	MC 20FC 10L	70	-	-	20	-	-	-	10	0.55	2.75
12	MC 20FD 10L	70	-	-	-	20	-	-	10	0.55	2.75
13	MC 20FE 10L	70	-	-	-	-	20	-	10	0.55	2.75
14	MC 20FF 10L	70	-	-	-	-	-	20	10	0.55	2.75

ตารางที่ 3.8 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการหาความต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		เถ้าลอย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						ผงหินปูน ขนาด 3 ไมครอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	W/B	S/B
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	A	B	C	D	E	F			
1	MC	100	-	-	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
2	MC5	-	100	-	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
3	MC 10L	90	-	-	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
4	MC 20FA	80	-	20	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
5	MC 20FB	80	-	-	20	-	-	-	-	-	0.55	2.75
6	MC 20FC	80	-	-	-	20	-	-	-	-	0.55	2.75
7	MC 20FD	80	-	-	-	-	20	-	-	-	0.55	2.75
8	MC 20FE	80	-	-	-	-	-	20	-	-	0.55	2.75
9	MC 20FF	80	-	-	-	-	-	-	20	-	0.55	2.75
10	MC 10FA 10L	80	-	10	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
11	MC 10FB 10L	80	-	-	10	-	-	-	-	10	0.55	2.75
12	MC 10FC 10L	80	-	-	-	10	-	-	-	10	0.55	2.75
13	MC 10FD 10L	80	-	-	-	-	10	-	-	10	0.55	2.75
14	MC 10FE 10L	80	-	-	-	-	-	10	-	10	0.55	2.75
15	MC 10FF 10L	80	-	-	-	-	-	-	10	10	0.55	2.75
16	MC 40FA	60	-	40	-	-	-	-	-	-	0.55	2.75
17	MC 40FB	60	-	-	40	-	-	-	-	-	0.55	2.75
18	MC 40FC	60	-	-	-	40	-	-	-	-	0.55	2.75
19	MC 40FD	60	-	-	-	-	40	-	-	-	0.55	2.75
20	MC 40FE	60	-	-	-	-	-	40	-	-	0.55	2.75
21	MC 40FF	60	-	-	-	-	-	-	40	-	0.55	2.75
22	MC 30FA 10L	60	-	30	-	-	-	-	-	10	0.55	2.75
23	MC 30FB 10L	60	-	-	30	-	-	-	-	10	0.55	2.75
24	MC 30FC 10L	60	-	-	-	30	-	-	-	10	0.55	2.75
25	MC 30FD 10L	60	-	-	-	-	30	-	-	10	0.55	2.75
26	MC 30FE 10L	60	-	-	-	-	-	30	-	10	0.55	2.75
27	MC 30FF 10L	60	-	-	-	-	-	-	30	10	0.55	2.75

*** <u>หมายเหตุ</u> ***

- P หมายถึง เพสต์
- M หมายถึง มอร์ต้าร์
- C หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
- C5 หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5
- FA FB FC FD FE FF หมายถึง เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระต่างๆกัน ดังตารางที่ 1.1
- L หมายถึง ผงหินปูนขนาด 3 ไมโครเมตร
- ตัวเลข 10, 20, 30, 40 และ 50 หมายถึง ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูน

*** <u>การอ่านสัญลักษณ์</u> ***

- PC หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- MC หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- MC5 หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน
- PC 10L หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10
- MC 10L หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10
- PC 20FA หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 20
- MC 20FA หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 20
- PC 10FA 10L หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10
- MC 10FA 10L หมายถึง มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

บทที่ 4
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

บทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล โดยแบ่งหัวข้อออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ 1 กล่าวถึงผลการศึกษาและการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ส่วนที่ 2 กล่าวถึงผลการศึกษาและการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา และส่วนที่ 3 กล่าวถึงผลการศึกษาและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาค ความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน และองค์ประกอบทางเคมี โดยมีผลการศึกษาและการวิเคราะห์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

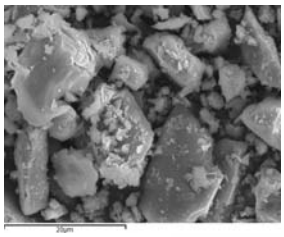
ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 5 ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 3.15 และ 3.18 ตามลำดับ ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยโดยปกติจะอยู่ในช่วง 1.9 ถึง 2.9 และเถ้าลอยแม่เมาะจะมีค่าความถ่วงจำเพาะค่อนข้างต่ำในช่วงประมาณ 2.0 ถึง 2.2 [23] ซึ่งในการทดลองครั้งนี้เถ้าลอยที่ใช้มีความถ่วงจำเพาะดังนี้ เถ้าลอยตัวอย่าง A มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.08 และเถ้าลอยตัวอย่าง D มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.40 ขณะที่ความถ่วงจำเพาะของผงหินปูนนั้นจากผลการทดสอบพบว่ามีค่าเท่ากับ 2.78

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มิอะบิลิตีของเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน

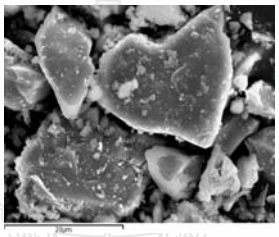
รายการ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		เถ้าลอย		ผงหินปูน
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	ตัวอย่าง A	ตัวอย่าง D	3 μ
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	3.15	3.18	2.08	2.40	2.78
ความละเอียดโดยวิธีเบลน, ซม.^{2}/ก.	3,350	3,830	2,390	1,705	12,160

4.1.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสาน

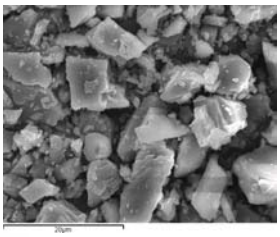
จากภาพถ่ายขยายกำลังสูงด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2500 เท่าของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างลักษณะของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ทั้งประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5) กับเถ้าลอย กล่าวคือลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆขนาดปนกันอยู่ ในขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและผิวค่อนข้างเรียบแต่มีอนุภาคหลายๆขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน สำหรับผงหินปูนนั้นมีลักษณะของอนุภาคเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระไม่เรียบคล้ายกับกรณีของปูนซีเมนต์แต่มีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกัน ทั้งนี้เพราะความละเอียดของผงหินปูนซึ่งมีความละเอียดค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับความละเอียดของปูนซีเมนต์คือ มีความละเอียดประมาณ 4 เท่า (กรณีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้)



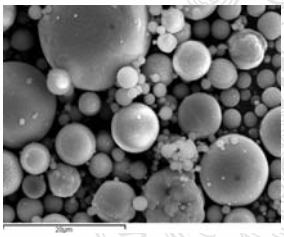
ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



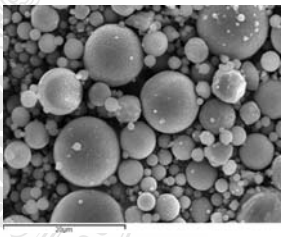
ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



ค) ผงหินปูนขนาด 5 ไมโครเมตร



ง) เถ้าลอยตัวอย่าง A



จ) เถ้าลอยตัวอย่าง D

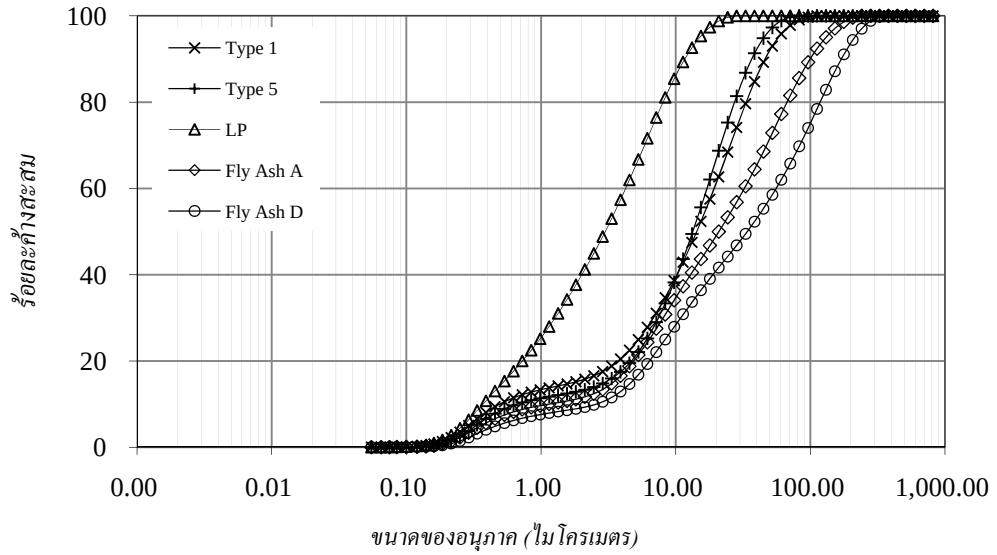
รูปที่ 4.1 ภาพขยายขนาด 2500 เท่าของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน

4.1.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน

รูปที่ 4.2 แสดงขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดเฉลี่ย (d50) ของอนุภาคของผงหินปูนมีค่าประมาณ 3 ไมโครเมตร ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 14 ไมโครเมตร ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าประมาณ 13 ไมโครเมตร สำหรับเถ้าลอยแม่เมาะตัวอย่าง A และตัวอย่าง D มีค่าประมาณ 20 และ 35 ไมโครเมตรตามลำดับ นั่นคือขนาดเฉลี่ยของอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดเล็ก

ที่สุด รองลงมาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ในขณะที่ของเถ้าลอยมีขนาดใหญ่มากขึ้นโดยเฉพาะเถ้าลอยตัวอย่าง D มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคใหญ่ที่สุด

ส่วนลักษณะการกระจายตัวหรือขนาดคละของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้ พบว่าลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของผงหินปูนค่อนข้างสม่ำเสมอ กล่าวคือ ขนาดที่ละเอียดกับขนาดที่หยาบของอนุภาคมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน สำหรับการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ถ้าพิจารณาถึงการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอย พบว่าขนาดอนุภาคที่ละเอียดจะมีมากกว่าอนุภาคที่หยาบ โดยที่ทั้งเถ้าลอยตัวอย่าง A และตัวอย่าง D จะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.2 ขนาดเฉลี่ยและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน

4.1.4 ความละเอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลน

ความละอียดโดยวิธีแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เท่ากับ 3,350 และ 3,830 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ ส่วนความละเอียดของเถ้าลอยตัวอย่าง A และเถ้าลอยตัวอย่าง D มีค่าน้อยกว่ากรณีของปูนซีเมนต์คือเท่ากับ 2,390 และ 1,705 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ ในขณะที่ความละเอียดของผงหินปูนที่ใช้ศึกษาครั้งนี้มีความละเอียดค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย คือเท่ากับ 12,160 ซม.^{2}/ก.

4.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน พบว่าเมื่อจำแนกชนิดเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 สามารถจัดเถ้าลอยตัวอย่าง A อยู่ในเถ้าลอยชนิด F เนื่องจากผลรวมปริมาณ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 77.21 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70.00 ส่วน SO_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.86 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 5.00 และปริมาณ LOI มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.12 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 6.00 ส่วนเถ้าลอยตัวอย่าง D สามารถจัดอยู่ในเถ้าลอยชนิด C เนื่องจากผลรวมปริมาณ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 65.13 ซึ่งอยู่ระหว่างร้อยละ 50.00 และร้อยละ 70 ส่วน SO_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.08 ซึ่งใกล้เคียงกับร้อยละ 5.00 และปริมาณ LOI มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.22 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 6.00 เมื่อจำแนกชนิดเถ้าลอยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเลขที่ มอก. 2135-2545 พบว่าเถ้าลอยตัวอย่าง A จัดอยู่ในเถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 (ชนิด ข) เนื่องจากมีปริมาณร้อยละของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 41.54 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 30.00 ส่วน CaO มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.69 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 10.00 ปริมาณ SO_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.86 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5.00 และปริมาณ LOI มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.12 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 6.00 เช่นเดียวกันเถ้าลอยตัวอย่าง D ก็จัดอยู่ในเถ้าลอยชั้นคุณภาพ 2 (ชนิด ข) เนื่องจากมีปริมาณร้อยละของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 32.96 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 30.00 ส่วน CaO มีค่าเท่ากับร้อยละ 22.46 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 10.00 ปริมาณ SO_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.08 ซึ่งใกล้เคียงกับร้อยละ 5.00 และปริมาณ LOI มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.22 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 6.00 โดยชนิดเถ้าลอยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีพบว่าปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากที่สุด (ร้อยละ 65.38) รองลงมาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ร้อยละ 61.32) ถัดมาเป็นผงหินปูน (ร้อยละ 55.25) เถ้าลอยตัวอย่าง D (ร้อยละ 22.46) และเถ้าลอยตัวอย่าง A (ร้อยละ 13.69) ตามลำดับ ส่วนกรณีปริมาณของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) พบว่าเถ้าลอยตัวอย่าง A มีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 41.54) รองลงมาคือเถ้าลอยตัวอย่าง D (ร้อยละ 32.96) ถัดมาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ร้อยละ 20.96) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 19.51) ตามลำดับ ขณะที่ผงหินปูนมีปริมาณของซิลิกาออกไซด์น้อยมากเพียงร้อยละ 0.46 เท่านั้น ส่วนกรณีปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) พบว่าเถ้าลอยตัวอย่าง A มีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 21.98) รองลงมาคือเถ้าลอยตัวอย่าง D (ร้อยละ 17.24) ถัดมาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 4.97 และร้อยละ 3.79 ตามลำดับ) ขณะที่ผงหินปูนมีปริมาณของอลูมิเนียมออกไซด์น้อยมาก (ร้อยละ 0.06) สำหรับกรณีปริมาณไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) พบว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D มีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 14.93) รองลงมาคือเถ้าลอยตัวอย่าง A (ร้อยละ 13.69) ถัดมาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 5 และประเภทที่ 1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 3.95 และ 3.78 ตามลำดับ) ขณะที่ผงหินปูนมีปริมาณของไอออนออกไซด์น้อยมาก (ร้อยละ 0.03)

เมื่อพิจารณาปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 3.75) รองลงมาคือเถ้าลอยตัวอย่าง D และเถ้าลอยตัวอย่าง A ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 2.24 และ 2.80 ตามลำดับ) ถัดมาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 1.08) ขณะที่ผงหินปูนมีปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์น้อยมาก (ร้อยละ 0.37) ส่วนกรณีปริมาณของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) พบว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D มีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 5.08) รองลงมาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ร้อยละ 2.76) ถัดมาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 2.16) และเถ้าลอยตัวอย่าง A (ร้อยละ 1.86) ตามลำดับ ขณะที่ผงหินปูนมีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์น้อยมาก (น้อยกว่าร้อยละ 0.01) ส่วนกรณีปริมาณของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on igition, LOI) พบว่าผงหินปูนมีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 43.79) รองลงมาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 2.34 และ 2.27 ตามลำดับ) ถัดมาเป็นเถ้าลอยตัวอย่าง D (ร้อยละ 0.22) และเถ้าลอยตัวอย่าง A (ร้อยละ 0.12) ส่วนกรณีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) พบว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D มีปริมาณมากที่สุด (ร้อยละ 2.11) รองลงมาคือเถ้าลอยตัวอย่าง A (ร้อยละ 0.83) ถัดมาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ร้อยละ 1.00) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (ร้อยละ 0.53)

สำหรับปริมาณของออกไซด์ของอัลคาไล กรณีปริมาณของโซเดียมออกไซด์(Na_2O) พบว่าเถ้าลอยตัวอย่าง A และตัวอย่าง D มีปริมาณใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 1.16 และ 1.04 ตามลำดับ) ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าเพียงร้อยละ 0.02 ขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงหินปูนมีปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่าร้อยละ 0.01) กรณีปริมาณของโปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O) พบว่าเถ้าลอยตัวอย่าง A และตัวอย่าง D มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.08 และ 2.75 ตามลำดับ ขณะที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และประเภทที่ 1 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 0.52 และ 0.47 ตามลำดับ) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยทั้งสองตัวอย่าง ส่วนผงหินปูนมีค่าน้อยมากเพียงร้อยละ 0.01

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าลอยตัวอย่าง A เถ้าลอยตัวอย่าง D และผงหินปูน

องค์ประกอบทางเคมี	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		เถ้าลอย		ผงหินปูน
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	ตัวอย่าง A	ตัวอย่าง D	3μ
ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide), %	SiO_2	19.51	20.98	41.54	32.96	0.46
อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide), %	Al_2O_3	4.97	3.79	21.98	17.24	0.06
ไอออนออกไซด์ (Ferric Oxide), %	Fe_2O_3	3.78	3.95	13.69	14.93	0.03
คัลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide), %	CaO	65.38	61.32	13.69	22.46	55.25
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide), %	MgO	1.08	3.75	2.24	2.80	0.37
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfer Trioxide), %	SO_3	2.16	2.76	1.86	5.08	< 0.01
โซเดียมออกไซด์ (Sodium Oxide) , %	Na_2O	< 0.01	0.02	1.16	1.04	< 0.01
โปตัสเซียมออกไซด์ (Potassium Oxide), %	K_2O	0.47	0.52	3.08	2.71	0.01
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Igition, LOI), %	LOI	2.27	2.34	0.12	0.22	43.79
แคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free Calcium Oxide), %	fCaO	1.00	0.53	0.83	2.11	-

ตารางที่ 4.3 ชนิดของตัวอย่างเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษา

เถ้าลอย	มาตรฐานในการจำแนกประเภทเถ้าลอย	
	ASTM C618	มอก. 2135-2545
ตัวอย่าง A	ชนิด F	ชั้นคุณภาพ 2 (ชนิด ข)
ตัวอย่าง D	ชนิด C	ชั้นคุณภาพ 2 (ชนิด ข)

4.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งได้แก่ ความข้นเหลวปกติของเพสต์ เวลาการก่อตัวของเพสต์ การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ความข้นเหลวปกติของเพสต์

ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่าเท่ากับร้อยละ 24.50 และเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 24.86) ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (3 ไมโครเมตร) ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (14 ไมโครเมตร) และผงหินปูนยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (12,160 ซม.^{2}/ก.) มากกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (3,350 ซม.^{2}/ก.) ทำให้เพสต์ต้องการน้ำเพื่อเคลือบหุ้มผิวมากขึ้น

สำหรับเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 พบว่าทุกตัวอย่างเพสต์ที่ผสมเถ้าลอยมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมน้อยกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่กลมจึงช่วยในการลื่นไหล รวมทั้งเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษามีขนาดเฉลี่ยและพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กล่าวคือ เถ้าลอยตัวอย่าง A และตัวอย่าง D มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 20 และ 35 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งหยาบกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (14 ไมโครเมตร) และเถ้าลอยตัวอย่าง A และตัวอย่าง D ยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2,390 และ 1,750 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (3,350 ซม.^{2}/ก.) ทำให้ต้องการน้ำเพื่อเคลือบหุ้มผิวลดลง

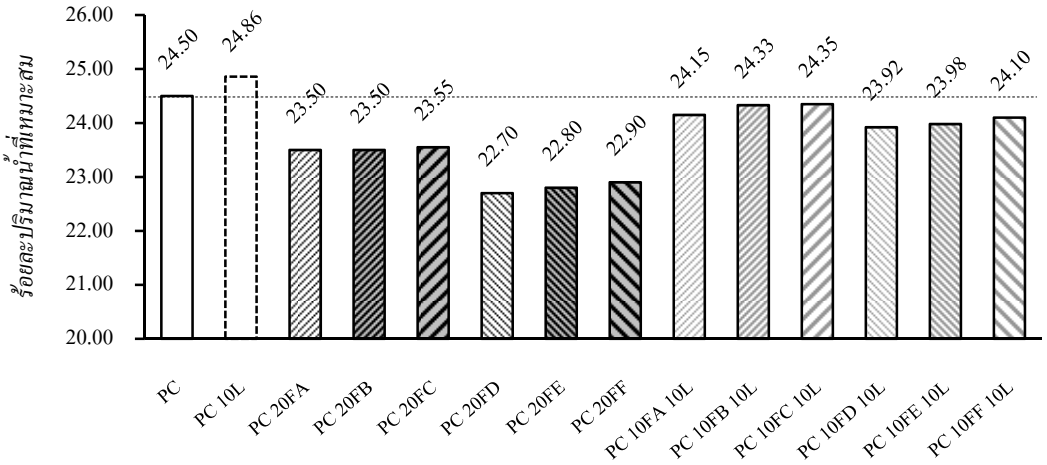
กรณีเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าให้ค่าในทิศทางเดียวกับกรณีเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 แต่มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคละเอียดกว่าเถ้าลอยตัวอย่าง A และตัวอย่าง D และผงหินปูนยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเถ้าลอยตัวอย่าง A และตัวอย่าง D ทำให้เพสต์ต้องการน้ำเพื่อเคลือบหุ้มผิวมากขึ้น แต่ก็ยังคงมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมน้อยกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่เหมาะสมระหว่างชุดของเถ้าลอยตัวอย่าง A, B และ C (เถ้าลอยตัวอย่าง B และ C ได้จากการเติม fCaO ลงในเถ้าลอยตัวอย่าง A) กับชุดเถ้าลอยตัวอย่าง D, E และ F (เถ้าลอยตัวอย่าง E และ F ได้จากการเติม fCaO ลงในเถ้าลอยตัวอย่าง D) พบว่าชุดของเถ้าลอยตัวอย่าง A (เถ้าลอยตัวอย่าง A, B และ C) มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากกว่าชุดของเถ้าลอยตัวอย่าง D (เถ้าลอยตัวอย่าง D, E และ F) เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 20 เท่ากัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยตัวอย่าง A (2,390 ซม.^{2}/ก.) มีค่ามากกว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D (1,750 ซม.^{2}/ก.) ทำให้ต้องการน้ำเพื่อเคลือบหุ้มผิวมากขึ้น ส่วนเมื่อพิจารณาถึงผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ที่แตกต่างกันไม่ว่าจะในชุดของเถ้าลอยตัวอย่าง A, B และ C หรือชุดของเถ้าลอยตัวอย่าง D, E และ F พบว่าในแต่ละชุดเถ้าลอยมีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมไม่แตกต่างกัน กล่าวคือ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A, B และ C ไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกันกับเพสต์ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D, E

และ F ก็มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมไม่แตกต่างกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย (กรณีปริมาณที่ศึกษาในครั้งนี้) ไม่มีผลต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์และเวลาก่อตัวของเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	เพสต์	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	เวลาก่อตัว (นาที)	
			ระยะต้น	ระยะปลาย
1	PC	24.50	87.00	100.00
2	PC 10L	24.86	78.50	91.00
3	PC 20FA	23.50	110.00	124.00
4	PC 20FB	23.50	103.00	118.00
5	PC 20FC	23.55	97.00	114.00
6	PC 20FD	22.70	97.00	112.00
7	PC 20FE	22.80	96.00	107.00
8	PC 20FF	22.90	95.00	106.00
9	PC 10FA 10L	24.15	82.00	91.50
10	PC 10FB 10L	24.33	80.00	91.10
11	PC 10FC 10L	24.35	79.00	91.20
12	PC 10FD 10L	23.92	80.00	92.00
13	PC 10FE 10L	23.98	80.00	91.30
14	PC 10FF 10L	24.10	81.50	92.00



รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นส่วนผสม

4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

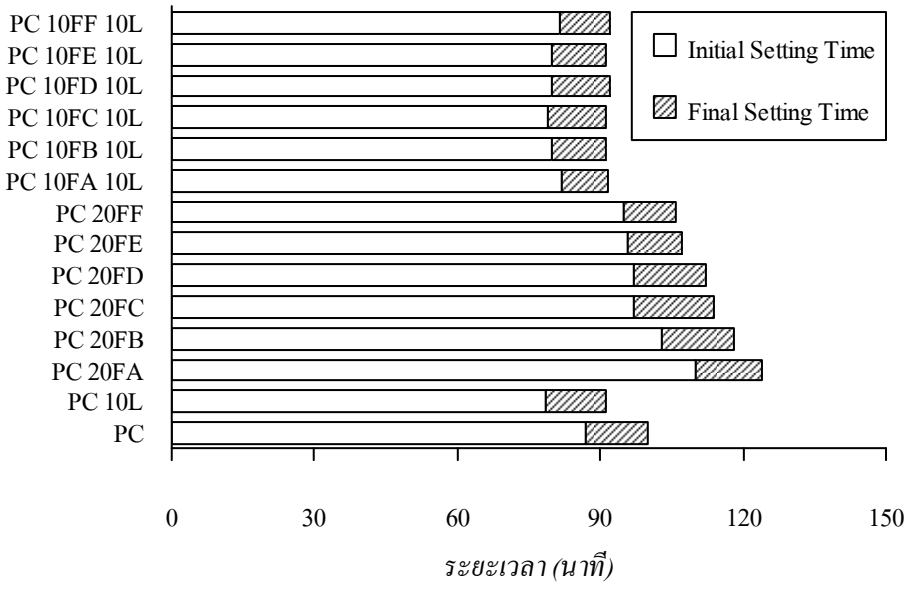
เวลาก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 พบว่าการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าน้อยกว่ากรณีของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนซึ่งค่อนข้างมีความละเอียดมากเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงเป็นการไปแทรกตามอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ดีขึ้น [7,24] ส่วนกรณีเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย 6 ชนิดในอัตราส่วนร้อยละ 20 พบว่าเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ทั้งหมดมีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง การไฮเดรชั่นจึงเกิดได้น้อย รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดหลังหรือช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานต้องอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในการทำปฏิกิริยา [10] โดยที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์นั้นเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

สำหรับเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าจะมีค่าน้อยกว่ากรณีของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่ใกล้เคียงหรือมากกว่ากรณีเพสต์เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยและผงหินปูนที่มีผลต่อเวลาการก่อตัวดังที่กล่าวมาแล้ว

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยต่อการก่อตัวของเพสต์นั้น พบว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยชุด A (เถ้าลอยตัวอย่าง A, B และ C) มีแนวโน้มระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายเร็วขึ้นเล็กน้อย เมื่อเถ้าลอยมีปริมาณ fCaO มากขึ้น คือ ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ผสมเถ้าลอยตัวอย่าง A, B และ C มีเวลาเร็วขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เพราะปริมาณ fCaO ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [10,24,25] ซึ่งเป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดเร็วขึ้น ส่วนเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนดุประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยชุด D (เถ้าลอยตัวอย่าง D, E และ F) ก็มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ มีแนวโน้มระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายเร็วขึ้น เมื่อเถ้าลอยมีปริมาณ fCaO มากขึ้น คือ ระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ผสมเถ้าลอยตัวอย่าง D, E และ F มีเวลาเร็วขึ้นตามลำดับ สำหรับเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้น ปริมาณ fCaO ที่ต่างกันในเถ้าลอย ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์แต่อย่างใด

เมื่อเปรียบเทียบเวลาการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด A และชุด B พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด A มีการก่อตัวช้ากว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด D ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยตัวอย่าง D มีปริมาณ fCaO (ร้อยละ 2.11) มากกว่าเถ้าลอยตัวอย่าง A (ร้อยละ 0.83) ซึ่งอาจเร่งให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดเร็วขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.4 เวลาการก่อตัวระยะต้นและเวลาการก่อตัวระยะปลายของเพสต์วัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูนเป็นส่วนผสม

4.2.3 การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

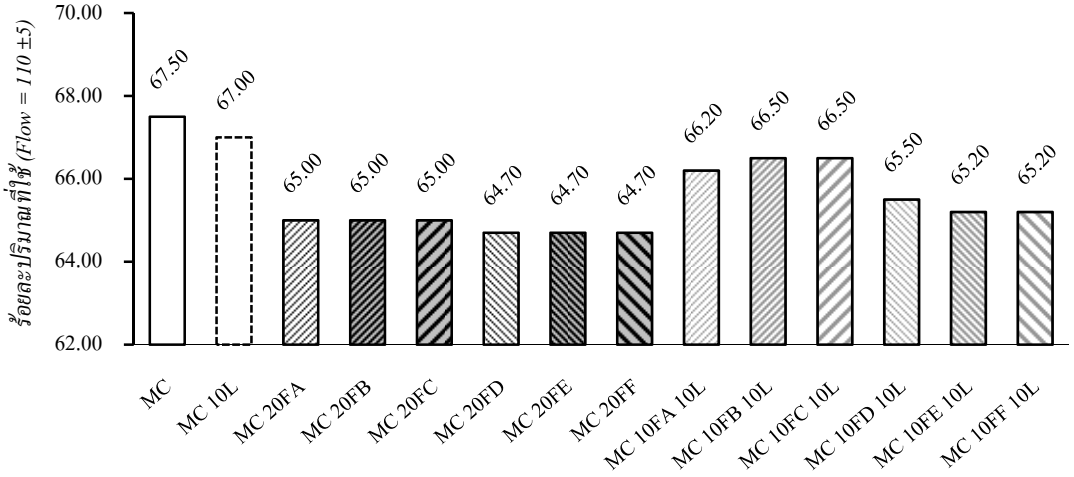
ปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่ (flow value) เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5 พบว่าปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้าร์เพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความข้นเหลวปกติของเพสต์ (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม) ในหัวข้อ 4.2.1 กล่าวคือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ใช้ปริมาณน้ำ (ร้อยละ 67.00) น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (ร้อยละ 67.50) และปริมาณน้ำที่ใช้ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้ง 6 ตัวอย่างในอัตราส่วนร้อยละ 20 ก็มีค่าน้อยกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาถึงปริมาณน้ำที่ใช้ (เพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5) ของ

มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยชุดตัวอย่าง A (เถ้าลอยตัวอย่าง A, B และ C) พบว่ามีค่ามากกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยชุดตัวอย่าง D (เถ้าลอยตัวอย่าง D, E และ F) ส่วนกรณีแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนก็ให้ผลสอดคล้องกับกรณีแทนที่ด้วยเถ้าลอยหรือผงหินปูนอย่างเดียว สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย พบว่าไม่มีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ของตัวอย่างมอร์ต้าร์เช่นเดียวกับกรณีของความข้นเหลวปกติของเพสต์

สำหรับเหตุผลในการอธิบายผลของค่าการไหลแผ่ สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับกรณีความข้นเหลวปกติของเพสต์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว (หัวข้อ 4.2.1)

ตารางที่ 4.5 ค่าการไหลแผ่และปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5

ลำดับที่	มอร์ต้าร์	ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	ค่าการไหล (ร้อยละ)
1	MC	67.50	111.0
2	MC 10L	67.00	115.5
3	MC 20FA	65.00	105.0
4	MC 20FB	65.00	113.0
5	MC 20FC	65.00	105.5
6	MC 20FD	64.70	114.0
7	MC 20FE	64.70	105.0
8	MC 20FF	64.70	110.5
9	MC 10FA 10L	66.20	115.0
10	MC 10FB 10L	66.50	106.0
11	MC 10FC 10L	66.50	107.5
12	MC 10FD 10L	65.50	115.0
13	MC 10FE 10L	65.20	110.5
14	MC 10FF 10L	65.20	107.0
14	MC 10FF 10L	65.20	107.0



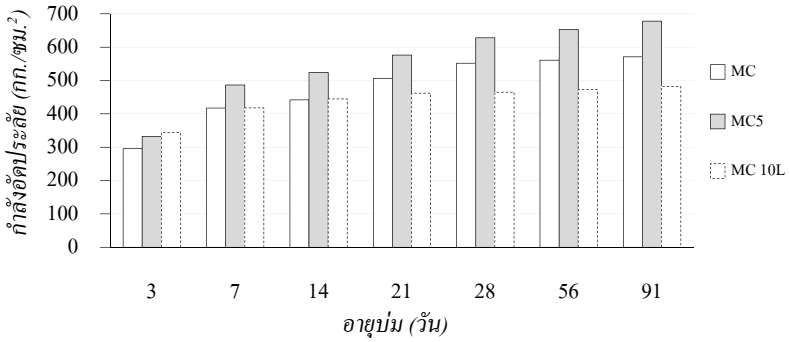
รูปที่ 4.5 ปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย และผงหินปูน

4.2.4 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์

รูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.15 แสดงผลการศึกษากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 อธิบายได้ดังนี้

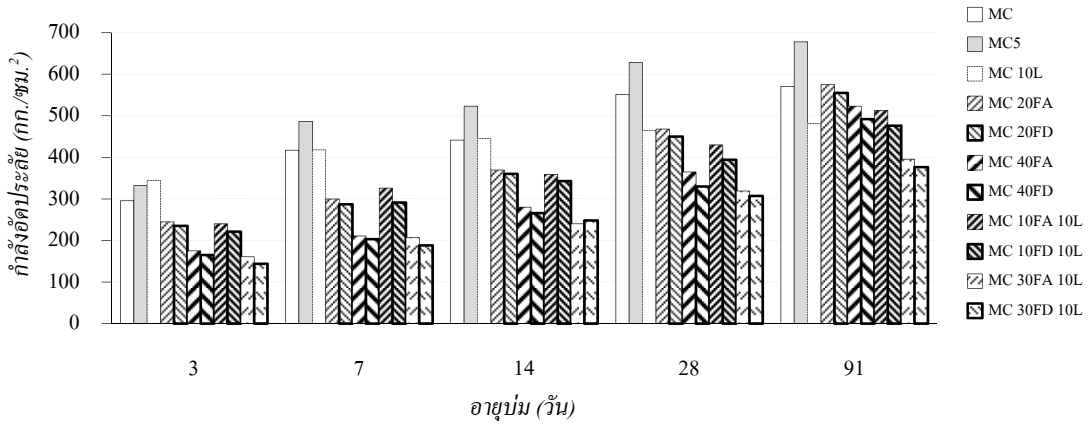
จากรูปที่ 4.6 พบว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีกำลังอัดประลัยที่ทุกๆอายุมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (3,830 ซม.^{2}/ก.) มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (3,350 ซม.^{2}/ก.) เมื่อพิจารณาการพัฒนากำลังของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีการพัฒนากำลังอัดรวดเร็วในช่วง 28 วัน แต่มี การพัฒนากำลังอัดช้าลงเมื่ออายุมากขึ้น ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ในช่วงอายุ 14 วัน พบว่ามีกำลังอัดประลัยมากกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่ออายุมากขึ้นกลับให้ค่ากำลังอัดประลัยน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

พบว่ามีกำลังอัดประลัยต่ำกว่าในทุกๆอายุทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนที่แทนที่ปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม (Filler) ลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อมอร์ต้าร์ทำให้แน่นขึ้น [26,27] มอร์ต้าร์จึงมีกำลังอัดประลัยช่วงอายุต้นสูง อย่างไรก็ตามเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยลง ส่งผลให้ปริมาณสารประกอบ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) น้อยลง ทำให้เมื่ออายุมากขึ้นจึงมีกำลังอัดประลัยน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน



รูปที่ 4.6 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

เมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยของทุกสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A กับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ดังรูปที่ 4.7 พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A มีแนวโน้มกำลังอัดประลัยมากกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอย A มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (20 ไมโครเมตร) เล็กกว่าเถ้าลอย D (35 ไมโครเมตร) จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาดีขึ้น กำลังอัดประลัยจึงมากกว่า

