บทความวิจัย

อิทธิพลของซีโอไลต์ธรรมชาติที่มีต่อการหดตัวแบบแห้งและกำลังอัดของมอร์ต้าร์มวลรวมหินทรายบด

Influence of Natural Zeolite on Drying Shrinkage and Compressive Strength of Crushed Sandstone Aggregate Mortar

ชัยณรงค์ จันทร์มณี[1] และดนุพล ตันนโยภาส[2*]

Chainarong Chanmanee [1] and Danupon Tonnayopas[2*]

บทคัดย่อ

ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ต้าร์ใส่มวลรวมหินทรายบดผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยอัตราส่วนผสมร้อยละ 0 10 20 และ 30 บ่มด้วยความชื้นที่ 7 28 56 90 วัน และไม่บ่ม มวลรวมหินทรายบดและซีโอไลต์ธรรมชาตินำมาทดสอบการกระจายขนาด โมดูลัสความละเอียด พื้นที่ผิวจำเพาะ และความถ่วงจำเพาะ ส่วนก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์มวลรวมหินทรายบดผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้มีการประเมินค่า การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นรวม การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรและหลังบ่ม ความต้านทานไฟฟ้า ความแข็งแบบชอร์ และกำลังอัด ผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าร์มวลรวมหินทรายบดผสมซีโอไลต์ธรรมชาติไม่มีการหดตัวแบบแห้งและผสมซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 90 วัน มีกำลังอัดสูงสุดถึง 56.54 เมกะพาสคัล หรือกำลังเปรียบเทียบได้ถึง 129

คำสำคัญ : ซีโอไลต์ธรรมชาติ มวลรวมหินทรายบด มอร์ต้าร์ กำลังอัด การหดตัวแบบแห้ง

Abstract

The physical and mechanical property of mortar containing crushed sandstone aggregate mortar (SAM) blended natural zeolite (NZ) was investigated. Portland cement, Type I was replaced in the proportion of 0%, 10%, 20% and 30 wt.% NZ and uncured and cured with moisture for 7, 28, 56 and 90 days. Aggregate characterizations of sandstone and NZ have been examined in grain size distribution, fineness modulus, specific surface area and specific gravity. Moreover, water absorption, bulk density, volumetric drying shrinkage and after curing, electrical resistance, Shore hardness and compressive strength of SAM blended NZ was determined. Experimental results revealed SAM blended NZ having non-drying shrinkage and containg 10%NZ at 90-day given highest compressive strength of 56.54 MPa or relative strength of 129.

Keywords : Natural Zeolite, Crushed Sandstone Aggregate, Mortar, Compressive Strength, Drying Shrinkage

[1] นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ 90112

[2] รศ.ดร., ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ 90112

* Corresponding author: E-mail: danupon.t@psu.ac.th โทรศัพท์/โทรสาร 074 558 834 ต่อ 7318

บทนำ

ปัจจุบันในงานก่อสร้างอาคารทั่วไป ส่วนใหญ่ที่พบเห็นมักนิยมก่อสร้างจากการใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักขององค์ประกอบอาคารนั้นๆ เช่น ฐานราก คาน เสา และพื้นเป็นต้น แสดงถึงความนิยมในการเลือกใช้วัสดุคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หิน ทราย น้ำ และสารผสมเพิ่ม) และเหล็ก (เหล็กเส้นกลม เหล็กเส้นข้ออ้อย และเหล็กรูปพรรณ) มากที่สุด ดังนั้นปูนซีเมนต์ซึ่งทั่วโลกผลิต 1600 ล้านตันต่อปี [1] จึงเป็นวัตถุดิบหลักของคอนกรีตและมีความต้องการมากขึ้นโดยปริยาย ซึ่งกระบวนผลิตปูนซีเมนต์นั้นได้ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดร้อยละ 7 [2] ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง ด้วยการเติมแร่ผสมเพิ่ม (mineral admixture) ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบซิลิกาและอะลูมินาที่สำคัญของสารปอซโซลานอยู่ปริมาณมาก ผสมกับปูนซีเมนต์ในมอร์ต้าร์และคอนกรีตทำให้สมบัติดีขึ้น [3, 4, 5] ต้านทานปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาและซัลเฟต [6] โดยเฉพาะซีโอไลต์ในหินเถ้าภูเขาไฟ [7] ทำให้พัฒนาไฮเดรชันช่วงต้น [8, 9] ผลิตคอนกรีตพรุน [10] ป้องกันเชื้อรา [11] และแบคทีเรีย [12] อันเป็นแนวทางช่วยลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทวีความรุนแรงมากขึ้นทุกวัน นอกจากนี้การขาดแคลนแหล่งทรายธรรมชาติเพื่อใช้ในการก่อสร้างบางพื้นที่ มีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนั้นการศึกษาหินทรายมาย่อยใช้เป็นทรายหล่อคอนกรีตให้กำลังได้ดี [13] อันเป็นแนวทางลดปัญหาการขาดแคลนดังกล่าวในอนาคตได้อีกทางหนึ่ง

