

**กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์เถ้าลอยระยองบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า
ภายใต้การกระทำของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต**
**Compressive Strength of Rayong Fly Ash Cement Mortar with Electric Oven
under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks**

บุรฉัตร ฉัตรวีระ* และ วินัย หอมศรีประเสริฐ

Burachat Chatveera* and Winai Homsriprasert

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ.คลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้เถ้าลอยจากแหล่งจังหวัดระยองมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อผลิตมอร์ตาร์ที่ทนทานต่อสภาวะความเป็นซัลเฟต โดยงานวิจัยจะแบ่งมอร์ตาร์ออกเป็น 2 ชุด คือ มอร์ตาร์ควบคุมที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยกับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสัดส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องแล้วบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C, 60°C และ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมอร์ตาร์ไปบ่มแช่น้ำใน 4 สภาวะ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง ในน้ำ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต สำหรับมอร์ตาร์ควบคุมใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.49 และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.5, 0.61, 0.64 และ 0.66 ตามลำดับ งานวิจัยนี้สรุป ได้ว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 เมื่อบ่มในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80°C แล้วแช่น้ำจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด

คำสำคัญ : กำลังรับแรงอัด, ซีเมนต์มอร์ตาร์, เถ้าลอยระยอง, โซเดียมซัลเฟต, แมกนีเซียมซัลเฟต

Abstract

This research is a study of the proper mixing proportions using Rayong fly ash replacements in Portland cement Type I to produce mortar resistant sulfate attacks. There are two mortar groups, the first one; cement mortar is control cement mortar. Another one is percentage replacements of Rayong fly ash in Portland cement Type I were 10, 20, 30 and 40 by weight of binder. After that samples are cured at room temperature and then on electric oven at 40°C, 60°C and 80°C for a period of 24 hours. Moreover, the mortars are cured under four conditions; such as at room temperature, water, sodium sulfate solution and magnesium sulfate solution. For the water – to – binder ratios of control cement mortar is 0.49 and the percentage replacements of Rayong fly ash in Portland cement Type I were 10, 20, 30 and 40 by weight of binder, the water – to – binder ratios were 0.5, 0.61, 0.64 and 0.66, respectively. The results indicated that the compressive strength of cement mortar at the replacement levels of 10 % by weight of binder with the electric oven at a temperature of 80°C and then immersed in water is the highest compressive strength.

Keywords : compressive strength, cement mortar, , rayong fly ash, sodium sulfate, magnesium sulfate

1. บทนำ

จากอดีตจวบจนปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นับเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความสำคัญและถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมหลักในการผลิตคอนกรีตรวมถึงการใช้งานเป็นปูนก่อและปูนฉาบ ไม่ว่าจะเป็นการก่อสร้างบ้านเรือนขนาดเล็กไปจนถึงอาคารขนาดใหญ่ ถนน สะพาน หรือแม้แต่เขื่อนกั้นน้ำและอุโมงค์ก็ล้วนต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งสิ้น อย่างไรก็ตามในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นมีส่วนประกอบหลักคือ สารซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยต้องใช้อุณหภูมิในการเผาที่ประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียสแล้วนำมาบดให้ละเอียดตามความต้องการ ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก ซึ่งผลกระทบจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) และเป็นตัวการที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) โดยการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจกถึงปีละ 13,500 ล้านตันหรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาในบรรยากาศทั้งหมด [1] จากผลกระทบดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยการหาวัสดุอื่นมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ผสม (Blend Cement) ซึ่งตัวอย่างวัสดุดังกล่าวได้แก่ วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan Materials) แต่อย่างไรก็ตามวัสดุพอซโซลานยังไม่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ทั้งหมดเนื่องจากซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในวัสดุดังกล่าวต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำปฏิกิริยาพอซโซลานต่อให้ได้สารประกอบแคลเซียม ซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำวัสดุพอซโซลานประเภทเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตซีเมนต์มอร์ตาร์เถ้าลอยเมื่อต้องถูกแช่ในสภาวะความเป็นซัลเฟต

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้เถ้าลอยจากแหล่งจังหวัดระยอง มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการผลิตมอร์ตาร์ที่ทนทานต่อสภาวะความเป็นซัลเฟต

3. วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. วัสดุผงที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินจากจากโรงผลิตไฟฟ้า BLC Power Station นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง
2. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำคลองขนาด (Graded standard sand) ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface-Dry, S.S.D) โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำงตะแกรงเบอร์ 100 ตามมาตรฐาน ASTM C778 [2]
3. น้ำ ใช้น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
4. สารละลายซัลเฟต ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C1012 [3]

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 การประเมินศักยภาพเบื้องต้นของเถ้าลอย

ศึกษาสมบัติพื้นฐานทางเคมี สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยระยองเพื่อวิเคราะห์และประเมินศักยภาพของการใช้เป็นวัสดุเติมในการผลิตมอร์ตาร์โดยสมบัติพื้นฐานทางเคมีที่ศึกษา ประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี ศึกษาโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สำหรับสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย ความต้องการน้ำ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดและดัชนีกำลัง ส่วนโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยระยองทำการศึกษาภาพถ่ายขยายโดยวิธีเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) การกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยโดยวิธีเทคนิค Particle Size Distribution (PSD)

3.2.2 การทดสอบการไหลแผ่

ทำการทดสอบหาค่าร้อยละการไหลแผ่ทั้ง 5 ส่วนผสม ดังตารางที่ 1 ให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C109 [4] (ร้อยละ 110 ± 5) ด้วยวิธีโต๊ะการไหล (Flow Table) ถ้า ค่าร้อยละการไหลแผ่ของชุดตัวอย่างไม่อยู่ในมาตรฐาน ให้เติมน้ำลงไปผสมเพิ่มจนมอร์ต้ารมีค่าร้อยละการไหลแผ่ อยู่ในมาตรฐานที่กำหนด

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยระยอง

ลำดับ ที่	ส่วนผสม	สัดส่วนที่ใช้ (ร้อยละ)	
		ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย
1	C100FA0	100	0
2	C90FA10	90	10
3	C80FA20	80	20
4	C70FA30	70	30
5	C60FA40	60	40

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

C หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Cement)

FA หมายถึง เถ้าลอย (Fly Ash)

การอ่านสัญลักษณ์ของก้อนตัวอย่างในแต่ละสูตร สามารถอ่านได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้ เช่น

C90FA10 หมายถึง มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบโดยมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อยู่ร้อยละ 90 และมีส่วนผสมของเถ้าลอยอยู่ร้อยละ 10

3.2.3 การบ่ม

เมื่อทำการหล่อมอร์ต้าร์เสร็จแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำไปบ่ม 2 วิธี ได้แก่ บ่มที่อุณหภูมิห้อง และบ่มในเตาอบไฟฟ้า โดยที่อุณหภูมิห้องนั้นตัวอย่างจะอยู่ในแบบหล่อ และปิดคลุมด้วยแผ่นพลาสติกทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นนำตัวอย่างเข้าบ่มในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C , 60°C และ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.4 สภาพการบ่มแช่

หลังจากนำตัวอย่างมอร์ต้าร์ออกจากเตาอบไฟฟ้าแล้ว นำชุดตัวอย่างไปบ่มแช่ใน 4 สภาพ ได้แก่ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต ในน้ำ และที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน

4. ผลการวิจัย

4.1 สมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยระยอง ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเถ้าลอยระยองมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยมวลเท่ากับร้อยละ 33.90 ซึ่งถือว่าเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) Free CaO อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มีค่าเท่ากับร้อยละ 27.54, 19.78, 16.71 และ 6.50 โดยมวล ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยระยองกับข้อกำหนดของการจัดประเภทสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 [5] พบว่าเถ้าลอยระยองที่นำมาใช้จัดอยู่ในประเภท C ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยระยองเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบ ทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	เถ้าลอยระยอง	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์
SiO_2	33.90	19.96
Al_2O_3	16.71	4.99
Fe_2O_3	6.50	2.68
CaO	27.54	65.56
MgO	1.04	1.18
K_2O	0.85	0.48
Na_2O	0.10	0.08
SO_3	6.28	2.22
Free CaO	19.78	0.99

