กำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมในระบบวัสดุประสานสามชนิด

สำเริง รักซ้อน [1]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ถนนสามเสน ดุสิต กรุงเทพฯ 10300

และ ปริญญา จินดาประเสริฐ [2]

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

รับเมื่อ 28 มิถุนายน 2550 ตอบรับเมื่อ 19 มิถุนายน 2551

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาด (FA) และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (POA) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) แทนที่ด้วย FA และ POA ที่อัตราร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากใช้การแทนที่แบบทั่วไปแล้ว การศึกษาในครั้งนี้ยังได้ใช้วัสดุปอซโซลาน FA ผสมรวมกับวัสดุปอซโซลาน POA นำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ด้วยค่าคงที่เท่ากับ 0.5 ใช้สารลดน้ำพิเศษในทุกส่วนผสมเพื่อควบคุมค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 โดย FA และ POA มีปริมาณน้ำหนักค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก ทดสอบหาค่ากำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ ผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าร์ที่ผสม FA และ POA ให้ค่ากำลังอัดที่สูง กำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมวัสดุปอซโซลานในอัตราร้อยละ 10 และ 20 สูงกว่ามอร์ต้าร์ OPC ในทุกอายุการทดสอบ นอกจากนั้นการใช้วัสดุประสานสามชนิดรวมกันของ OPC, FA และ POA ให้ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่สูงและต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี

คำสำคัญ : กำลังอัด / คลอไรด์ / เถ้าถ่านหิน / เถ้าปาล์มน้ำมัน / มอร์ต้าร์

Corresponding author E-mail: rerng197@rmutp.ac.th

[1] *วิศวกรโยธา, นักวิจัย*

[2] *ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

Strength and Chloride Penetration of Mortar with Mixture Proportioning in Ternary Cementitious System

Sumrerng Rukzon [1]

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Samsen Road, Dusit, Bangkok 10300

and Prinya Chindaprasirt [2]

Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

Received 28 June 2007 ; accepted 19 June 2008

Abstract

This paper presents a study of the strength and chloride penetration of blended Portland cement mortar containing classified fly ash (FA) and ground palm oil fuel ash (POA). Ordinary Portland cement type I (OPC) was partially replaced with FA and POA at the dosage of 0–40% by weight of cementitious materials. In addition to normal replacement, a blend of different weight portion of FA and POA was also used to study the combined effect of the FA and POA. Sand–to–binder ratio of 2.75 by weight and water to binder ratio of 0.5 were used. Superplasticizer (SP) was incorporated in order to obtain mortar mixes with similar flow of 110 ± 5%. FA and POA with 1–3% by weight retained on a sieve No. 325 were used. Compressive strength and chloride penetration depth of mortars were determined. The results revealed that the use of FA and POA produced high strength mortars. The strength of mortar containing 10% and 20% of pozzolans and blended of pozzolans were higher than that of OPC mortar at all ages. In addition, the use of ternary blended of OPC, FA and POA also produced high strength mortars and excellent resistance to chloride penetration.