วิธีการ วัสดุและอุปกรณ์

ลักษณะและการเตรียมวัตถุดิบ

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ซีโอไลต์ผลิตขายในท้องตลาด และหินทรายจากเขาหลังโรงเรียน มอ.วิทยานุสรณ์ (ภาพที่ 1 ก) บดให้ได้ขนาดตามที่ ASTM C128 กำหนด โดยใช้เครื่องบดปากงับ (jaw crusher) และเครื่องบดปากกรวย (cone crusher) คัดขนาดด้วยตะแกรง 30 50 100 เมช และถาดรอง มวลรวมคัดได้ไปอบแห้ง (ภาพที่ 1 ข) ส่วนซีโอไลต์ธรรมชาติมีขนาดละเอียด (325 เมช) ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 1 ค) ผลวิเคราะห์เป็น แร่ไคลนอบทิโลไลต์ (clinoptilolite) มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ70.12 รองลงมาคือ อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 21.89 และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 1.77 รวมได้ 93.25 (ตารางที่ 1) อันเป็นสารประกอบสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (ASTM C612) และเทียบเคียงได้เถ้าลอยในชั้น F ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างซีโอไลต์ธรรมชาติละเอียดกว่า 45 ไมครอน มีค่า 8.491 ตารางเมตร/กรัม และความพรุน 22.28 ตารางเมตร/กรัม เป็นลักษณะวัสดุที่เกื้อกูลให้มีโอกาสการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูงตามไปด้วย

ภาพที่ 1 (ก) ก้อนหินทรายทดสอบแรงกดจุด (ข) ขนาดของมวลรวมหินทรายที่ใช้ และ (ค) ผงซีโอไลต์

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)	
	ซีโอไลต์ธรรมชาติ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
SiO_2	70.12	21.30
Al_2O_3	21.89	4.96
Fe_2O_3	1.77	3.10
TiO_2	1.24	-
K_2O	0.94	0.50
SO_3	0.46	2.72
CaO	0.16	66.61
LOI	3.42	0.74
S.G.	1.80	3.15

การออกแบบส่วนผสมมอร์ต้าร์

การหล่อก้อนตัวอย่างทดสอบใช้เบ้าโลหะทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มม. ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ 0.4 ตลอดการศึกษา ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ (ตารางที่ 2) ผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องบดลูกกลิ้ง หล่อมอร์ต้าร์แต่ละอัตราส่วนจำนวน 3 ก้อน รวม 12 ก้อนต่ออายุบ่มเดียว กำหนดบ่มแบบความชื้นไว้ 4 ช่วง เป็นระยะเวลา 7 28 56 และ 90 วัน และไม่บ่ม รวมตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 72 ก้อน

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้ศึกษา

ชนิดวัสดุ	อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			
	0	10	20	30
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	250	225	200	175
ซีโอไลต์ธรรมชาติ	0	25	50	75
มวลรวมละเอียดหินทราย	492	492	492	492
น้ำ	100	100	100	100