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยระยะของที่นำมาใช้กับเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอยระยะของ	ประเภทของเถ้าลอย	
		F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), ร้อยละต่ำสุด	57.11	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละสูงสุด	6.28	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นร้อยละสูงสุด	0.56	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition : LOI)	6.35	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละสูงสุด	0.10	1.5	1.5

4.1.2 สมบัติทางกายภาพ

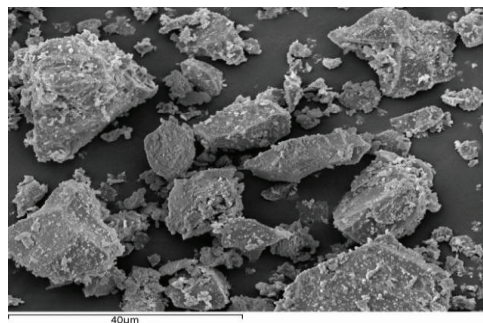
จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยระยะของและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า เถ้าลอยระยะของมีค่าปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ และความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้เถ้าลอยระยะของยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยระยะของมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยระยะของและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สมบัติทางกายภาพ	เถ้าลอยระยะของ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ปริมาณความชื้น (Moisture Content,%)	0.56	0.74
พื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface Area, cm^2/g)	5866	3376
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.53	3.15
ปริมาณน้ำที่ต้องการ (Water Requirement ,% of control)	109.5	100
ค่าความหนาแน่น (Bulk Density , kg/m^3)	690	1000

4.1.3 โครงสร้างทางจุลภาค

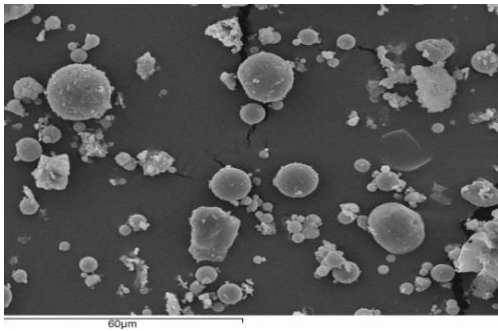
1. ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากการศึกษาลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะผิวขรุขระและเป็นเหลี่ยมมุม ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคค่อนข้างมาก ดังแสดงในรูปที่ 1



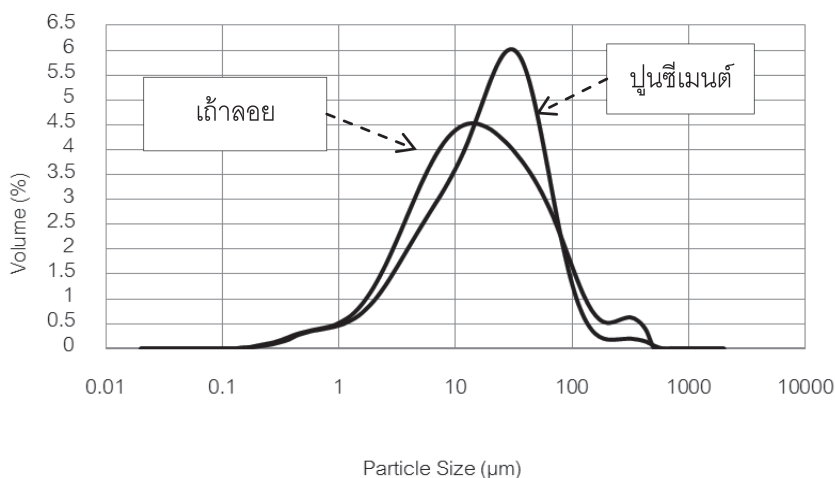
รูปที่ 1 ภาพถ่ายกำลังขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

2. ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยระยอง

จากการศึกษาลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยระยอง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าอนุภาคของเถ้าลอยระยองมีลักษณะรูปทรงกลมบิดเบี้ยวบ้างเล็กน้อย มีขนาดเล็กใหญ่คละกันและมีผิวที่ขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพถ่ายกำลังขยายของเถ้าลอยระยอง ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