Keywords : Strength / Chloride / Fly Ash / Palm Oil Fuel Ash / Mortar

Corresponding author E-mail : rerng197@rmutp.ac.th

[1] *Civil Engineer, Researcher.*

[2] *Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

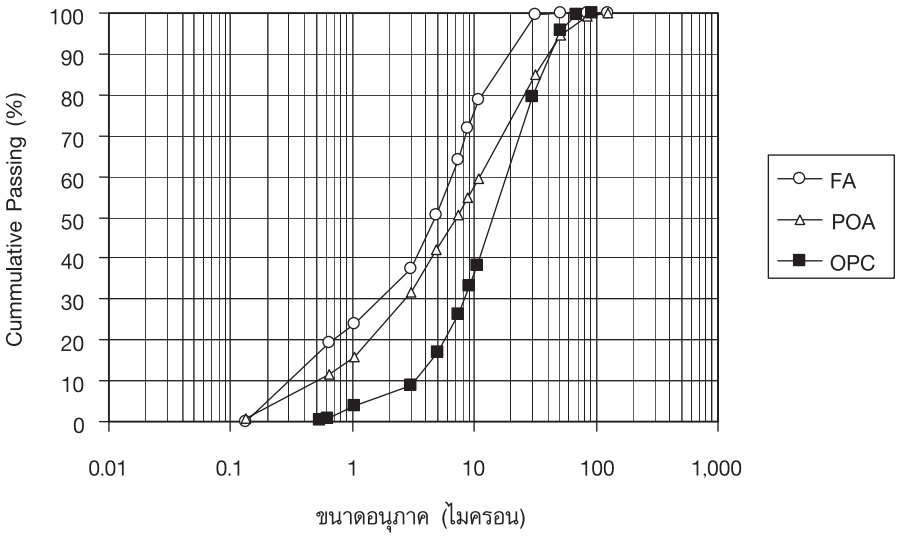
เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งในหลายชนิดและพบได้ในหลายประเทศทั่วโลก เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งใช้กะลาปาล์มและเส้นใยปาล์มเป็นเชื้อเพลิง โดยเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 800-1,000 °C [1] องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันคือซิลิกา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน [1] นอกจากเถ้าปาล์มน้ำมันแล้ว วัสดุปอซโซลานอีกชนิดหนึ่งที่เรารู้จักคือเถ้าถ่านหินซึ่งนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีต ปกติแล้วการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านความคงทน [1-3] ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลายชิ้นใช้วัสดุประสานสองชนิดรวมกันแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์ให้ดีขึ้นเนื่องจากผลของการเกื้อหนุนกันหรือเรียกว่า Synergic effects [1, 3] งานวิจัยของ Sumrerng Rukzon และ Prinya Chindaprasirt [3] รายงานว่าการใช้วัสดุประสานสามชนิดรวมกันของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินสามารถเพิ่มกำลังอัดของมอร์ต้าร์ได้ดี

พื้นที่สำหรับการทิ้งเถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัญหาใหญ่ของกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะเถ้าทิ้งดังกล่าวไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการใช้ประโยชน์โดยตรงของเถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานสองชนิดรวมกันแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดพื้นที่สำหรับการกำจัดทิ้ง ลดการใช้ปูนซีเมนต์ และลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตในโครงการก่อสร้าง งานวิจัยนี้นอกจากการใช้เถ้าถ่านหินหรือเถ้าปาล์มน้ำมันเพียงชนิดเดียวแทนที่ปูนซีเมนต์แล้ว ยังได้นำเถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุประสานสองชนิดรวมกันแทนที่ปูนซีเมนต์ เรียกว่าระบบการใช้วัสดุประสานสามชนิดรวมกันหรือ Ternary cementitious system (TCS) ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ หรือคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุดังกล่าวไม่ว่าจะเป็นด้านการรับกำลังอัดหรือการต้านทานคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ในระบบ TCS

2. การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้วิจัย

วัสดุปอซโซลานใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในทางภาคเหนือของประเทศไทย เถ้าปาล์มน้ำมันใช้จากโรงไฟฟ้าในทางภาคใต้ของประเทศไทย ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 วัสดุมวลละเอียดใช้เป็นทรายแม่น้ำมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 และโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.82 ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิด F (type-F superplasticizer, SP) สำหรับปรับค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ เถ้าถ่านหินนำมาแยกขนาดละเอียดเป็น FA มีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก เถ้าปาล์มน้ำมันนำมาบดละเอียดเป็น POA มีปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก ขนาดการกระจายตัวของวัสดุแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายอนุภาคของวัสดุปอซโซลานและ OPC

2.2 การเตรียมส่วนผสมของมอร์ต้าร์

OPC แทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานในอัตราร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากการแทนที่วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดในปูนซีเมนต์แล้ว ยังได้นำวัสดุปอซโซลานสองชนิดรวมกันในปริมาณที่แตกต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์รวมเป็นวัสดุประสานสามชนิดหรือระบบ TCS ใช้ทรายในอัตราส่วนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้คงที่เท่ากับ 0.5 ใช้ SP ปรับค่าการไหลแผ่ให้ได้เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ตัวอย่างมอร์ต้าร์เก็บในตู้ควบคุมที่อุณหภูมิเท่ากับ 23 °C หลังจากหล่อมอร์ต้าร์ 24 ชม. ถอดแบบและบ่มในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิเท่ากับ 23 °C จนได้อายุการทดสอบ ส่วนผสมมอร์ต้าร์ใช้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมมอร์ต้าร์