วิธีการทดสอบ

ทดสอบแรงกดจุด (point load test) ของหินทราย เวลาก่อตัวของเพสต์ด้วยเข็มไวแคตตามวิธี ASTM C191-01 หลังครบกำหนดบ่มนำมาเช็ดให้ผิวแห้งและชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของก้อนตัวอย่าง เพื่อคำนวณความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำ วัดความแข็งแบบชอร์ (ค่ากระดอน) ด้วยเครื่อง Hardness Tester รุ่น EQUO TIP ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะด้วยเครื่อง Megohmmeter รุ่น CA 6525 และตัวอย่างอีกส่วนไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (70-80%) วัดการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตร ทดสอบกำลังอัดตาม ASTM C 192 ด้วยเครื่องมีกำลังสูงสุดที่ 272×10^3 กก. และให้อัตราการกดได้สม่ำเสมอในช่วง 85.8 – 208.2 กก./ตร.ซม./นาที

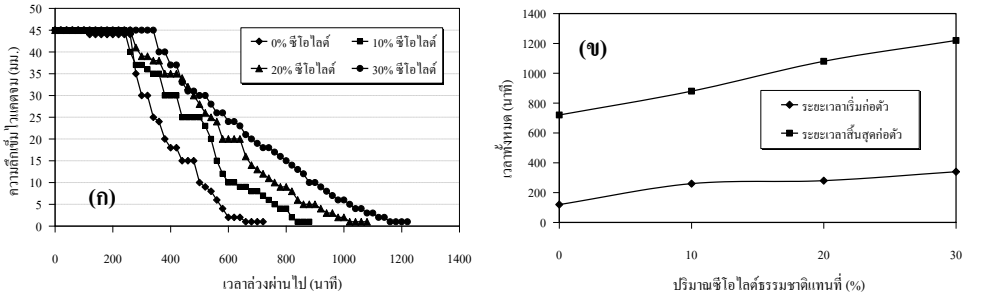
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

สมบัติของหินทรายและมวลรวมของหินทรายบด

ค่ากำลังแรงกดจุดของหินทราย มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.56±1.03 เมกะพาสคัล ซึ่งตามการจำแนกของ ISRM (1985) จัดอยู่ในหินกำลังอัดสูง ความถ่วงจำเพาะแห้ง 2.30 และการดูดซึมน้ำร้อยละ 3.93 จัดเป็นหินดูดซึมน้ำค่อนข้างสูง ผลการวิเคราะห์ขนาดหินทรายบดพบว่าที่ขนาด 0.60 0.3 0.15 มิลลิเมตร มีการกระจายตัวเท่ากับร้อยละ 71.54 30.28 และ 11.38 ตามลำดับ นำมาคละขนาดได้ดี ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness of modulus, F.M.) เท่ากับร้อยละ 2.51 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 ใช้น้ำหล่อไม่มาก

เวลาก่อตัวของเพสต์

พฤติกรรมเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ก่อตัวเร็วที่สุดคือ เริ่มต้นที่ 120 นาที และสิ้นสุดที่ 720 นาที และเพสต์เติมซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 30 ก่อตัวนานที่สุดคือ เริ่มต้นที่ 340 นาที และสิ้นสุดที่ 1,220 นาที (ภาพที่ 2 ก) การผสมซีโอไลต์ธรรมชาติมีผลทำให้เพสต์มีระยะเวลาเริ่มต้นจนสิ้นสุดก่อตัวนานขึ้นร้อยละ 46 (ภาพที่ 2 ข)