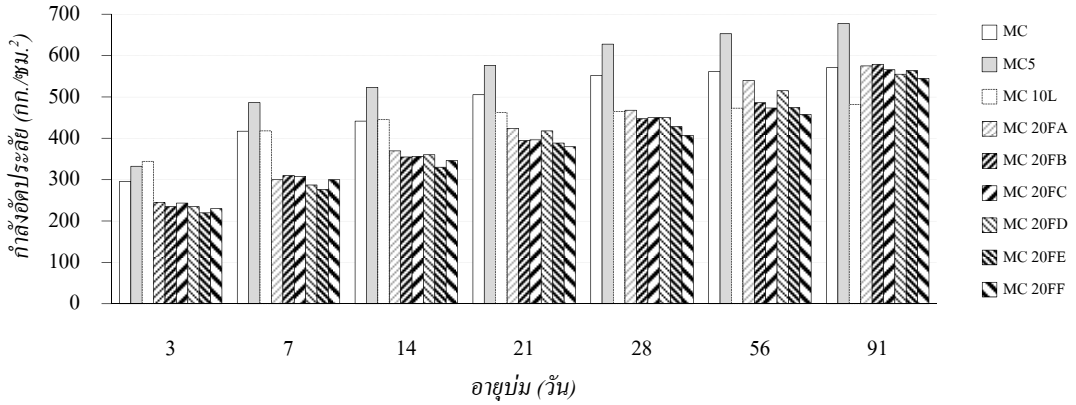


รูปที่ 4.7 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20, ร้อยละ 40 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

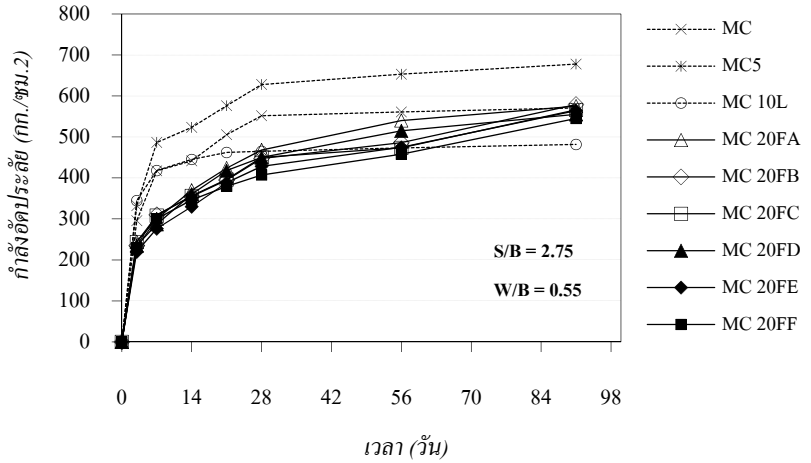
กรณีมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 (รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9) พบว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยทั้ง 6 ตัวอย่าง ให้ค่ากำลังอัดประลัยในช่วงอายุ 56 วัน น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีอายุ 91 วัน กลับให้ค่าเทียบเท่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง การไฮเดรชั่นจึงเกิดน้อยในช่วงอายุต้น ดังนั้นกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 6 ตัวอย่างในช่วงแรกจึงมีค่าน้อย แต่เมื่ออายุมากขึ้น ในขณะหรือหลังปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งผลผลิตนี้จะทำปฏิกิริยากับซิลากาและอลูมินาในเถ้าลอย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้ได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนต (CAH) [10,23] นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์ ในเถ้าลอยจะกลายเป็นแคลเซียมไอออน และสามารถทำปฏิกิริยากับซิลากาได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มอีกด้วย [28,29] ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นรวมกับปฏิกิริยาปอซโซลานดังกล่าว ส่งผลให้มอร์ต้าร์รับกำลังอัดได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 กับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 มีกำลังอัดประลัยน้อยกว่าในทุกๆอายุทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดไม่มากพอนั่นเอง และเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าในช่วง 28 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 มีกำลังอัดประลัยน้อยกว่า เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดน้อย เมื่อมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยมีอายุ 56 วัน จะให้ค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่กำลังอัดประลัย

ที่อายุ 91วัน พบว่าการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 20 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้ค่ากำลังอัดประลัยมากกว่าการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 อย่างชัดเจน ทั้งนี้เพราะผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อย ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ปริมาณ C_3S และ C_2S น้อยลง เป็นผลให้กำลังอัดประลัยเมื่ออายุมากขึ้นน้อยลง ตรงข้ามกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ถึงแม้ว่าจะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง แต่เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้มอร์ต้าร์มีกำลังอัดประลัยมากขึ้น อย่างไรก็ตามการทำปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า เพราะต้องใช้ CH ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลผลิตมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้นมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 จึงมีการพัฒนากำลังอัดช้าในช่วงแรก และมีค่ามากขึ้นเมื่ออายุมอร์ต้าร์มากขึ้น

สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 พบว่า ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ที่แตกต่างกันในเถ้าลอย ไม่มีผลต่อกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20



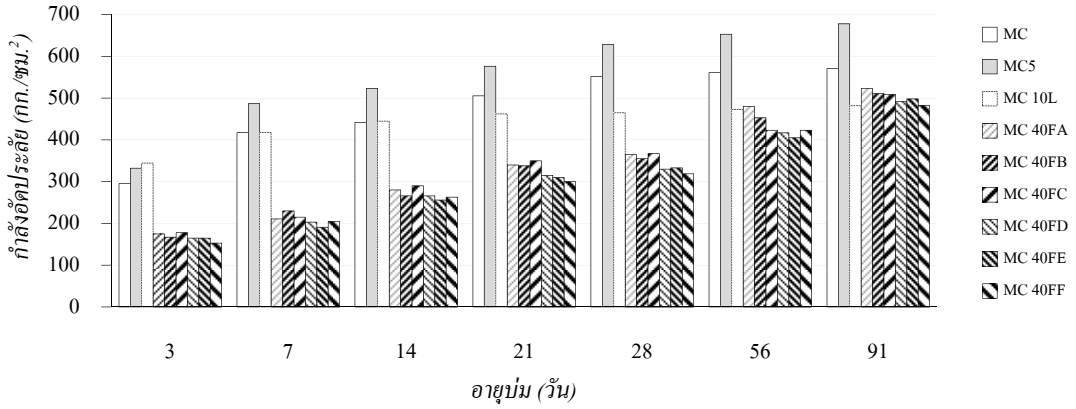
รูปที่ 4.8 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20



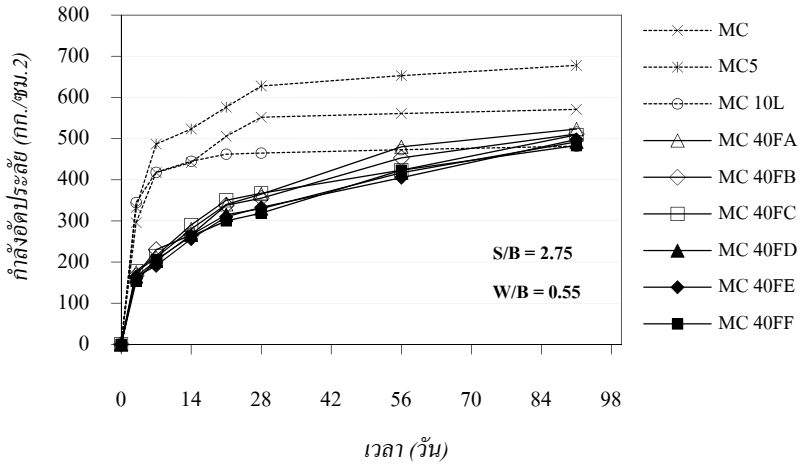
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

ส่วนรูปที่ 4.10 แสดงกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ แสดงดังรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 มีกำลังอัดประลัยที่ทุกๆอายุทดสอบ น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยถึงร้อยละ 40 ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ อาจไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานที่ขยายเข้าไปในโพรงยังไม่มากพอ กำลังอัดประลัยจึงยังคงน้อย และเมื่อเปรียบเทียบมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 กับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอย มีกำลังอัดประลัยน้อยกว่าในช่วงอายุ 56 วัน สาเหตุสามารถอธิบายได้ดังที่กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตามเมื่ออายุมอร์ต้าร์มากขึ้นก็ยังคงมีค่ากำลังอัดประลัยใกล้เคียงหรือสูงกว่า เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้นนั่นเอง

สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.10 พบว่า ปริมาณ fCaO ที่แตกต่างกันในเถ้าลอยไม่มีผลต่อกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40



รูปที่ 4.10 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40

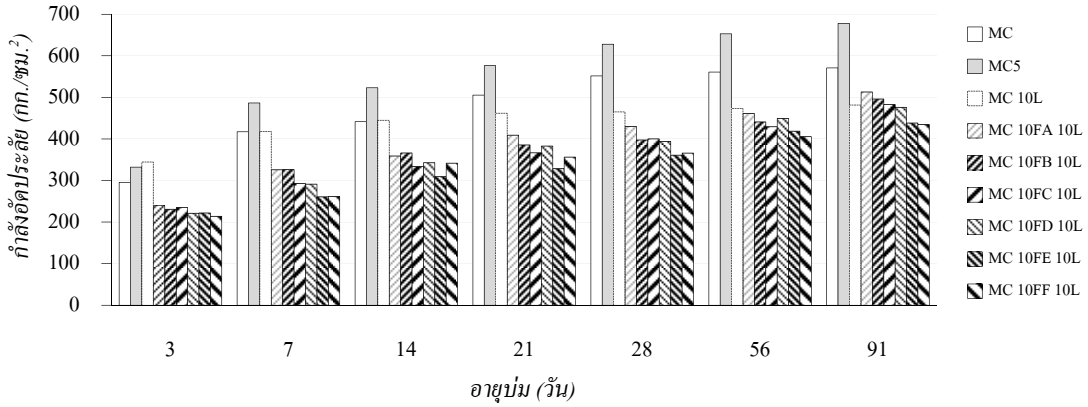


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40

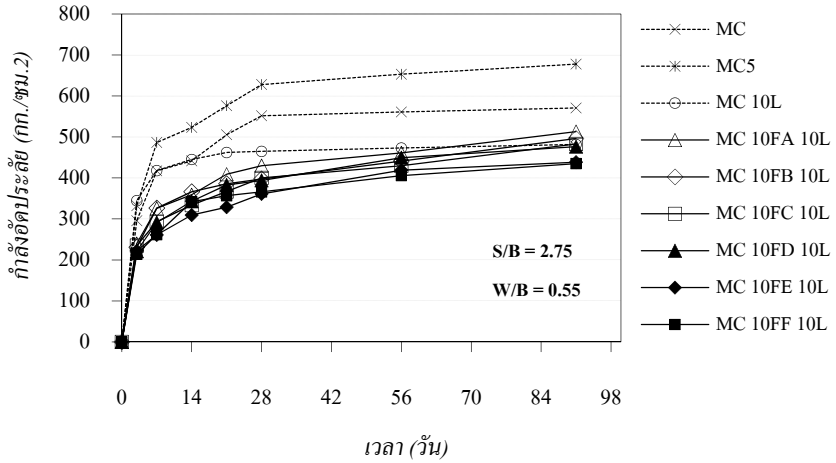
รูปที่ 4.12 แสดงกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ แสดงดังรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีกำลังอัดประลัยที่ทุกๆอายุ น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์

ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูน ทำให้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานลดลง ส่งผลให้มอร์ต้าร์มีกำลังอัดประลัยน้อยลง แต่เมื่อเปรียบเทียบการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 กับการแทนที่เฉพาะผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีกำลังอัดประลัยน้อยกว่าในช่วงอายุ 56 วันเท่านั้น แต่มีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าที่อายุ 91 วัน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้นนั่นเอง

สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 พบว่า ปริมาณ fCaO ที่แตกต่างกันในเถ้าลอยไม่มีผลต่อกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



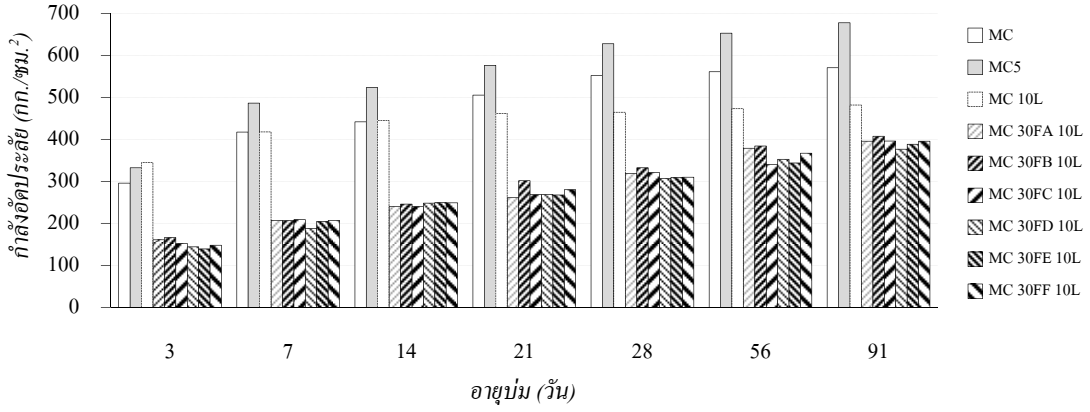
รูปที่ 4.12 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



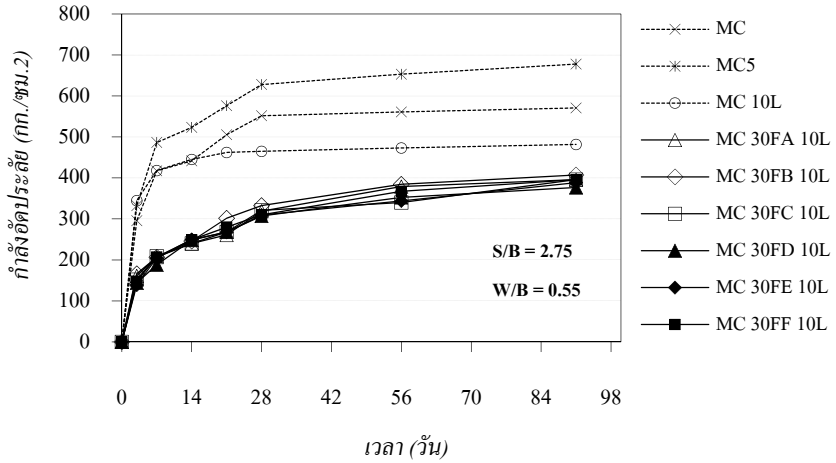
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ส่วนรูปที่ 4.14 แสดงกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ แสดงดังรูปที่ 4.15 จากรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 พบว่ากำลังรับแรงอัดประลัยที่ทุกๆอายุของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทำให้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเหลือเพียงร้อยละ 90 พร้อมกับใช้เถ้าลอยแทนที่ร่วมในปริมาณถึงร้อยละ 30 ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน กำลังอัดประลัยจึงน้อยลง ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าน้อยลงอย่างชัดเจน

สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.14 พบว่า ปริมาณ fCaO ที่แตกต่างกันในเถ้าลอยไม่มีผลต่อกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ 4.14 กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มกับกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

4.3 คุณสมบัติทางด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์วัสดุประสาน

สำหรับผลการทดสอบและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์วัสดุประสานที่ศึกษา ได้แก่ การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ อธิบายได้ดังนี้

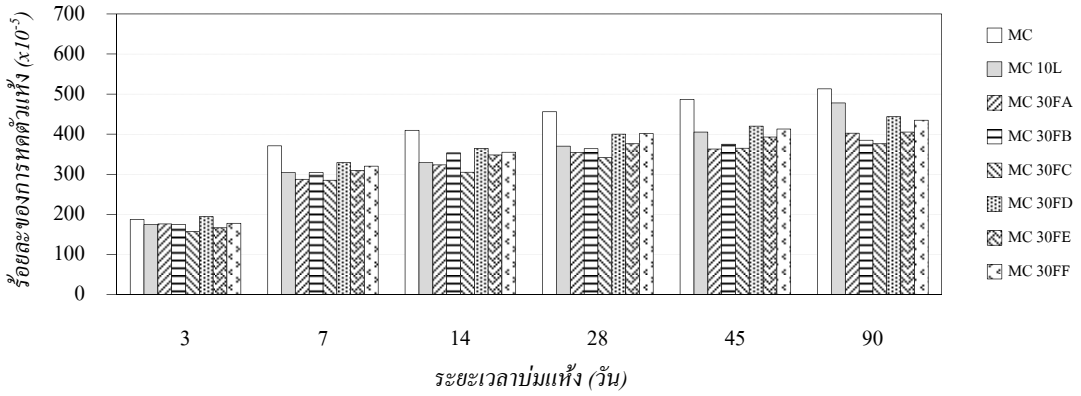
4.3.1 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์

รูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.27 แสดงผลการศึกษาการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และร้อยละ 50 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

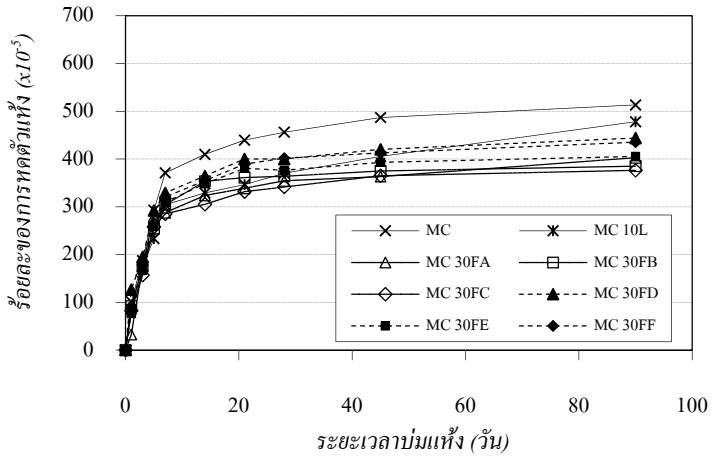
รูปที่ 4.16 แสดงค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าร้อยละของการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ในช่วงระยะเวลาบ่มแห้ง 90 วัน แสดงดังรูปที่ 4.17 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (inert material) ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เป็นการเพิ่ม

มวลรวมละเอียด ซึ่งโดยทั่วไปการเพิ่มปริมาตรของมวลรวมทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยลงและลดการหดตัวได้ [30,31] ประกอบกับผงหินปูนมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ จึงสามารถดูดซับน้ำไว้ที่ผิวของอนุภาคได้มาก ทำให้เหลือน้ำอิสระน้อยลง เนื้อมอร์ต้าร์จึงมีช่องว่างลดลง และด้วยอนุภาคที่เล็กมากของผงหินปูน ช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ ส่งผลให้การสูญเสียความชื้นยากขึ้น สำหรับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้ง 6 ตัวอย่าง ให้ค่าร้อยละของการหดตัวแห้งน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย อาจทำให้ความพรุนมากขึ้น แต่ขนาดโดยเฉลี่ยของโพรงมีขนาดเล็กลง [31] ดังนั้นการสูญเสียความชื้นสู่สภาพแวดล้อมจึงเป็นไปได้ยากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวแห้งน้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 กับการแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน ดังรูปที่ 4.16 พบว่ามีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งใกล้เคียงกันในช่วงระยะเวลาบ่มแห้ง 45 วัน แต่ที่อายุ 90 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 กลับมีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้น ทำให้ขนาดโพรงเล็กลงจึงสูญเสียความชื้นยากขึ้น

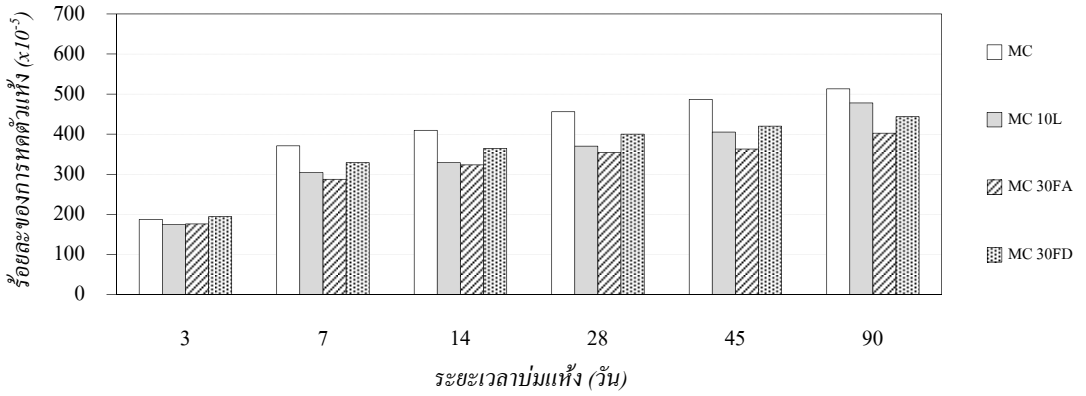
เมื่อพิจารณาการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A กับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ดังรูปที่ 4.18 พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A มีแนวโน้มค่าร้อยละของการหดตัวแห้งน้อยกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D เล็กน้อย ทั้งนี้เพราะขนาดเฉลี่ยของอนุภาคของเถ้าลอยตัวอย่าง A เล็กกว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D จึงต้องการน้ำเคลือบหุ้มผิวมากกว่า ทำให้เหลือน้ำอิสระน้อยลง และการไฮเดรชั่นยังเกิดได้ดีกว่าอีกด้วย ส่งผลให้เนื้อมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยตัวอย่าง A จึงมีความพรุนน้อยกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยตัวอย่าง D สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.16 พบว่าไม่มีแนวโน้มว่าค่าร้อยละของการหดตัวแห้งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ fCaO ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยไม่มีผลต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30



รูปที่ 4.16 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30

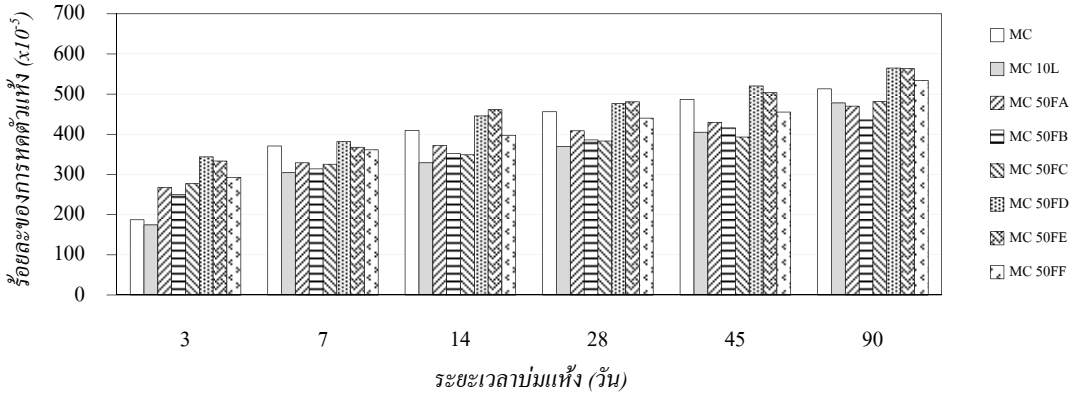


รูปที่ 4.18 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร้อยละ 30 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน

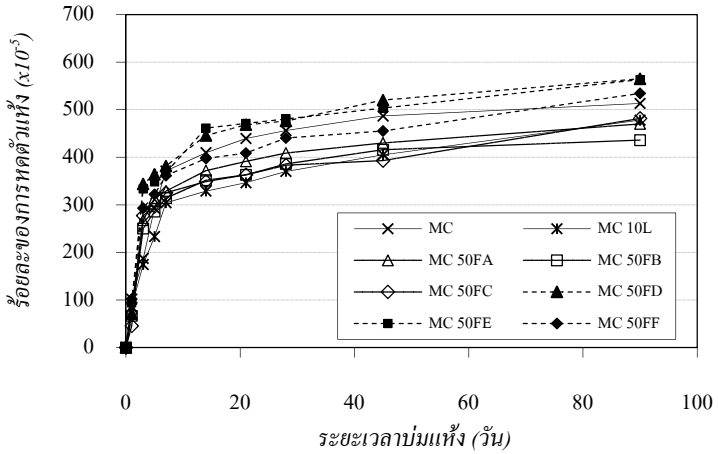
ส่วนรูปที่ 4.19 แสดงค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 และแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าร้อยละของการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ แสดงดังรูปที่ 4.20 เมื่อพิจารณาจากรูป 4.19 พบว่าค่าร้อยละของการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3 วัน มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปูนซีเมนต์ลดลง ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงอายุต้นๆจึงเกิดน้อยลง เป็นผลให้ผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดน้อยลง ดังนั้นที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3 วัน มอร์ต้าร์จึงมีความพรุนมากและมีขนาดโพรงใหญ่ ทำให้สูญเสียน้ำสู่สภาพแวดล้อมง่าย นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละของการหดตัวแห้งระหว่างการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ดังรูปที่ 4.21 พบว่ามื่อระยะเวลาบ่มแห้งในอากาศมากขึ้น (ระยะเวลาบ่มแห้งตั้งแต่ 7 วัน) การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ให้ค่าการหดตัวแห้งมากกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมากกว่ามอร์ต้าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเถ้าลอยตัวอย่าง D มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุประสานชนิดอื่นๆ เป็นผลให้ต้องการน้ำเคลือบหุ้มผิวน้อยลง เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมาก (w/b เท่ากับ 0.55) พร้อมกับแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ในปริมาณมาก (ร้อยละ 50) จึงส่งผลให้เหลือน้ำอิสระมาก ก่อให้เกิดความพรุนมากขึ้นและขนาดเฉลี่ยของโพรงใหญ่ขึ้น การสูญเสียความชื้นสู่สภาพแวดล้อมจึงเป็นไปได้ง่ายขึ้น

ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด A กลับให้ผลแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาบ่มแห้งในอากาศมากขึ้น (ระยะเวลาบ่มแห้งตั้งแต่ 7 วัน) การแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด A มีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

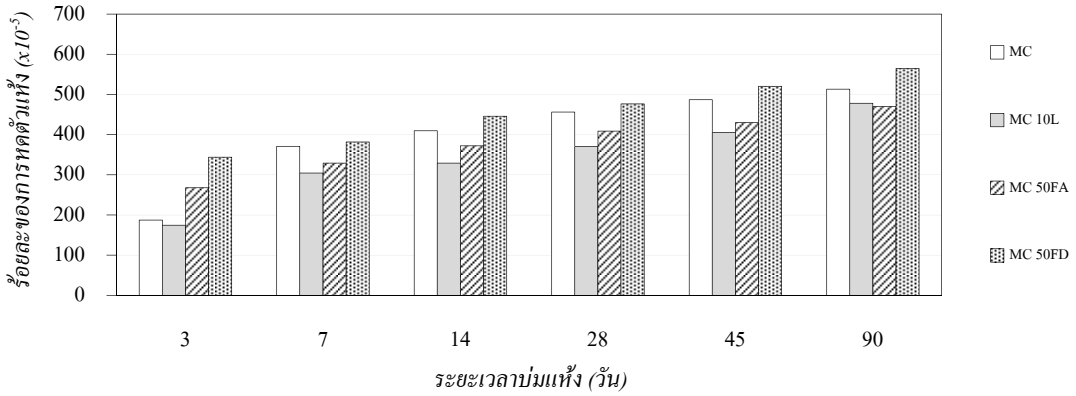
สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.19 พบว่าปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยไม่มีผลต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50



รูปที่ 4.19 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยและผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50

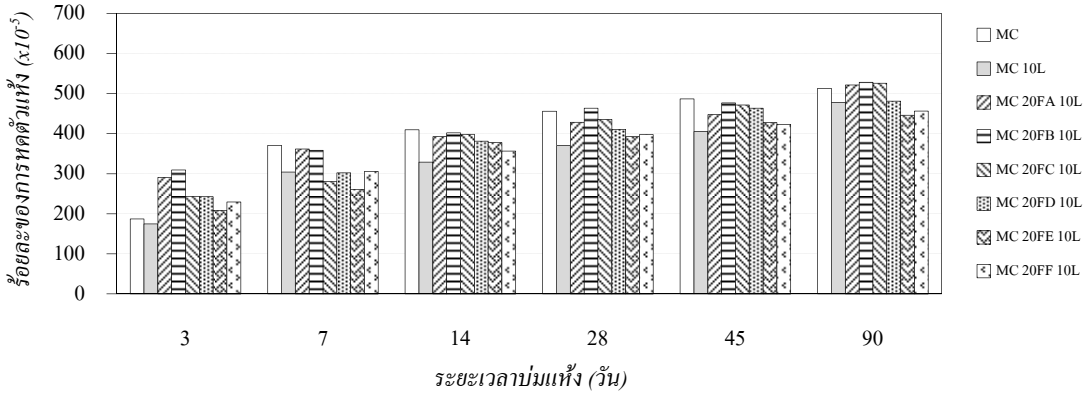


รูปที่ 4.21 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร้อยละ 50 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน

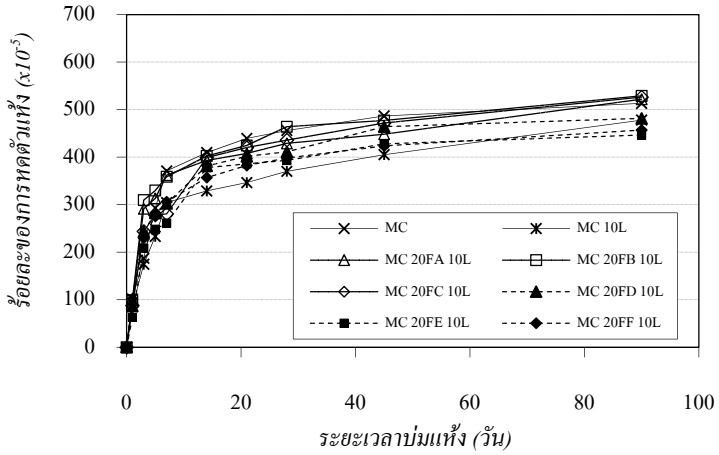
ส่วนรูปที่ 4.22 แสดงค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าร้อยละของการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ แสดงดังรูปที่ 4.23 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.22 พบว่าที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับ ผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงอายุต้นๆเกิดน้อยลงนั่นเอง มอร์ต้าร์จึงมีความพรุนมากและมีขนาดโพรงใหญ่ ทำให้สูญเสียน้ำสู่สภาพแวดล้อมง่าย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาบ่มแห้งมากขึ้น (ระยะเวลาบ่มแห้งตั้งแต่ 7 วัน) จากรูปที่ 4.22 ประกอบกับรูปที่ 4.23 สังเกตุได้ว่ามอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยทั้ง 6 ตัวอย่าง มีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ทำให้ขนาดโดยเฉลี่ยของโพรงในเพสต์ที่แข็งตัวแล้วมีขนาดเล็กลง การสูญเสียความชื้นสู่สภาพแวดล้อมจึงยากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวของมอร์ต้าร์น้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่า มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งมากกว่าหรือใกล้เคียงกัน

สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาจาก

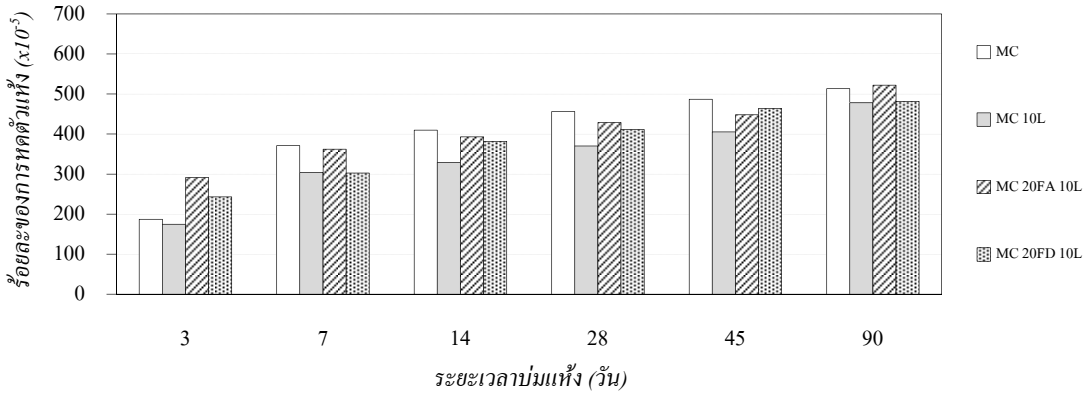
รูปที่ 4.22 พบว่าไม่มีแนวโน้มว่าค่าร้อยละของการหดตัวแห้งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ fCaO ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยไม่มีผลต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ 4.22 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยและผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

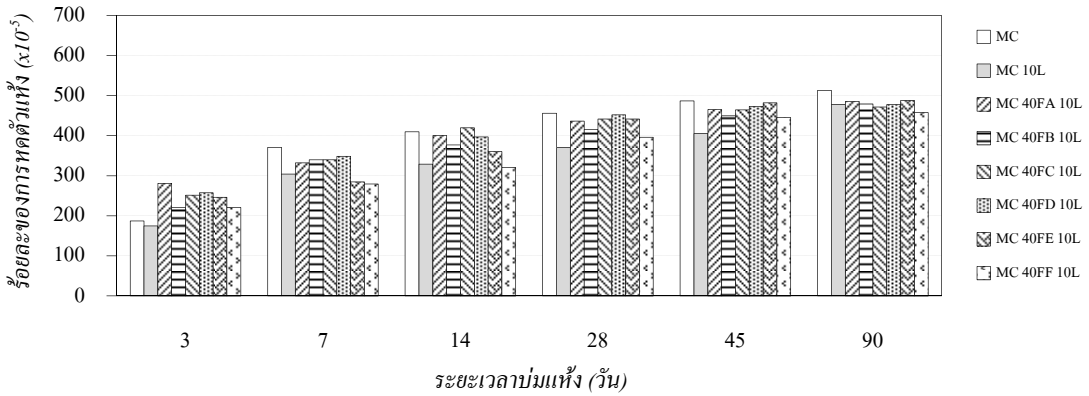


รูปที่ 4.24 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน

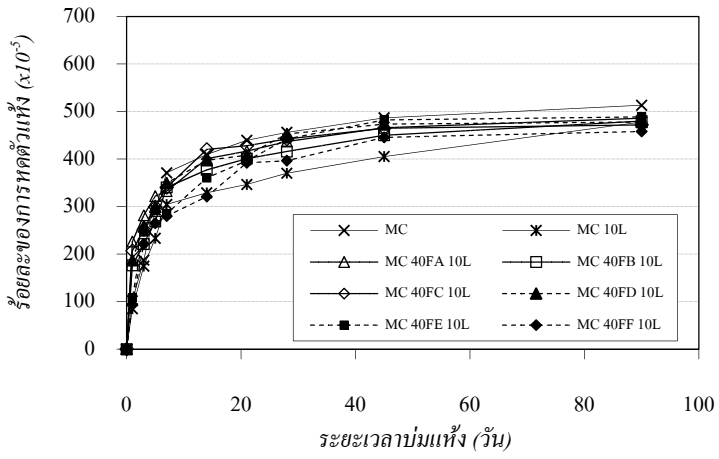
รูปที่ 4.25 แสดงค่าร้อยละของการหดตัวแห้งที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งในอากาศกับค่าร้อยละของการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์แสดงดังรูปที่ 4.26 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.25 เห็นได้ว่าที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าร้อยละของการหดตัวแห้งมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วงอายุต้นๆเกิดน้อยลงนั่นเอง แต่เมื่อระยะเวลาบ่มแห้งมากขึ้น (ระยะเวลาบ่มแห้งตั้งแต่ 7 วัน) สังเกตุจากรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 เห็นได้ว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่า ร้อยละของการหดตัวแห้งน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่ามอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอย มีค่าการหดตัวแห้งในช่วงระยะเวลาบ่มแห้ง 45 วันแรก มากกว่าหรือไกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมอร์ต้าร์มีระยะเวลาบ่มแห้ง 90 วัน กลับให้ค่าร้อยละของการหดตัวแห้งใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้นนั่นเอง