หมายเลขส่วนผสม	สัญลักษณ์	OPC	FA	POA	SP (%)
1	OPC	100	-	-	2.0
2	20FA	80	20	-	0.5
3	10FA10POA	80	10	10	0.7
4	20POA	80	-	20	2.1
5	40FA	60	40	-	0.2
6	20FA20POA	60	20	20	1.2
7	40POA	60	-	40	3.3
8	10FA	90	10	-	0.7
9	10POA	90	-	10	2.0
10	20FA10POA	70	20	10	1.1
11	15FA15POA	70	15	15	1.2
12	10FA20POA	70	10	20	1.3

2.3 การทดสอบกำลังอัด

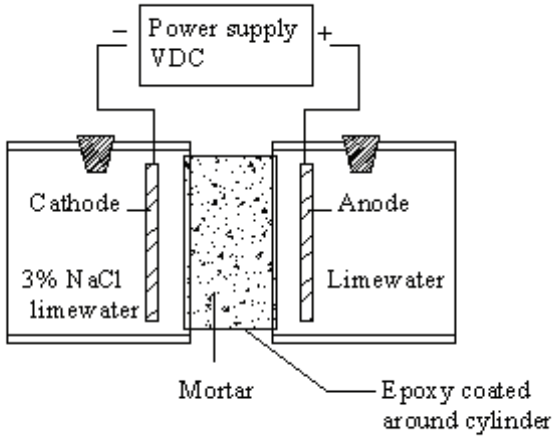
การทดสอบกำลังอัดใช้แบบหล่อมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาดเท่ากับ 50 × 50 × 50 มม. ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 [4] ค่ากำลังอัดคำนวณด้วยการใช้ตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างและหาค่าเฉลี่ย

2.4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

ใช้แบบหล่อมอร์ต้าร์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มม. สูงเท่ากับ 200 มม. ตามมาตรฐาน ASTM C39 [5] หลังจากหล่อมอร์ต้าร์ให้ถอดแบบใน 24 ชม. จากนั้นบ่มในน้ำสะอาดเป็นเวลา 27 วัน นำมาตัดที่กึ่งกลางให้มีความหนา 50 มม. (ใช้ด้านซ้ายและขวา) ตามมาตรฐาน ASTM C1202 [6] จะได้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ 2 ก้อน และนำไปเคลือบด้วยอีพอกซี (Epoxy coated) โดยรอบทรงกระบอก จากนั้นทิ้งไว้อีก 1 วัน นำไปทดสอบหาความลึกคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid migration test, RMT) และความลึกคลอไรด์แบบแช่ (Immersion test, IMT)

2.4.1 ความลึกคลอไรด์แบบเร่ง หรือ Rapid migration test (RMT)