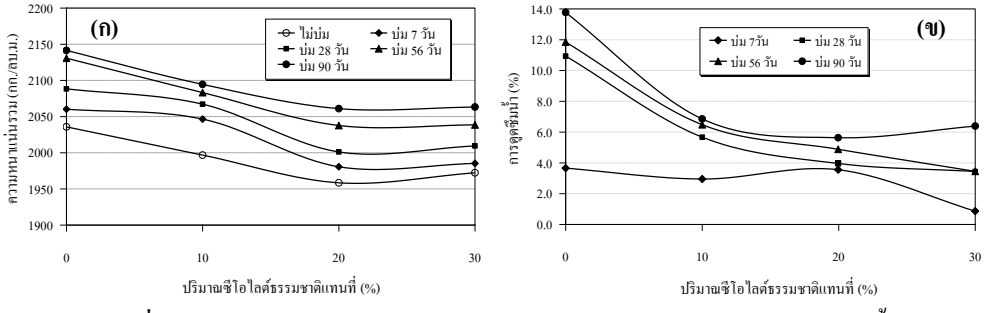
ภาพที่ 2 (ก) พฤติกรรมการก่อตัวของเพสต์ และ (ข) ระยะเวลาการก่อตัว

ความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์

ความหนาแน่นรวมของตัวอย่างมอร์ต้าร์ไม่บ่มและบ่มเป็นเวลา 7 28 56 และ 90 วัน มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนซีโอไลต์ธรรมชาติ (ภาพที่ 3 (ก) โดยค่าสูงสุดประมาณ 2,141 กก./ลบ.ม. ที่ไม่เติมซีโอไลต์ธรรมชาติบ่ม 90 วัน และค่าความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์ทดสอบต่ำสุดประมาณ 1,958 กก./ลบ.ม. ที่ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ร้อยละ 20 ไม่บ่ม หรือปริมาณซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่เพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นรวมลดลงประมาณร้อยละ 3-9 และในทางกลับกันเวลาบ่มนานขึ้นทำให้ความหนาแน่นรวมของมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 3-5

การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของตัวอย่างมอร์ต้าร์มวลรวมหินทรายผสมซีโอไลต์ธรรมชาติที่อายุบ่ม 7 28 56 และ 90 วัน (ภาพที่ 3 ข) พบว่าค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดเท่ากับร้อยละ 13.77 ที่ไม่เติมซีโอไลต์ธรรมชาติ บ่มนาน 90 วัน และค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 0.86 ที่เติมซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ร้อยละ 30 อายุบ่ม 7 วัน พบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซีโอไลต์ธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นไปตามอายุบ่มประมาณร้อยละ 2-10 (ภาพที่ 3 ข) สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวม อันเนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของซีโอไลต์ธรรมชาติน้อยกว่าของปูนซีเมนต์



ภาพที่ 3 สมบัติมอร์ต้าร์หินทรายบด (ก) ความหนาแน่นรวม และ (ข) การดูดซึมน้ำ

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

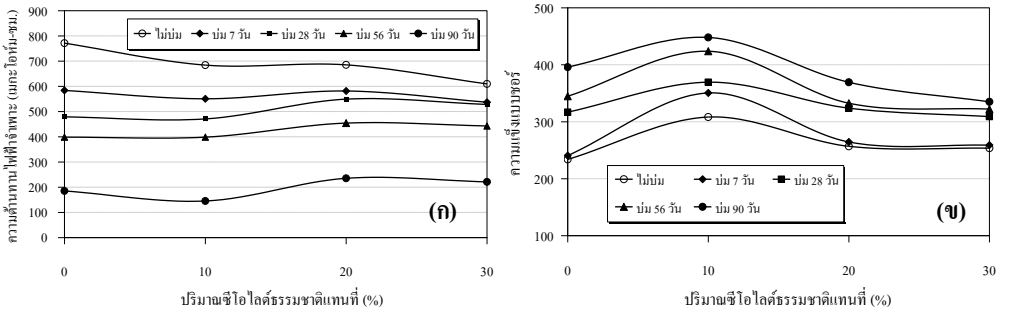
ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 771.17 เมกะโอห์ม-ซม. ที่ไม่เติมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่ไม่บ่ม และค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ 145.29 เมกะโอห์ม-ซม.ที่ปริมาณซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ร้อยละ 10 บ่ม 90 วัน (ภาพที่ 4 ก) พบว่าเมื่อแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นแนวโน้มค่าความต้านทานจะมีค่าลดลงตามอายุบ่มประมาณร้อยละ 8-40 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ นั้นมีค่าความต้านทานสูงเมื่อไม่บ่ม ส่วนที่อายุบ่มความชื้น 7 28 56 และ 90 วัน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวมและค่าการดูดซึมน้ำ