รูปที่ 3 การกระจายขนาดคละของอนุภาควัสดุผง

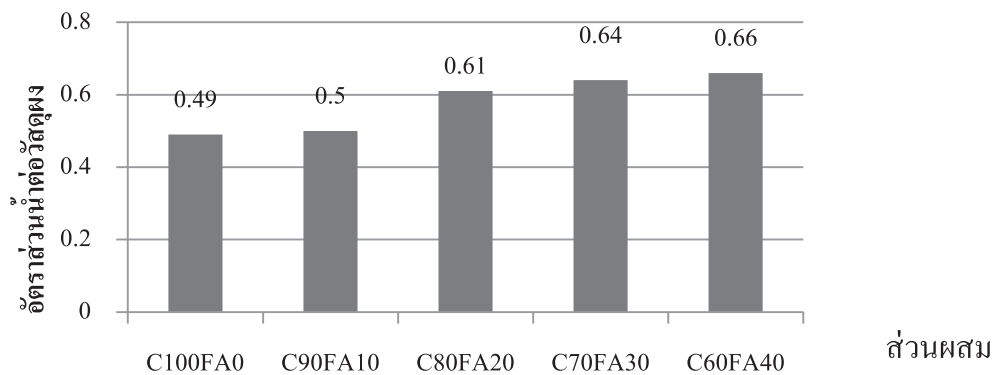
4.1.4 ผลการทดสอบการไหลแผ่

จากรูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองกับมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองในสัดส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่า มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองจะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่

3. ลักษณะการกระจายขนาดคละของวัสดุผง

จากผลการทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และของเถ้าลอยระยอง พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนใหญ่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค 59.22 ไมโครเมตร (μm) และเถ้าลอยระยองส่วนใหญ่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ที่ 37.22 ไมโครเมตร (μm) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจากการที่อนุภาคของเถ้าลอยระยองมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้เกิดการอุดแทรกระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ดีขึ้น โดยช่วยให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้นและส่งผลให้มอร์ตาร์มีคุณสมบัติ ในการรับแรงอัดได้ดีขึ้นด้วย [6]

ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยอง โดยจะเห็นว่ามอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองจะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.49 ส่วนมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองร้อยละ 10, 20, 30, 40 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.50, 0.61, 0.64 และ 0.66 ตามลำดับ

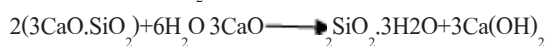


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและส่วนผสม

4.1.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

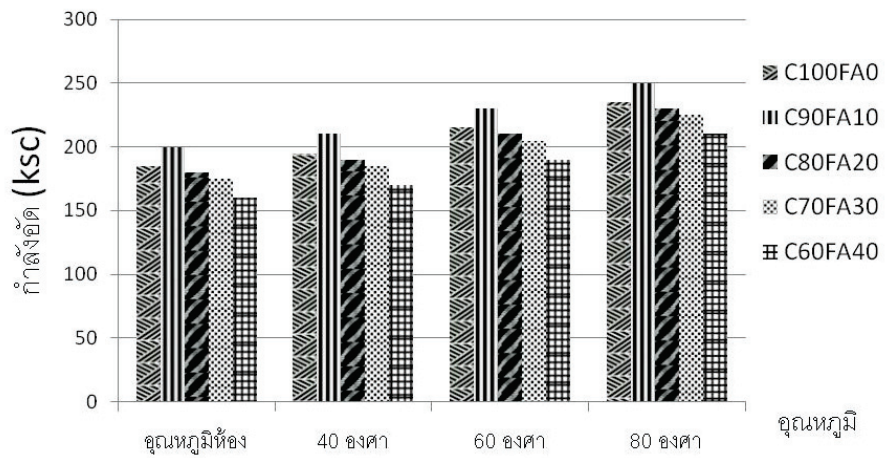
จากรูปที่ 5 ถึง 8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองกับมอร์ตาร์ ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองในสัดส่วน ร้อยละ 10 , 20 , 30 และ 40 โดยน้ำหนักและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นนำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง แชนน้ำ แชนในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแชนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 1 , 3 , 7 และ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ในทุกอุณหภูมิของการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าจะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันทั้งในกรณีของบ่มที่อุณหภูมิห้อง และกรณีของการบ่มแชนน้ำ นั่นคือ มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยระยองแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะมีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด รองลงมาเป็น มอร์ตาร์ที่ไม่ใช้เถ้าลอยระยองแทนที่ และมอร์ตาร์ที่ใช้ เถ้าลอยระยองแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของการบ่มที่ให้ค่ากำลัง รับแรงอัดสูงที่สุด คือ 80 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาผลอิทธิพลของสารละลายซัลเฟต พบว่า มอร์ตาร์ที่บ่มแชนในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีกำลังรับแรงอัดดีกว่ามอร์ตาร์ที่บ่มแชนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในทุกอุณหภูมิของการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าสำหรับสาเหตุของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยระยองแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดย

น้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเป็นเพราะว่าปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำหรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) นั้นจะให้ผลิตภัณฑ์ (Product) คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ดังแสดงในสมการ

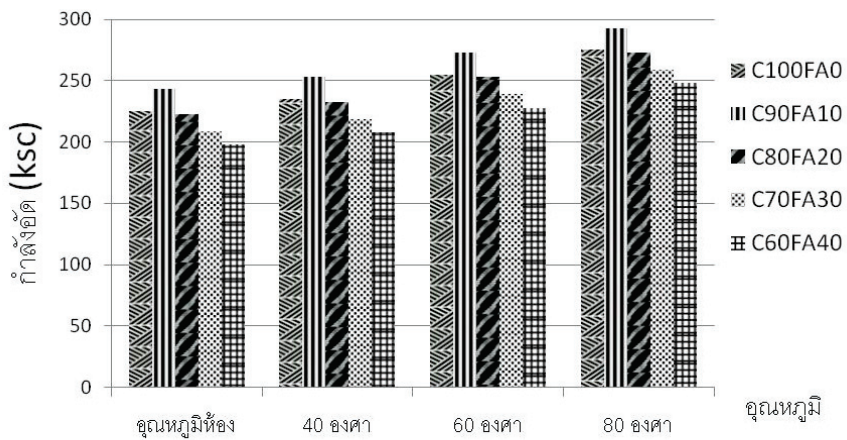


[7] และเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองในปริมาณที่เหมาะสม (จากผลการวิจัยคือร้อยละ 10) จะทำให้องค์ประกอบทางเคมีใน เถ้าลอยระยองทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้ผลิตภัณฑ์คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) มากขึ้น เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานให้ความแข็งแรงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้น [8] แต่ในขณะเดียวกัน หากมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองในปริมาณที่มากเกินไป (จากผลการวิจัยคือ มากกว่าร้อยละ 10) จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะลดลง ทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก [9] กับเถ้าลอยระยอง จึงส่งผลให้มีปริมาณเถ้าลอยระยองส่วนเกินเหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยา

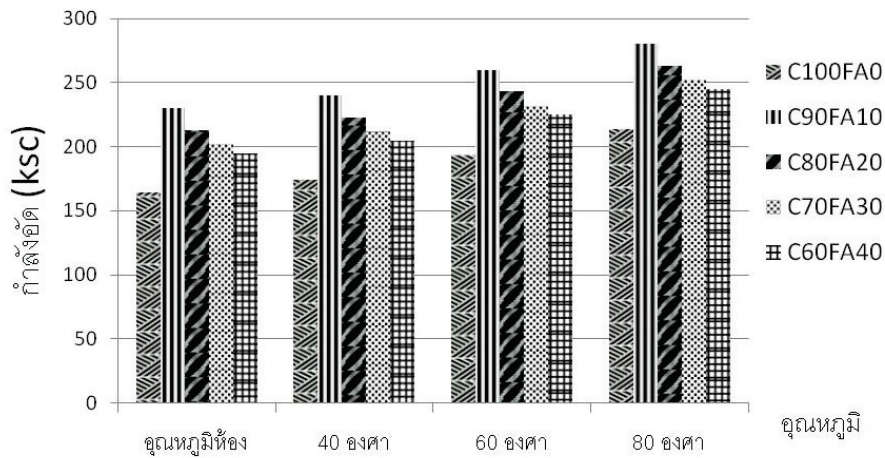
เป็นจำนวนมากส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ลดลง