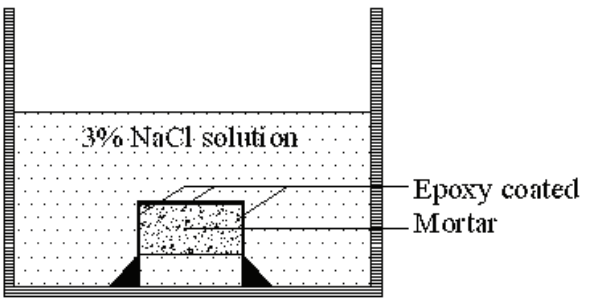
หลังการบ่มตัวอย่างที่อายุ 27 วัน ตัดตัวอย่างที่กึ่งกลางให้หนาเท่ากับ 50 มม. เหมือนในหัวข้อ 2.4 นำมาเคลือบด้วยอีพอกซีโดยรอบทรงกลม ทิ้งไว้อีก 1 วัน การทดสอบใช้ตามรูปที่ 2 ด้วยการประยุกต์วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [6] ในด้านขั้วลบหรือด้านแคโทด (Cathod side) ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3 ในน้ำปูนใส (ร้อยละ 3 NaCl in limewater) ส่วนด้านขั้วบวกหรือด้านแอโนด (Anode side) เป็นน้ำปูนใส (limewater) และทดสอบใช้แรงดันไฟฟ้าในสองขั้วเท่ากับ 30 โวลต์ (30 V DC) เป็นเวลา 8 ชม. เนื่องจากเป็นค่าแรงดันและระยะเวลาที่พอเหมาะซึ่งไม่ส่งผลต่อความร้อนในสารละลาย หากใช้ค่าแรงดันและระยะเวลาที่สูงกว่านี้ จะทำให้สารละลายเดือดและอุณหภูมิสูง จากนั้นหาความลึกคลอไรด์ด้วยการหักมอร์ต้าร์และฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 0.1 โมลลาร์ หรือ 0.1 M $AgNO_3$ [7] เพื่อตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์และวัดระยะความลึก สำหรับการวัดความลึก ใช้การวัดระยะแนวการแทรกซึมที่หน้าตัดมอร์ต้าร์ประมาณ 6 จุดและหาค่าเฉลี่ย การเลือกการทดสอบวิธีนี้เนื่องจากต้องการศึกษาเพื่อหาวิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและนำไปเทียบกับแบบแช่ ซึ่งเป็นการแช่แบบธรรมชาติ ทั้งนี้ เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาวิจัยในอนาคตต่อไป



รูปที่ 2 การทดสอบความลึกคลอไรด์แบบเร่ง (RMT)

2.4.2 ความลึกคลอไรด์แบบแช่ หรือ Immersion test (IMT)

การทดสอบ IMT ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3 การติดตั้งการทดสอบใช้ตามรูปที่ 3 คล้ายกับหลายงานวิจัยที่ผ่านมา [1, 8] หลังการบ่มตัวอย่างที่อายุ 27 วัน ตัดตัวอย่างที่กึ่งกลางให้หนาเท่ากับ 50 มม. เหมือนในหัวข้อ 2.4 นำมาเคลือบด้วยอีพอกซีโดยรอบทรงกลมและเหลือไว้เพียงด้านเดียวเพื่อให้มีการแทรกซึม ทิ้งไว้อีก 1 วัน นำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 30 วัน ใช้ความสูงจากผิวของสารละลายถึงด้านบนตัวอย่างมอร์ต้าร์ประมาณ 10 ซม. จากนั้นหาความลึกคลอไรด์ด้วยการหักมอร์ต้าร์และฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 0.1 โมลลาร์ หรือ 0.1 M $AgNO_3$ [7] เพื่อตรวจสอบการแทรกซึมคลอไรด์และวัดระยะความลึก สำหรับการวัดความลึก ใช้การวัดระยะแนวการแทรกซึมที่หน้าตัดมอร์ต้าร์ประมาณ 6 จุดและหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3 การทดสอบความลึกคลอไรด์แบบแช่ธรรมชาติ (IMT)

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

ความละเอียดของ OPC และวัสดุปอซโซลานแสดงไว้ในตารางที่ 2 ความละเอียดของ OPC โดยวิธีของเบลน (Blaine fineness) มีค่าเท่ากับ 3,600 ตร.ซม./ก. ความละเอียดของ FA และ POA มีค่าเท่ากับ 5700 และ 11,800 ตร.ซม./ก. ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะของ OPC, FA และ POA เท่ากับ 3.14, 2.45 และ 2.25 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ OPC, FA และ POA เท่ากับ 15, 4.9 และ 7.2 ไมครอน ตามลำดับ องค์ประกอบเคมีของวัสดุประสานแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าเถ้าถ่านหิน FA จากแม่เมาะที่ใช้เป็นชนิด F (Class F) มีผลรวมของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ เท่ากับร้อยละ 74 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 มีค่า SO_3 เท่ากับร้อยละ 2.2 และมีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 2.5 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM C618 [9] ส่วน POA มีองค์ประกอบเคมี SiO_2 เท่ากับร้อยละ 63.6 มีองค์ประกอบเคมีของ CaO และ K_2O เท่ากับร้อยละ 7.6 และ 6.9 ตามลำดับ ส่วน LOI มีเท่ากับร้อยละ 9.6 ซึ่งไม่สูงมากนักเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม และผลรวมของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ เท่ากับร้อยละ 66.6 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 70 เพียงเล็กน้อยและจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C618 [9]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติกายภาพของวัสดุ

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	ปริมาณค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ร้อยละ)	ความถ่วงจำเพาะ (ก./ลบ.ซม.)	ความละเอียด (ตร.ซม./ก.)
OPC	15.0	-	3.14	3,600
FA	4.9	1-3	2.45	5,700
POA	7.9	1-3	2.25	11,800

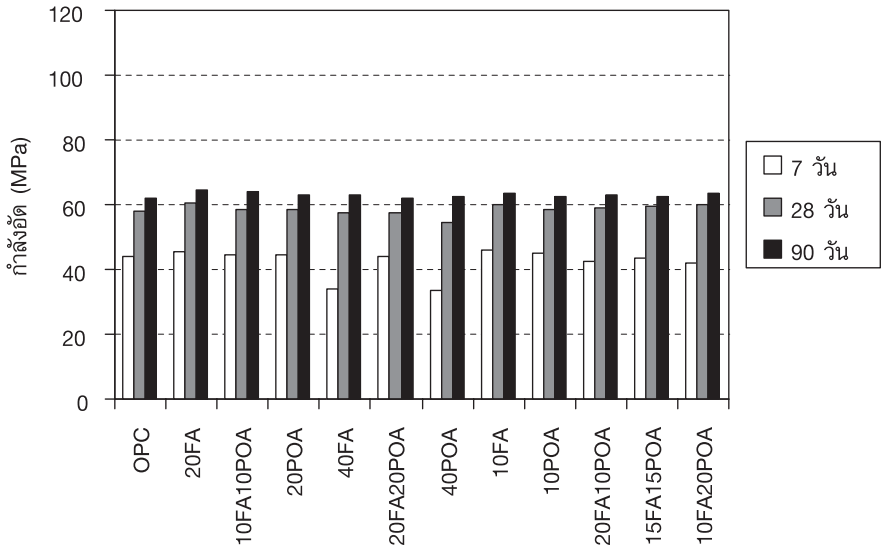
ตารางที่ 3 องค์ประกอบเคมีของวัสดุ

ออกไซด์	OPC	POA	FA
SiO_2	20.5	63.6	41.0
Al_2O_3	4.5	1.5	21.5
Fe_2O_3	3.4	1.5	11.5
CaO	65.4	7.6	14.4
MgO	1.3	3.9	3.3
Na_2O	0.2	0.1	1.1
K_2O	0.4	6.9	2.6
SO_3	2.7	0.2	2.2
LOI	0.9	9.6	2.5
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	-	66.6	74.0

3.2 กำลังอัด

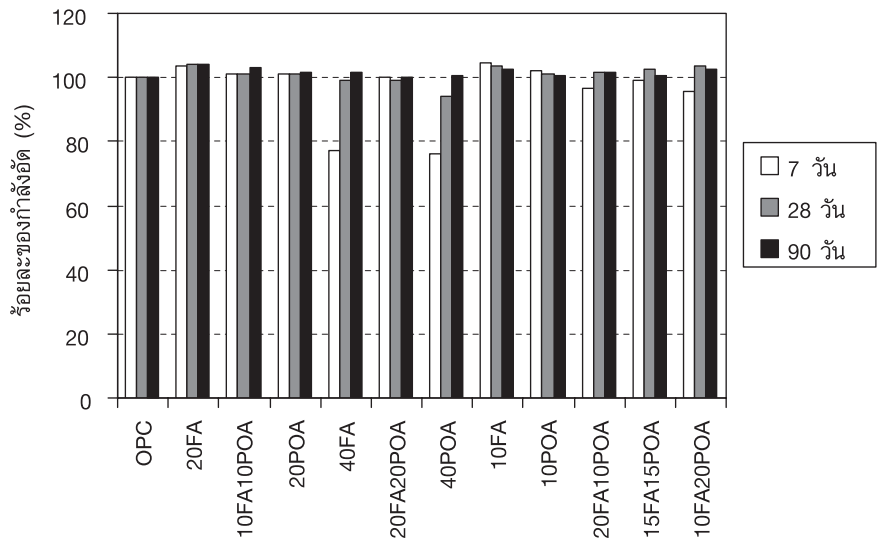
รูปที่ 4 เป็นผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ในแต่ละส่วนผสมซึ่งพบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมวัสดุปอซโซลานในอัตราร้อยละ 10 และ 20 มีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์ OPC ทุกอายุการทดสอบ