เมื่อพิจารณาการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง

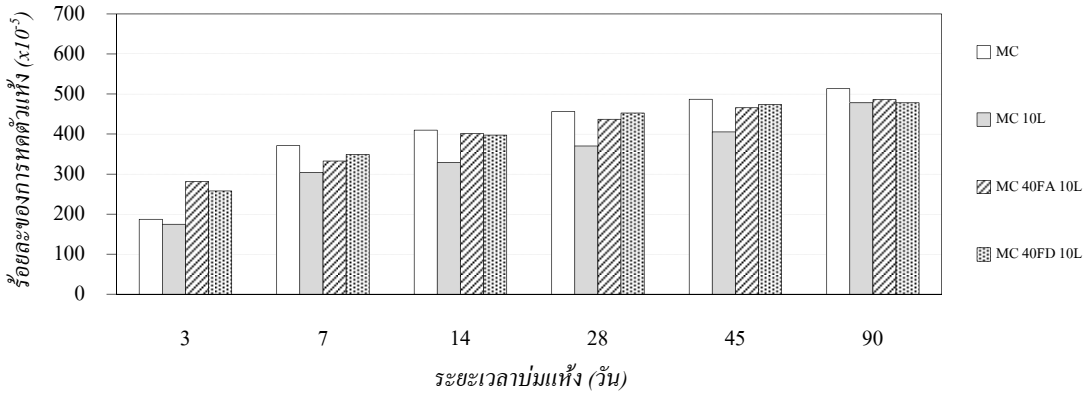
A กับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ดังรูปที่ 4.27 เห็นได้ว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และตัวอย่าง D มีแนวโน้มค่าร้อยละของการหดตัวแห้งไม่แตกต่างกัน สำหรับผลของปริมาณ fCaO ใน เถ้าลอยต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.25 พบว่าปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยไม่มีผลต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ 4.25 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มแห้งกับค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยและผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ 4.27 ค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่มแห้ง 3, 7, 14, 28, 45 และ 90 วัน

4.3.2 ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์

ผลการศึกษาการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน แสดงดังตารางที่ 4.6 และแสดงดังรูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.33 โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ค่าปริมาณคลอไรด์ในเนื้อเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน

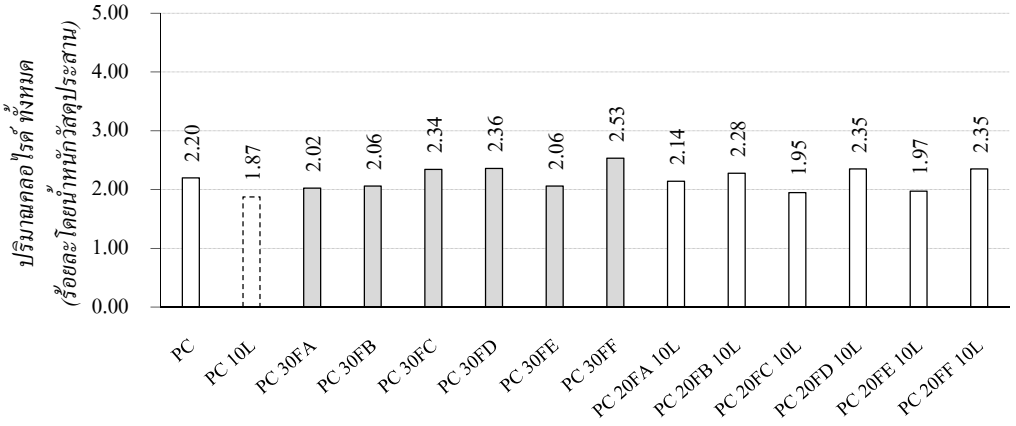
ลำดับที่	เพสต์	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	อัตราส่วนความสามารถเก็บกักคลอไรด์
1	PC	2.20	1.45	0.66
2	PC 10L	1.87	1.06	0.56
3	PC 30FA	2.02	1.09	0.54
4	PC 30FB	2.06	1.17	0.57
5	PC 30FC	2.34	1.60	0.68
6	PC 30FD	2.36	1.63	0.69
7	PC 30FE	2.06	1.22	0.59
8	PC 30FF	2.53	1.72	0.68

ตารางที่ 4.6 ค่าปริมาณคลอไรด์ในเนื้อเพสต์วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	เพสต์	ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	อัตราส่วนความสามารถเก็บกักคลอไรด์
9	PC 20FA 10L	2.14	1.32	0.62
10	PC 20FB 10L	2.28	1.46	0.64
11	PC 20FC 10L	1.95	1.05	0.54
12	PC 20FD 10L	2.35	1.46	0.62
13	PC 20FE 10L	1.97	1.09	0.56
14	PC 20FF 10L	2.35	1.58	0.67

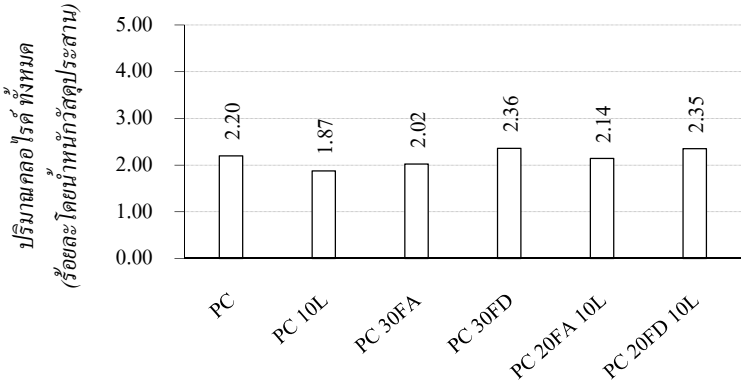
รูปที่ 4.28 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ในชิ้นตัวอย่างเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน พบว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด น้อยกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะผงหินปูนที่แทนที่ปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม (filler) ลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อมอร์ต้าร์ทำให้แน่นขึ้น [26,27] ประกอบกับขนาดอนุภาคที่เล็กของผงหินปูน สามารถยึดจับคลอไรด์อิออนด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (physical bound) ที่ผิวของผงหินปูน ด้วยเหตุผลดังกล่าวรวมกันจึงส่งผลให้คลอไรด์อิออนเข้าไปในเนื้อเพสต์น้อยลง ส่วนเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 นั้น พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของทั้งสองสัดส่วนผสมของเพสต์ มีค่าใกล้เคียงกับเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มีแนวโน้มมากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติของผงหินปูนเป็นวัสดุเติมเต็มลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อมอร์ต้าร์ อาจมีประสิทธิภาพมากกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย จะส่งผลให้เพสต์มีปริมาณโพรงมากขึ้น คลอไรด์อิออนจึงสามารถเข้าไปในเนื้อเพสต์มากขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่ามีปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ในชิ้นตัวอย่างใกล้เคียงกัน

สำหรับผลของปริมาณ fCaO ที่ต่างกันในเถ้าลอยต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่า เมื่อสังเกตุจากรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ผสมเถ้าลอย ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณ fCaO ที่แตกต่างกันในเถ้าลอย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า fCaO ไม่มีผลต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



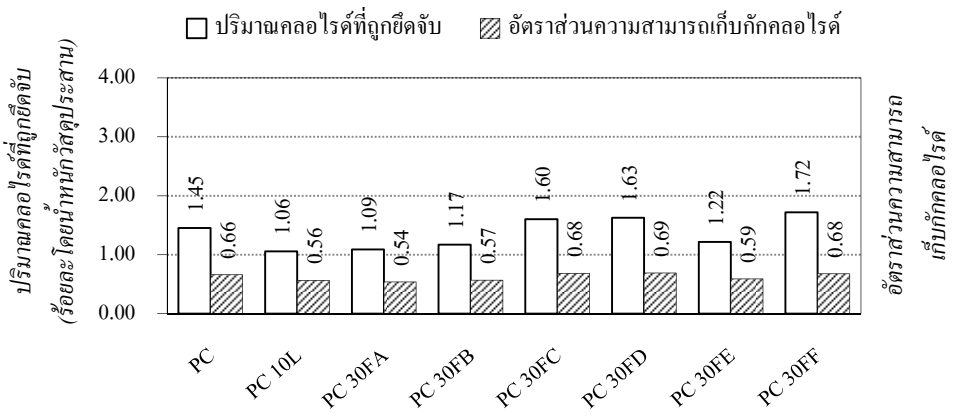
รูปที่ 4.28 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ในชิ้นตัวอย่างเพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอย ระหว่างการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A กับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ดังรูปที่ 4.29 พบว่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่อยู่ในชิ้นตัวอย่างเพสต์ผสมเถ้าลอยตัวอย่าง A มีค่าน้อยกว่าเพสต์ผสมเถ้าลอยตัวอย่าง D ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยตัวอย่าง A มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานดีกว่า ดังนั้นผลผลิตจากปฏิกิริยาดังกล่าว (CSH และ CAH) จึงมีปริมาณมากกว่า ซึ่ง CSH และ CAH สามารถยึดจับคลอไรด์อิออนได้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ ประกอบกับด้วยอนุภาคที่เล็กกว่าของเถ้าลอยตัวอย่าง A จึงสามารถแทรกกระจายได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดได้ดีขึ้น



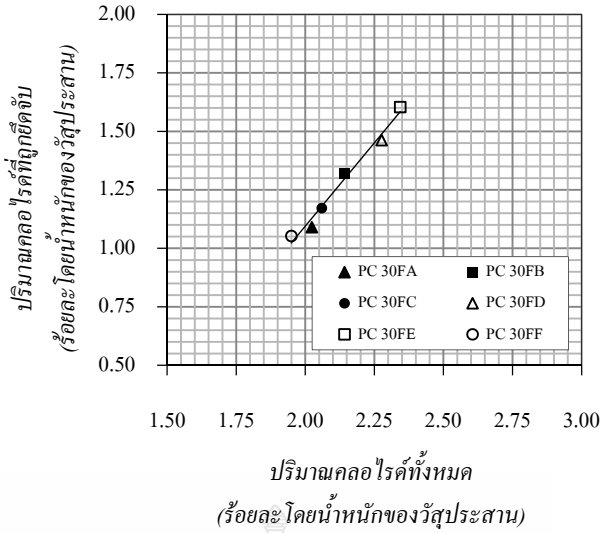
รูปที่ 4.29 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน

สำหรับรูปที่ 4.30 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนความสามารถเก็บกักคลอไรด์ (หาได้จากอัตราส่วนของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับต่อปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน ซึ่งพบว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มีอัตราส่วนความสามารถเก็บกักคลอไรด์น้อยกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถึงแม้การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูน จะทำให้คลอไรด์อิอออนเข้าไปในเนื้อเพสต์น้อยลง (รูปที่ 4.28) แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก ผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อย เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ ทำให้ปูนซีเมนต์น้อยลง ปริมาณของสารประกอบ C_3A, C_4AF จึงน้อยลงด้วย ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้สามารถยึดจับคลอไรด์อิอออนได้โดยการทำปฏิกิริยาทางเคมี (chemical bound) นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณ C_3S, C_2S และผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (CSH, CAH, monosulfate, ettringite) ลดลงอีกด้วย ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ก็สามารถยึดจับคลอไรด์อิอออนได้เช่นกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ [32,29] ด้วยสาเหตุดังกล่าว จึงส่งผลให้การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูน จึงมีอัตราส่วนความสามารถเก็บกักคลอไรด์น้อยลง ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์น้อยลง ส่วนเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีค่าใกล้เคียงกับเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10



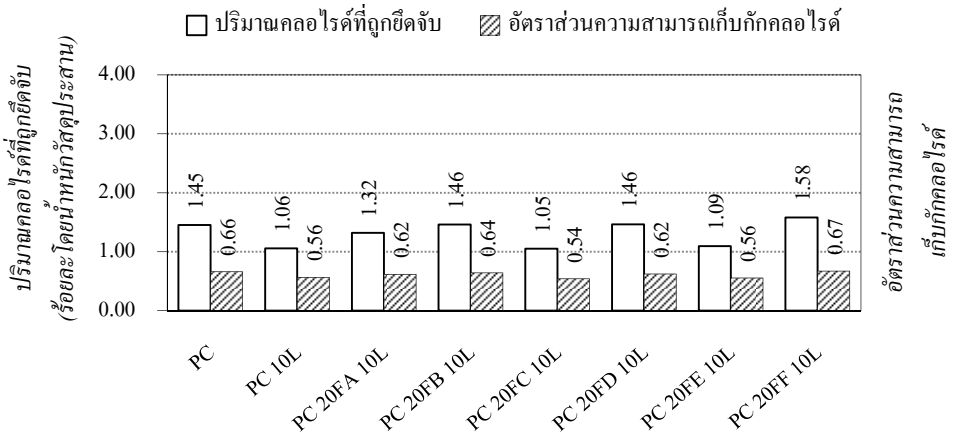
รูปที่ 4.30 ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและอัตราส่วนความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยต่อการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ซึ่งอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ดังรูปที่ 4.31 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยไม่มีผลต่อการเก็บกักคลอไรด์ เนื่องจากการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (เถ้าลอยตัวอย่าง A, B, C ,D, E, F) ร้อยละ 30 อยู่บนเส้นแนวโน้มเดียวกัน



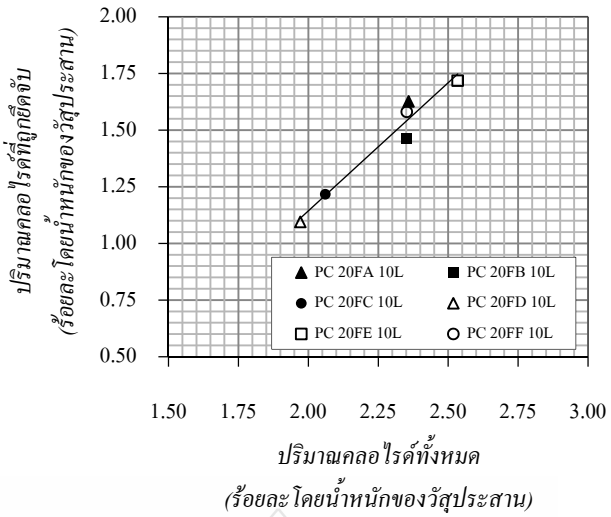
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน

ส่วนรูปที่ 4.32 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและอัตราส่วนความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ส่งผลให้อัตราส่วนความสามารถเก็บกักคลอไรด์น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน บ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ที่ลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยผงหินปูนทำให้ C_3A, C_4AF และผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยลงนั่นเอง



รูปที่ 4.32 ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์เก็บกักของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยต่อการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยไม่มีผลต่อการเก็บกักคลอไรด์ เนื่องจากการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (เถ้าลอยตัวอย่าง A, B, C ,D, E, F) ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 อยู่บนเส้นแนวโน้มเดียวกัน



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ถูกยึดจับและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อายุแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 91 วัน

4.3.3 ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์

ผลการศึกษาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อายุการบ่ม 7 วัน, 28 วัน และ 91 วัน แสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.34 ถึงรูปที่ 4.40 อธิบายได้ดังนี้

การศึกษาความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ครั้งนี้ ประเมินความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ โดยวัดปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์เพื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของคลอไรด์และปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ประยุกต์ใช้การประเมินค่าการซึมผ่านของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 ซึ่งกำหนดระดับการซึมผ่านของคลอไรด์ตามจำนวนประจุที่เคลื่อนผ่านชิ้นตัวอย่างคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4.7 และผลการทดสอบปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์วัสดุประสานในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์เมื่อพิจารณาจากผลการเคลื่อนที่ของประจุ ASTM C1202 (ASTM Volume 04.02, 1996)

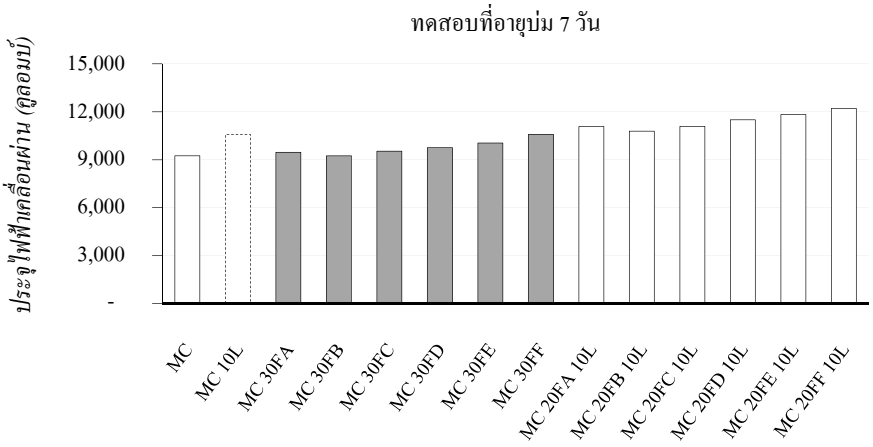
จำนวนประจุที่เคลื่อนผ่าน (คูลอมบ์)	ระดับการซึมผ่านได้
มากกว่า 4,000	สูง
2,000 ถึง 4,000	ปานกลาง
1,000 ถึง 2,000	ต่ำ
100 ถึง 1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่มีผล

ตารางที่ 4.8 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์วัสดุประสาน

ลำดับที่	มอร์ต้าร์	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ (คูลอมบ์)		
		อายุบ่ม 7 วัน	อายุบ่ม 28 วัน	อายุบ่ม 91 วัน
1	MC	9,245	8,087	7,661
2	MC 10L	10,574	9,038	8,411
3	MC 30FA	9,464	5,080	2,124
4	MC 30FB	8,529	5,234	1,957
5	MC 30FC	9,532	5,142	1,122
6	MC 30FD	9,757	6,071	2,216
7	MC 30FE	10,046	5,358	2,449
8	MC 30FF	10,577	5,273	2,933
9	MC 20FA 10L	11,081	6,950	3,092
10	MC 20FB 10L	10,792	6,576	3,174
11	MC 20FC 10L	11,090	6,269	3,309
12	MC 20FD 10L	11,498	7,503	3,936
13	MC 20FE 10L	11,830	8,951	2,866
14	MC 20FF 10L	12,212	7,999	1,690

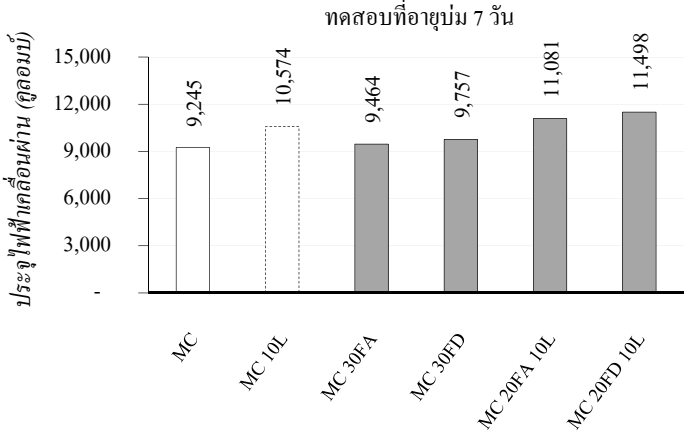
รูปที่ 4.34 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 7 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าที่อายุ 7 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมด (9,245 คูลอมบ์) น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (10,574 คูลอมบ์) บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่น้อยลงซึ่งก็สอดคล้องกับการวิจัยของเอกศักดิ์และคณะ[30] ทั้งนี้เพราะผงหินปูนเป็นวัสดุอุดโพรงช่องว่าง (filler effect) แต่ขาดคุณสมบัติในการยึดประสาน ดังนั้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง ผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงมีไม่มากพอขยายเข้าไปอุดโพรงในเนื้อมอร์ต้าร์ คลอไรด์จึงสามารถเข้าไปในเนื้อมอร์ต้าร์ได้ง่าย ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 พบว่ามีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกัน ขณะที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 กลับมีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนและมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่น้อยกว่า สาเหตุมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนทำให้ปริมาณวัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานน้อยลงนั่นเอง และเมื่อเปรียบเทียบมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 กับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าที่อายุมอร์ต้าร์ 7 วันการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมด มากกว่าการแทนที่เฉพาะผงหินปูนอย่างเดียว ทั้งนี้เพราะในช่วงอายุต้นปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยยังเกิดน้อย จึงส่งผลให้มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับ ผงหินปูนมีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดมากกว่ามอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน ซึ่งบ่งบอกถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.34 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 7 วัน

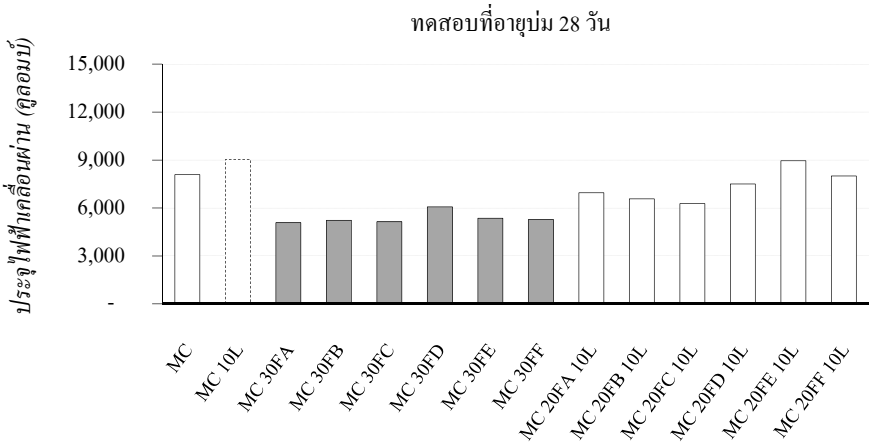
เมื่อพิจารณาการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกรณีแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A กับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ดังรูปที่ 4.35 พบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดน้อยกว่ากรณีแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D เล็กน้อย บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่ดีกว่า ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยตัวอย่าง A ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (20 ไมโครเมตร) เล็กกว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D (35 ไมโครเมตร) จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้ดีกว่า สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย เมื่อสังเกตุจากรูปที่ 4.34 พบว่าปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย (กรณีปริมาณที่ศึกษาในครั้งนี้) มีผลน้อยมากต่อความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 4.35 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 7 วัน

จากรูปที่ 4.36 พบว่าที่อายุบ่ม 28 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ยังคงมีค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์มากกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่น้อยลง เพราะการขาดคุณสมบัติในการยึดประสานของผงหินปูนที่แทนที่ปูนซีเมนต์นั่นเอง ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 พบว่ามีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนอย่างชัดเจน บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่มากขึ้น เนื่องจากเมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและ

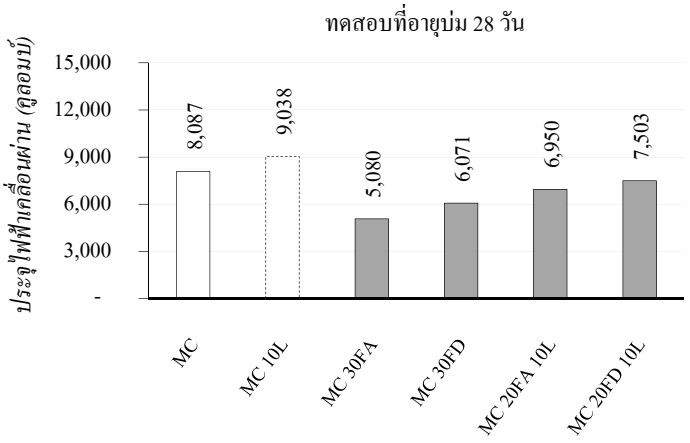
ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดเพิ่มขึ้น ผลิตผลของปฏิกิริยาทั้งสองทำให้มอร์ต้าร์มีระบบโพรงเล็กลง การซึมผ่านของคลอไรด์จึงเป็นไปได้ยากขึ้น ส่วนกรณีมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่าค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดมีแนวโน้มใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพราะปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้น แต่เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 พบว่ามีค่ามากกว่า บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากผลของการแทนที่ผงหินปูนทำให้ปริมาณวัสดุที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานน้อยลง



รูปที่ 4.36 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 28 วัน

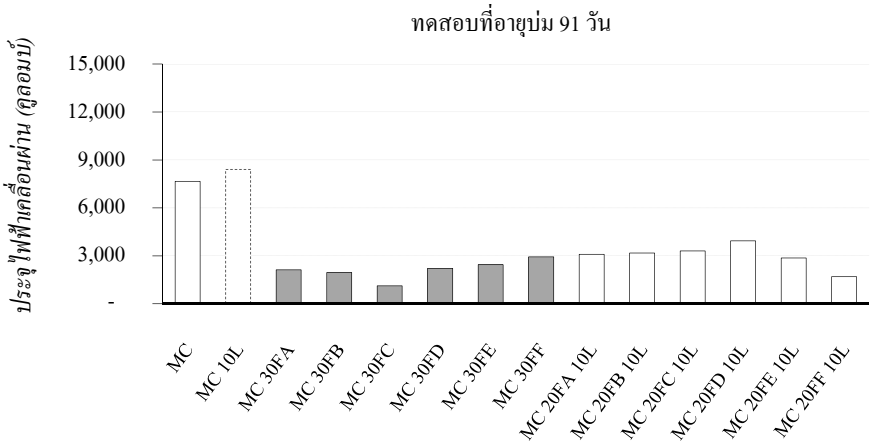
เมื่อพิจารณาการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกรณีแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A กับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ดังรูปที่ 4.37 พบว่าที่อายุ 28 วันให้ผลในทำนองเดียวกับกรณีอายุบ่ม 7 วัน กล่าวคือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด A มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด D เล็กน้อย บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่ดีกว่า สาเหตุสามารถอธิบายได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.36 ก็พบว่าที่อายุบ่ม 28 วันให้ผลในทำนองเดียวกับกรณีอายุบ่ม 7 วัน กล่าวคือ ปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยไม่มีผลต่อความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย

เถ้าลอยร้อยละ 30 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



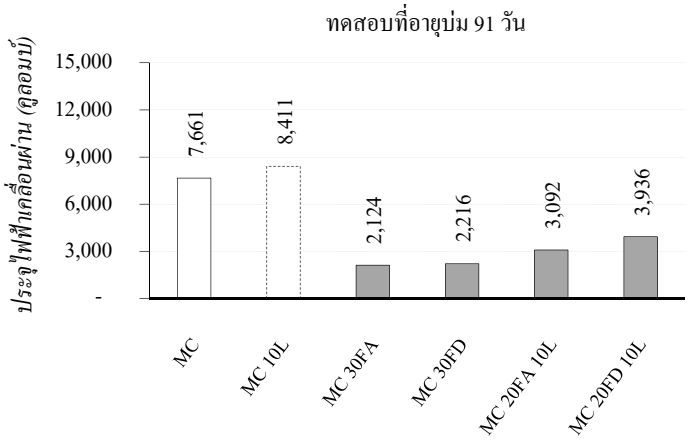
รูปที่ 4.37 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 28 วัน

ส่วน รูปที่ 4.38 พบว่ากรณีอายุบ่ม 91 วัน เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ให้ผลในทิศทางเดียวกับกรณีอายุบ่ม 7 และ 28 วัน กล่าวคือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทำให้ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์น้อยลง ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10พบว่ามีค่าประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดใกล้เคียงกัน บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่ใกล้เคียงกัน และยังพบว่ามอร์ต้าร์ทั้งสองมีค่าประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนอย่างชัดเจน บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์มากขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่าที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์มากขึ้น (91 วัน) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอยและการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ให้ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์แตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะเมื่ออายุมอร์ต้าร์มากขึ้น ทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมากขึ้น ทำให้มอร์ต้าร์มีระบบโพรงเล็กลง ประกอบกับผงหินปูนทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม (Filler) ลดปริมาณช่องว่างภายในเนื้อมอร์ต้าร์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวรวมกัน ส่งผลให้การซึมผ่านของคลอไรด์ในมอร์ต้าร์จึงเป็นไปได้ยากขึ้น



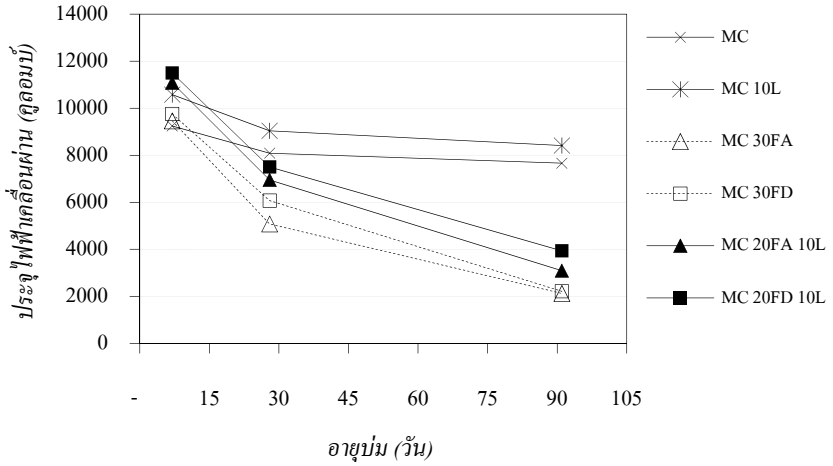
รูปที่ 4.38 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 91 วัน

เมื่อพิจารณาการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 เปรียบเทียบกรณีแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A กับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ดังรูปที่ 4.39 พบว่าให้ผลทำนองเดียวกับกรณีอายุบ่ม 7 และ 28 วัน กล่าวคือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด A มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด D เล็กน้อย บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่ดีกว่า สาเหตุสามารถอธิบายได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สำหรับผลของปริมาณ fCaO ในเถ้าลอย ที่อายุ 91 วัน ก็พบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกับกรณีอายุบ่ม 7 และ 28 วัน กล่าวคือ ปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยไม่มีผลต่อความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ 4.39 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน ที่อายุตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 28 วัน

สุดท้ายรูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุบ่ม ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน พบว่าทุกๆตัวอย่างมอร์ต้าร์มีค่าประจุเคลื่อนผ่านตัวอย่างทั้งหมดลดลง เมื่อมอร์ต้าร์มีอายุบ่มมากขึ้น บ่งชี้ถึงความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและเถ้าลอยเกิดมากขึ้น ผลผลิตของปฏิกิริยาทั้งสองจึงขยายเข้าไปในโพรงมากขึ้น ทำให้มอร์ต้าร์มีระบบโพรงเล็กลงเนื่อมอร์ต้าร์จึงแน่นขึ้น การซึมผ่านคลอไรด์จึงเป็นไปได้ยากขึ้นตามอายุมอร์ต้าร์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์มากขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 20 ทั้งนี้เพราะประสิทธิภาพของเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ มอร์ต้าร์มีระบบโพรงเล็ก การซึมผ่านคลอไรด์จึงเป็นไปได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์กับอายุบ่มของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D และแทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A และ D ร่วมกับผงหินปูน

4.3.4 ความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์

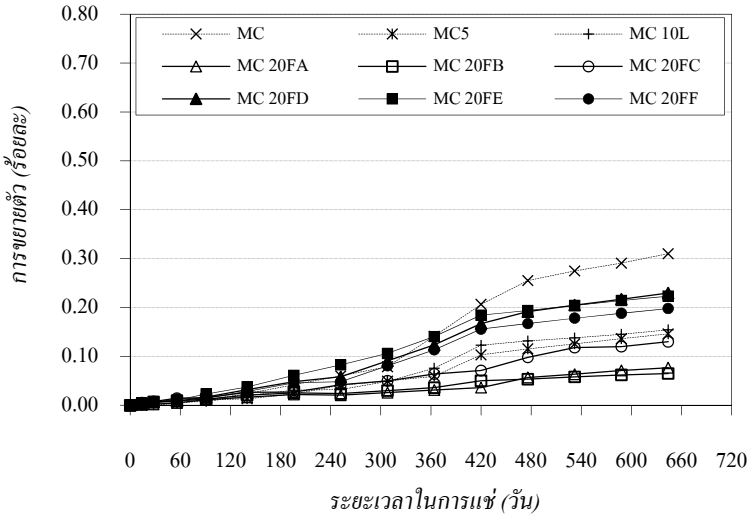
การประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดค่าการขยายตัว (กรณีโซเดียมซัลเฟต) และการสูญเสียน้ำหนัก (กรณีแมกนีเซียมซัลเฟต) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน มีรายละเอียดผลการทดสอบและวิเคราะห์ดังนี้

4.3.4.1 <u>การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต</u>

รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

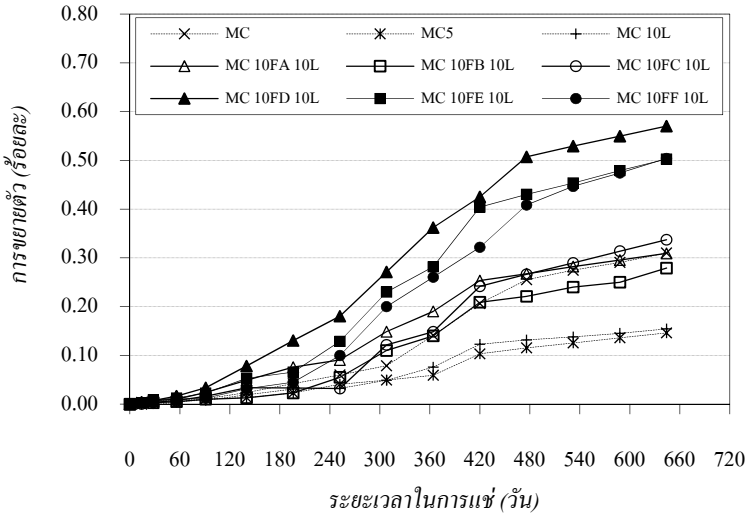
จาก รูปที่ 4.41 ซึ่งแสดงการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 20 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เพราะปริมาณ C_3A ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 น้อยกว่า ส่งผลให้เกิดเอททริงไจท์ (Ettringite) น้อยกว่า [22,31,32] ทำให้การขยายตัวน้อยกว่า ส่วนการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (ขนาด 3 ไมโครเมตร) มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

แต่น้อยกว่าของ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อย เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ $Ca(OH)_2$ น้อยลง การขยายตัวจึงน้อยลง ขณะที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยนั้น พบว่าการแทนที่ของทุกตัวอย่างเถ้าลอย (6 ตัวอย่าง) การขยายตัวของมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณ C_3A และ C_4AF ลดลง อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานยังเปลี่ยน $Ca(OH)_2$ ให้เป็น CSH จึงเป็นการเพิ่มสภาพการทนทานการกัดกร่อน และการลดลงของ $Ca(OH)_2$ ทำให้เกิดเอททริงไจท์น้อยลง การขยายตัวจึงน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และยังน้อยกว่ามอร์ต้าร์ผงหินปูน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D (เถ้าลอย D, E และ F) มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมากกว่ามอร์ต้าร์ผงหินปูนด้วย ซึ่งทั้งนี้เป็นไปได้ว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D มีปริมาณ CaO และ SO_3 ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 22.46 และ 5.08 ตามลำดับ) ในขณะที่เถ้าลอยตัวอย่าง A มีปริมาณ CaO และ SO_3 ต่ำกว่า (ร้อยละ 13.69 และ 1.86 ตามลำดับ) เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงๆ ในอัตราการแทนที่ต่ำๆ (ร้อยละ 20) จะทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามาก [23,32] ประกอบกับ SO_3 สามารถทำให้เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวได้ [10] ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D แต่เมื่อพิจารณาถึงการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A หรือเถ้าลอยตัวอย่างชุด D พบว่าปริมาณที่แตกต่างกันของ fCaO มีผลต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตน้อยมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีผลต่อการขยายตัว ทั้งนี้เพราะจะเห็นได้ว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่าง A ตัวอย่าง B และตัวอย่าง C ไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่าง D ตัวอย่าง E และตัวอย่าง F ก็ให้ผลไม่แตกต่างกัน