ความแข็งแบบชอร์

ค่าความแข็งแบบชอร์สูงสุดเท่ากับ 462.80 ของมอร์ต้าร์ที่แทนด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 10 ที่อายุบ่ม 56 วัน และค่าความแข็งแบบชอร์ต่ำสุดที่อายุบ่ม 7 วัน ที่ไม่เติมซีโอไลต์ธรรมชาติ เท่ากับ 217.80 ค่าความแข็งกระดอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามส่วนผสมซีโอไลต์ธรรมชาติที่เพิ่มประมาณร้อยละ10-33 และเมื่ออายุบ่มมากขึ้นความแข็งแบบชอร์เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10-70 มีความหมายเป็นนัยว่าซีโอไลต์ธรรมชาติมีผลทำให้เนื้อมอร์ต้าร์ทดลองมีการประสานตัวกันดีขึ้น (ภาพที่ 4 ข) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวมและค่าการดูดซึมน้ำ

กำลังอัด

กำลังอัดของมอร์ต้าร์ทดสอบให้กำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 17.67 เมกะพาสคัล ที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 30 ที่ไม่บ่ม ซึ่งที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 10 ทุกอายุบ่มให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมประมาณร้อยละ 25-43 โดยเฉพาะอายุ 90 วัน ค่าสูงสุด 56.54 เมกะพาสคัล (ภาพที่ 5 ก) ใกล้เคียงกับผลศึกษาของ Uzal and Turanli [3] จัดเป็นคอนกรีตประเภทกำลังสูง (> 40 เมกะพาสคัล) ตามเกณฑ์ ASTM C109/C109M-02 มอร์ต้าร์ทุก

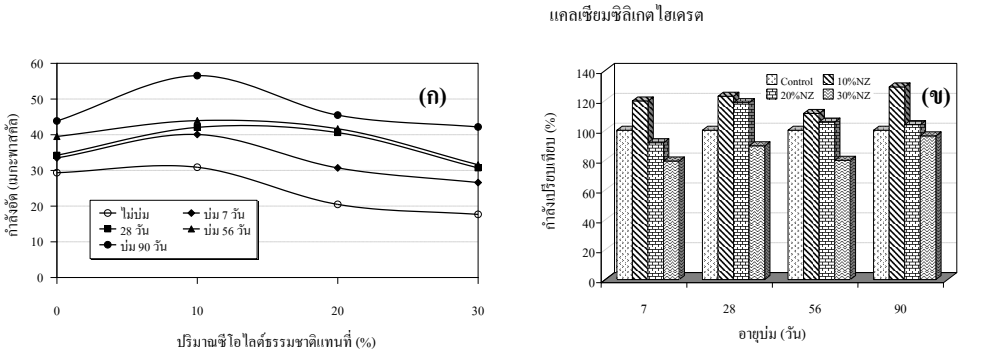


ภาพที่ 4 สมบัติมอร์ต้าร์หินทรายบด (ก) ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ และ (ข) ความแข็งแบบชอร์

สูตรมีค่ากำลังเกินร้อยละ 75 ทุกอายุบ่ม (ภาพที่ 5 ข) สาเหตุมาจากหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังเหลือแคลเซียมออกไซด์จึงทำปฏิกิริยาต่อกับซิลิกาอิสระในซีโอไลต์ จึงพัฒนากำลังอัดต่อเนื่องมา ดังสมการข้างล่าง

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3(CaO.H_2O) \quad \text{..... (1)}$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + CaO.H_2O \quad \text{..... (2)}$$