ความละเอียดของ FA สามารถกระจายตัวและเข้าไปแทรกตัวในรูพรุนของเพสต์ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นและเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลาน [2, 10] การใช้ POA ในมอร์ต้าร์ส่งผลให้เกิดการอัดตัวในเพสต์และทำให้มอร์ต้าร์มีความทึบแน่นขึ้น เนื่องจากความละเอียดของ POA และเนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงของ POA ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่มากขึ้น [1] การเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานทั้ง FA และ POA ในอัตราร้อยละ 40 ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลงในอายุต้นของมอร์ต้าร์ อย่างไรก็ตาม กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 90 วันสูงกว่ามอร์ต้าร์ OPC แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นช้าในอายุต้น และกำลังอัดของมอร์ต้าร์สูงขึ้นเมื่ออายุทดสอบสูงขึ้นที่ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4 ผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าการใช้ FA และ POA เกิดปฏิกิริยาได้มากและเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานเมื่ออายุเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 กำลังอัดของมอร์ต้าร์

รูปที่ 5 เป็นค่าร้อยละกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซลานสำหรับการใช้วัสดุปอซโซลานในระบบ TCS พบว่าค่าดัชนีกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 7 วัน มีค่าระหว่างร้อยละ 95-101 ของมอร์ต้าร์ OPC ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ค่าดัชนีกำลังอัดของมอร์ต้าร์อยู่ระหว่างร้อยละ 99-103 และร้อยละ 100-103 ของมอร์ต้าร์ OPC ตามลำดับ ผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าการแทนที่ในอัตราร้อยละ 40 ด้วยระบบ TCS พัฒนากำลังอัดในอายุตอนต้นของมอร์ต้าร์เมื่อเทียบกับการใช้วัสดุปอซโซลานเพียงชนิดเดียวแทนที่ปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เป็นผลของการเกื้อหนุนกันของวัสดุประสานที่ใช้ในการทดสอบในระบบ TCS [3, 8, 11] ส่วนผลของปริมาณ SP ของ POA พบว่าสูงกว่า FA เล็กน้อย เนื่องจากการบดให้ POA มีความละเอียดที่สูงส่งผลให้ความพรุนลดลงตามไปด้วย