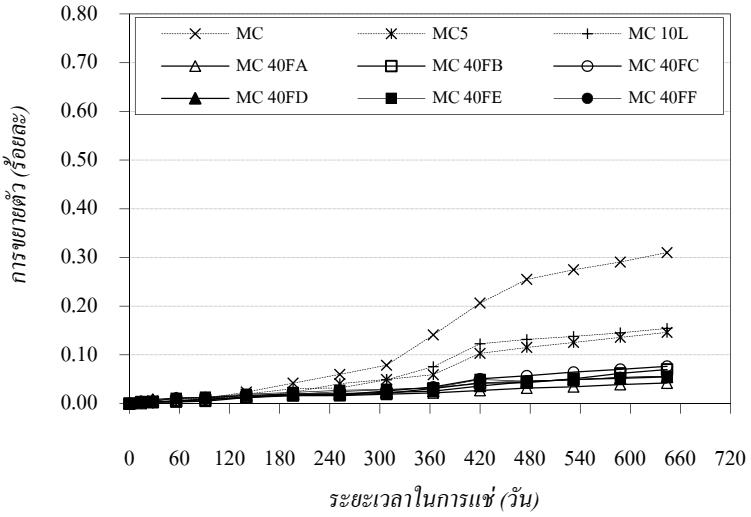
รูปที่ 4.41 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 20

รูปที่ 4.42 เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างระหว่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า ทุกตัวอย่างเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ที่แทนที่ร่วมกับผงหินปูนมีผลให้การขยายตัวมีค่ามากกว่าทั้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนและมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กเข้าเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ทำให้ขนาดโพรงเล็กลง ไม่มีช่องว่างให้เอททริงไจท์ที่เกิดขึ้น จึงทำให้เพสต์ขยายตัวมากขึ้น ส่วนการขยายตัวของมอร์ต้าร์ เถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) มีค่าใกล้เคียงกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D (เถ้าลอย D, E และ F) มีค่าค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์อื่นๆ ก็แสดงให้เห็นชัดเจนว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งมีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (เถ้าลอยตัวอย่าง D ซึ่งมีปริมาณ CaO ร้อยละ 22.46) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณยิ่งต่ำๆ คือร้อยละ 10 ทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากขึ้น ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว และเช่นกันจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A และชุด D ก็จะเห็นว่าผลจากปริมาณ fCaO ที่แตกต่างกันมีผลน้อยต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เพราะการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในแต่ละชุดของเถ้าลอยแตกต่างกันไม่มากและไม่ได้มีแนวโน้มว่าเถ้าลอยที่มี fCaO สูงกว่าจะขยายตัวมากกว่า



รูปที่ 4.42 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

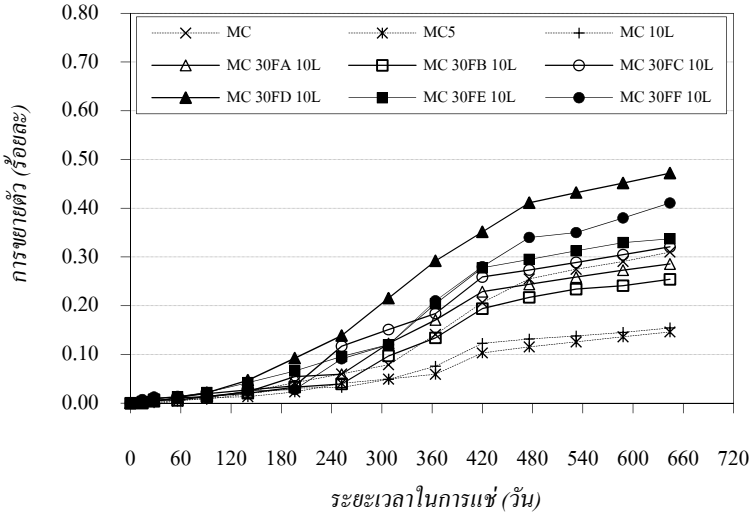
ส่วน รูปที่ 4.43 เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 40 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ซึ่งเป็นปริมาณการแทนที่ค่อนข้างสูง ไม่ว่าตัวอย่างเถ้าลอยจะมีปริมาณ CaO ที่สูงหรือต่ำ จะมีผลให้การขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าน้อย ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานมีประสิทธิภาพ (ลด $Ca(OH)_2$) มากกว่าผลของปริมาณ CaO ที่สูงของเถ้าลอย [32] ส่วนปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยก็ไม่มีผลต่อการขยายตัวเช่นกัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร่วมกับผงหินปูนแทบไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.43 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 40

สุดท้าย รูปที่ 4.44 เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งแนวโน้มก็ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด D ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ผงหินปูนและมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มีค่ามากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนและมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้สาเหตุสามารถอธิบายได้คือ การแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30) ปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เพสต์มีความพรุนน้อยลง ผงหินปูนก็เข้าเติมเต็มช่องว่างทำให้ขนาดโพรงเล็กลง จากผลดังกล่าวทำให้ไม่มีชองว่างสำหรับเอททริงไจท์ การขยายตัวจึงมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A และมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A ส่วนผลจาก

ปริมาณ fCaO ก็มีผลค่อนข้างน้อยเพราะจะเห็นได้จากการขยายตัวที่สลับไปมา แสดงว่ามีผลจากสาเหตุอื่นมากกว่าผลของปริมาณ fCaO ที่ต่างกัน



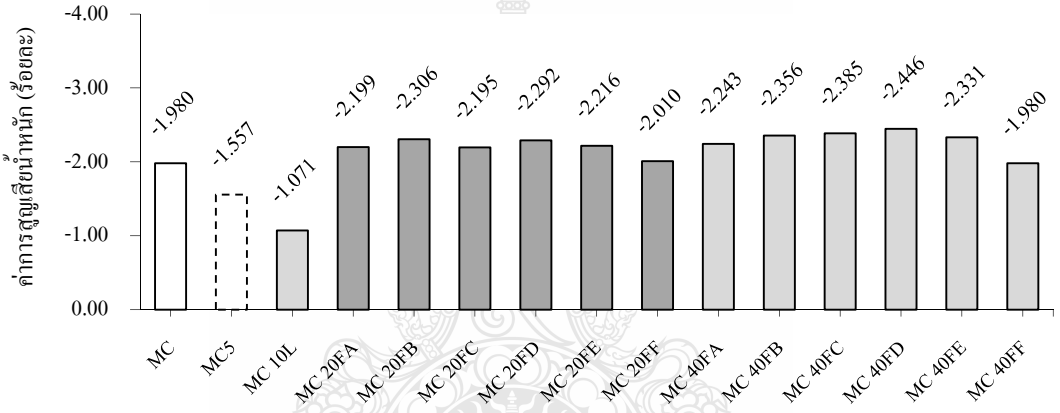
รูปที่ 4.44 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

4.3.4.2 <u>การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต</u>

รูปที่ 4.45 และ 4.46 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 90 สัปดาห์

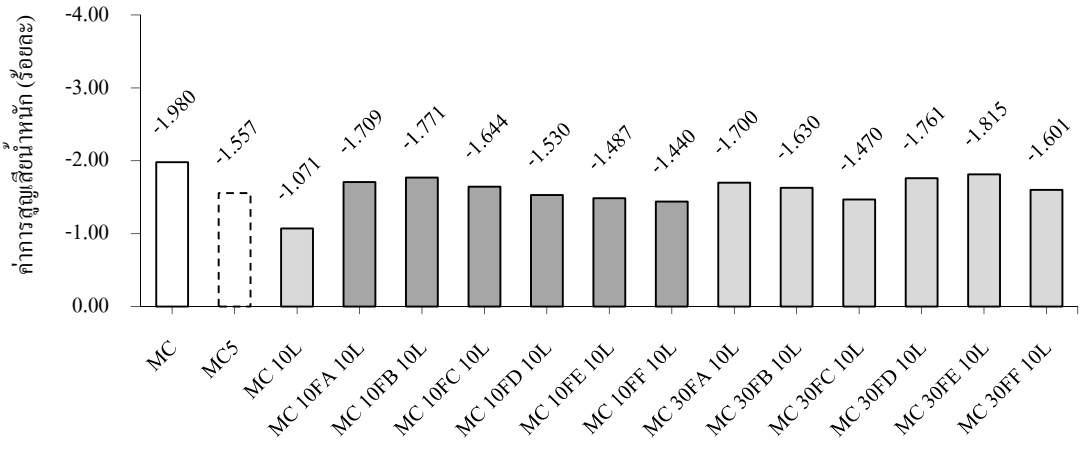
จาก รูปที่ 4.45 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 20 และร้อยละ 40 พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ C_3S ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ส่งผลให้การสะสมของยิปซั่ม (บรูไซ (MH) และซิลิกาเจล (S_2H) มากกว่า และการเปลี่ยน CSH เป็น MSH ก็เกิดมากกว่าอีกด้วย ซึ่งเป็นผลเสียต่อเนื้อมอร์ต้าร์เพราะ MSH เป็นสารประกอบที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่ามีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

และประเภทที่ 5 ล้วน เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคเล็กมาก อาจช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ทำให้มีความทึบน้ำมากขึ้น รวมทั้งการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงทำให้ C_3S และ C_2S น้อยลง การสะสมของยิปซั่ม บรูไซ และซิลิกาเจลจึงน้อยลง และ MSH ก็เกิดน้อยลงด้วย ขณะที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 นั้น พบว่าการแทนที่ด้วยตัวอย่างเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งไปลด $Ca(OH)_2$ ทำให้ความเป็นด่างลดลง จึงเกิดความไม่เสถียรภาพในมอร์ต้าร์ ดังนั้นการสลายตัวของ CSH ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือปฏิกิริยาปอซโซลานก็แล้วแต่ กลายเป็น MSH มากขึ้น ซึ่งก็สอดคล้องกับการวิจัยของปิติศานต์และคณะ [32] โดยเฉพาะการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 40 มีแนวโน้มว่าจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 20



รูปที่ 4.45 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 20 และร้อยละ 40

รูปที่ 4.46 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร่วมกับผงหินปูน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้น มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยมากกว่ามอร์ต้าร์ผงหินปูนร้อยละ 10 แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนที่ต่างกัน (กรณีศึกษาครั้งนี้) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่ค่อยแตกต่างกัน



รูปที่ 4.46 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร่วมกับผงหินปูน

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของ fCaO ต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าปริมาณที่แตกต่างกันของ fCaO (ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้) มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยมากหรืออาจกล่าวว่าไม่มีผล ทั้งนี้สังเกตุได้จากการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) และมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D (เถ้าลอย D, E และ F) ทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 ให้ค่าที่แตกต่างกันน้อยและไม่มีแนวโน้มว่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ fCaO แต่อย่างใด (รูปที่ 4.45)

ส่วน รูปที่ 4.47 เป็นภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 90 สัปดาห์ ซึ่งถ้าดูจากลักษณะการถูกทำลายแล้ว ก็พบว่าไปในทิศทางเดียวกับผลการสูญเสียน้ำหนักดังที่กล่าวมาแล้ว

(ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน

(ข) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

(ค) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

(ง) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 20

(จ) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

(ฉ) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 40

(ช) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

รูปที่ 4.47 รูปถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 90 สัปดาห์

4.4 สรุปผลการศึกษาอิทธิพลปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปผลของการศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ในเถ้าลอย ต่อ คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา และคุณสมบัติทางด้านความคงทนของเพสต์และมอร์ต้าร์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สรุปผลการศึกษาพฤติกรรมของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ในเถ้าลอยต่อคุณสมบัติต่างๆของเพสต์และมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

คุณสมบัติ	พฤติกรรม		
	แย่ลง	ไม่มีผล	ดีขึ้น
ความข้นเหลวปกติของเพสต์		●	
เวลาการก่อตัวของเพสต์			●
การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์		●	
กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์		●	
การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์		●	
ความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์		●	
ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์		●	
ความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์		●	

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาตลอดการวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ความต้องการน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งการแทนที่ด้วยผงหินปูนและเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย มีความต้องการน้ำน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ล้วน

5.1.2 การก่อตัว (ระยะต้นและระยะปลาย) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ขณะที่เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย มีค่าการก่อตัวมากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.3 ปริมาณน้ำที่ใช้ (ให้มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110±5) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.4 การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูน มีผลให้กำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ช่วงอายุต้นมากกว่า แต่เมื่ออายุมากขึ้น กลับให้ค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การแทนที่ด้วยเถ้าลอย พบว่ามีกำลังอัดประลัยช่วงอายุต้นน้อยกว่า แต่เมื่ออายุมอร์ต้าร์มากขึ้นมีค่าใกล้เคียง เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ส่งผลให้กำลังอัดประลัยทั้งอายุต้นและอายุปลายของมอร์ต้าร์น้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.5 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กลับให้ค่าการหดตัวแห้งใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.6 การเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มีค่าใกล้คียงกับเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.7 ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ขณะที่ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุต้นมีค่าน้อยกว่า แต่เมื่ออายุมากขึ้นมีค่ามากกว่า เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5.1.8 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตพบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ขณะที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยและด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนพบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย กล่าวคือ ถ้าเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูง เมื่อแทนที่ในปริมาณที่ต่ำ มีแนวโน้มให้ค่าการขยายตัวใกล้เคียงหรือมากกว่าทั้งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนเมื่อแทนที่ด้วยปริมาณที่สูง จะให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน แต่เมื่อเถ้าลอยมีปริมาณ CaO ต่ำ ไม่ว่าแทนที่ปริมาณสูงหรือต่ำ จะให้ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์น้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน

5.1.9 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตพบว่า การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย จะมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กลับให้ค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

5.1.10 แคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ในเถ้าลอยที่มีปริมาณแตกต่างกัน ไม่มีผลต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสานร่วม (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และผงหินปูน) ปริมาณน้ำที่ใช้ของมอร์ต้าร์วัสดุประสานร่วม (ให้มีค่าร้อยละการไหล เท่ากับ 110 ± 5) และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์วัสดุประสานร่วม แต่มีผลให้เวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของเพสต์มีแนวโน้มเร็วขึ้น

5.1.11 แคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ในเถ้าลอยที่มีปริมาณแตกต่างกัน ไม่มีผลต่อทั้ง การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์วัสดุประสานร่วม การเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์วัสดุประสานร่วม การซึมผ่านคลอไรด์ของมอร์ต้าร์วัสดุประสานร่วม และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์วัสดุประสานร่วม

5.2 ข้อเสนอแนะจากการทดลอง

จากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ มีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 การวิจัยนี้ เป็นการวิจัยที่มุ่งเน้นการศึกษาเพื่ออธิบายผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ในเถ้าลอย โดยการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงในเถ้าลอยตั้งต้นให้มีปริมาณ fCaO แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามควรมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ fCaO ที่มีอยู่ในเถ้าลอยกับเถ้าลอยที่เติมแคลเซียมออกไซด์ให้มีปริมาณเท่ากันว่ามีผลสอดคล้องกันหรือไม่ต่อไป

5.2.2 การวิจัยนี้ ควบคุมปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยถึงระดับหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตามปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยในระดับที่ต่างจากงานวิจัยนี้ ยังเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาต่อไป เพื่อเป็นแนวทางในการคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้อย่างเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

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

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

[3] **"เถ้าลอย" จากของไร้ค่า สู่อุตสาหกรรมพันล้าน** (ออนไลน์), 2003. Available: http://www.technologymedia.co.th/column/columnview.asp?id=66 (3 กันยายน 2552).

[4] บรรณาธิการ, "วิจัยเถ้าลอยฯ จับขยะมาทำประโยชน์," **Engineering Today**, ปีที่ 1, ฉบับที่ 02, 2546

[5] **การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์** (ออนไลน์). Available: http://maemoh.egat.com/index_ maemoh.php?content=sara&topic=2

[6] 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).

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

[8] 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)

[9] LIN Zongshou and ZHAO Qian, "Strength of Limestone-based Non-calcined Cement and its Properties," **Journal of Wuhan University of Technolotgy-Mater**, 2009. p. 471.

[10] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.

[11] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, "คุณสมบัติด้านความต้านทานและกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ," **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.**, ปีที่ 23, ฉบับที่ 2, 2543. หน้า 17.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[12] Cengiz D. A., Alaeettin k. and Umur K.S., "Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash," **Cement and Concrete Research**(Electronic), 2005, Vol. 27, pp. 191-196. Available: Elsevier/Science Direct (3 may 2009).

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

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

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

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

[17] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, **"มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง**," มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38. พิมพ์ครั้งที่ 1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2538.

[18] ปริญญา จินดาประเสริฐ, **เถ้าลอยในงานคอนกรีต.** กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.

[19] ศักดิ์ประยุทธ สินธุภิญโญ และสุรชัย วังรัตนชัย, "คุณสมบัติของสารประกอบของปูนซีเมนต์ที่ผสมหินปูนบดละเอียด," **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี**, ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552, นครราชสีมา, 2552. หน้า 15.

[20] Vagelis, G. P., "Effect of fly ash on Portland cement systems Part II. High-calcium fly ash," **Cement & Concrete Research** (Electronic), 2000, Vol. 30, pp. 1650. Available: Elsevier/Science Direct (3 may 2009).

[21] Deng Min, "Mechanism of Expansion in Hardened Cement Pastes with Hard - Burnt Free Lime," **Cement & Concrete Research** (Electronic), 1995, Vol. 25, p. 446. Available: Elsevier/Science Direct (3 may 2009).

[22] สุขชัย สุขยานุดิษฐ์ และคณะ, "ผลกระทบของผงหินปูนต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต," **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี**, ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552, นครราชสีมา, 2552. หน้า 4.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[23] ปิติศานต์ กร้ำมาตร และสมนึก ตั้งเติมสิริกุล, "การต้านทานซัลแฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ฝุ่นหินปูน," **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี**, ครั้งที่ 3, 24-26 ตุลาคม 2550, ชลบุรี, 2550. หน้า 4.

[24] อาภา สธนเสาวภาคย์, **การศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2544.

[25] สมชัย กกกำแหง, "ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์," **วารสารโยธาสาร,** กุมภาพันธ์, 2539, หน้า 32.

[26] Benoît Bissonnette, Pascale Pierre and Michel Pigeon, "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials," **Cement & Concrete Research** (Electronic), 1999, Vol. 29, pp. 1661. Available: Elsevier/Science Direct (3 may 2009).

[27] Theerawat Sinsiri, **Effect of Particle Size and Shape of Fly Ash on Pore Structure and Permeability of Blended Cement Paste**, Ph. D. Thesis, Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2005.

[28] Taweechai Sumranwanich, **Chloride Binding Capacity of Cement – Fly Ash Past and Simulation of Chloride Profile in Concrete**, Ph. D. Thesis, Civil Engineering, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University, 2004.

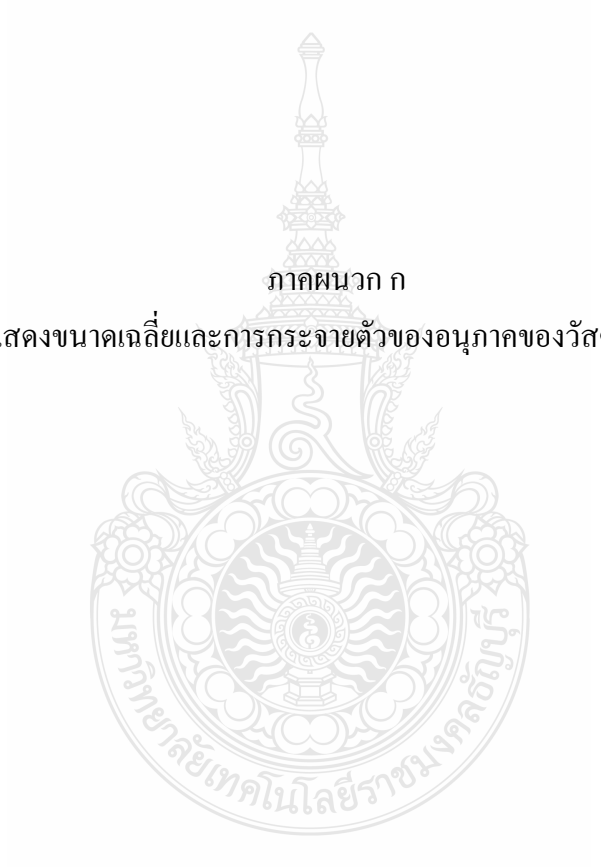
[29] Somnuk Tangtermsirikul, **Durability and Mix Design of Concrete**. Printing House Thammasat University Rangsit Campus, 2003, pp. 86-87.

[30] เอกศักดิ์ ฤกษมหาลิขิต และคณะ, "การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยฝุ่นหินปูน และสารขยายตัว," **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี**, ครั้งที่ 5, 20-22 ตุลาคม 2552, นครราชสีมา, 2552. หน้า 4.

[31] 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. pp. 247.

[32] 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.

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 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอยตัวอย่าง A

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	0.01	0.01
0.08	0.09	0.085	0.01	0.02
0.09	0.11	0.100	0.03	0.05
0.11	0.13	0.120	0.06	0.11
0.13	0.15	0.140	0.11	0.22
0.15	0.17	0.160	0.20	0.42
0.17	0.20	0.185	0.36	0.78
0.20	0.23	0.215	0.59	1.37
0.23	0.27	0.250	0.88	2.25
0.27	0.31	0.290	1.11	3.36
0.31	0.36	0.335	1.17	4.53
0.36	0.42	0.390	1.09	5.62
0.42	0.49	0.455	1.00	6.62
0.49	0.58	0.535	0.88	7.50
0.58	0.67	0.625	0.71	8.21
0.67	0.78	0.725	0.57	8.78
0.78	0.91	0.845	0.47	9.25
0.91	1.06	0.985	0.40	9.65

ตารางที่ ก.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอยตัวอย่าง A (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
1.06	1.24	1.150	0.36	10.01
1.24	1.44	1.340	0.35	10.36
1.44	1.68	1.560	0.36	10.72
1.68	1.95	1.815	0.42	11.14
1.95	2.28	2.115	0.54	11.68
2.28	2.65	2.465	0.73	12.41
2.65	3.09	2.870	1.00	13.41
3.09	3.60	3.345	1.36	14.77
3.60	4.19	3.895	1.78	16.55
4.19	4.88	4.535	2.22	18.77
4.88	5.69	5.285	2.62	21.39
5.69	6.63	6.160	2.94	24.33
6.63	7.72	7.175	3.17	27.50
7.72	9.00	8.360	3.27	30.77
9.00	10.48	9.740	3.29	34.06
10.48	12.21	11.345	3.24	37.30
12.21	14.22	13.215	3.18	40.48
14.22	16.57	15.395	3.14	43.62
16.57	19.31	17.940	3.14	46.76
19.31	22.49	20.900	3.21	49.97
22.49	26.20	24.345	3.33	53.30
26.20	30.53	28.365	3.50	56.80
30.53	35.56	33.045	3.70	60.50
35.56	41.43	38.495	3.92	64.42
41.43	48.27	44.850	4.13	68.55
48.27	56.23	52.250	4.33	72.88
56.23	65.51	60.870	4.37	77.25
65.51	76.32	70.915	4.29	81.54
76.32	88.91	82.615	4.04	85.58
88.91	103.58	96.245	3.66	89.24
103.58	120.67	112.125	3.17	92.41
120.67	140.58	130.625	2.62	95.03
140.58	163.77	152.175	2.07	97.10
163.77	190.80	177.285	1.52	98.62
190.80	222.26	206.530	0.97	99.59
222.26	258.95	240.605	0.42	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

ตารางที่ ก.3 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอยตัวอย่าง A (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
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 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอยตัวอย่าง D

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	0.01	0.02
0.11	0.13	0.120	0.03	0.05
0.13	0.15	0.140	0.06	0.11
0.15	0.17	0.160	0.12	0.23
0.17	0.20	0.185	0.22	0.45
0.20	0.23	0.215	0.39	0.84
0.23	0.27	0.250	0.62	1.46
0.27	0.31	0.290	0.82	2.28
0.31	0.36	0.335	0.89	3.17
0.36	0.42	0.390	0.86	4.03
0.42	0.49	0.455	0.81	4.84
0.49	0.58	0.535	0.75	5.59
0.58	0.67	0.625	0.63	6.22
0.67	0.78	0.725	0.53	6.75
0.78	0.91	0.845	0.45	7.20
0.91	1.06	0.985	0.39	7.59
1.06	1.24	1.150	0.35	7.94
1.24	1.44	1.340	0.32	8.26
1.44	1.68	1.560	0.31	8.57
1.68	1.95	1.815	0.33	8.90
1.95	2.28	2.115	0.40	9.30
2.28	2.65	2.465	0.52	9.82
2.65	3.09	2.870	0.72	10.54
3.09	3.60	3.345	1.01	11.55
3.60	4.19	3.895	1.36	12.91
4.19	4.88	4.535	1.75	14.66

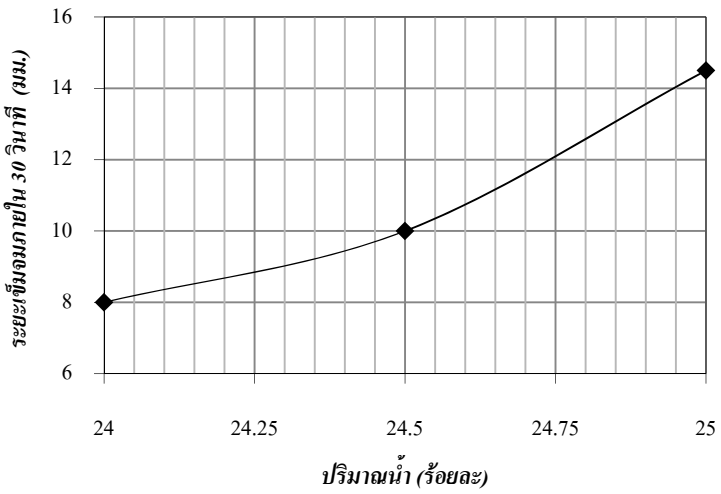
ตารางที่ ก.4 ขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าลอยตัวอย่าง D (ต่อ)

ขนาดอนุภาคเล็กที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด (ไมโครเมตร)	ขนาดเฉลี่ยอนุภาค (ไมโครเมตร)	อนุภาคค้าง (ร้อยละ)	อนุภาคค้างสะสม (ร้อยละ)
4.88	5.69	5.285	2.15	16.81
5.69	6.63	6.160	2.49	19.30
6.63	7.72	7.175	2.76	22.06
7.72	9.00	8.360	2.91	24.97
9.00	10.48	9.740	2.96	27.93
10.48	12.21	11.345	2.92	30.85
12.21	14.22	13.215	2.83	33.68
14.22	16.57	15.395	2.73	36.41
16.57	19.31	17.940	2.64	39.05
19.31	22.49	20.900	2.58	41.63
22.49	26.20	24.345	2.56	44.19
26.20	30.53	28.365	2.6	46.79
30.53	35.56	33.045	2.68	49.47
35.56	41.43	38.495	2.82	52.29
41.43	48.27	44.850	3.01	55.30
48.27	56.23	52.250	3.23	58.53
56.23	65.51	60.870	3.48	62.01
65.51	76.32	70.915	3.74	65.75
76.32	88.91	82.615	4.00	69.75
88.91	103.58	96.245	4.26	74.01
103.58	120.67	112.125	4.41	78.42
120.67	140.58	130.625	4.44	82.86
140.58	163.77	152.175	4.29	87.15
163.77	190.80	177.285	3.92	91.07
190.80	222.26	206.530	3.35	94.42
222.26	258.95	240.605	2.62	97.04
258.95	301.68	280.315	1.8	98.84
301.68	351.46	326.570	0.98	99.82
351.46	409.45	380.455	0.16	99.98
409.45	477.01	443.230	0	99.98
477.01	555.71	516.360	0	99.98
555.71	647.41	601.560	0	99.98
647.41	754.23	700.820	0	99.98
754.23	878.67	816.450	0	99.98

ภาคผนวก ข
ตารางและรูป แสดงการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์วัสดุประสาน และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน

ตารางที่ ข.1 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (PC)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	100	-	-	-	-	-	-	-	24.0	8.0
2	100	-	-	-	-	-	-	-	24.5	10.0
3	100	-	-	-	-	-	-	-	25.0	14.5

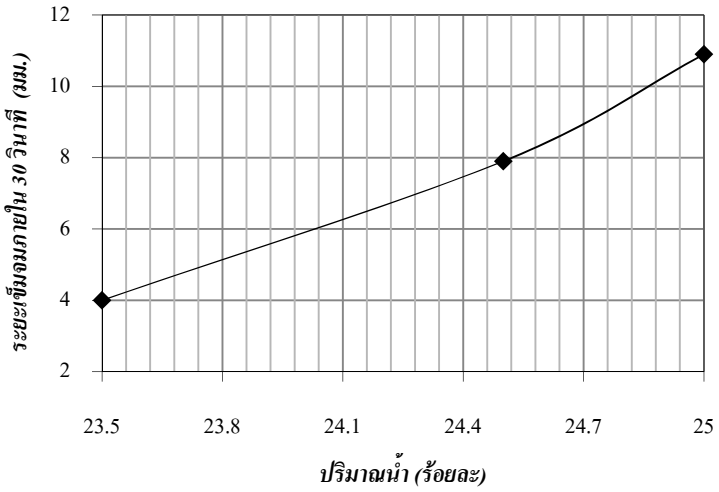


รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 24.50 %

ตารางที่ ข.2 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (PC 10L)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	90	-	-	-	-	-	-	10	23.5	4.0
2	90	-	-	-	-	-	-	10	24.5	7.9
3	90	-	-	-	-	-	-	10	25.0	10.9

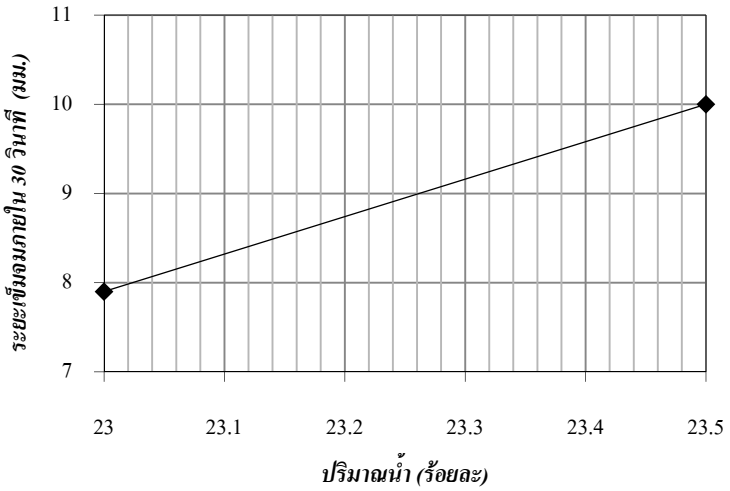


รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 24.86 %

ตารางที่ ข.3 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 20 (PC 20FA)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	20	-	-	-	-	-	-	23.0	7.9
2	80	20	-	-	-	-	-	-	23.5	10

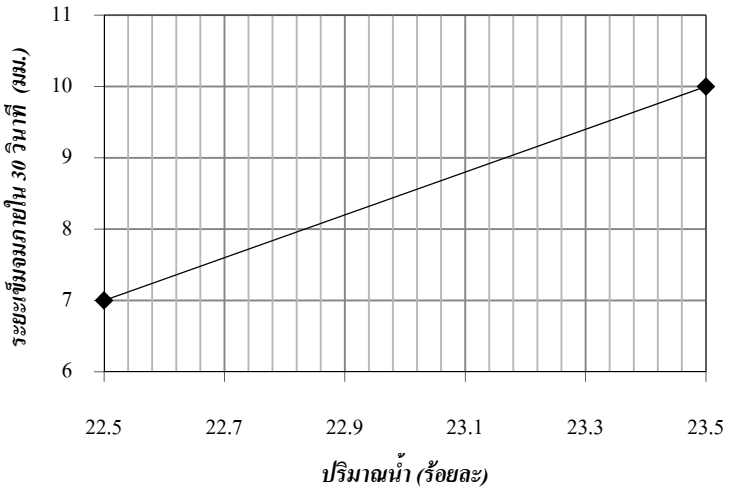


รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.50 %

ตารางที่ ข.4 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 20 (PC 20FB)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	20	-	-	-	-	-	22.5	7
2	80	-	20	-	-	-	-	-	23.5	10

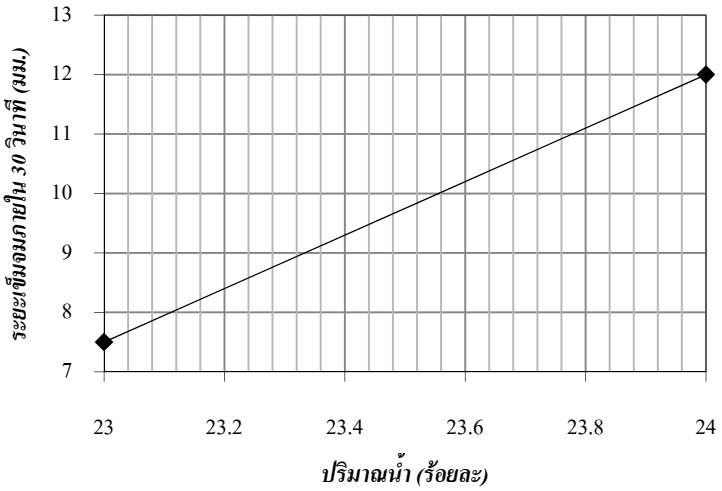


รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.50 %

ตารางที่ ข.5 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 20 (PC 20FC)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	-	20	-	-	-	-	23	7.5
2	80	-	-	20	-	-	-	-	24	12

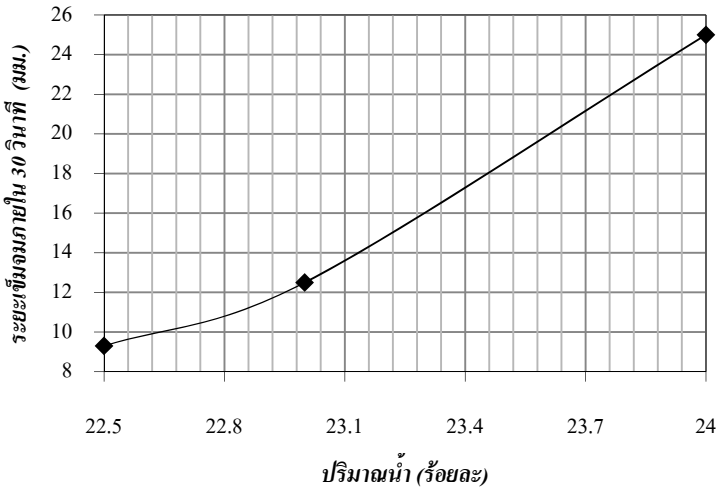


รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.55 %

ตารางที่ ข.6 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 20 (PC 20FD)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	-	-	20	-	-	-	22.5	9.3
2	80	-	-	-	20	-	-	-	23.0	12.5
3	80	-	-	-	20	-	-	-	24.0	25.0

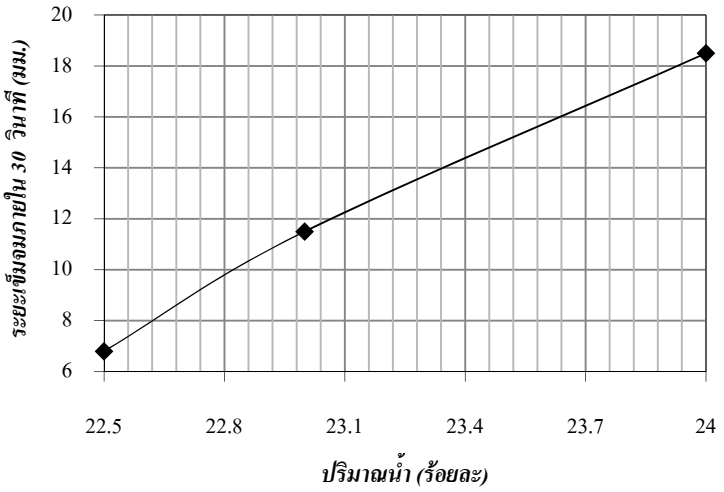


รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 22.65 %

ตารางที่ ข.7 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 20 (PC 20FE)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	-	-	-	20	-	-	22.5	6.8
2	80	-	-	-	-	20	-	-	23.0	11.5
3	80	-	-	-	-	20	-	-	24.0	18.5