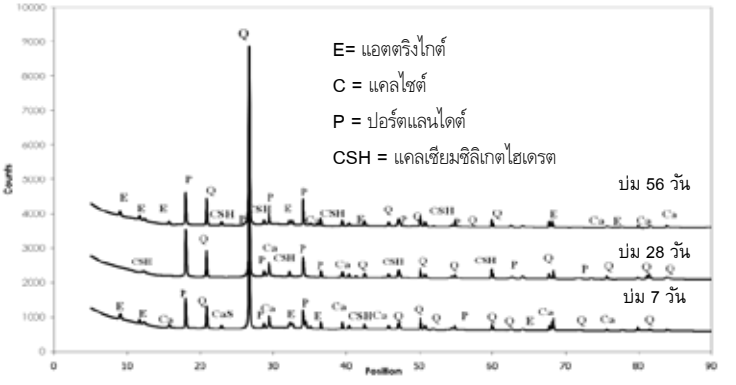
ภาพที่ 5 มอร์ต้าร์มวลรวมหินทรายบดผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ (ก) กำลังอัด และ (ข) กำลังเปรียบเทียบ

การหดตัวแบบแห้ง

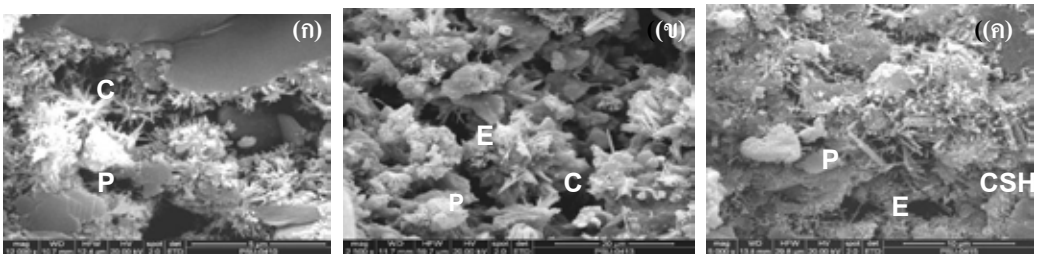
ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้งของก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ เป็นระยะเวลา 11 สัปดาห์ พบว่ามีการหดตัวทุกอัตราส่วนผสมไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากการคัดขนาดมวลรวมหินทรายได้ตามเกณฑ์ ASTM C33 รวมทั้งการเติมซีโอไลต์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมทำให้ลดช่องว่างในตัวอย่างมอร์ต้าร์ลง จนถือได้ว่าไม่มีการหดตัว สอดคล้องกับงาน Najimi et al. [3] นอกจากนี้ในสภาพความชื้นสูงเป็นเวลา 30 วัน พบว่าไร้ราและตะไคร้น้ำขึ้น อาจเนื่องจากประจุไอออนในอนุภาคซีโอไลต์ที่ทำความสะอาดให้และยับยั้งการเจริญของเชื้อรา [3]

การเกิดวัฏภาคของแร่และโครงสร้างจุลภาค

ตัวอย่างมอร์ต้าร์หลังทดสอบกำลังอัด บ่ม 7 28 และ 56 วัน มาตรวจวิเคราะห์ด้วย XRD ผลการคำนวณหาปริมาณแร่แต่ละชนิดด้ววิธีการคำนวณพื้นที่ใต้ลายพิมพ์ (ภาพที่ 6) ตรวจพบแอตตริงไกต์ (Ettringite) มีปริมาณสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน ประมาณร้อยละ 12.18 และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เกิดทุกอายุบ่ม มีปริมาณร้อยละ 15.86 16.99 และ 11.84 ตามลำดับ ต่างจาก Uzal and Turanli [3] ที่พบไคลนอบทิโลไลต์ ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของมอร์ต้าร์ชุดเดียวกับวิเคราะห์ XRD ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) อายุบ่มต่างกัน เห็นโครงสร้างภายในมีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ภายในตัวอย่างมอร์ต้าร์มีลักษณะรูปผลึกคล้ายแท่งเข็มยาวของแอตตริงไกต์ (E) (ภาพที่ 7 ก และ ข) และผลึกแบบกระจุกเข็มแหลมล้อมรอบคล้ายหอยเม่นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (ภาพที่ 7 ค) การภาพถ่ายโครงสร้างนี้จึงสนับสนุนข้อมูลผลวิเคราะห์ XRD อันเป็นการยืนยันว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นในเนื้อมอร์ต้าร์