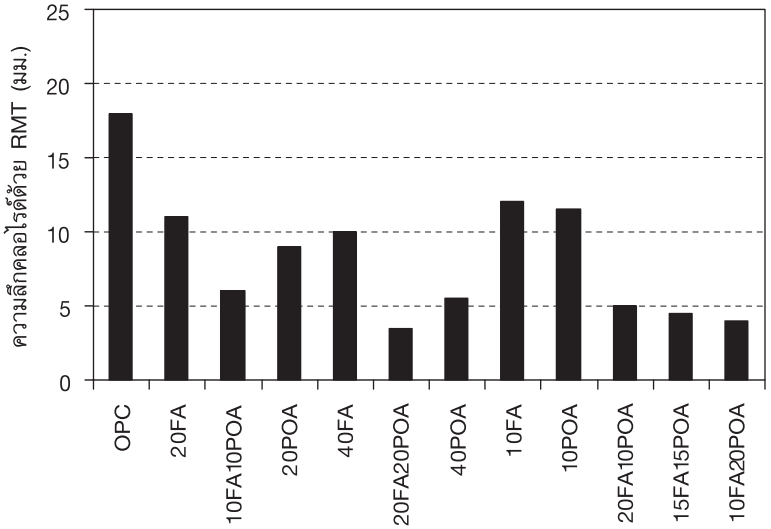


รูปที่ 5 ร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์

3.3 การแทรกซึมคลอไรด์

3.3.1 ความลึกคลอไรด์ด้วย RMT

ผลการทดสอบความลึกคลอไรด์ด้วย RMT แสดงในรูปที่ 6 ผลทดสอบพบว่าเมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ส่งผลให้ความลึกคลอไรด์ลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ OPC การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย FA ในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 40 มีความลึกคลอไรด์เท่ากับ 12, 11 และ 10 มม. ตามลำดับ ขณะที่ความลึกคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ OPC มีค่าเท่ากับ 18 มม. ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย POA ในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 40 มีความลึกคลอไรด์เท่ากับ 11.5, 9 และ 5.5 มม. ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ FA และ POA สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์ ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และลดการซึมผ่านในมอร์ต้าร์ การทดสอบพบว่า POA ต้านทานคลอไรด์ได้ดี ตามด้วย FA และ OPC ตามลำดับ

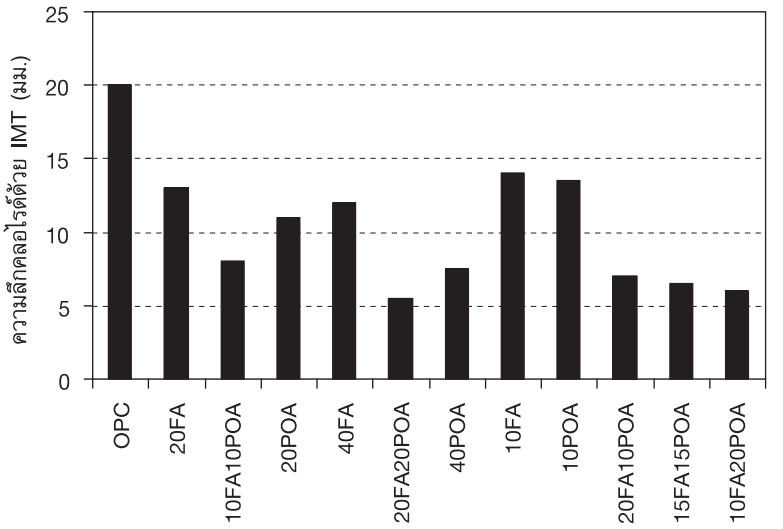


รูปที่ 6 ความลึกคลอไรด์ด้วย RMT

สำหรับการใช้วัสดุประสานสามชนิดรวมกันในมอร์ต้าร์พบว่าสามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดี ความลึกคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ 10FA10POA, 20FA20POA, 20FA10POA, 15FA15POA และ 10FA20POA คือ 6.0, 3.5, 5.0, 4.5 และ 4.0 มม. ตามลำดับ ขณะที่ความลึกคลอไรด์ของมอรต้าร์ OPC มีค่าเท่ากับ 18 มม. ผลการทดสอบสนับสนุนเหตุผลจากการเกื้อหนุนกันของวัสดุปอซโซลาน ของ FA และ POA เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังอัดที่ให้ค่าที่สูงเมื่อใช้วัสดุปอซโซลานสองชนิดรวมกัน [3, 8, 11] ผลของอนุภาคที่เล็กหรือความละเอียดของเถ้าถ่านหินและเถ้าปาล์มน้ำมันส่งผลของการเร่งให้เกิดปฏิกิริยารวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มเติมจากไฮเดรชันทำให้มอร์ต้าร์มีความทึบแน่นอาจเนื่องจากผลผลิตของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรทในซีเมนต์เพสต์ [12] จึงทำให้มอร์ต้าร์มีกำลังอัดที่สูงและต้านทานคลอไรด์ได้ดี โดยเฉพาะเมื่อใช้ FA รวมกับ POA แทนที่ปูนซีเมนต์