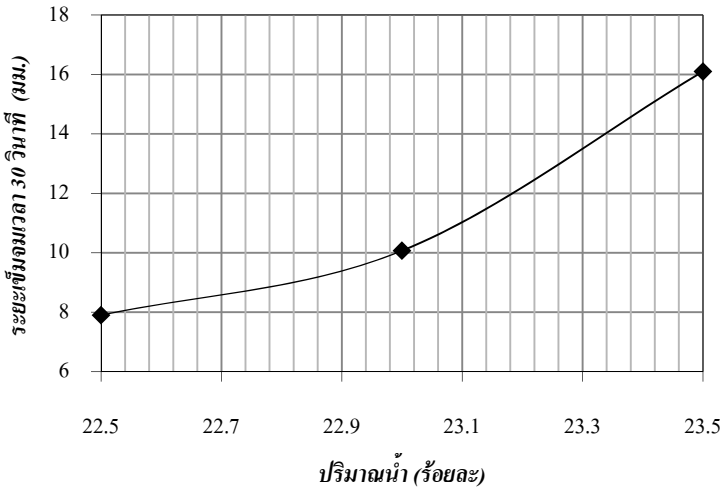


รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 22.80 %

ตารางที่ ข.8 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 20 (PC 20FF)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	-	-	-	-	20	-	22.5	7.9
2	80	-	-	-	-	-	20	-	23.0	10.1
3	80	-	-	-	-	-	20	-	23.5	16.1

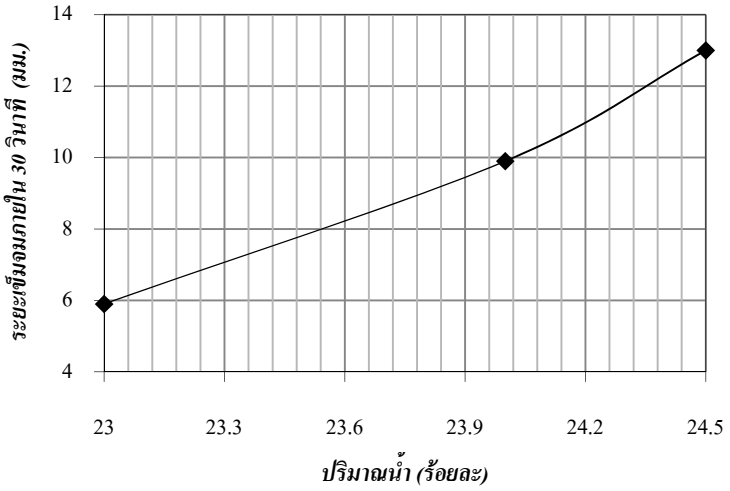


รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 20

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.00 %

ตารางที่ ข.9 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC 10FA 10L)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	10	-	-	-	-	-	10	23.0	5.9
2	80	10	-	-	-	-	-	10	24.0	9.9
3	80	10	-	-	-	-	-	10	24.5	13.0

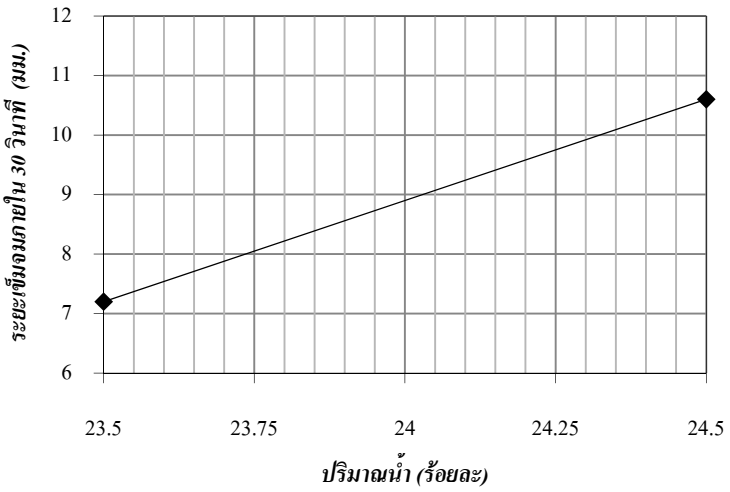


รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 24.05 %

ตารางที่ ข.10 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC 10FB 10L)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	10	-	-	-	-	10	23.5	7.2
2	80	-	10	-	-	-	-	10	24.5	10.6

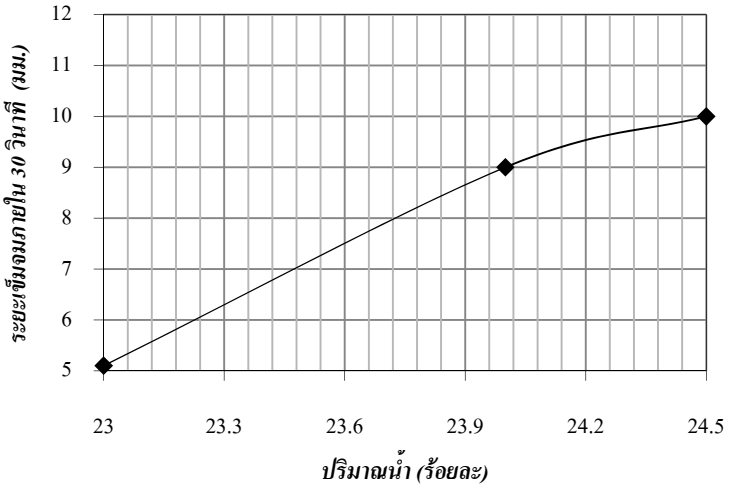


รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 24.33 %

ตารางที่ ข.11 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC 10FC 10L)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	-	10	-	-	-	10	23.0	5.1
2	80	-	-	10	-	-	-	10	24.0	9.0
3	80	-	-	10	-	-	-	10	24.5	10.0

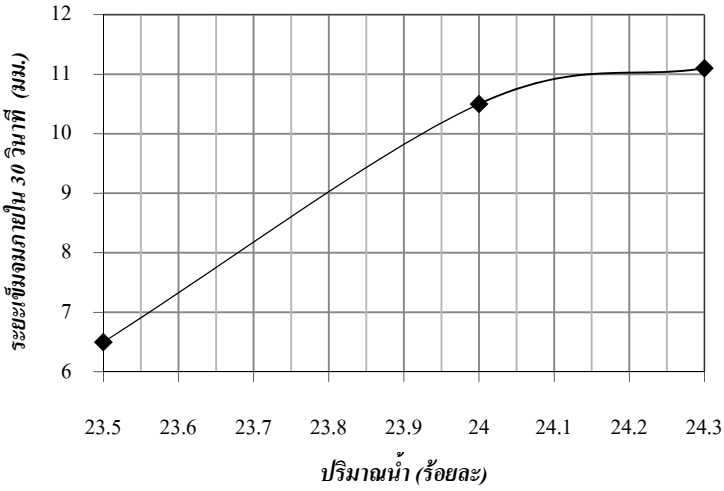


รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 24.50 %

ตารางที่ ข.12 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC 10FD 10L)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	-	-	10	-	-	10	23.5	6.5
2	80	-	-	-	10	-	-	10	24.0	10.5
3	80	-	-	-	10	-	-	10	24.3	11.1

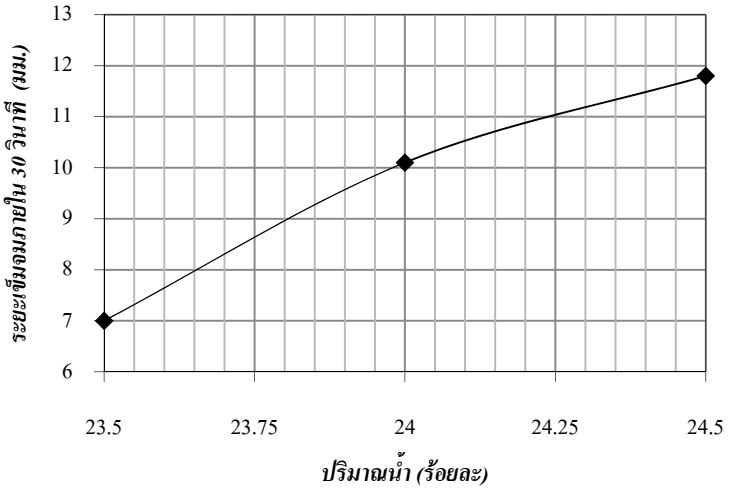


รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.92 %

ตารางที่ ข.13 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC 10FE 10L)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	-	-	-	10	-	10	23.5	7
2	80	-	-	-	-	10	-	10	24.0	10.1
3	80	-	-	-	-	10	-	10	24.5	11.8

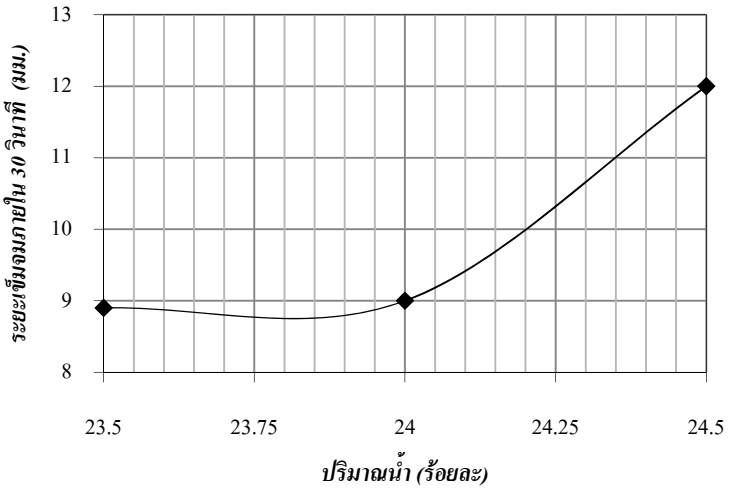


รูปที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 23.98 %

ตารางที่ ข.14 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะ (Normal Consistency) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (PC 10FF 10L)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	น้ำ (ลบ.ซม.)	ระยะเข็มจม (มม.)
		A	B	C	D	E	F			
1	80	-	-	-	-	-	10	10	23.5	8.9
2	80	-	-	-	-	-	10	10	24.0	9.0
3	80	-	-	-	-	-	10	10	24.5	12.0



รูปที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระยะเข็มจมและปริมาณน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ปริมาณน้ำที่เหมาะ (ระยะเข็มจม 10 มม.) = 24.19 %

ตารางที่ ข.15 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน

PC		PC 10L		PC 20FA	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30.00	40.00	30.00	40.00	30.00	40.00
45.00	40.00	45.00	40.00	45.00	40.00
60.00	40.00	60.00	40.00	60.00	40.00
75.00	39.00	75.00	31.00	75.00	40.00
90.00	20.00	90.00	2.00	90.00	40.00
100.00	0.00	91.00	0.00	105.00	32.00
-	-	-	-	120.00	9.50
-	-	-	-	124.00	0.00
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)
86.50	100.00	78.50	91.00	110.00	124.00

ตารางที่ ข.15 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC		PC 10L		PC 20FA	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30.00	40.00	30.00	40.00	30.00	40.00
45.00	40.00	45.00	40.00	45.00	40.00
60.00	40.00	60.00	40.00	60.00	40.00
75.00	39.00	75.00	31.00	75.00	40.00
90.00	20.00	90.00	2.00	90.00	40.00
100.00	0.00	91.00	0.00	105.00	32.00
-	-	-	-	120.00	9.50
-	-	-	-	124.00	0.00
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)
86.50	100.00	78.50	91.00	110.00	124.00

ตารางที่ ข.15 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC 20FB		PC 20FC		PC 20FD	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30.00	40.00	30.00	40.00	30.00	40.00
45.00	40.00	45.00	40.00	45.00	40.00
60.00	40.00	60.00	40.00	60.00	40.00
75.00	40.00	75.00	39.00	75.00	40.00
90.00	38.00	90.00	32.00	90.00	35.00
105.00	23.00	105.00	15.00	105.00	12.00
118.00	0.00	114.00	0.00	112.00	0.00
-	-	-	-	-	-
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)
103.00	118.00	97.00	114.00	97.00	112.00

ตารางที่ ข.15 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC 20FE		PC 20FF		PC 10FA 10L	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30.00	40.00	30.00	40.00	30.00	40.00
45.00	40.00	45.00	40.00	45.00	40.00
60.00	40.00	60.00	40.00	60.00	40.00
75.00	40.00	75.00	40.00	75.00	38.00
90.00	36.00	90.00	35.00	90.00	4.00
105.00	5.00	105.00	4.00	91.50	0.00
107.00	0.00	106.00	0.00	-	-
-	-	-	-	-	-
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)
96.00	107.00	95.00	106.00	82.00	91.50

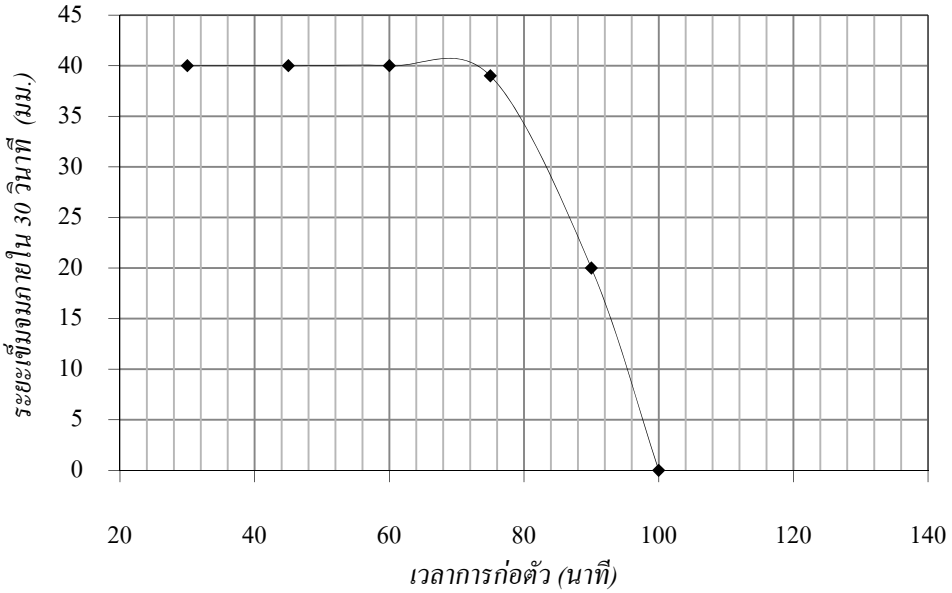
ตารางที่ ข.15 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC 10FB 10L		PC 10FC 10L		PC 10FD 10L	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30.00	40.00	30.00	40.00	30.00	40.00
45.00	40.00	45.00	40.00	45.00	40.00
60.00	40.00	60.00	37.00	60.00	37.00
75.00	33.00	75.00	25.00	75.00	27.00
90.00	3.00	90.00	4.00	90.00	3.00
91.10	0.00	91.20	0.00	92.00	0.00
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)
80.00	91.10	75.00	91.20	76.50	92.00

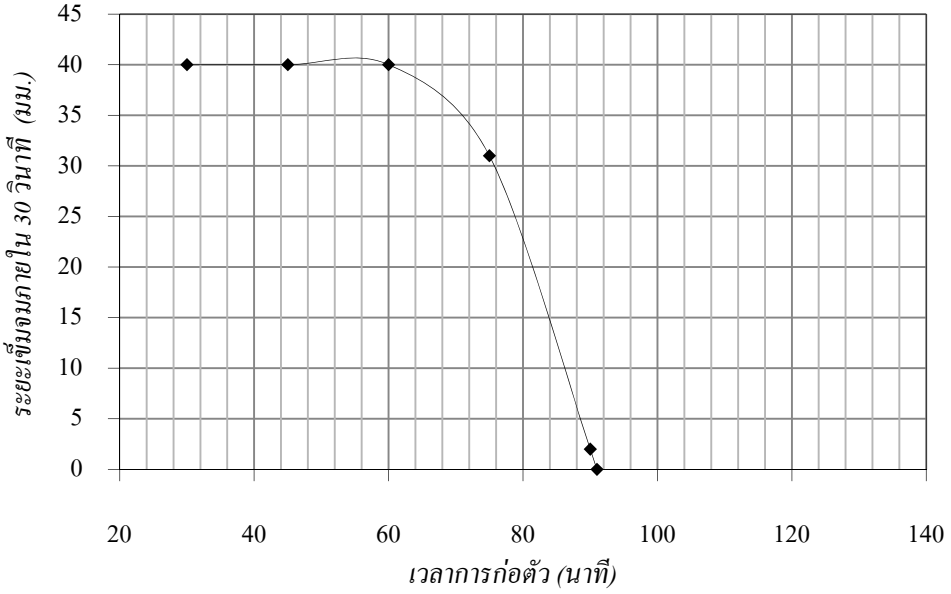
ตารางที่ ข.15 เวลาการก่อตัวของเพสต์วัสดุประสาน (ต่อ)

PC 10FE 10L		PC 10FF 10L	
เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)	เวลา (นาที)	ระยะเข็มจมภายใน 30 วินาที (มม.)
30.00	40.00	30.00	40.00
45.00	40.00	45.00	40.00
60.00	40.00	60.00	40.00
75.00	34.00	75.00	37.00
90.00	3.00	90.00	4.00
91.30	0.00	92.00	0.00
-	-	-	-
-	-	-	-

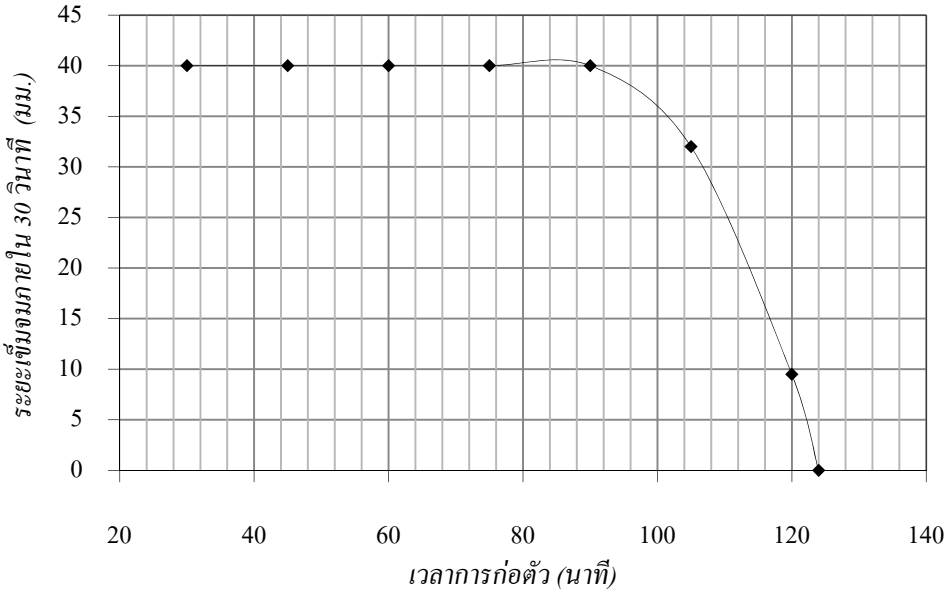
เวลาการก่อตัว		เวลาการก่อตัว	
ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)	ระยะต้น (นาที)	ระยะปลาย (นาที)
80.00	91.30	81.50	92.00



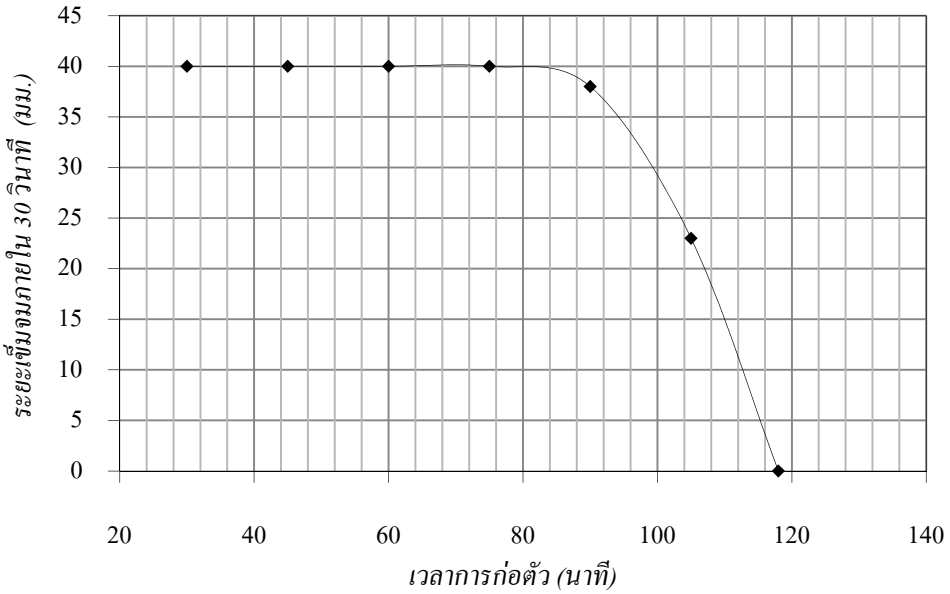
รูปที่ ข.15 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (PC)



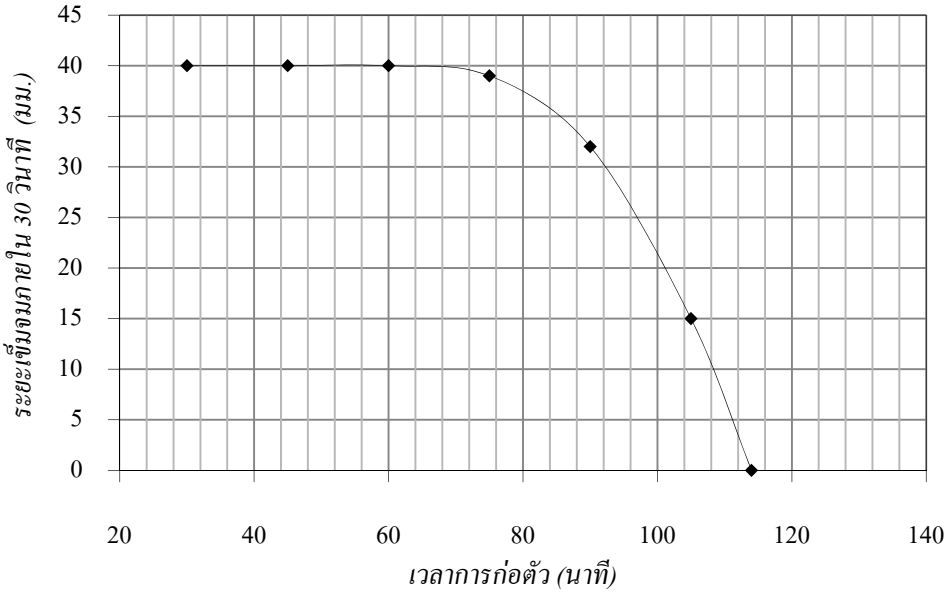
รูปที่ ข.16 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (PC 10L)



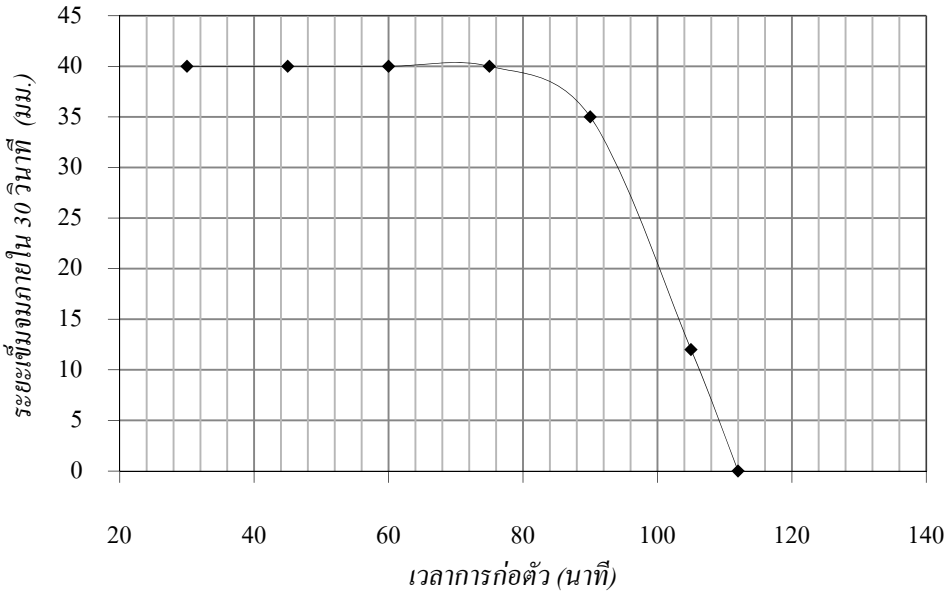
รูปที่ ข.17 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 20



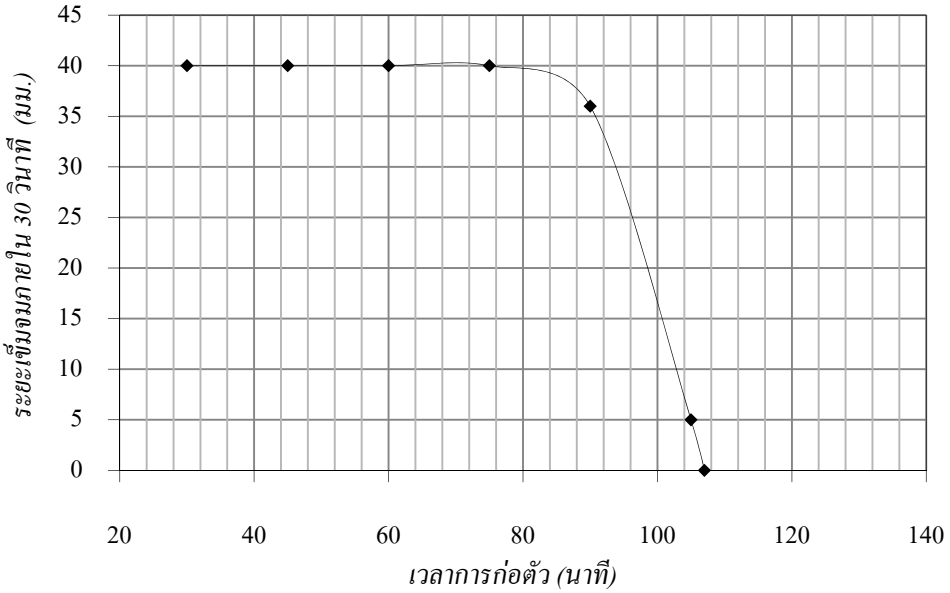
รูปที่ ข.18 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 20



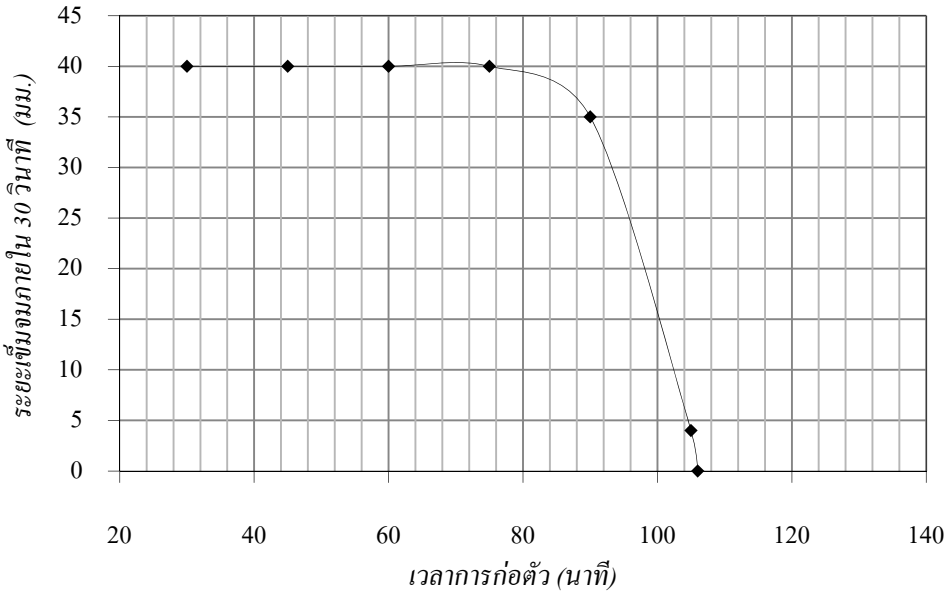
รูปที่ ข.19 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 20



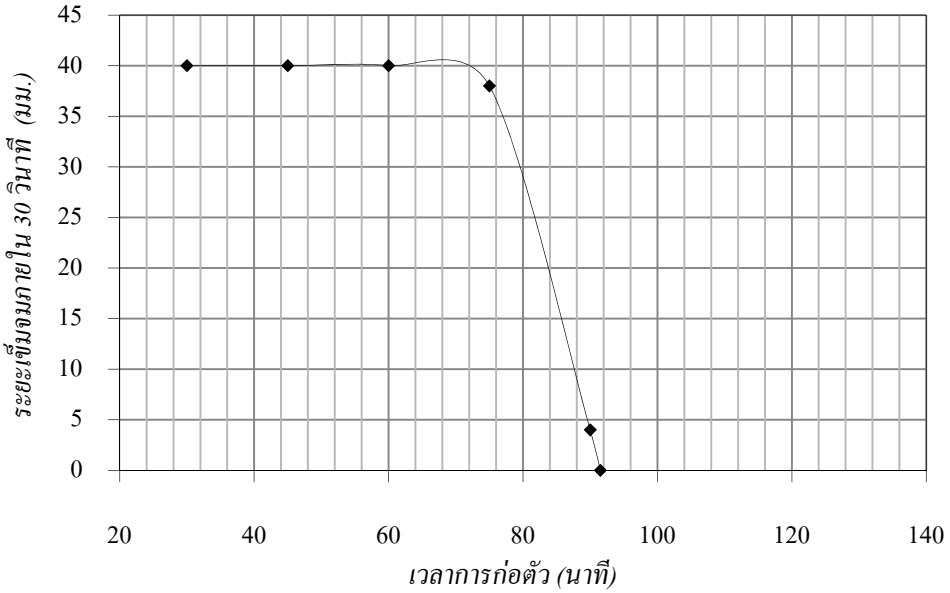
รูปที่ ข.20 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 20



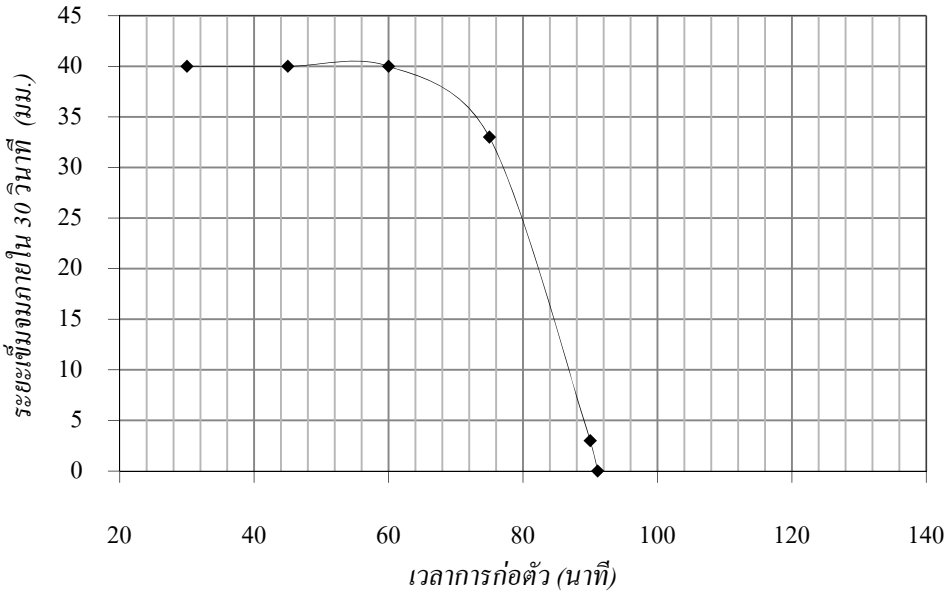
รูปที่ ข.21 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 20



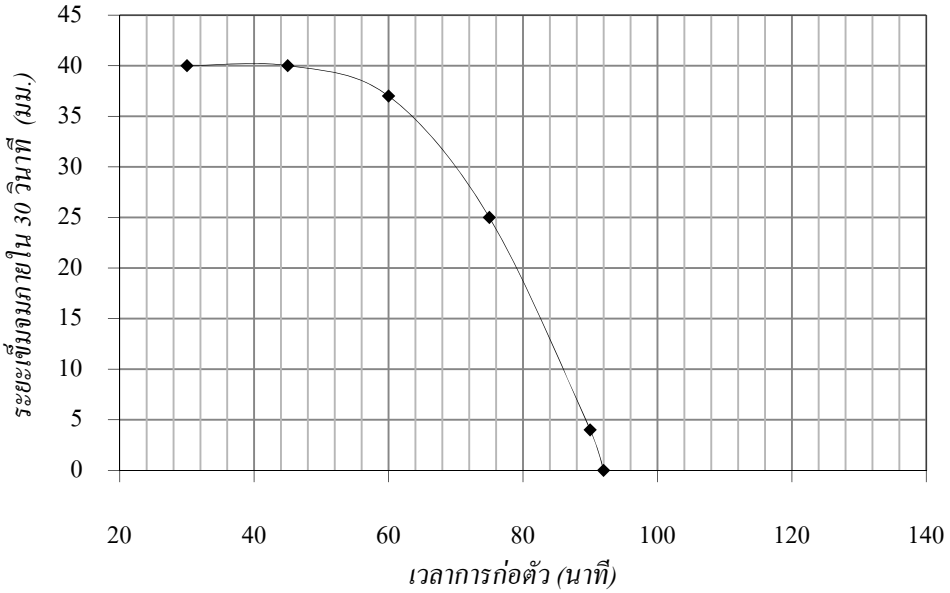
รูปที่ ข.22 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 20



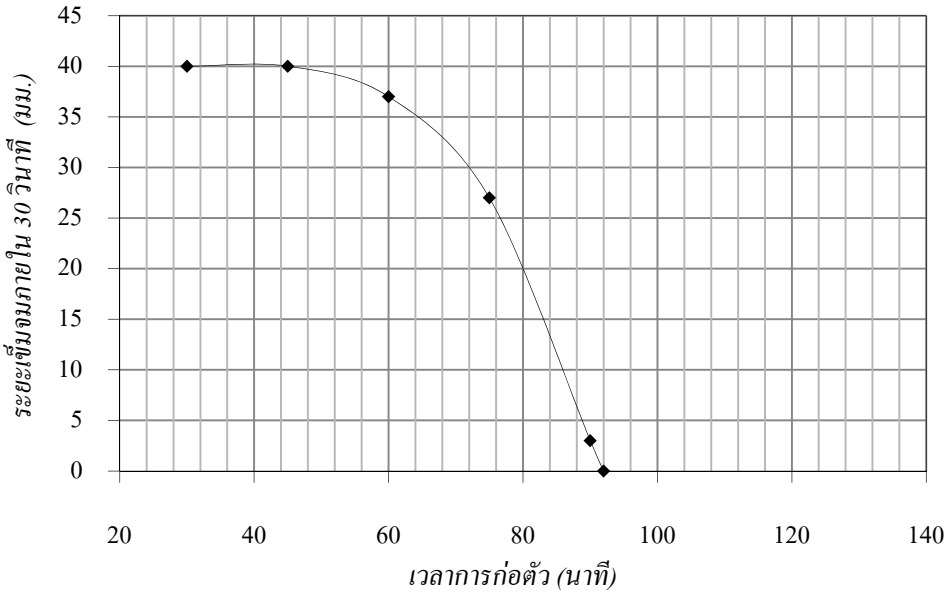
รูปที่ ข.23 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง Aร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