ภาพที่ 6 ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอร์ต้าร์ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 10 บ่มที่ 7 28 และ 56 วัน



ภาพที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อมอร์ต้าร์หินทรายย่อยผสมซีโอไลต์ร้อยละ 10 กำลังขยาย 3000 เท่า บ่มที่ (ก) 7 วัน (ข) 28 วัน และ (ค) 56 วัน

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษามอร์ต้าร์มวลรวมหินทรายบดผสมซีโอไลต์มีแนวทางสรุปได้ดังนี้

1. ซีโอไลต์ที่ใช้ในการศึกษาเมื่อตรวจสอบหลายเทคนิควมกัน จัดเป็นแร่ซีโอไลต์กลุ่ม ‘‘heulandite type II’’ ปริมาณทั้งหมดของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 93 โดยน้ำหนัก และมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง สามารถใช้ในการผสมคอนกรีตได้ [3,5,7] ทำให้ได้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น

2. การผสมซีโอไลต์ธรรมชาติเข้าในปูนซีเมนต์ช่วยให้ $Ca(OH)_2$ เกิดในช่วงไฮเดรชันและเกิดผลิตผลไฮเดรตคล้ายของปูนซีเมนต์ล้วน โดยเฉพาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ให้ผลกำลังอัดช่วงต้นต่ำกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม อย่างไรก็ตามการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ให้กำลังอัดที่บ่มตั้งแต่ 7-90 วัน ที่เท่ากันหรือมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมคิดเป็นกำลังเปรียบเทียบได้สูงสุด 129 ลดการหดตัวแบบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง และยังกันเชื้อราและตะไคร่น้ำในสภาพมีความชื้นได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

ทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สัญญา ENG-53-2-7-08-0113-S

เอกสารอ้างอิง

[1] Mehta, P.K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. **Concrete International.** 24, 23-27.

[2] Worrell, E., Martin, N. and Price, L. (2000). Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. **Energy,** 25(12), 1189-1214.

[3] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. and Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. **Construction and Building Materials.** 35, 1023-1033.

[4] Ahmadi, B. and Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. **Cement & Concrete Composites.** 32(2), 134–141.

[5] Uzal, B. and Turanlˆ, L. (2012). Blended cements containing high volume of natural zeolites: Properties, hydration and paste microstructure. **Cement and Concrete Composites.** 34(1), 101-109.

[6] Karakurt, C. and Topcu, I.B. (2011). Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete. **Construction and Building Materials,** 25, 1789–1795.

[7] Bilim, C. (2011). Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials.** 25(8), 3175-3180.

[8] Perraki, Th., Kakali, G. and Kontoleon, F. (2003). The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement. **Microporous and Mesoporous Materials.** 61(1-3), 205–212.

[9] Snellings, R., Mertens, G., Cizer, Ö. and Elsen, J. (2010). Early age hydration and pozzolanic reaction in natural zeolite blended cements: Reaction kinetics and products by in situ synchrotron X-ray powder diffraction. **Cement and Concrete Research.** 40(12), 1704–1713.

[10] Karakurt, C., Kurama, H. and Topcu, I.B. (2010). Utilization of natural zeolite in aerated concrete production, **Cement & Concrete Composites.** 32(1), 1–8.

[11] Park, S.-K., Jay Kim, J.-H., Namb, J.-W., Phan, H.D. and Kim, J.-K. (2009). Development of anti-fungal mortar and concrete using zolite and zeocarbon microcapsules, **Cement & Concrete Composites.** 31(7), 447–453.

[12] Haile, T., Nakhla, G. and Allouche, E. (2008). Evaluation of the resistance of mortars coated with silver bearing zeolite to bacterial-induced corrosion. **Corrosion Science 50**(3), 713–720.

[13] Kumar, P.S., Mannan, M.A., Kurain, V.J. and Achuytha, H. (2007). Investigation on the flexural behavior of high-performance reinforced concrete beams using sandstone aggregates. **Building and Enviroment.** 42(7), 2622-2629.