3.3.2 ความลึกคลอไรด์ด้วย IMT

ผลทดสอบความลึกคลอไรด์ด้วย IMT แสดงในรูปที่ 7 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลทดสอบ RMT แตกต่างกันเพียงค่าที่ได้จากการทดสอบเท่านั้น และพบว่ามอร์ต้าร์ผสมด้วย POA หรือการใช้ FA รวมกับ POA ต้านทานคลอไรด์ได้ดี การทดสอบด้วย IMT เป็นการวัดค่าความลึกคลอไรด์โดยตรงแบบธรรมชาติด้วยการแช่ตัวอย่างทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ขณะที่การทดสอบ RMT เป็นวิธีการแบบเร่งผลทดสอบ อย่างไรก็ตามผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าการทดสอบ RMT สามารถใช้เป็นวิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ได้ และประหยัดเวลาในการทดสอบ



รูปที่ 7 ความลึกคลอไรด์ด้วย IMT

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่ามอร์ต้าร์ผสม FA และ POA ให้ค่ากำลังอัดที่สูง กำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมด้วยวัสดุปอซโซลานทั้งแบบชนิดเดียวและสองชนิดรวมกันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ OPC การใช้วัสดุประสานสามชนิดรวมกันของ OPC, FA และ POA ให้ค่ากำลังอัดที่สูงและต้านทานคลอไรด์ได้ดี การทดสอบ RMT สามารถใช้เป็นวิธีการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งได้ และประหยัดเวลาในการทดสอบ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนทุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ได้รับสนับสนุนทุนวิจัยและห้องปฏิบัติการจากศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมสาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

6. เอกสารอ้างอิง

1. Chindaprasirt, P., Rukzon, S., and Sirivivatnanon, V., 2008, "Resistance to Chloride Penetration of Blended Portland Cement Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash, Rice Husk Ash and Fly Ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 5, pp. 932-938.

2. Poon, C.S., Wong, Y.L., and Lam, L., 1997, "The Influence of Different Curing Conditions on the Pore Structure and Related Properties of Fly Ash Cement Pastes and Mortars," *Construction and Building Materials*, Vol. 11, No. 78, pp. 383-393.

3. Rukzon, S. and Chindaprasirt, P., 2006, "Strength of Ternary Blended Cement Mortar Containing Portland Cement, Rice Husk Ash and Fly Ash", *Journal of Engineering Institute of Thailand*, Vol. 17, No. 2, pp. 33-38.

4. ASTM C109/C109M-99, 2001, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in or [50 mm] Cube specimens)*, Annual Book of ASTM Standards 04.01, pp. 83-88.

5. ASTM C39, 2001, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM C39M-01*, Annual Book of ASTM Standards 04.02, pp. 18-22.

6. ASTM C 1202, 2001, *Standard Test Method*

for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM C1202-97, Annual Book of ASTM Standards 04.02, pp. 646-651.

7. Otsuki, N., Nagataki, S., and Nakashita, K., 1993, "Evaluation of $AgNO_3$ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials", *Construction and Building Materials*, Vol. 7, No. 4, pp. 195-201.

8. Chindaprasirt, P., Rukzon, S., and Sirivivatnanon, V., 2008, "Effect of Carbon Dioxide on Chloride Penetration and Chloride Ion Diffusion Coefficient of Blended Portland Cement Mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 8, pp. 1701-1707.

9. ASTM C618-00, 2001, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*, Annual Book of ASTM Standards 04.02, pp. 310-313.

10. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2005. "Effect of Fly ash Fineness on Compressive Strength and Pore size of Blended Cement Paste", *Cement and Concrete Composite*, Vol. 27, No. 4, pp. 425-428.

11. Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G., and Moraes, R., 2003, "Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High-performance Concrete", *Cement and Concrete Composite*, Vol. 25, No. 1, pp. 69-76.

12. Neville, A.M., 1995, Properties of Concrete, 4^{th}, and Final Edition, Longman Group Limited, Malaysia.