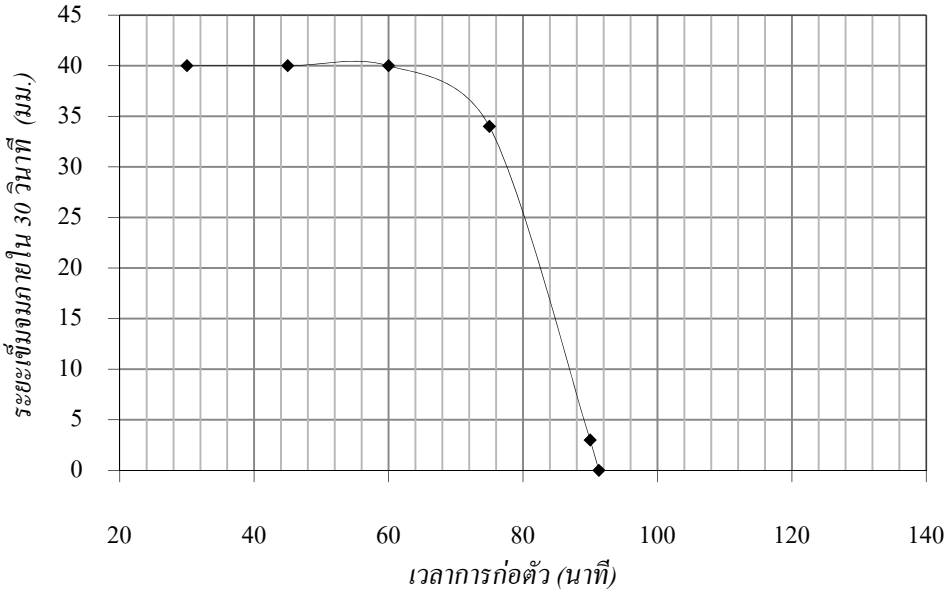
รูปที่ ข.24 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง Bร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



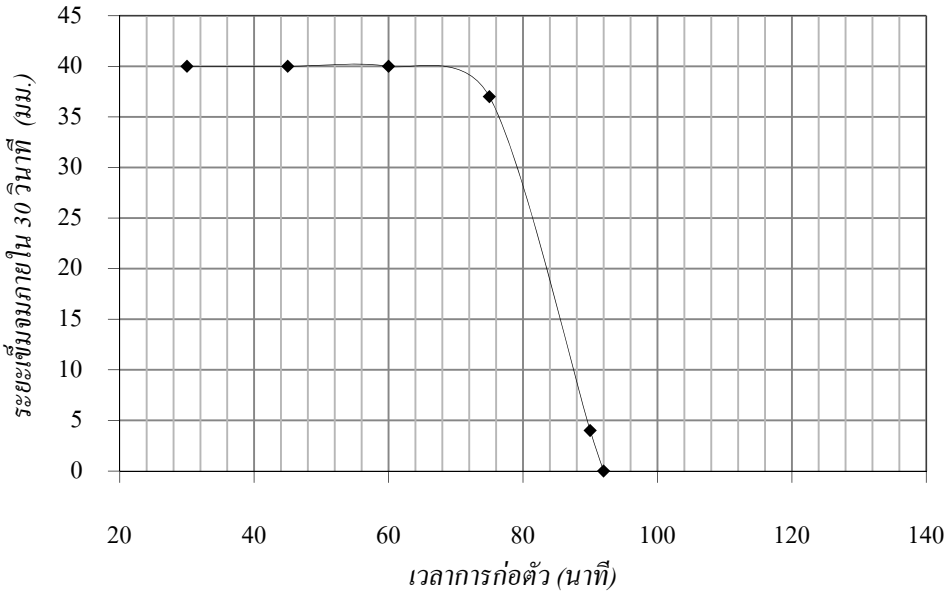
รูปที่ ข.25 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง Cร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ ข.26 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ ข.27 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



รูปที่ ข.28 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ภาคผนวก ค
ตารางแสดงการหาการไหลแผ่และกำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน

ตารางที่ ค.1 การหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน

มอร์ต้าร์	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)						ผงหินปูนขนาด 5 ไมครอน (กรัม)	ทราย (กรัม)	ปริมาณน้ำที่ต้องการ (กรัม)	ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	ค่าการไหล (ร้อยละ)				
		A	B	C	D	E	F					ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าที่ 4	รวม
MC	300	-	-	-	-	-	-	-	825	202.50	67.50	27.50	28.50	28.20	26.80	111.0
MC 10L	270	-	-	-	-	-	-	30	825	201.00	67.00	29.10	28.50	28.40	29.00	115.0
MC 20FA	240	60	-	-	-	-	-	-	825	195.00	65.00	26.50	26.20	25.80	26.50	105.0
MC 20FB	240	-	60	-	-	-	-	-	825	195.00	65.00	28.30	28.40	28.00	28.30	113.0
MC 20FC	240	-	-	60	-	-	-	-	825	195.00	65.00	26.30	26.40	26.30	26.50	105.5
MC 20FD	240	-	-	-	60	-	-	-	825	194.10	64.70	28.30	28.50	28.60	28.60	114.0
MC 20FE	240	-	-	-	-	60	-	-	825	194.10	64.70	26.40	26.50	26.00	26.10	105.0
MC 20FF	240	-	-	-	-	-	60	-	825	194.10	64.70	27.60	27.50	27.60	27.80	110.5
MC 10FA 10L	240	30	-	-	-	-	-	30	825	198.60	66.20	28.70	28.70	28.80	28.80	115.0
MC 10FB 10L	240	-	30	-	-	-	-	30	825	199.50	66.50	26.60	26.50	26.50	26.40	106.0
MC 10FC 10L	240	-	-	30	-	-	-	30	825	199.50	66.50	26.70	27.00	27.00	26.80	107.5
MC 10FD 10L	240	-	-	-	30	-	-	30	825	196.50	65.50	28.70	28.50	29.00	28.80	115.0
MC 10FE 10L	240	-	-	-	-	30	-	30	825	195.60	65.20	27.60	27.60	27.40	27.60	110.5
MC 10FF 10L	240	-	-	-	-	-	30	30	825	195.60	65.20	26.50	26.80	26.90	26.80	107.0

ตารางที่ ค.2 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (MC)

Cement Type1 : Fly Ash : Limestone Powder = 100:0:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	282.84	285	25	282.73	297	25	282.21	306	296
7	25	283.53	408	25	283.13	416	25	283.75	428	417
14	25	282.45	440	25	282.11	457	25	282.31	428	442
21	25	282.64	497	25	282.45	510	25	282.10	510	506
28	25	283.92	599	25	282.54	510	25	283.19	546	552
56	25	282.76	561	25	283.78	561	25	283.75	561	561
91	25	282.87	567	25	282.75	569	25	282.64	576	571

ตารางที่ ค.3 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน (MC5)

Cement Type5 : Fly Ash : Limestone Powder = 100:0:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	275.77	334	25	275.97	330	25	276.08	332	332
7	25	276.86	469	25	277.24	502	25	277.37	489	487
14	25	275.68	502	25	276	542	25	276.09	526	523
21	25	275.91	599	25	276.2	571	25	276.44	559	576
28	25	278.36	591	25	278.71	673	25	278.9	620	628
56	25	278.99	653	25	279.3	653	25	279.51	653	653
91	25	283.37	659	25	283.7	683	25	283.92	692	678

ตารางที่ ค.4 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 10L)

Cement Type1 : Fly Ash : Limestone Powder = 90:0:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	281.48	343	25	281.62	345	25	281.45	347	345
7	25	281.44	416	25	281.11	418	25	282.11	420	418
14	25	282.14	445	25	282.65	445	25	282.47	445	445
21	25	283.65	449	25	283.77	469	25	283.22	469	462
28	25	282.47	449	25	282.67	449	25	282.74	497	465
56	25	282.33	473	25	281.45	473	25	280.97	473	473
91	25	283.45	491	25	283.19	478	25	283.33	477	482

ตารางที่ ค.5 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 20 (MC 20FA)

Cement Type1 : Fly Ash A : Limestone Powder = 80:20:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	283.74	245	25	283.11	245	25	283.65	245	245
7	25	282.29	326	25	282.45	294	25	282.44	306	309
14	25	281.67	359	25	281.49	343	25	281.78	408	370
21	25	283.21	449	25	283.11	400	25	283.34	423	424
28	25	283.75	488	25	283.74	469	25	283.55	510	489
56	25	281.15	540	25	281.41	540	25	281.56	540	540
91	25	283.27	580	25	283.44	580	25	283.44	580	580

ตารางที่ ค.6 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 20 (MC 20FB)

Cement Type1 : Fly Ash B : Limestone Powder = 80:20:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	282.10	207	25	282.11	201	25	282.18	195	201
7	25	283.54	279	25	283.48	280	25	283.88	280	280
14	25	283.29	335	25	284.21	347	25	283.16	384	355
21	25	283.67	395	25	283.12	401	25	283.88	389	395
28	25	282.12	463	25	282.86	432	25	282.87	446	447
56	25	281.43	493	25	282.51	480	25	282.74	485	486
91	25	283.14	562	25	283.00	596	25	283.43	579	579

ตารางที่ ค.7 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 20 (MC 20FC)

Cement Type1 : Fly Ash C : Limestone Powder = 80:20:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	281.75	245	25	282.74	242	25	282.35	245	244
7	25	283.58	322	25	283.47	332	25	280.87	312	322
14	25	282.99	357	25	281.58	356	25	282.24	355	356
21	25	281.17	395	25	281.45	395	25	281.85	398	396
28	25	283.48	406	25	283.47	443	25	283.64	422	423
56	25	283.87	461	25	283.28	475	25	283.49	484	473
91	25	284.01	561	25	284.32	561	25	284.18	561	561

ตารางที่ ค.8 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 20 (MC 20FD)

Cement Type1 : Fly Ash D : Limestone Powder = 80:20:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	283.87	241	25	281.84	285	25	282.13	285	270
7	25	283.44	310	25	284.27	298	25	283.85	330	331
14	25	281.47	338	25	283.39	379	25	282.75	363	360
21	25	283.87	428	25	283.00	418	25	283.11	408	418
28	25	283.48	489	25	283.58	449	25	282.74	449	462
56	25	283.58	515	25	282.12	515	25	282.57	515	515
91	25	282.74	570	25	282.20	589	25	281.85	544	568

ตารางที่ ค.9 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 20 (MC 20FE)

Cement Type1 : Fly Ash E : Limestone Powder = 80:20:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	283.45	223	25	282.39	224	25	283.37	225	224
7	25	283.84	275	25	283.18	263	25	282.84	290	276
14	25	282.18	330	25	282.45	330	25	281.45	330	330
21	25	283.64	413	25	281.11	389	25	284.24	400	389
28	25	281.29	415	25	280.74	404	25	282.18	467	428
56	25	282.13	486	25	282.89	470	25	283.22	468	475
91	25	283.68	562	25	282.84	559	25	282.65	571	564

ตารางที่ ค.10 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 20 (MC 20FF)

Cement Type1 : Fly Ash F : Limestone Powder = 80:20:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	283.75	254	25	282.19	254	25	282.45	254	254
7	25	283.18	300	25	284.45	300	25	283.93	300	300
14	25	283.29	346	25	283.38	355	25	283.23	338	346
21	25	282.59	405	25	281.29	380	25	281.75	354	380
28	25	283.23	451	25	283.29	365	25	284.23	406	407
56	25	280.88	458	25	281.12	458	25	281.59	458	458
91	25	282.38	490	25	283.84	511	25	281.32	532	511

ตารางที่ ค.11 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 10FA 10L)

Cement Type1 : Fly Ash A : Limestone Powder = 80:10:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	281.93	270	25	282.34	270	25	282.13	270	270
7	25	283.21	360	25	284.28	353	25	283.34	353	356
14	25	283.45	388	25	283.29	394	25	283.22	385	389
21	25	283.34	437	25	283.25	420	25	282.13	430	429
28	25	282.85	426	25	282.59	452	25	283.85	439	439
56	25	281.11	491	25	283.74	491	25	282.75	491	491
91	25	281.89	564	25	281.55	523	25	281.11	542	543

ตารางที่ ค.12 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 10FB 10L)

Cement Type1 : Fly Ash B : Limestone Powder = 80:10:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	27ถ.25	234	25	274.25	231	25	275.98	228	231
7	25	277.34	313	25	276.56	347	25	277.42	320	327
14	25	281.84	369	25	272.4	370	25	272.96	360	366
21	25	284.27	381	25	279.13	401	25	281.03	376	386
28	25	283.45	411	25	283.31	397	25	284.64	384	397
56	25	282.19	441	25	279.09	441	25	280.49	441	441
91	25	283.58	495	25	284.38	503	25	283.67	490	496

ตารางที่ ค.13 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 10FC 10L)

Cement Type1 : Fly Ash C : Limestone Powder = 80:10:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	278.82	211	25	279.17	213	25	279.68	212	212
7	25	279.66	271	25	279.52	285	25	280.01	278	278
14	25	280.31	334	25	280.96	334	25	281.12	334	334
21	25	283.71	367	25	283.83	367	25	283.97	367	367
28	25	276.6	401	25	276.7	399	25	276.91	400	400
56	25	279.44	430	25	279.74	422	25	280.09	438	430
91	25	283.45	468	25	280.69	444	25	281.07	456	456

ตารางที่ ค.14 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 10FD 10L)

Cement Type1 : Fly Ash D : Limestone Powder = 80:10:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	279.79	218	25	279.89	220	25	280.12	222	221
7	25	280.18	288	25	280.42	292	25	280.72	294	291
14	25	281.2	347	25	281.55	344	25	281.78	338	343
21	25	284.01	383	25	284.25	383	25	284.53	383	383
28	25	276.99	394	25	277.11	394	25	277.25	394	394
56	25	280.21	462	25	280.32	446	25	280.58	441	449
91	25	281.19	476	25	281.4	476	25	281.62	476	476

ตารางที่ ค.15 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 10FE 10L)

Cement Type1 : Fly Ash E : Limestone Powder = 80:10:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	277.95	222	25	278.34	223	25	278.42	222	222
7	25	281.79	261	25	282.05	261	25	282.11	261	261
14	25	283.79	308	25	284.07	310	25	284.15	309	309
21	25	282.87	329	25	282.14	329	25	282.25	329	329
28	25	283.44	361	25	283.75	361	25	283.88	361	361
56	25	283.74	426	25	283.17	408	25	283.28	423	419
91	25	283.09	435	25	283.37	438	25	283.5	441	438

ตารางที่ ค.16 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 10FF 10L)

Cement Type1 : Fly Ash F : Limestone Powder = 80:10:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	278.73	212	25	278.88	215	25	278.13	215	214
7	25	282.32	261	25	282.61	263	25	282.64	262	262
14	25	284.33	342	25	284.70	343	25	284.56	341	342
21	25	282.58	358	25	282.82	358	25	283.23	355	357
28	25	283.97	360	25	283.13	360	25	283.23	360	360
56	25	283.52	412	25	282.64	407	25	282.74	399	406
91	25	283.72	431	25	283.91	436	25	282.11	439	435

ตารางที่ ค.17 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 40 (MC 40FA)

Cement Type1 : Fly Ash A : Limestone Powder = 60:40:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	282.77	220	25	283.42	220	25	282.76	220	220
7	25	282.70	265	25	283.35	255	25	282.78	245	255
14	25	283.04	346	25	283.58	334	25	282.27	355	345
21	25	283.02	408	25	283.54	408	25	280.41	408	408
28	25	283.29	469	25	283.84	449	25	282.17	459	459
56	25	283.13	491	25	283.45	491	25	283.04	491	491
91	25	283.64	518	25	283.93	523	25	283.49	528	523

ตารางที่ ค.18การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 40 (MC 40FB)

Cement Type1 : Fly Ash B : Limestone Powder = 60:40:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	276.66	170	25	276.66	170	25	276.78	170	170
7	25	280.70	207	25	280.77	232	25	280.93	200	213
14	25	279.78	244	25	279.20	258	25	279.43	221	241
21	25	280.32	270	25	280.48	282	25	280.68	294	282
28	25	276.13	327	25	276.29	306	25	276.92	333	322
56	25	276.17	407	25	276.40	373	25	276.58	398	393
91	25	283.61	398	25	283.75	445	25	283.90	451	431

ตารางที่ ค.19 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 40 (MC 40FC)

Cement Type1 : Fly Ash C : Limestone Powder = 60:40:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	284.90	161	25	283.93	163	25	284.01	169	164
7	25	283.99	191	25	283.74	191	25	283.80	191	191
14	25	282.73	268	25	282.41	264	25	283.47	263	265
21	25	283.83	294	25	281.19	293	25	283.25	324	303
28	25	275.68	353	25	285.89	361	25	282.00	335	350
56	25	272.79	400	25	282.26	405	25	281.34	392	399
91	25	283.01	485	25	283.08	466	25	283.34	446	466

ตารางที่ ค.20 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 40 (MC 40FD)

Cement Type1 : Fly Ash D : Limestone Powder = 60:40:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	283.11	207	25	283.31	205	25	282.50	206	206
7	25	282.91	252	25	282.99	252	25	282.11	252	252
14	25	283.58	329	25	283.69	321	25	284.73	325	325
21	25	282.34	371	25	283.52	371	25	282.74	371	371
28	25	281.06	387	25	281.24	443	25	282.41	415	415
56	25	283.45	462	25	283.66	473	25	283.75	469	468
91	25	282.42	518	25	282.63	518	25	283.73	518	518

ตารางที่ ค.21 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 40 (MC 40FE)

Cement Type1 : Fly Ash E : Limestone Powder = 60:40:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย กำลังอัดประลัย (กก.)
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	
3	25	281.83	199	25	282.06	202	25	282.12	199	200
7	25	281.73	240	25	281.79	221	25	282.08	259	240
14	25	279.46	320	25	279.50	320	25	279.77	320	320
21	25	280.62	331	25	280.66	374	25	280.79	382	374
28	25	280.63	402	25	280.71	403	25	281.12	404	403
56	25	280.84	449	25	280.98	449	25	281.24	449	449
91	25	281.39	525	25	281.53	525	25	281.82	525	525

ตารางที่ ค.22 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 40 (MC 40FF)

Cement Type1 : Fly Ash F : Limestone Powder = 60:40:0 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	282.32	185	25	282.49	182	25	282.77	188	185
7	25	282.19	215	25	282.30	208	25	283.10	225	216
14	25	279.92	250	25	280.09	276	25	279.28	262	268
21	25	280.98	286	25	281.15	317	25	282.17	308	304
28	25	281.24	321	25	281.42	315	25	281.04	342	326
56	25	281.42	394	25	281.62	389	25	281.75	393	392
91	25	281.98	445	25	282.19	445	25	283.04	445	445

ตารางที่ ค.23 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 30FA 10L)

Cement Type1 : Fly Ash A : Limestone Powder = 60:30:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	285.80	140	25	285.70	140	25	286.24	140	140
7	25	283.14	189	25	283.18	188	25	283.09	190	189
14	25	279.27	221	25	279.30	221	25	280.62	221	221
21	25	285.16	241	25	285.22	241	25	281.81	241	241
28	25	283.13	300	25	283.49	288	25	281.62	312	300
56	25	284.86	379	25	284.98	379	25	283.44	379	379
91	25	283.21	396	25	283.42	396	25	283.82	396	396

ตารางที่ ค.24 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 30FB 10L)

Cement Type1 : Fly Ash B : Limestone Powder = 60:30:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด (ซม.^{2})	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	283.69	168	25	274.29	164	25	274.70	166	166
7	25	281.29	204	25	277.72	209	25	277.87	208	207
14	25	282.69	240	25	274.18	251	25	274.43	247	246
21	25	283.45	302	25	278.08	292	25	278.37	331	302
28	25	281.12	326	25	282.20	339	25	282.50	310	332
56	25	282.49	389	25	278.37	384	25	278.59	379	384
91	25	283.71	399	25	284.12	415	25	283.31	407	407

ตารางที่ ค.25 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 30FC 10L)

Cement Type1 : Fly Ash C : Limestone Powder = 60:30:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	274.90	127	25	275.28	127	25	275.61	127	127
7	25	278.02	196	25	278.27	181	25	278.38	182	186
14	25	274.60	208	25	274.91	219	25	275.12	211	213
21	25	278.56	281	25	278.94	257	25	279.26	267	268
28	25	282.63	296	25	283.05	285	25	283.30	303	295
56	25	278.71	331	25	278.99	308	25	279.17	312	317
91	25	282.78	336	25	283.24	337	25	283.44	360	345

ตารางที่ ค.26 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 30FD 10L)

Cement Type1 : Fly Ash D : Limestone Powder = 60:30:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	284.43	159	25	284.79	161	25	284.99	160	160
7	25	282.56	198	25	282.89	206	25	282.07	217	207
14	25	281.44	250	25	281.83	249	25	281.98	248	248
21	25	280.17	269	25	280.30	272	25	280.32	266	269
28	25	276.31	306	25	276.50	314	25	276.54	301	307
56	25	276.52	353	25	276.70	351	25	276.73	352	352
91	25	278.01	356	25	278.55	397	25	278.72	378	377

ตารางที่ ค.27 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 30FE 10L)

Cement Type1 : Fly Ash E : Limestone Powder = 60:30:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	283.36	160	25	283.44	152	25	283.93	157	156
7	25	281.49	200	25	286.59	209	25	282.60	206	205
14	25	282.37	258	25	282.45	241	25	279.12	249	250
21	25	280.42	263	25	280.86	272	25	276.26	266	267
28	25	276.62	300	25	277.14	319	25	278.21	308	309
56	25	276.89	349	25	277.38	339	25	278.65	344	344
91	25	278.92	378	25	279.30	399	25	279.12	390	389

ตารางที่ ค.28 การหากำลังอัดประลัยของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (MC 30FF 10L)

Cement Type1 : Fly Ash F : Limestone Powder = 60:30:10 (C+F+L) : Sand = 1:2.75

W/(C+F+L) = 0.55

อายุ (วัน)	ตัวอย่างทดสอบที่ 1			ตัวอย่างทดสอบที่ 2			ตัวอย่างทดสอบที่ 3			ค่าเฉลี่ย
	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	ขนาดหน้าตัด ($ซม.^2$)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังอัดประลัย (กก.)	กำลังอัดประลัย (กก.)
3	25	281.45	161	25	281.57	160	25	281.78	159	159
7	25	281.10	229	25	281.24	235	25	281.45	227	230
14	25	279.47	262	25	279.65	247	25	279.77	238	249
21	25	276.56	320	25	276.79	280	25	276.91	297	299
28	25	285.41	345	25	285.6	342	25	285.88	345	344
56	25	278.95	364	25	279.08	370	25	279.40	367	367
91	25	279.55	392	25	279.64	400	25	279.91	396	396

ภาคผนวก ง
ตารางแสดงการหาค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน

ตารางที่ ง.1 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

MC	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	3.899	3.866	-0.012	-0.010	3.846	-0.019	-0.019	3.819	-0.028	-0.029
ตัวอย่างที่ 2	2.824	2.794	-0.011		2.770	-0.019		2.740	-0.029	
ตัวอย่างที่ 3	5.784	5.759	-0.009		5.732	-0.018		5.698	-0.030	
ตัวอย่างที่ 4	5.957	5.929	-0.010		5.903	-0.019		5.873	-0.029	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	3.899	3.790	-0.038	-0.037	3.784	-0.040	-0.041	3.774	-0.044	-0.044
ตัวอย่างที่ 2	2.824	2.720	-0.036		2.706	-0.041		2.697	-0.045	
ตัวอย่างที่ 3	5.784	5.679	-0.037		5.665	-0.042		5.659	-0.044	
ตัวอย่างที่ 4	5.957	5.852	-0.037		5.842	-0.040		5.833	-0.044	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	3.899	3.767	-0.046	-0.046	3.760	-0.049	-0.049	3.750	-0.052	-0.051
ตัวอย่างที่ 2	2.824	2.695	-0.045		2.689	-0.047		2.680	-0.051	
ตัวอย่างที่ 3	5.784	5.653	-0.046		5.641	-0.050		5.635	-0.052	
ตัวอย่างที่ 4	5.957	5.829	-0.045		5.819	-0.048		5.814	-0.050	

ตารางที่ ง.2 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

MC 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	4.518	4.497	-0.007	-0.009	4.468	-0.018	-0.017	4.455	-0.022	-0.023
ตัวอย่างที่ 2	2.605	2.583	-0.008		2.557	-0.017		2.543	-0.022	
ตัวอย่างที่ 3	-0.046	-0.063	-0.006		-0.094	-0.017		-0.112	-0.023	
ตัวอย่างที่ 4	0.984	0.947	-0.013		0.931	-0.019		0.909	-0.026	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	4.518	4.430	-0.031	-0.030	4.418	-0.035	-0.033	4.425	-0.033	-0.035
ตัวอย่างที่ 2	2.605	2.521	-0.029		2.511	-0.033		2.500	-0.037	
ตัวอย่างที่ 3	-0.046	-0.125	-0.028		-0.133	-0.031		-0.143	-0.034	
ตัวอย่างที่ 4	0.984	0.888	-0.034		0.890	-0.033		0.884	-0.035	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	4.518	4.410	-0.038	-0.037	4.397	-0.042	-0.041	4.376	-0.050	-0.048
ตัวอย่างที่ 2	2.605	2.502	-0.036		2.494	-0.039		2.472	-0.047	
ตัวอย่างที่ 3	-0.046	-0.152	-0.037		-0.151	-0.037		-0.171	-0.044	
ตัวอย่างที่ 4	0.984	0.879	-0.037		0.859	-0.044		0.839	-0.051	

ตารางที่ ง.3 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 30

MC 30FA	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	5.525	5.513	-0.004	-0.003	5.476	-0.017	-0.018	5.445	-0.028	-0.028
ตัวอย่างที่ 2	3.375	3.365	-0.004		3.324	-0.018		3.298	-0.027	
ตัวอย่างที่ 3	5.266	5.257	-0.003		5.215	-0.018		5.184	-0.029	
ตัวอย่างที่ 4	6.095	6.089	-0.002		6.045	-0.018		6.015	-0.028	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	5.525	5.442	-0.029	-0.029	5.432	-0.033	-0.032	5.427	-0.034	-0.034
ตัวอย่างที่ 2	3.375	3.291	-0.029		3.280	-0.033		3.278	-0.034	
ตัวอย่างที่ 3	5.266	5.184	-0.029		5.174	-0.032		5.170	-0.034	
ตัวอย่างที่ 4	6.095	6.016	-0.028		6.006	-0.031		6.000	-0.033	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	5.525	5.423	-0.036	-0.035	5.423	-0.036	-0.036	5.412	-0.040	-0.040
ตัวอย่างที่ 2	3.375	3.272	-0.036		3.265	-0.039		3.264	-0.039	
ตัวอย่างที่ 3	5.266	5.166	-0.035		5.165	-0.035		5.150	-0.041	
ตัวอย่างที่ 4	6.095	5.996	-0.035		5.994	-0.035		5.976	-0.042	

ตารางที่ ง.4 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 30

MC 30FB	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	6.662	6.635	-0.009	-0.009	6.611	-0.018	-0.017	6.590	-0.025	-0.025
ตัวอย่างที่ 2	4.250	4.225	-0.009		4.201	-0.017		4.176	-0.026	
ตัวอย่างที่ 3	2.783	2.757	-0.009		2.732	-0.018		2.709	-0.026	
ตัวอย่างที่ 4	3.166	3.139	-0.009		3.118	-0.017		3.096	-0.025	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	6.662	6.578	-0.029	-0.030	6.558	-0.036	-0.035	6.562	-0.035	-0.036
ตัวอย่างที่ 2	4.250	4.161	-0.031		4.155	-0.033		4.153	-0.034	
ตัวอย่างที่ 3	2.783	2.699	-0.029		2.680	-0.036		2.671	-0.039	
ตัวอย่างที่ 4	3.166	3.076	-0.032		3.065	-0.035		3.063	-0.036	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	6.662	6.559	-0.036	-0.036	6.551	-0.039	-0.037	6.545	-0.041	-0.039
ตัวอย่างที่ 2	4.250	4.146	-0.036		4.142	-0.038		4.143	-0.038	
ตัวอย่างที่ 3	2.783	2.676	-0.038		2.678	-0.037		2.681	-0.036	
ตัวอย่างที่ 4	3.166	3.065	-0.035		3.063	-0.036		3.053	-0.040	

ตารางที่ ง.5 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 30

MC 30FC	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	-0.265	-0.289	-0.008	-0.008	-0.308	-0.015	-0.016	-0.340	-0.026	-0.026
ตัวอย่างที่ 2	-0.491	-0.514	-0.008		-0.535	-0.015		-0.564	-0.026	
ตัวอย่างที่ 3	2.500	2.478	-0.008		2.455	-0.016		2.428	-0.025	
ตัวอย่างที่ 4	3.539	3.514	-0.009		3.492	-0.016		3.465	-0.026	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-0.265	-0.346	-0.028	-0.029	-0.357	-0.032	-0.031	-0.356	-0.032	-0.033
ตัวอย่างที่ 2	-0.491	-0.572	-0.028		-0.570	-0.028		-0.585	-0.033	
ตัวอย่างที่ 3	2.500	2.420	-0.028		2.420	-0.028		2.405	-0.033	
ตัวอย่างที่ 4	3.539	3.456	-0.029		3.442	-0.034		3.441	-0.034	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-0.265	-0.359	-0.033	-0.034	-0.364	-0.035	-0.036	-0.365	-0.035	-0.038
ตัวอย่างที่ 2	-0.491	-0.592	-0.035		-0.599	-0.038		-0.599	-0.038	
ตัวอย่างที่ 3	2.500	2.403	-0.034		2.397	-0.036		2.395	-0.037	
ตัวอย่างที่ 4	3.539	3.442	-0.034		3.433	-0.037		3.423	-0.041	

ตารางที่ ง.6 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 30

MC 30FD	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	4.039	4.003	-0.013	-0.013	3.982	-0.020	-0.019	3.955	-0.029	-0.029
ตัวอย่างที่ 2	3.611	3.578	-0.013		3.558	-0.019		3.532	-0.028	
ตัวอย่างที่ 3	1.468	1.427	-0.013		1.405	-0.022		1.383	-0.030	
ตัวอย่างที่ 4	-0.704	-0.738	-0.013		-0.753	-0.017		-0.789	-0.030	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	4.039	3.944	-0.033	-0.033	3.931	-0.038	-0.036	3.927	-0.039	-0.040
ตัวอย่างที่ 2	3.611	3.520	-0.032		3.507	-0.036		3.498	-0.040	
ตัวอย่างที่ 3	1.468	1.370	-0.034		1.361	-0.038		1.353	-0.040	
ตัวอย่างที่ 4	-0.704	-0.795	-0.032		-0.801	-0.034		-0.820	-0.041	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	4.039	3.926	-0.040	-0.040	3.921	-0.041	-0.042	3.914	-0.044	-0.044
ตัวอย่างที่ 2	3.611	3.486	-0.044		3.477	-0.047		3.465	-0.051	
ตัวอย่างที่ 3	1.468	1.352	-0.041		1.347	-0.042		1.343	-0.044	
ตัวอย่างที่ 4	-0.704	-0.806	-0.036		-0.810	-0.037		-0.814	-0.039	

ตารางที่ ง.7 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 30

MC 30FE	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	-0.160	-0.180	-0.007	-0.008	-0.206	-0.016	-0.017	-0.230	-0.025	-0.026
ตัวอย่างที่ 2	2.099	2.078	-0.007		2.052	-0.016		2.027	-0.025	
ตัวอย่างที่ 3	-0.132	-0.154	-0.008		-0.181	-0.017		-0.209	-0.027	
ตัวอย่างที่ 4	0.582	0.558	-0.008		0.534	-0.017		0.506	-0.027	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-0.160	-0.246	-0.030	-0.031	-0.267	-0.038	-0.035	-0.266	-0.037	-0.038
ตัวอย่างที่ 2	2.099	2.012	-0.031		2.012	-0.031		1.993	-0.037	
ตัวอย่างที่ 3	-0.132	-0.222	-0.032		-0.237	-0.037		-0.243	-0.039	
ตัวอย่างที่ 4	0.582	0.492	-0.032		0.491	-0.032		0.471	-0.039	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-0.160	-0.268	-0.038	-0.038	-0.270	-0.039	-0.039	-0.274	-0.040	-0.041
ตัวอย่างที่ 2	2.099	1.992	-0.038		1.990	-0.038		1.986	-0.040	
ตัวอย่างที่ 3	-0.132	-0.244	-0.039		-0.246	-0.040		-0.250	-0.041	
ตัวอย่างที่ 4	0.582	0.480	-0.036		0.467	-0.040		0.465	-0.041	

ตารางที่ ง.8 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 30

MC 30FF	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	2.052	2.027	-0.009	-0.009	2.000	-0.018	-0.018	-0.230	-0.025	-0.026
ตัวอย่างที่ 2	0.588	0.566	-0.008		0.540	-0.017		2.027	-0.025	
ตัวอย่างที่ 3	2.939	2.912	-0.009		2.887	-0.018		-0.209	-0.027	
ตัวอย่างที่ 4	3.002	2.972	-0.011		2.951	-0.018		0.506	-0.027	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	2.052	-0.246	-0.030	-0.031	-0.267	-0.038	-0.035	-0.266	-0.037	-0.038
ตัวอย่างที่ 2	0.588	2.012	-0.031		2.005	-0.033		1.993	-0.037	
ตัวอย่างที่ 3	2.939	-0.222	-0.032		-0.237	-0.037		-0.243	-0.039	
ตัวอย่างที่ 4	3.002	0.492	-0.032		0.491	-0.032		0.471	-0.039	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	2.052	-0.268	-0.038	-0.038	-0.270	-0.039	-0.039	-0.274	-0.040	-0.041
ตัวอย่างที่ 2	0.588	1.992	-0.038		1.990	-0.038		1.986	-0.040	
ตัวอย่างที่ 3	2.939	-0.244	-0.039		-0.246	-0.040		-0.250	-0.041	
ตัวอย่างที่ 4	3.002	0.480	-0.036		0.467	-0.040		0.465	-0.041	

ตารางที่ ง.9 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 50

MC 50FA	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	1.722	1.698	-0.008	-0.008	1.645	-0.027	-0.027	1.632	-0.032	-0.031
ตัวอย่างที่ 2	2.707	2.680	-0.009		2.634	-0.026		2.620	-0.031	
ตัวอย่างที่ 3	2.330	2.310	-0.007		2.256	-0.026		2.242	-0.031	
ตัวอย่างที่ 4	0.414	0.392	-0.008		0.333	-0.028		0.321	-0.033	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	1.722	1.628	-0.033	-0.033	1.613	-0.038	-0.037	3.436	-0.035	-0.036
ตัวอย่างที่ 2	2.707	2.616	-0.032		2.615	-0.032		3.338	-0.040	
ตัวอย่างที่ 3	2.330	2.238	-0.032		2.225	-0.037		3.197	-0.033	
ตัวอย่างที่ 4	0.414	0.316	-0.034		0.296	-0.041		3.015	-0.036	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	1.722	3.435	-0.036	-0.039	3.417	-0.042	-0.042	3.412	-0.044	-0.044
ตัวอย่างที่ 2	2.707	3.318	-0.047		3.331	-0.043		3.328	-0.044	
ตัวอย่างที่ 3	2.330	3.197	-0.033		3.179	-0.040		3.178	-0.040	
ตัวอย่างที่ 4	0.414	3.010	-0.038		2.999	-0.042		2.985	-0.047	