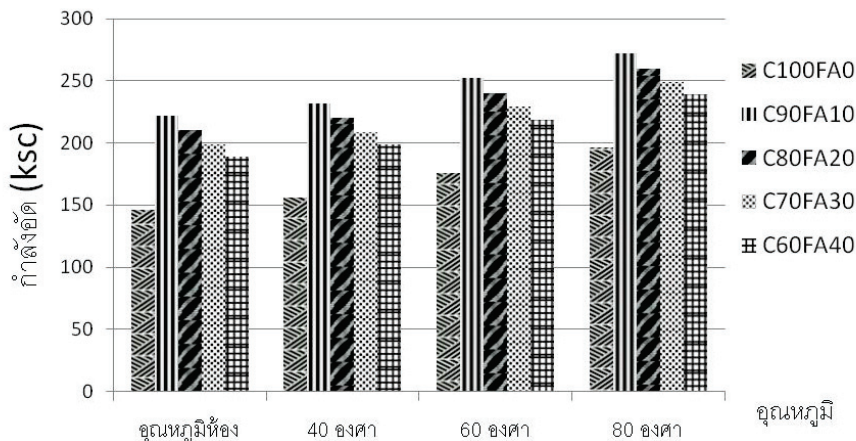
รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ผ่านการบ่มในอากาศเป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ผ่านการบ่มแช่น้ำเป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตเป็นเวลา 28 วัน



รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตเป็นเวลา 28 วัน

5. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัย สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยระยะของ ซึ่งมีลักษณะทรงกลมบิดเบี้ยวเล็กน้อย มีขนาดเล็กใหญ่ คละกัน และมีผิวที่ขรุขระ มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีขนาดอนุภาค เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้เกิดการ อุดแทรกกระหว่างช่องว่างของอนุภาคปูนซีเมนต์ได้ดีขึ้น ส่งผลให้การใช้เถ้าลอยระยะของแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ในปริมาณที่เหมาะสม (จากการวิจัยคือร้อยละ 10) จะช่วยพัฒนา มอร์ตาร์ให้สามารถรับแรงอัดได้ดีขึ้น

5.2 ในกรณีที่บ่มแช่มอร์ตาร์ที่อุณหภูมิห้องกับบ่มแช่ ในน้ำ พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยระยะของแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะมีกำลังรับแรง อัดสูงที่สุด ในทุกอุณหภูมิของการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า รongลงมาเป็นมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้า ลอยระยะของ และมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ระยะร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และ พบว่ากรณีบ่มแช่ในน้ำจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่ากรณี บ่มที่อุณหภูมิห้อง

5.3 ในกรณีที่บ่มแช่มอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต และแมกนีเซียมซิลเฟต พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยระยะของ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

จะมีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดในทุกอุณหภูมิของการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า รองลงมาเป็นมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และ ดีกว่าที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยของ และพบ

ว่ากรณีบ่มแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะมีกำลังรับแรงอัดดีกว่าบ่มแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทีมผู้ช่วยวิจัย ประกอบด้วยนางสาวณัฏฐา ยิ่งสุวรรณโชติ นายปรัชญา ชันไถ นายปณวัชร นิมวัฒนา และนางสาวสิริธร จิตารีย์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mehta PK. “Greening of The Concrete Industry for Sustainable Development”, ACI Concrete International, Vol. 24, No. 7, 2002, pp.23-28.
- [2] American Society for Testing and Materials, ASTM C778 Standard Specification for Standard Sand, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate, 2012.
- [3] American Society for Testing Materials, ASTM C 1012 : Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02 Philadelphia, PA, USA*, 2003.
- [4] American Society for Testing and Materials, ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate, 2012.
- [5] American Society for Testing and Materials, ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate, 2009.
- [6] Minnick LJ. Investigation Relation to the use of Fly Ash as a Pozzolanic Material as Admixture in Portland Cement Concrete; 1954.
- [7] Amoudi. O.S.B. Mechanisms of Sulfate in Plain and Blended Cement a Review. Proceeding of the International Seminar. University of Dundee. Scotland. UK.; 1999.
- [8] Wagner C. Sulfate Resistance of Blended Cements Containing Fly Ash and Rice Husk Ash. Senior Materials Scientist. Sydney. Australia; 2007.
- [9] Dulaijan AL, S.U., et al. Sulfate Resistance of Plain and Blended Cements Exposed to Varying Concentrations of Sodium Sulfate. *Cement & Concrete Composites* 25 : Article in Press; 2003.