ตารางที่ ง.10 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 50

MC 50FB	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	3.537	3.518	-0.007	-0.007	3.469	-0.024	-0.025	3.457	-0.028	-0.029
ตัวอย่างที่ 2	3.453	3.434	-0.007		3.383	-0.025		3.369	-0.029	
ตัวอย่างที่ 3	3.292	3.270	-0.008		3.220	-0.025		3.213	-0.028	
ตัวอย่างที่ 4	3.118	3.102	-0.006		3.043	-0.026		3.035	-0.029	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	3.537	3.440	-0.034	-0.031	3.431	-0.037	-0.035	3.436	-0.035	-0.036
ตัวอย่างที่ 2	3.453	3.364	-0.031		3.345	-0.038		3.338	-0.040	
ตัวอย่างที่ 3	3.292	3.208	-0.029		3.193	-0.035		3.197	-0.033	
ตัวอย่างที่ 4	3.118	3.030	-0.031		3.030	-0.031		3.015	-0.036	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	3.537	3.435	-0.036	-0.039	3.417	-0.042	-0.042	3.412	-0.044	-0.044
ตัวอย่างที่ 2	3.453	3.318	-0.047		3.331	-0.043		3.328	-0.044	
ตัวอย่างที่ 3	3.292	3.197	-0.033		3.179	-0.040		3.178	-0.040	
ตัวอย่างที่ 4	3.118	3.010	-0.038		2.999	-0.042		2.985	-0.047	

ตารางที่ ง.11 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 50

MC 50FC	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	3.937	3.924	-0.005	-0.005	3.861	-0.027	-0.028	3.855	-0.029	-0.030
ตัวอย่างที่ 2	1.737	1.723	-0.005		1.658	-0.028		1.652	-0.030	
ตัวอย่างที่ 3	4.557	4.546	-0.004		4.477	-0.028		4.472	-0.030	
ตัวอย่างที่ 4	2.680	2.666	-0.005		2.599	-0.028		2.594	-0.030	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	3.937	3.846	-0.032	-0.033	3.853	-0.029	-0.035	3.833	-0.036	-0.036
ตัวอย่างที่ 2	1.737	1.645	-0.032		1.631	-0.037		1.633	-0.036	
ตัวอย่างที่ 3	4.557	4.464	-0.033		4.470	-0.031		4.458	-0.035	
ตัวอย่างที่ 4	2.680	2.585	-0.033		2.559	-0.042		2.573	-0.038	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	3.937	3.833	-0.036	-0.038	3.828	-0.038	-0.039	3.799	-0.048	-0.048
ตัวอย่างที่ 2	1.737	1.632	-0.037		1.627	-0.039		1.600	-0.048	
ตัวอย่างที่ 3	4.557	4.438	-0.042		4.443	-0.040		4.414	-0.050	
ตัวอย่างที่ 4	2.680	2.571	-0.038		2.565	-0.040		2.549	-0.046	

ตารางที่ ง.12 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 50

MC 50FD	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	4.506	4.485	-0.007	-0.007	4.402	-0.036	-0.034	4.401	-0.037	-0.036
ตัวอย่างที่ 2	6.578	6.558	-0.007		6.471	-0.038		6.466	-0.039	
ตัวอย่างที่ 3	4.904	4.886	-0.006		4.821	-0.029		4.794	-0.039	
ตัวอย่างที่ 4	4.965	4.943	-0.008		4.867	-0.034		4.877	-0.031	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	4.506	4.385	-0.042	-0.038	4.390	-0.041	-0.045	4.373	-0.047	-0.047
ตัวอย่างที่ 2	6.578	6.483	-0.033		6.451	-0.045		6.444	-0.047	
ตัวอย่างที่ 3	4.904	4.790	-0.040		4.767	-0.048		4.782	-0.043	
ตัวอย่างที่ 4	4.965	4.860	-0.037		4.837	-0.045		4.820	-0.051	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	4.506	4.370	-0.048	-0.048	4.362	-0.051	-0.052	4.336	-0.060	-0.056
ตัวอย่างที่ 2	6.578	6.439	-0.049		6.428	-0.053		6.403	-0.061	
ตัวอย่างที่ 3	4.904	4.781	-0.043		4.775	-0.045		4.751	-0.054	
ตัวอย่างที่ 4	4.965	4.820	-0.051		4.795	-0.060		4.819	-0.051	

ตารางที่ ง.13 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 50

MC 50FE	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	2.795	2.761	-0.012	-0.009	2.701	-0.033	-0.033	2.699	-0.034	-0.035
ตัวอย่างที่ 2	1.908	1.882	-0.009		1.809	-0.035		1.809	-0.035	
ตัวอย่างที่ 3	3.486	3.462	-0.008		3.399	-0.031		3.393	-0.033	
ตัวอย่างที่ 4	2.253	2.230	-0.008		2.153	-0.035		2.144	-0.038	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	2.795	2.669	-0.044	-0.037	2.653	-0.050	-0.046	2.645	-0.053	-0.047
ตัวอย่างที่ 2	1.908	1.802	-0.037		1.787	-0.042		1.787	-0.042	
ตัวอย่างที่ 3	3.486	3.381	-0.037		3.355	-0.046		3.355	-0.046	
ตัวอย่างที่ 4	2.253	2.171	-0.029		2.121	-0.046		2.118	-0.047	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	2.795	2.651	-0.051	-0.048	2.641	-0.054	-0.050	2.630	-0.058	-0.056
ตัวอย่างที่ 2	1.908	1.780	-0.045		1.773	-0.047		1.744	-0.058	
ตัวอย่างที่ 3	3.486	3.340	-0.051		3.354	-0.046		3.326	-0.056	
ตัวอย่างที่ 4	2.253	2.123	-0.046		2.100	-0.054		2.100	-0.054	

ตารางที่ ง.14 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 50

MC 50FF	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	5.375	5.340	-0.012	-0.010	5.294	-0.028	-0.029	5.286	-0.031	-0.032
ตัวอย่างที่ 2	4.277	4.252	-0.009		4.196	-0.028		4.187	-0.032	
ตัวอย่างที่ 3	4.521	4.497	-0.008		4.439	-0.029		4.431	-0.032	
ตัวอย่างที่ 4	2.714	2.682	-0.011		2.624	-0.032		2.616	-0.034	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	5.375	5.273	-0.036	-0.036	5.266	-0.038	-0.040	5.265	-0.039	-0.041
ตัวอย่างที่ 2	4.277	4.173	-0.036		4.166	-0.039		4.155	-0.043	
ตัวอย่างที่ 3	4.521	4.419	-0.036		4.409	-0.039		4.409	-0.039	
ตัวอย่างที่ 4	2.714	2.610	-0.036		2.593	-0.042		2.592	-0.043	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	5.375	5.256	-0.042	-0.044	5.244	-0.046	-0.046	5.225	-0.053	-0.053
ตัวอย่างที่ 2	4.277	4.155	-0.043		4.153	-0.044		4.127	-0.053	
ตัวอย่างที่ 3	4.521	4.396	-0.044		4.389	-0.046		4.372	-0.052	
ตัวอย่างที่ 4	2.714	2.578	-0.048		2.582	-0.046		2.554	-0.056	

ตารางที่ ง.15 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 20FA 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	4.086	4.060	-0.009	-0.009	4.010	-0.027	-0.029	3.998	-0.031	-0.031
ตัวอย่างที่ 2	3.735	3.708	-0.009		3.651	-0.029		3.650	-0.030	
ตัวอย่างที่ 3	2.247	2.219	-0.010		2.158	-0.031		2.158	-0.031	
ตัวอย่างที่ 4	-0.675	-0.702	-0.009		-0.758	-0.029		-0.770	-0.033	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	4.086	3.982	-0.036	-0.036	3.980	-0.037	-0.039	3.969	-0.041	-0.041
ตัวอย่างที่ 2	3.735	3.633	-0.036		3.619	-0.041		3.618	-0.041	
ตัวอย่างที่ 3	2.247	2.145	-0.036		2.131	-0.041		2.133	-0.040	
ตัวอย่างที่ 4	-0.675	-0.780	-0.037		-0.785	-0.039		-0.792	-0.041	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	4.086	3.970	-0.041	-0.043	3.960	-0.044	-0.045	3.941	-0.051	-0.052
ตัวอย่างที่ 2	3.735	3.615	-0.042		3.607	-0.045		3.591	-0.051	
ตัวอย่างที่ 3	2.247	2.126	-0.042		2.125	-0.043		2.090	-0.055	
ตัวอย่างที่ 4	-0.675	-0.807	-0.046		-0.810	-0.047		-0.824	-0.052	

ตารางที่ ง.16 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 20FB 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	1.502	1.473	-0.010	-0.010	1.420	-0.029	-0.031	1.410	-0.032	-0.033
ตัวอย่างที่ 2	1.753	1.727	-0.009		1.667	-0.030		1.656	-0.034	
ตัวอย่างที่ 3	3.033	3.002	-0.011		2.939	-0.033		2.938	-0.033	
ตัวอย่างที่ 4	4.525	4.498	-0.009		4.434	-0.032		4.433	-0.032	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	1.502	1.402	-0.035	-0.036	1.389	-0.040	-0.040	1.379	-0.043	-0.042
ตัวอย่างที่ 2	1.753	1.649	-0.036		1.638	-0.040		1.639	-0.040	
ตัวอย่างที่ 3	3.033	2.931	-0.036		2.917	-0.041		2.909	-0.044	
ตัวอย่างที่ 4	4.525	4.422	-0.036		4.410	-0.040		4.402	-0.043	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	1.502	1.379	-0.043	-0.046	1.369	-0.047	-0.048	1.353	-0.052	-0.053
ตัวอย่างที่ 2	1.753	1.622	-0.046		1.632	-0.042		1.596	-0.055	
ตัวอย่างที่ 3	3.033	2.898	-0.047		2.881	-0.053		2.894	-0.049	
ตัวอย่างที่ 4	4.525	4.385	-0.049		4.387	-0.048		4.367	-0.055	

ตารางที่ ง.17 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 20FC 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	-2.069	-2.096	-0.009	-0.009	-2.141	-0.025	-0.024	-2.144	-0.026	-0.028
ตัวอย่างที่ 2	0.664	0.640	-0.008		0.594	-0.025		0.583	-0.028	
ตัวอย่างที่ 3	0.410	0.386	-0.008		0.343	-0.024		0.331	-0.028	
ตัวอย่างที่ 4	0.291	0.266	-0.009		0.222	-0.024		0.209	-0.029	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-2.069	-2.148	-0.028	-0.028	-2.184	-0.040	-0.040	-2.185	-0.041	-0.042
ตัวอย่างที่ 2	0.664	0.581	-0.029		0.551	-0.040		0.554	-0.039	
ตัวอย่างที่ 3	0.410	0.337	-0.026		0.299	-0.039		0.293	-0.041	
ตัวอย่างที่ 4	0.291	0.206	-0.030		0.175	-0.041		0.155	-0.048	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-2.069	-2.198	-0.045	-0.044	-2.204	-0.047	-0.047	-2.223	-0.054	-0.053
ตัวอย่างที่ 2	0.664	0.542	-0.043		0.528	-0.048		0.509	-0.054	
ตัวอย่างที่ 3	0.410	0.284	-0.044		0.276	-0.047		0.277	-0.047	
ตัวอย่างที่ 4	0.291	0.171	-0.042		0.158	-0.047		0.145	-0.051	

ตารางที่ ง.18 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 20FD 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	0.127	0.095	-0.011	-0.009	0.052	-0.026	-0.024	0.048	-0.028	-0.028
ตัวอย่างที่ 2	0.914	0.889	-0.009		0.848	-0.023		0.835	-0.028	
ตัวอย่างที่ 3	-0.088	-0.114	-0.009		-0.158	-0.025		-0.173	-0.030	
ตัวอย่างที่ 4	1.276	1.260	-0.006		1.210	-0.023		1.197	-0.028	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	0.127	0.042	-0.030	-0.030	0.024	-0.036	-0.038	0.013	-0.040	-0.040
ตัวอย่างที่ 2	0.914	0.829	-0.030		0.807	-0.038		0.801	-0.040	
ตัวอย่างที่ 3	-0.088	-0.179	-0.032		-0.206	-0.041		-0.190	-0.036	
ตัวอย่างที่ 4	1.276	1.192	-0.029		1.169	-0.038		1.147	-0.045	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	0.127	0.005	-0.043	-0.041	-0.008	-0.047	-0.046	-0.015	-0.050	-0.048
ตัวอย่างที่ 2	0.914	0.804	-0.039		0.782	-0.046		0.778	-0.048	
ตัวอย่างที่ 3	-0.088	-0.213	-0.044		-0.213	-0.044		-0.219	-0.046	
ตัวอย่างที่ 4	1.276	1.164	-0.039		1.139	-0.048		1.136	-0.049	

ตารางที่ ง.19 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 20FE 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	0.588	0.572	-0.006	-0.006	0.528	-0.021	-0.021	0.515	-0.026	-0.025
ตัวอย่างที่ 2	0.810	0.792	-0.006		0.749	-0.021		0.736	-0.026	
ตัวอย่างที่ 3	5.045	5.027	-0.006		4.985	-0.021		4.975	-0.025	
ตัวอย่างที่ 4	2.049	2.029	-0.007		1.992	-0.020		1.983	-0.023	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	0.588	0.513	-0.026	-0.026	0.477	-0.039	-0.038	0.485	-0.036	-0.039
ตัวอย่างที่ 2	0.810	0.738	-0.025		0.703	-0.038		0.703	-0.038	
ตัวอย่างที่ 3	5.045	4.971	-0.026		4.944	-0.035		4.928	-0.041	
ตัวอย่างที่ 4	2.049	1.972	-0.027		1.937	-0.039		1.936	-0.040	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	0.588	0.478	-0.039	-0.039	0.470	-0.041	-0.043	0.464	-0.044	-0.045
ตัวอย่างที่ 2	0.810	0.704	-0.037		0.694	-0.041		0.688	-0.043	
ตัวอย่างที่ 3	5.045	4.928	-0.041		4.918	-0.045		4.913	-0.046	
ตัวอย่างที่ 4	2.049	1.934	-0.040		1.927	-0.043		1.918	-0.046	

ตารางที่ ง.20 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 20FF 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	2.119	2.088	-0.011	-0.010	2.053	-0.023	-0.023	2.039	-0.028	-0.028
ตัวอย่างที่ 2	3.602	3.573	-0.010		3.533	-0.024		3.521	-0.028	
ตัวอย่างที่ 3	0.456	0.428	-0.010		0.391	-0.023		0.377	-0.028	
ตัวอย่างที่ 4	0.421	0.393	-0.010		0.359	-0.022		0.345	-0.027	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	2.119	2.030	-0.031	-0.031	2.007	-0.039	-0.036	2.009	-0.039	-0.038
ตัวอย่างที่ 2	3.602	3.520	-0.029		3.501	-0.035		3.495	-0.038	
ตัวอย่างที่ 3	0.456	0.365	-0.032		0.364	-0.032		0.346	-0.039	
ตัวอย่างที่ 4	0.421	0.334	-0.031		0.319	-0.036		0.312	-0.038	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	2.119	2.006	-0.040	-0.040	1.998	-0.042	-0.042	1.987	-0.046	-0.046
ตัวอย่างที่ 2	3.602	3.485	-0.041		3.482	-0.042		3.474	-0.045	
ตัวอย่างที่ 3	0.456	0.343	-0.040		0.334	-0.043		0.326	-0.046	
ตัวอย่างที่ 4	0.421	0.310	-0.039		0.301	-0.042		0.290	-0.046	

ตารางที่ ง.21 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 40FA 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	3.712	3.646	-0.023	-0.023	3.629	-0.029	-0.028	3.617	-0.033	-0.032
ตัวอย่างที่ 2	2.848	2.785	-0.022		2.770	-0.027		2.759	-0.031	
ตัวอย่างที่ 3	0.569	0.498	-0.025		0.481	-0.031		0.469	-0.035	
ตัวอย่างที่ 4	1.478	1.420	-0.020		1.406	-0.025		1.395	-0.029	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	3.712	3.613	-0.035	-0.033	3.597	-0.040	-0.040	3.596	-0.041	-0.042
ตัวอย่างที่ 2	2.848	2.751	-0.034		2.732	-0.041		2.735	-0.040	
ตัวอย่างที่ 3	0.569	0.475	-0.033		0.456	-0.040		0.436	-0.047	
ตัวอย่างที่ 4	1.478	1.389	-0.031		1.365	-0.040		1.365	-0.040	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	3.712	3.584	-0.045	-0.044	3.589	-0.043	-0.047	3.567	-0.051	-0.049
ตัวอย่างที่ 2	2.848	2.731	-0.041		2.715	-0.047		2.703	-0.051	
ตัวอย่างที่ 3	0.569	0.442	-0.045		0.435	-0.047		0.435	-0.047	
ตัวอย่างที่ 4	1.478	1.352	-0.044		1.337	-0.049		1.348	-0.046	

ตารางที่ ง.22 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 40FB 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	1.505	1.456	-0.017	-0.018	1.436	-0.024	-0.022	1.433	-0.025	-0.027
ตัวอย่างที่ 2	2.730	2.683	-0.016		2.673	-0.020		2.660	-0.025	
ตัวอย่างที่ 3	0.169	0.115	-0.019		0.105	-0.022		0.082	-0.031	
ตัวอย่างที่ 4	0.570	0.519	-0.018		0.508	-0.022		0.493	-0.027	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	1.505	1.403	-0.036	-0.034	1.398	-0.038	-0.038	1.385	-0.042	-0.040
ตัวอย่างที่ 2	2.730	2.639	-0.032		2.623	-0.038		2.631	-0.035	
ตัวอย่างที่ 3	0.169	0.072	-0.034		0.058	-0.039		0.039	-0.046	
ตัวอย่างที่ 4	0.570	0.472	-0.034		0.465	-0.037		0.462	-0.038	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	1.505	1.393	-0.039	-0.042	1.375	-0.046	-0.045	1.363	-0.050	-0.048
ตัวอย่างที่ 2	2.730	2.617	-0.040		2.595	-0.047		2.594	-0.048	
ตัวอย่างที่ 3	0.169	0.045	-0.044		0.040	-0.045		0.037	-0.046	
ตัวอย่างที่ 4	0.570	0.445	-0.044		0.451	-0.042		0.433	-0.048	

ตารางที่ ง.23 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 40FC 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	-0.910	-0.968	-0.020	-0.021	-0.982	-0.025	-0.025	-0.998	-0.031	-0.030
ตัวอย่างที่ 2	-0.626	-0.687	-0.021		-0.698	-0.025		-0.713	-0.031	
ตัวอย่างที่ 3	3.327	3.269	-0.020		3.254	-0.026		3.243	-0.029	
ตัวอย่างที่ 4	2.571	2.512	-0.021		2.501	-0.025		2.489	-0.029	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-0.910	-1.014	-0.036	-0.034	-1.025	-0.040	-0.042	-1.034	-0.044	-0.043
ตัวอย่างที่ 2	-0.626	-0.717	-0.032		-0.751	-0.044		-0.757	-0.046	
ตัวอย่างที่ 3	3.327	3.230	-0.034		3.208	-0.042		3.201	-0.044	
ตัวอย่างที่ 4	2.571	2.475	-0.034		2.451	-0.042		2.464	-0.038	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-0.910	-1.038	-0.045	-0.044	-1.059	-0.052	-0.046	-1.058	-0.052	-0.047
ตัวอย่างที่ 2	-0.626	-0.755	-0.045		-0.743	-0.041		-0.761	-0.047	
ตัวอย่างที่ 3	3.327	3.205	-0.043		3.198	-0.045		3.205	-0.043	
ตัวอย่างที่ 4	2.571	2.446	-0.044		2.436	-0.047		2.438	-0.047	

ตารางที่ ง.24 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 40FD 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	1.335	1.281	-0.019	-0.019	1.265	-0.025	-0.026	1.252	-0.029	-0.030
ตัวอย่างที่ 2	3.219	3.170	-0.017		3.143	-0.027		3.139	-0.028	
ตัวอย่างที่ 3	1.324	1.272	-0.018		1.250	-0.026		1.237	-0.031	
ตัวอย่างที่ 4	-0.040	-0.098	-0.020		-0.114	-0.026		-0.131	-0.032	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	1.335	1.235	-0.035	-0.035	1.214	-0.042	-0.040	1.204	-0.046	-0.041
ตัวอย่างที่ 2	3.219	3.123	-0.034		3.104	-0.040		3.115	-0.036	
ตัวอย่างที่ 3	1.324	1.221	-0.036		1.215	-0.038		1.212	-0.039	
ตัวอย่างที่ 4	-0.040	-0.139	-0.035		-0.148	-0.038		-0.158	-0.041	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	1.335	1.207	-0.045	-0.045	1.200	-0.047	-0.047	1.196	-0.049	-0.048
ตัวอย่างที่ 2	3.219	3.097	-0.043		3.074	-0.051		3.089	-0.046	
ตัวอย่างที่ 3	1.324	1.193	-0.046		1.189	-0.047		1.193	-0.046	
ตัวอย่างที่ 4	-0.040	-0.175	-0.047		-0.165	-0.044		-0.185	-0.051	

ตารางที่ ง.25 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง E ร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

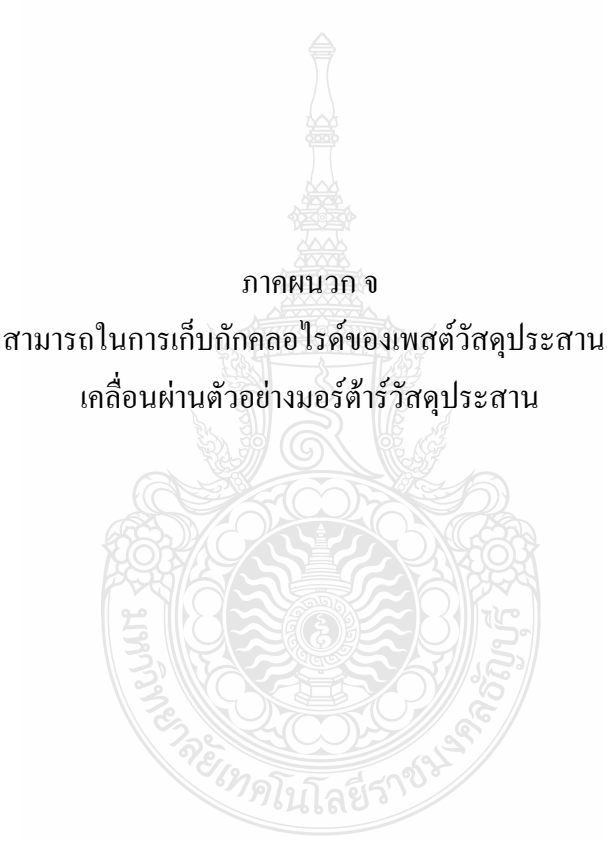
MC 40FE 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	-2.139	-2.171	-0.011	-0.011	-2.209	-0.025	-0.025	-2.222	-0.029	-0.029
ตัวอย่างที่ 2	1.738	1.712	-0.009		1.666	-0.025		1.652	-0.030	
ตัวอย่างที่ 3	3.351	3.320	-0.011		3.281	-0.025		3.265	-0.030	
ตัวอย่างที่ 4	3.067	3.033	-0.012		2.998	-0.024		2.989	-0.027	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-2.139	-2.219	-0.028	-0.029	-2.243	-0.036	-0.036	-2.249	-0.039	-0.040
ตัวอย่างที่ 2	1.738	1.654	-0.029		1.630	-0.038		1.624	-0.040	
ตัวอย่างที่ 3	3.351	3.269	-0.029		3.256	-0.033		3.241	-0.039	
ตัวอย่างที่ 4	3.067	2.988	-0.028		2.963	-0.036		2.949	-0.041	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	-2.139	-2.258	-0.042	-0.044	-2.278	-0.049	-0.048	-2.277	-0.048	-0.049
ตัวอย่างที่ 2	1.738	1.614	-0.044		1.596	-0.050		1.595	-0.050	
ตัวอย่างที่ 3	3.351	3.220	-0.046		3.211	-0.049		3.212	-0.049	
ตัวอย่างที่ 4	3.067	2.937	-0.046		2.938	-0.045		2.930	-0.048	

ตารางที่ ง.26 การหาค่าการหดตัวแห้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง F ร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูน ร้อยละ 10

MC 40FF 10L	ความยาวเริ่มต้น (มม.)	อายุบ่ม 1 วัน			อายุบ่ม 3 วัน			อายุบ่ม 5 วัน		
		ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)	ความยาวที่อายุทดสอบ (มม.)	ค่าการหดตัว (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัว (ร้อยละ)
ตัวอย่างที่ 1	2.700	2.672	-0.010	-0.009	2.638	-0.022	-0.022	2.620	-0.028	-0.026
ตัวอย่างที่ 2	1.219	1.194	-0.009		1.157	-0.022		1.140	-0.028	
ตัวอย่างที่ 3	0.685	0.655	-0.011		0.625	-0.021		0.618	-0.024	
ตัวอย่างที่ 4	0.541	0.518	-0.008		0.473	-0.024		0.465	-0.027	
		อายุบ่ม 7 วัน			อายุบ่ม 14 วัน			อายุบ่ม 21 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	2.700	2.619	-0.028	-0.028	2.608	-0.032	-0.032	2.588	-0.039	-0.039
ตัวอย่างที่ 2	1.219	1.141	-0.027		1.127	-0.032		1.110	-0.038	
ตัวอย่างที่ 3	0.685	0.609	-0.027		0.600	-0.030		0.572	-0.040	
ตัวอย่างที่ 4	0.541	0.457	-0.029		0.444	-0.034		0.428	-0.040	
		อายุบ่ม 28 วัน			อายุบ่ม 45 วัน			อายุบ่ม 91 วัน		
ตัวอย่างที่ 1	2.700	2.584	-0.041	-0.040	2.572	-0.045	-0.045	2.570	-0.046	-0.046
ตัวอย่างที่ 2	1.219	1.107	-0.039		1.086	-0.047		1.085	-0.047	
ตัวอย่างที่ 3	0.685	0.578	-0.038		0.557	-0.045		0.555	-0.046	
ตัวอย่างที่ 4	0.541	0.424	-0.041		0.422	-0.042		0.413	-0.045	

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงการหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์วัสดุประสานและปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์วัสดุประสาน



ตารางที่ จ.1 การหาความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ของเพสต์วัสดุประสาน

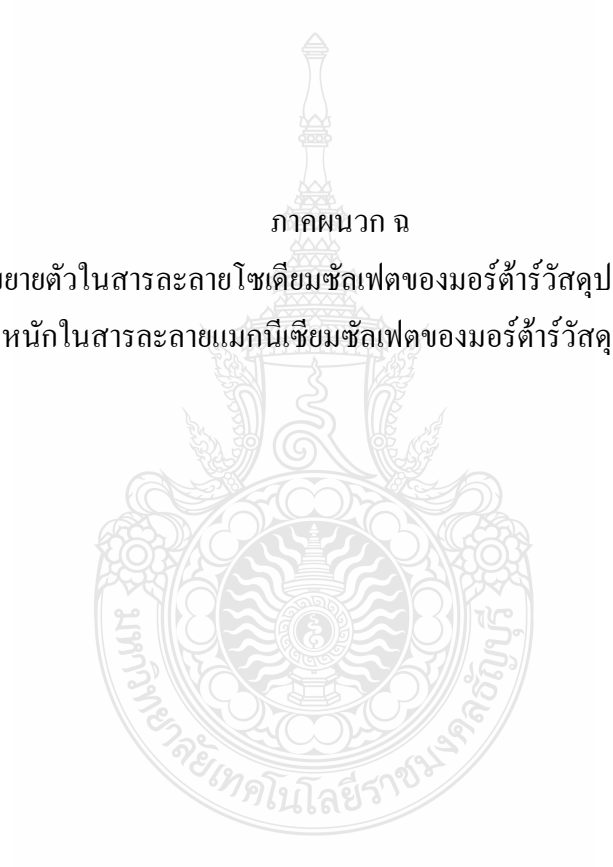
เพสต์	น้ำหนักเถ้า (ก.)	[Cl] ของน้ำเถ้า (ร้อยละ)	คลอไรด์ทั้งหมด (ก.)	น.ตัวอย่าง (ก.)	น.ตัวอย่าง 10 ชิ้น (ก.)	ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ปริมาณน้ำใน 10 ชิ้นตัวอย่าง (ก.)	[Cl] ของน้ำในตัวอย่าง (%)	คลอไรด์ทั้งหมด (Total CL) (ก.)	คลอไรด์อิสระ (Free CL) (ก.)	คลอไรด์ยึดจับ (Fixed CL) (ก.)	Free CL (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	Fixed CL (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	Fixed CL (ร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)	อัตราส่วน Fixed CL
PC	725.50	1.83	8.49	700.61	538.78	22.81	122.89	1.80	6.53	2.21	4.32	0.74	1.45	2.20	0.66
PC 10L	688.97	1.98	7.03	689.37	525.08	23.88	125.39	1.86	5.35	2.33	3.02	0.82	1.06	1.87	0.56
PC 30FA	757.60	2.09	6.89	644.32	488.50	25.98	126.94	1.90	5.23	2.41	2.82	0.93	1.09	2.02	0.54
PC 30FB	713.47	2.02	6.99	646.07	491.50	26.45	129.98	1.92	5.32	2.50	2.82	1.04	1.17	2.06	0.57
PC 30FC	805.81	1.96	8.38	654.31	504.66	23.49	118.55	1.97	6.46	2.34	4.13	0.91	1.60	2.34	0.68
PC 30FD	757.14	1.89	8.40	658.98	508.12	24.29	123.44	1.87	6.48	2.31	4.17	0.90	1.63	2.36	0.69
PC 30FE	695.28	1.98	7.09	652.95	503.00	26.21	131.83	1.86	5.46	2.45	3.01	0.99	1.22	2.06	0.59
PC 30FF	804.89	1.85	9.26	683.04	521.37	25.13	131.00	1.98	7.07	2.59	4.47	1.00	1.72	2.53	0.68
PC 20FA 10L	741.97	1.98	7.57	666.47	504.36	25.77	129.96	1.87	5.73	2.43	3.30	0.97	1.32	2.14	0.62
PC 20FB 10L	768.75	1.99	7.76	628.40	478.65	24.01	114.92	2.06	5.91	2.37	3.55	0.98	1.46	2.28	0.64
PC 20FC 10L	720.72	2.04	6.92	655.78	517.42	24.23	125.39	2.16	5.46	2.71	2.75	1.04	1.05	1.95	0.54
PC 20FD 10L	766.41	1.91	8.35	665.53	514.15	25.25	129.84	2.08	6.45	2.70	3.75	1.05	1.46	2.35	0.62
PC 20FE 10L	642.48	1.90	7.07	672.09	514.07	25.33	130.20	2.00	5.41	2.60	2.80	1.02	1.09	1.97	0.56
PC 20FF 10L	787.13	1.95	8.26	649.12	504.03	24.21	122.01	1.96	6.42	2.39	4.03	0.94	1.58	2.35	0.67

ตารางที่ จ.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์วัสดุประสาน

มอร์ต้าร์	ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมอร์ต้าร์ (คูลอมบ์)		
	อายุบ่ม 7 วัน	อายุบ่ม 28 วัน	อายุบ่ม 91 วัน
MC	9,245	8,087	7,661
MC 10L	10,574	9,038	8,411
MC 30FA	9,464	5,080	2,124
MC 30FB	8,529	5,234	1,957
MC 30FC	9,532	5,142	1,122
MC 30FD	9,757	6,071	2,216
MC 30FE	10,046	5,358	2,449
MC 30FF	10,577	5,273	2,933
MC 20FA 10L	11,081	6,950	3,092
MC 20FB 10L	10,792	6,576	3,174
MC 20FC 10L	11,090	6,269	3,309
MC 20FD 10L	11,498	7,503	3,936
MC 20FE 10L	11,830	8,951	2,866
MC 20FF 10L	12,212	7,999	1,690

ภาคผนวก ฉ

ตารางแสดงค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน และค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน



ตารางที่ ฉ.1 ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน

มอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)													
	14	28	56	91	140	196	252	308	364	420	476	532	588	644
MC	0.004	0.006	0.009	0.011	0.024	0.042	0.060	0.079	0.141	0.206	0.255	0.275	0.291	0.310
MC5	0.000	-0.001	0.004	0.011	0.013	0.023	0.041	0.049	0.059	0.103	0.115	0.126	0.136	0.146
MC 10L	-0.002	0.001	0.006	0.008	0.019	0.031	0.032	0.049	0.076	0.123	0.132	0.138	0.145	0.154
MC 20FA	-0.002	0.002	0.005	0.011	0.016	0.022	0.021	0.026	0.031	0.036	0.057	0.064	0.071	0.077
MC 20FB	0.002	0.007	0.009	0.013	0.021	0.025	0.024	0.030	0.036	0.050	0.053	0.058	0.062	0.065
MC 20FC	0.005	0.008	0.014	0.015	0.027	0.027	0.042	0.050	0.064	0.071	0.098	0.118	0.120	0.130
MC 20FD	0.003	0.006	0.008	0.017	0.032	0.048	0.058	0.091	0.124	0.167	0.191	0.205	0.217	0.229
MC 20FE	0.005	0.008	0.011	0.023	0.038	0.061	0.083	0.106	0.141	0.184	0.194	0.204	0.214	0.223
MC 20FF	0.006	0.006	0.013	0.015	0.028	0.046	0.048	0.081	0.113	0.156	0.167	0.178	0.188	0.198
MC 10FA 10L	0.000	0.007	0.010	0.024	0.049	0.076	0.091	0.149	0.190	0.253	0.267	0.282	0.295	0.309
MC 10FB 10L	0.000	0.003	0.005	0.010	0.013	0.023	0.055	0.110	0.140	0.209	0.221	0.240	0.250	0.279
MC 10FC 10L	0.001	0.004	0.007	0.016	0.034	0.033	0.032	0.122	0.148	0.242	0.266	0.289	0.314	0.337
MC 10FD 10L	0.004	0.007	0.016	0.034	0.078	0.131	0.180	0.271	0.362	0.425	0.507	0.529	0.549	0.570
MC 10FE 10L	0.003	0.009	0.013	0.023	0.053	0.066	0.129	0.230	0.282	0.404	0.430	0.454	0.479	0.502
MC 10FF 10L	0.003	0.008	0.011	0.012	0.032	0.045	0.100	0.200	0.260	0.322	0.408	0.447	0.474	0.504

213

ตารางที่ ฉ.2 ค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน (ต่อ)

มอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)													
	14	28	56	91	140	196	252	308	364	420	476	532	588	644
MC 40FA	0.000	0.003	0.004	0.005	0.012	0.016	0.016	0.019	0.022	0.027	0.032	0.035	0.039	0.042
MC 40FB	0.003	0.003	0.005	0.007	0.013	0.017	0.018	0.021	0.031	0.042	0.043	0.051	0.062	0.070
MC 40FC	0.004	0.003	0.006	0.009	0.013	0.018	0.018	0.026	0.034	0.051	0.057	0.065	0.070	0.077
MC 40FD	0.004	0.008	0.011	0.012	0.017	0.020	0.020	0.023	0.026	0.036	0.045	0.049	0.052	0.055
MC 40FE	0.004	0.005	0.011	0.013	0.019	0.023	0.027	0.030	0.032	0.050	0.046	0.049	0.053	0.056
MC 40FF	0.004	0.005	0.012	0.012	0.016	0.019	0.025	0.028	0.032	0.043	0.047	0.048	0.054	0.056
MC 30FA 10L	0.001	0.004	0.011	0.013	0.023	0.055	0.059	0.122	0.171	0.229	0.244	0.259	0.273	0.286
MC 30FB 10L	0.000	0.007	0.006	0.014	0.020	0.033	0.039	0.097	0.134	0.194	0.217	0.234	0.241	0.254
MC 30FC 10L	0.002	0.009	0.013	0.019	0.027	0.035	0.117	0.151	0.184	0.259	0.273	0.289	0.305	0.321
MC 30FD 10L	0.002	0.004	0.011	0.021	0.047	0.092	0.139	0.215	0.292	0.351	0.411	0.432	0.452	0.472
MC 30FE 10L	0.003	0.008	0.013	0.022	0.042	0.066	0.096	0.120	0.204	0.278	0.295	0.313	0.329	0.337
MC 30FF 10L	0.007	0.013	0.011	0.011	0.025	0.028	0.091	0.120	0.210	0.280	0.340	0.350	0.380	0.411

214

ตารางที่ ฉ.3 ค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน

มอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)						
	14	28	56	91	252	308	644
MC	0.000	0.055	0.104	0.186	-0.136	-0.225	-1.980
MC5	0.000	0.065	0.072	0.023	-0.265	-0.353	-1.557
MC 10L	0.000	0.120	0.249	0.349	0.406	0.371	-1.071
MC 20FA	0.045	0.119	0.252	0.254	0.314	0.241	-2.199
MC 20FB	0.098	0.161	0.275	0.354	0.135	0.030	-2.306
MC 20FC	0.097	0.149	0.278	0.367	0.236	0.110	-2.195
MC 20FD	0.056	0.100	0.190	0.256	0.154	0.088	-2.292
MC 20FE	0.127	0.189	0.328	0.358	0.055	0.030	-2.216
MC 20FF	0.060	0.071	0.112	0.286	0.077	0.082	-2.010
MC 10FA 10L	0.186	0.237	0.311	0.399	0.558	0.488	-1.709
MC 10FB 10L	0.101	0.173	0.234	0.293	0.652	0.681	-1.771
MC 10FC 10L	0.125	0.174	0.272	0.529	0.655	0.674	-1.644
MC 10FD 10L	0.102	0.135	0.227	0.293	0.623	0.664	-1.530
MC 10FE 10L	0.142	0.176	-0.284	0.398	0.834	0.872	-1.487
MC 10FF 10L	0.144	0.296	0.286	0.421	0.496	0.526	-1.440

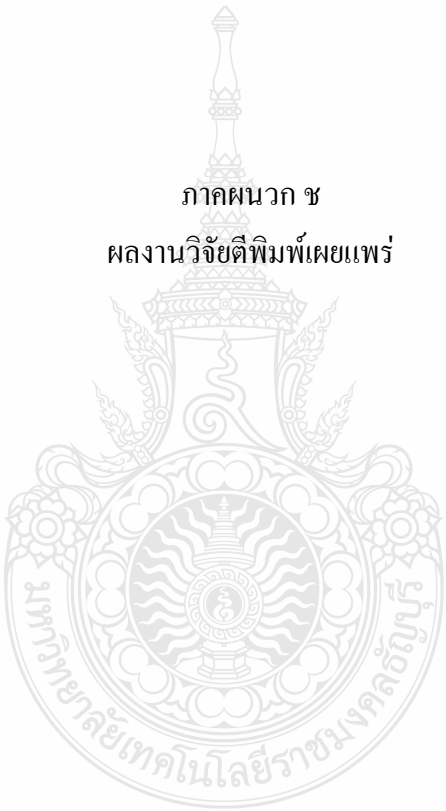
215

ตารางที่ ฉ.4 ค่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์วัสดุประสาน (ต่อ)

มอร์ต้าร์	อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)						
	14	28	56	91	252	308	644
MC 40FA	0.042	0.158	0.316	0.422	0.374	0.223	-2.243
MC 40FB	0.109	0.148	0.218	0.313	0.488	0.460	-2.356
MC 40FC	0.114	0.191	0.313	0.415	0.400	0.167	-2.385
MC 40FD	0.141	0.096	0.317	0.421	0.357	0.298	-2.446
MC 40FE	0.148	0.178	0.301	0.430	0.461	0.445	-2.331
MC 40FF	0.255	0.267	0.349	0.429	0.693	0.670	-1.980
MC 30FA 10L	0.007	0.219	0.309	0.386	0.592	0.690	-1.700
MC 30FB 10L	0.113	0.451	0.644	0.753	0.736	0.660	-1.630
MC 30FC 10L	0.140	0.293	0.399	0.492	0.529	0.420	-1.470
MC 30FD 10L	0.177	0.368	0.480	0.715	0.288	0.171	-1.761
MC 30FE 10L	0.070	0.408	0.572	1.314	0.365	0.145	-1.815
MC 30FF 10L	0.150	0.427	0.513	1.082	0.679	0.661	-1.601

216

ภาคผนวก ช
ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่



การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6

ANNUAL CONCRETE CONFERENCE (ACC6)

ในวาระครบรอบ 50 ปี แห่งการสถาปนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

20 - 22 ตุลาคม 2553
Grand Pacific Sovereign Resort & Spa
อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
ร่วมกับ
- ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาครุศาสตร์โยธา และ ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- ACI Thailand Chapter
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6

ศ.ดร.ชัย	จาตุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เอนก	ศิริพานิชกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สมเกียรติ	รุ่งทองใบสุรีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สุทัศน์	ลีลาทวีวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ทวิช	พูลเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.วีรชาติ	ตั้งจิรภัทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ธรรมนูญ	เฮงษฎีกุล	ศูนย์การศึกษาต่อเนื่อง มจธ.
อ.เอกชัย	ภัทรวงศ์ไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.สมิตร	ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ปิติศานต์	กร้ำมาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.พุทธพล	ทองอินทร์ดำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จตุพล	ตั้งปกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	สินสิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.วันชัย	สะตะ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.อุบลลักษณ์	รัตนศักดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.เรืองรุชดิ์	ชีระโรจน์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.สหลาภ	หอมวุฒิวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร.ปิติ	สุคนธสุขกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.คมสัน	มาลีสี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.บุรฉัตร	ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.สำริง	รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเมคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รศ.ดร.บุญไชย	สถิตมั่นในธรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.รัฐภูมิ	ปริชาตปรีชา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ประวีณ	ชมปรีดา	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.วรรณสิริ	พันธุ์อุไร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.ธัชวีร์	ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
คุณวันทยาวุธ	วงศ์กองแก้ว	บริษัท บอรอล คอนกรีต (ประเทศไทย) จำกัด
คุณบุญรอด	คุปติทัพหิ	บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (CPAC)
ผศ.ดร.วันชัย	ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ว่าที่ ร.ต.ดร.ศุภชัย	สินถาวร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุวิมล	สัจจวาณิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.ฉัตร	สุจินดา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6 (ต่อ)

รศ.ดร.ไพบูลย์	ปัญญาคะโป	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.นคร	ภู่วโรดม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.วิรัช	เลิศไพฑูรย์พันธ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รศ.ดร.อมร	พิมานมาศ	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
คุณมนตรี	เชื้อคล้อยวรรณา	บริษัท เซ็มกรีต (ประเทศไทย) จำกัด (CEMKRETE)
ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.ณัฐวัฒน์	จุฑารัตน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รศ.ดร.ประเสริฐ	สุวรรณวิทยา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญบทความ (ต่อ)

บทความวิจัย สาขาคอนกรีตและวัสดุ (MAT)		หน้า
MAT-66	ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมวัสดุประสานสามชนิดในสิ่งแวดล้อมทะเล *ชัยเฉลิม ราศรี ทวีชัย สำราญวานิช เฉลิมชัย วาณิชย์สำเลิศ และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล*	341
MAT-67	ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตที่ผสมวัสดุประสานสามชนิด *ชัยเฉลิม ราศรี ทวีชัย สำราญวานิช เฉลิมชัย วาณิชย์สำเลิศ และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล*	349
MAT-68	EFFECT OF PLASTERING MORTAR AND PAINT ON CARBONATION RESISTANCE OF CONCRETE *Jiranuwat Banjongrat, Koraphat Wongpiyachetchai, Raktipong Sahamitmongkol, and Somnuk Tangtermsirikul*	359
MAT-69	Chloride Resistance of Cement Paste with Crystalline Materials *Dujthep Yodmalai, Raktipong Sahamitmongkol, and Somnuk Tangtermsirikul*	365
MAT-71	การศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต และการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ต้าที่ใช้วัสดุประสานต่างกัน และเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุบ่มภายใน *ธีรติ ศรีจันทร์ Kinaanath Hussain พงษ์ศักดิ์ โชคทวีกาญจน์ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ*	371
MAT-72	การทำนายกำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวผสมโฟมซีเมนต์ *อิทธิพล มีผล ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข เชิดชนินทร์ หมดมนทิน และ พานิช วุฒิพฤกษ์*	377
MAT-73	การพัฒนา Ultra High Strength Mortar: อิทธิพลของปริมาณเส้นใยเหล็กและมวลรวมละเอียด *เอกพล บุญมาเลิศ บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ ณัฏฐ์ มากุล*	383
MAT-74	ผลกระทบของการเติมแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต *พร้อมพงศ์ ฉลาดชัญญกิจ ปิติศานต์ กร้ำมาตร กฤดิยา แก้วมณี และ สมนึก ตั้งเติมสิริกุล*	389

ผลกระทบของการเติมแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต

EFFECT OF ADDITION OF FREE LIME IN FLY ASH ON EXPANSION AND WEIGHT LOSS IN SULFATE SOLUTION OF MORTAR WITH FLY ASH AND LIMESTONE POWDER

พร้อมพงศ์ ฉลาดชัญญกิจ (Prompong Chalattunyakij)[1]

ปิติศานต์ กรำมาตร (Pitisan Krammart)[2]

กฤติยา แก้วบณี (Krittiya Kaewmanee)[3]

สมนึก ตั้งเติมสิริกุล (Somnuk Tangtermsirikul)[4]

[1]นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี chalattunyakij@yahoo.com

[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[3]นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[4]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) ในเถ้าลอย ต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน (แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1) โดยใช้เถ้าลอยตั้งต้นที่เติมแคลเซียมออกไซด์อิสระให้มีปริมาณแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่าประเภทที่ 5 ล้วน ขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน (3 ไมโครเมตร) ร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และพบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอย หรือเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน มอร์ต้าร์จะมีค่าการขยายตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย กล่าวคือถ้าเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูง การแทนที่ในปริมาณต่ำอาจทำให้การขยายตัวมากขึ้น ส่วนในกรณีสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าทั้งของมอร์ต้าร์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูน ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 นั้น มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน พบว่าทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับปริมาณ fCaO ที่ต่างกันในเถ้าลอย พบว่าไม่มีผลกระทบต่อค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

ABSTRACT : This research was aimed at studying the effect of free lime (fCaO) content in fly ash on the expansion and weight loss of mortars with cement, fly ash and limestone powder submerged in sulfate solutions. Free lime was added to the original fly ash in order to vary free lime content of fly ash. Test results revealed that the expansion of OPC type I mortar was higher than that of OPC type V mortar in sodium sulfate solution. It was also found that the expansion of mixture with 10% replacement of limestone powder was about the same as that of OPC type V mixture. The expansion of binary mixtures with fly ash and ternary mixtures with cement, fly ash and limestone powder depended very much on the content and type of fly ash such that mixtures with small replacement ratio of high CaO fly ash yielded high expansion. In magnesium sulfate solution, weight loss of OPC type I mortar was higher than those of OPC type V mortar and mortar with limestone powder. Weight loss of mortars with 20% and 40% fly ash were higher than those of OPC type I and OPC type V mortars. Ternary mixture incorporating cement, fly ash and limestone powder showed lower weight loss than OPC type I mixture and was similar to OPC type V mixture. Free lime (fCaO) content of fly ash had no effect on the expansion and weight loss of mortar in sulfate solutions.

KEYWORDS: Free lime, Fly ash, Limestone powder, Sulfate, Durability

1. บทนำ

สภาวะแวดล้อมที่มีสารซัลเฟตซึ่งอยู่ในรูปสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เนื่องจากสามารถซึมผ่านสู่ภายในเนื้อคอนกรีตเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ก่อให้เกิดการผุกร่อน พองตัว และแตกร้าว ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตไม่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้

เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าการใช้เถ้าลอย (Fly Ash) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในเพสต์ลดลง และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารซัลเฟตได้ดีขึ้น [1] ข้อเสียของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนคือ ทำให้ก่อตัวช้า และกำลังรับแรงในระยะต้นจะลดลง [2] จึงไม่นิยมใช้เถ้าลอยในงานที่ต้องการกำลังรับแรงในระยะต้น หรือต้องการถอดแบบเร็ว ในขณะที่การใช้ผงหินปูนซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างทำให้กำลังรับแรงในระยะต้นมีค่าเพิ่มขึ้น [3] อย่างไรก็ตามการใช้ผงหินปูนยังไม่แพร่หลาย ถึงแม้ว่าราคาจะถูกกว่าปูนซีเมนต์ก็ตาม การพัฒนาวัสดุประสานร่วม ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าลอยหรือผงหินปูนเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ ประกอบกับปัจจุบันเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free lime, fCaO) สูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของ fCaO ในเถ้าลอย ต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

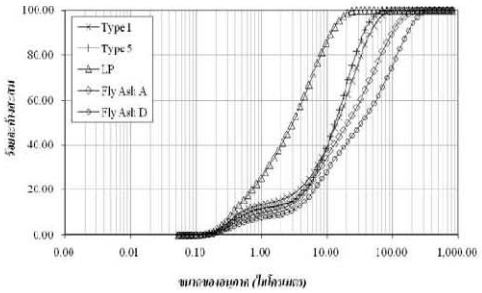
การศึกษานี้ใช้วัสดุประสานซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้เถ้าลอย และผงหินปูน เป็นวัสดุประสานเพิ่มแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้ผงหินปูนขนาดเฉลี่ย 3 ไมโครเมตร ทรายแม่น้ำ สำหรับเถ้าลอยที่ทำการศึกษาใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 2 ตัวอย่าง คือ เถ้าลอยตัวอย่าง A และเถ้าลอยตัวอย่าง D เป็นเถ้าลอยดั้งต้น ซึ่งมีปริมาณ fCaO เท่ากับร้อยละ 0.83 และร้อยละ 2.11 ตามลำดับ เถ้าลอยตัวอย่าง B และC เกิดจากการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงในเถ้าลอยดั้งต้น A เพื่อให้ได้เถ้าลอยที่มีปริมาณ fCaO เท่ากับ ร้อยละ 2.43 และร้อยละ 3.81 ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอยตัวอย่าง E และ F เกิดจากการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงในเถ้าลอยดั้งต้น D เพื่อให้ได้เถ้าลอยที่มีปริมาณ fCaO เท่ากับร้อยละ 3.11 และร้อยละ 4.51 ตามลำดับ โดยรายละเอียดปริมาณ fCaO และ SO_3 ในเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาแสดงใน *ตารางที่ 1* ส่วนลักษณะทางกายภาพโดยการกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาค (Size Distribution) และภาพถ่ายขยายกำลังสูง (Scanning Electron Microscope, SEM) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงใน*ภาพที่ 1 และภาพที่ 2* ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงใน *ตารางที่ 2*

ตารางที่ 1 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (fCaO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ในเถ้าลอย

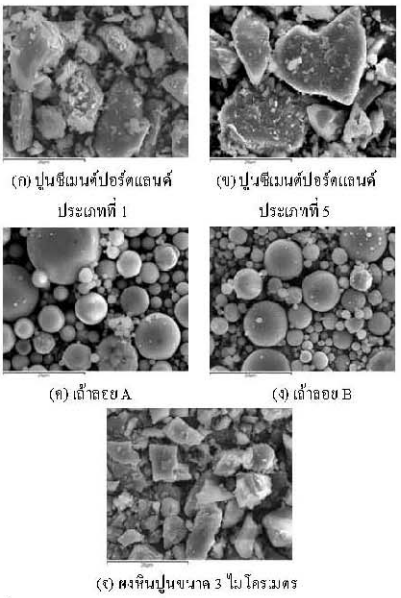
ตัวอย่างเถ้าลอย	fCaO (%)	SO_3 (%)
A	0.83	1.86
B	2.43	1.86
C	3.81	1.86
D	2.11	5.08
E	3.11	5.08
F	4.51	5.08

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียด และความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	OPC Type I	OPC Type V	เถ้าลอย A	เถ้าลอย D	ผงหินปูน 3μ
SiO_2	19.62	20.98	41.54	32.96	0.46
Al_2O_3	5.18	3.79	21.98	17.24	0.06
Fe_2O_3	3.59	3.95	13.69	14.93	0.03
CaO	64.17	61.32	13.69	22.46	55.25
MgO	1.02	3.75	2.24	2.80	0.37
SO_3	2.71	2.76	1.86	5.08	< 0.01
Na_2O	0.02	0.02	1.16	1.04	< 0.01
K_2O	0.54	0.52	3.08	2.71	0.001
LOI	2.52	1.75	0.12	0.22	43.79
fCaO	1.00	1.00	0.83	2.11	-
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,350	3,830	2,390	1,705	12,160
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.18	2.08	2.40	2.78



ภาพที่ 1 การกระจายตัวสะสมของขนาดอนุภาคของวัสดุประสาน



ภาพที่ 2 ลักษณะทางกายภาพโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM) ของวัสดุประสาน

2.2 สัดส่วนผสม

ตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 27 สัดส่วนผสม รายละเอียดสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์แสดงใน *ตารางที่ 3* โดยใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ตลอดการศึกษา

2.3 สารละลายซัลเฟต

สารละลายซัลเฟตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่ความเข้มข้นสารละลายร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือปริมาณซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟตโดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณซัลเฟตอิออนเท่ากับ 33800 ppm ส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแยกเตรียม

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของวัสดุผงที่ใช้ทำมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	สัญลักษณ์	OPC (%by weight)	เถ้าลอย (%by weight)	ผงหินปูน (%by weight)
1	MC	(Type1) 100	-	-
2	MC5	(Type5) 100	-	-
3	MC 10L	90	-	10
4	MC 20FA	80	20	-
5	MC 20FB	80	20	-
6	MC 20FC	80	20	-
7	MC 20FD	80	20	-
8	MC 20FE	80	20	-
9	MC 20FF	80	20	-
10	MC 10FA 10L	80	10	10
11	MC 10FB 10L	80	10	10
12	MC 10FC 10L	80	10	10
13	MC 10FD 10L	80	10	10
14	MC 10FE 10L	80	10	10
15	MC 10FF 10L	80	10	10
16	MC 40FA	60	40	-
17	MC 40FB	60	40	-
18	MC 40FC	60	40	-
19	MC 40FD	60	40	-
20	MC 40FE	60	40	-
21	MC 40FF	60	40	-
22	MC 30FA 10L	60	30	10
23	MC 30FB 10L	60	30	10
24	MC 30FC 10L	60	30	10
25	MC 30FD 10L	60	30	10
26	MC 30FE 10L	60	30	10
27	MC 30FF 10L	60	30	10

หมายเหตุ:
MC คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน
MC5 คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน
MC 10L คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10
MC 20FA คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง A ร้อยละ 20
MC 40FB คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง B ร้อยละ 40
MC 10FC 10L คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง C ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
MC 30FD 10L คือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่าง D ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณซัลเฟตอิออนที่เท่ากัน เตรียมสารละลายไว้ล่วงหน้า 1 วัน อุณหภูมิสารละลายขณะแช่ตัวอย่างประมาณ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนปริมาตรสารละลายต่อปริมาตรตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ประมาณ 4 ต่อ 1 และจัดให้มีระบบการหมุนเวียนสารละลายในถัง โดยสารละลายที่ใช้แช่ตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนทุกๆอายุการแช่ตัวอย่าง 2 เดือน

2.4 การเตรียมตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม. เพื่อวัดค่าการขยายตัว และใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม. เพื่อวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก ทำการหล่อตัวอย่างในแบบหล่อแล้วบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง ถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง หลังจากถอดแบบนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (Saturated Lime Water) เป็นเวลา 28 วัน

2.5 การทดสอบการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์

การประเมินความต้านทานซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้ประเมินโดยวัดค่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

เมื่อแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม. ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวครบ 28 วัน แล้วจึงนำชิ้นตัวอย่างไปวัดความยาวเริ่มต้นเทียบกับแท่งโลหะความยาวคงที่มาตรฐานด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายที่ได้เตรียมไว้ที่อายุการแช่ในสารละลายครบ 2, 4, 8, 13, 20, 28, 36, 44, 52, 60, 68, 76, 84 และ 92 สัปดาห์ นำตัวอย่างไปวัดการเปลี่ยนแปลงความยาว ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยค่า

การขยายตัวที่นำมาใช้รายงานผลจะได้จากค่าเฉลี่ยของค่าการขยายตัวของ 4 ชิ้นตัวอย่าง ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (1)

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \quad (1)$$

โดย ΔL คือ ค่าการขยายตัว (%)

L_x คือ ค่าเฉลี่ยความยาวแท่งตัวอย่างที่แช่ในสารละลายที่อายุทดสอบต่างๆ (มม.)

L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นแท่งตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำอิ่มตัวด้วยปูนขาวครบ 28 วัน (มม.)

L_g คือค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ285 (มม.)

2.5.2 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

เมื่อแช่ชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม. ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาวครบ 28 วัน นำชิ้นตัวอย่างล้างทำความสะอาดเอาปูนขาวและสิ่งสกปรกที่อาจติดอยู่ที่ผิวออก หลังจากนั้นเช็ดด้วยผ้าให้ผิวแห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายที่ได้เตรียมไว้ ที่อายุการแช่ในสารละลายครบ 90 สัปดาห์ นำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์มาปัดผิวด้วยแปรงเพื่อให้เศษมอร์ต้าร์ที่เสื่อมสภาพหลุดออกและซับผิวให้แห้งด้วยผ้าแล้วนำชิ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าน้ำหนักที่วัดได้ไปหาการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ได้จากสมการที่ (2)

$$\Delta W = \frac{W_x - W_i}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

โดย ΔW คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (%)

W_x คือ ค่าน้ำหนักที่อายุต่างๆที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (ก.)

W_i คือ ค่าน้ำหนักเริ่มต้น (ก.)

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์

การประเมินความต้านทานซัลเฟตโดยวัดค่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน มีรายละเอียดผลการทดสอบและวิเคราะห์ดังนี้

3.1 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

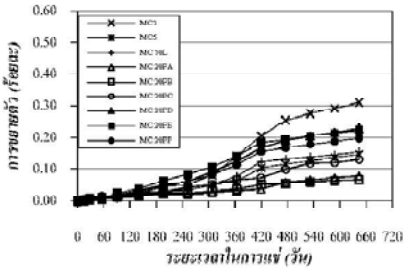
จาก *ภาพที่ 3 (ก)* ซึ่งแสดงการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 20 พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน เพราะปริมาณ C_3A ของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 น้อยกว่า ส่งผลให้เกิดเอททริงไจท์ (Ettringite) น้อยกว่า [4,5] ทำให้การขยายตัวน้อยกว่า ส่วนการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (ขนาด 3 ไมโครเมตร) มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน แต่น้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อย เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ $Ca(OH)_2$ น้อยลง การขยายตัวจึงน้อยลง ขณะที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยนั้น พบว่าการแทนที่ของทุกตัวอย่างเถ้าลอย (6 ตัวอย่าง) การขยายตัวของมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณ C_3A และ C_4AF ลดลง อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานยังเปลี่ยน $Ca(OH)_2$ ให้เป็น CSH จึงเป็นการเพิ่มสภาพการทนทานการกัดกร่อน และการลดลงของ $Ca(OH)_2$ ทำให้เกิดเอททริงไจท์น้อยลง การขยายตัวจึงน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และยังน้อยกว่ามอร์ต้าร์ผงหินปูน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D (เถ้าลอย D, E และ F) มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์

ประเภทที่ 5 ล้วน และมากกว่ามอร์ต้าร์ผงหินปูนด้วย ซึ่งทั้งนี้เป็นไปได้ว่าเถ้าลอยตัวอย่าง D มีปริมาณ CaO และ SO_3 ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 22.46 และ 5.08 ตามลำดับ) ในขณะที่เถ้าลอยตัวอย่าง A มีปริมาณ CaO และ SO_3 ต่ำกว่า (ร้อยละ 13.69 และ 1.86 ตามลำดับ) เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงๆในอัตราการแทนที่ต่ำๆ (ร้อยละ 20) จะทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามาก [6] ประกอบกับ SO_3 สามารถทำให้เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวได้ [7] ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A มีค่าน้อยกว่าของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D แต่เมื่อพิจารณาถึงการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A หรือเถ้าลอยตัวอย่างชุด D พบว่าปริมาณที่แตกต่างกันของ fCaO มีผลต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตน้อยมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีผลต่อการขยายตัว ทั้งนี้เพราะจะเห็นได้ว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่าง A ตัวอย่าง B และตัวอย่าง C ไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่าง D ตัวอย่าง E และตัวอย่าง F ก็ให้ผลไม่แตกต่างกัน

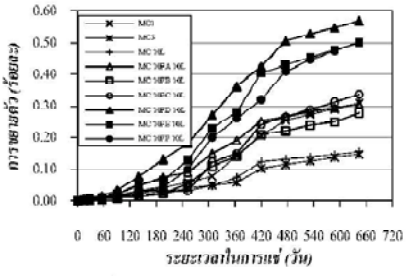
ภาพที่ 3 (ข) เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของตัวอย่างระหว่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า ทุกตัวอย่างเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ที่แทนที่ร่วมกับผงหินปูนมีผลให้การขยายตัวมีค่ามากกว่าทั้งของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วนและมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงหินปูนมีขนาดอนุภาคเล็กเข้าเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ ทำให้ขนาดโพรงเล็กลง ไม่มีช่องว่างให้เอททริงไจท์ที่เกิดขึ้น จึงทำให้เพสต์ขยายตัวมากขึ้น ส่วนการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) มีค่าใกล้เคียงกับของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D (เถ้าลอย D, E และ F) มีค่าค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์อื่นๆ ก็แสดงให้เห็นชัดเจนว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งมีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (เถ้าลอยตัวอย่าง D ซึ่งมีปริมาณ CaO ร้อยละ 22.46) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณยิ่งต่ำๆ คือร้อยละ 10 ทำให้การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่ามากขึ้น ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว และเช่นกันจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A และชุด D ก็จะเห็นว่าผลจากปริมาณ fCaO ที่แตกต่างกันมีผลน้อยต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เพราะการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในแต่ละชุดของเถ้าลอยแตกต่างกันไม่มากและไม่ได้มีแนวโน้มว่าเถ้าลอยที่มี fCaO สูงกว่าจะขยายตัวมากกว่า

ส่วน *ภาพที่ 3 (ค)* เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 40 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ซึ่งเป็นปริมาณการแทนที่ค่อนข้างสูง ไม่ว่าตัวอย่างเถ้าลอยจะมีปริมาณ CaO ที่สูงหรือต่ำ จะมีผลให้การขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าน้อย ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานมีประสิทธิภาพ (ลด $Ca(OH)_2$) มากกว่าผลของปริมาณ CaO ที่สูงของเถ้าลอย [6] ส่วนปริมาณ fCaO ในเถ้าลอยก็ไม่มีผลต่อการขยายตัวเช่นกัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร่วมกับผงหินปูนแทบไม่แตกต่างกัน

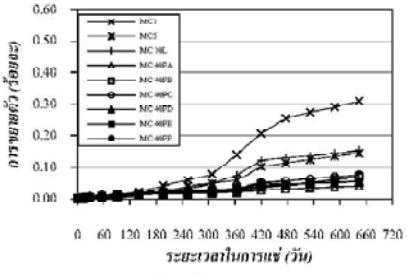
สุดท้าย *ภาพที่ 3 (ง)* เป็นการเปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 ซึ่งแนวโน้มก็ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การขยายตัวของมอร์ต้าร์



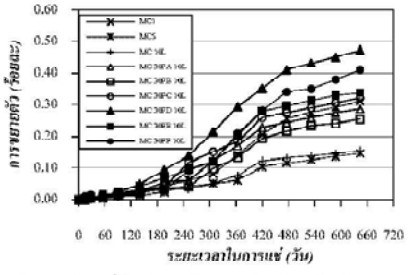
(ก) มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20



(ข) ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



(ค) ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40



(ง) ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์กับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด D ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ผงหินปูน และมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 โดยที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่มีค่ามากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วนและมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 ทั้งนี้สาเหตุสามารถอธิบายได้คือ การแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เพสต์มีความพรุนน้อยลง ผงหินปูนก็เข้าเติมเต็มช่องว่างทำให้ขนาดโพรงเล็กลง จากผลดังกล่าวทำให้ไม่มีช่องว่างสำหรับแอททริงไจท์ การขยายตัวจึงมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A และมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A ส่วนผลจากปริมาณ fCaO ก็มีผลค่อนข้างน้อย เพราะจะเห็นได้จากการขยายตัวที่สลับไปมา แสดงว่ามีผลจากสาเหตุอื่นมากกว่าผลของปริมาณ fCaO ที่ต่างกัน

3.2 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

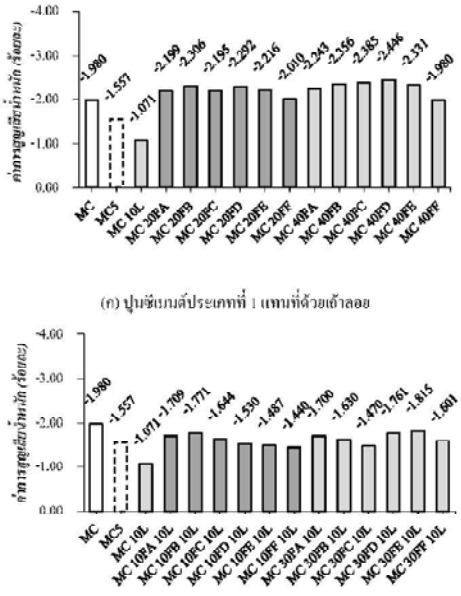
ภาพที่ 4 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ที่อายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต 90 สัปดาห์

จาก *ภาพที่ 4 (ก)* เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างบอร์ต้าร์ปูนซีเบนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร้อยละ 20 และร้อยละ 40 พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ

C_3S ของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มากกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ส่งผลให้การสะสมของยิปซั่ม (บรูไซ (MH) และซิลิกาเจล (S_2H) มากกว่า และการเปลี่ยน CSH เป็น MSH ก็เกิดมากกว่าอีกด้วย ซึ่งเป็นผลเสียต่อเนื้อมอร์ต้าร์เพราะ MSH เป็นสารประกอบที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 พบว่ามีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนและประเภทที่ 5 ล้วน เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนซึ่งมีคนุภาคเล็กมาก อาจช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ทำให้มีความทึบน้ำมากขึ้น รวมทั้งการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงทำให้ C_3S และ C_2S น้อยลง การสะสมของยิปซั่ม บรูไซ และซิลิกาเจลจึงน้อยลง และ MSH ก็เกิดน้อยลงด้วย ขณะที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 นั้น พบว่าการแทนที่ด้วยตัวอย่างเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งไปลด $Ca(OH)_2$ ทำให้ความเป็นด่างลดลง จึงเกิดความไม่เสถียรภาพในมอร์ต้าร์ ดังนั้นการสลายตัวของ CSH ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือปฏิกิริยาปอซโซลานก็แล้วแต่กลายเป็น MSH มากขึ้นซึ่งก็สอดคล้องกับการวิจัยของปิติ ศานต์และคณะ [6] โดยเฉพาะการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 40 มีแนวโน้มว่าจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 20

ภาพที่ 4 (ข) เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย (ทั้ง 6 ตัวอย่าง) ร่วมกับผงหินปูน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนนั้น มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยมากกว่ามอร์ต้าร์ผงหินปูนร้อยละ 10 แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนที่ต่างกัน (กรณีศึกษาครั้งนี้) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักไม่ค่อยแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของ fCaO ต่อการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าปริมาณที่แตกต่างกันของ fCaO (ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้) มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์น้อยมากหรืออาจกล่าวว่าไม่มีผล ทั้งนี้สังเกตุได้จากการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด A (เถ้าลอย A, B และ C) และมอร์ต้าร์เถ้าลอยตัวอย่างชุด D (เถ้าลอย D, E และ F) ทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 ให้ค่าที่แตกต่างกันน้อยและไม่มีแนวโน้มว่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ fCaO แต่อย่างใด (*ภาพที่ 4 (ก)*)

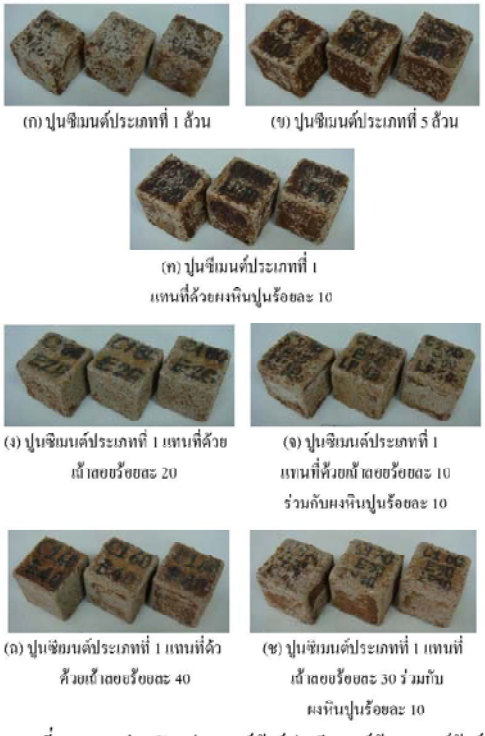


(ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย

(ข) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน

ภาพที่ 4 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 90 สัปดาห์

ส่วน *ภาพที่ 5* เป็นภาพถ่ายของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 90 สัปดาห์ ซึ่งถ้าดูจากลักษณะการถูกทำลายแล้ว ก็พบว่าไปในทิศทางเดียวกับผลการสูญเสียน้ำหนักดังที่กล่าวมาแล้ว



(ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน (ข) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

(ค) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10

(ง) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 (จ) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

(ฉ) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 (ช) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

ภาพที่ 5 ภาพถ่ายตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 90 สัปดาห์

4. สรุป

จากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ขณะที่การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (3 ไมโครเมตร) ร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

2. การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยในปริมาณมาก (ร้อยละ 40) ไม่ว่าปริมาณ CaO ในเถ้าลอยจะสูงหรือต่ำ ก็ทำให้การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ดังกล่าวค่อนข้างน้อย ซึ่งน้อยกว่าทั้งมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แต่เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูง การแทนที่ในปริมาณต่ำจะทำให้การขยายตัวของมอร์ต้าร์มีค่ามาก

3. การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน (โดยแทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 10) การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ดังกล่าว จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย กล่าวคือ ถ้าเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูง การแทนที่ในปริมาณต่ำอาจทำให้การขยายตัวมากขึ้น

4. ปริมาณที่ต่างกันของ fCaO ในเถ้าลอย (กรณีศึกษาครั้งนี้) พบว่าไม่มีผลต่อการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

5. ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน (ร้อยละ 10) ขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20 และร้อยละ 40 นั้น มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน

6. การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ทำให้การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน

7. การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ fCaO ต่างกัน ไม่มีผลต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Wesche K., 2005. Fly Ash in Concrete Properties and Performance. 1st edition. Taylor & Francis e-Library, V.13, No.3 pp. 9-16.

[2] ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547. เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). จำนวณ 1000. ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีตไทย.

[3] Voglis N., Kakali G., Chaniotakis 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.

[4] Al-Amoudi, O.S.B., 1999. Mechanisms of Sulfate in Plain and Blended Cement. a Review. Proceeding of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, UK: pp. 247

[5] สุขชัย สุขยานุดิษฐ์, ปิติสานต์ กร้ำมาตร, อิทธิพร ศิริสวัสดิ์, สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, 2552. ผลกระทบของผงหินปูนต่อการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต. การประชุมวิชาการคอนกรีตคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5:

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

[7] ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. จำนวณ 2000. ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีตไทย.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายพร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ
วัน เดือน ปีเกิด	29 กุมภาพันธ์ 2527
ที่อยู่	46/65 ถนนอินทรคีรี ต.แม่สอด อ.แม่สอด จ.ตาก 63110
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัย

พร้อมพงศ์ ฉลาดธัญญกิจ, ปิติศานต์ กร้ำมาตร และคณะ, **ผลกระทบของการเติมแคลเซียมออกไซด์อิสระในเถ้าลอยต่อการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในสารละลายซัลเฟต**, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6 ระหว่างวันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 ณ Grand Pacific Sovereign Resort & Spa อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี