

กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา

ศตวรรษ หฤธรรมพงศ์¹ ทวิช พูลเงิน^{2*} และ สมชาย ชูชีพสกุล³
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกา โดยเน้นไปที่การศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิกาต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยแปรเปลี่ยนขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาตั้งแต่ 7 12 และ 40 นาโนเมตร และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 3 5 8 10 และ 12 ตามลำดับ นอกจากนี้เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์มากขึ้น จะใช้นาโนซิลิการ่วมกับซิลิกาฟุ่ม โดยแทนที่นาโนซิลิกาด้วยซิลิกาฟุ่มในสัดส่วนร้อยละ 0 30 50 70 และ 100 ตามลำดับ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ ที่ปริมาณนาโนซิลิการ้อยละ 3 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 มอร์ตาร์ที่ใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 7 12 และ 40 นาโนเมตร ให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 1.11 1.21 และ 1.69 เท่า ตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์ที่ใช้นาโนซิลิกขนาด 40 นาโนเมตร จะมีความแน่น ความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังอัดที่ได้ กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์สูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ในช่วงร้อยละ 0 3 5 และ 8 โดยที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 8 ค่ากำลังอัดสูงสุดจะมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมถึง 2.32 เท่า และค่ากำลังของมอร์ตาร์จะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ร้อยละ 10 และ 12 ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์ในส่วนผสมด้วยนาโนซิลิกาเป็นการลดปริมาณรวมของปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยลงและมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์น้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้กำลังรวมของซีเมนต์มอร์ตาร์ลดลง โครงสร้างจุลภาคที่การแทนที่ร้อยละ 8 มีความแน่น ความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันสอดคล้องกับค่ากำลังที่ได้ การใช้นาโนซิลิกาพร้อมกับซิลิกาฟุ่มพบว่าอัตราส่วนระหว่างนาโนซิลิกาและซิลิกาฟุ่มส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังอัดและโครงสร้างจุลภาค เมื่อสัดส่วนของนาโนซิลิกามากขึ้น กำลังอัดของมอร์ตาร์ ความแน่น ความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างจุลภาคจะมากขึ้นด้วย

คำสำคัญ : ซีเมนต์มอร์ตาร์ / นาโนซิลิกา / ซิลิกาฟุ่ม / กำลังอัด / โครงสร้างจุลภาค

* Corresponding author : tawich.pul@kmutt.ac.th

1 นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
3 ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Compressive Strength and Microstructure of Cement Mortar with Nano-SiO₂

Sattawat Haruehansapong¹, Tawich Pulngern^{2*}, and Somchai Chucheepsakul³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

Abstract

This research article presents the compressive strength and microstructure of cement mortar with nanosilica. The effects of nanosilica particle size and the replacement content are determined by varying the nanosilica particle size from 7, 12 and 40 nm and the replacement content from 3, 5, 8, 10 and 12%, respectively. For economic consideration, the use of nanosilica incorporating with silica fume is included by partially replacing of nanosilica with silica fume 0, 30, 50, 70, and 100%, respectively.

The tested results indicated that nanosilica particle size affected directly on the compressive strength development and microstructure of cement mortar. For the replacement content 3% and water per binder ratio of 0.65, the mortar with nanosilica particles size of 7, 12, and 40 nm gave the higher compressive strength at age of 28 days than that of control cement mortar about 1.11, 1.21 and 1.69 times, respectively. The cement mortar with nanosilica particle size of 40 nm also presented the fully dense, uniform and homogenous microstructure corresponding with that of strength development. For the replacement content of cement by nanosilica ranged from 0, 3, 5, and 8%, the compressive strength of mortar was directly improved with the replacement content of nanosilica. For 8% replacement, the maximum compressive strength was higher than that of control mortar about 2.32 times. The compressive strength became lower for higher replacement content of 10 and 12% based on the fact that the higher than 8% of replacement content gave the mixture of mortar with low cement content. The lower cement contents, the lower hydration reaction and calcium hydroxide were obtained and then affected directly on the pozzolanic reaction and compressive strength of cement mortar. For the cement mortar with 8% of nanosilica, the fully dense, uniform and homogenous microstructure was also presented. For the use of nanosilica incorporating with silica fume, the ratio between nanosilica and silica fume affected on the compressive strength and microstructure of cement mortar. The mortar with higher ratio of nanosilica gave the higher compressive strength as well as fully dense, uniform and homogenous microstructure.

Keywords : Cement Mortar / Nanosilica / Silica Fume / Compressive Strength / Microstructure

* Corresponding author : tawich.pul@kmutt.ac.th.

¹ Ph.D Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นวัสดุหลักที่ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธา ควบคู่กับการใช้คอนกรีต โดยทั่วไปจะใช้งานฉาบผนังอาคารหรือเคลือบผิวโครงสร้าง นอกจากนี้การศึกษาพฤติกรรมของมอร์ตาร์สามารถสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมของคอนกรีตได้ดีเนื่องจากมอร์ตาร์เป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีต การพัฒนาสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีตให้มีกำลังที่สูงขึ้น มีโครงสร้างระดับจุลภาคที่แน่น มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีช่องว่างและโพรงอากาศ จะช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพและยืดอายุการทำงานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามมีหลายวิธีในการพัฒนาสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีต วิธีการที่นิยมอย่างหนึ่งได้แก่ การใช้วัสดุปอซโซลาน ทั้งที่ได้จากการสังเคราะห์และธรรมชาติ เช่น ซิลิกาฟูม ถ้ำถ่านหิน และถ้ำถ่านเปลือกไม้ [1] ในแง่ของการพัฒนากำลัง ซิลิกาฟูมหรือไมโครซิลิกาดูเหมือนว่าจะเป็นวัสดุที่ใช้อย่างแพร่หลายมากกว่า เนื่องจากซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กกว่าผงปูนซีเมนต์มาก จึงเข้าไปอัดแน่นในช่องว่าง ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ การที่ซิลิกาฟูมมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบกว่าร้อยละ 90 ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว เพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพ เพลสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมจะมีคุณภาพดีกว่าเพลสต์ธรรมดา โดยปกติเมื่อเติมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 จะช่วยเพิ่มแรงอัดได้ประมาณร้อยละ 30 [1]

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าสามารถใช้วัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าซิลิกาฟูม ได้แก่ nano-SiO₂ nano-Fe₂O₃ nano-TiO₂ และ Carbon Nanotubes มาผสมร่วมกับซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีตเพื่อพัฒนาให้เป็นคอนกรีตกำลังสูงพิเศษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนาโนซิลิกาจะถูกใช้มากที่สุด เช่น งานวิจัยของ Li และคณะ [2, 3] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้นาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 15 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 11 สามารถเพิ่มกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ 1.26 เท่า และยังพบว่านาโนซิลิกาช่วยทำให้คอนกรีตต้านทานต่อการซัดสีและเพิ่มความสามารถในการต้านแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาได้เป็นอย่างดี [4, 5] งานวิจัยของ Senff และคณะ [6] นำเสนอผลของนาโนซิลิกาต่อสมบัติ

ของคอนกรีตสด ได้แก่ ความสามารถต่อการไหล ระยะเวลาก่อตัว และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน อย่างไรก็ตาม สิ่งที่น่าสนใจได้แก่งานวิจัยของ Jo และคณะ [7] ซึ่งศึกษาสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้นาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 12 และพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พัฒนาได้มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 2.68 เท่า และงานวิจัยของ Sadrmomtazi และคณะ [8] ซึ่งศึกษาสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้นาโนซิลิกาขนาด 50 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 7 และพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พัฒนาได้มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 1.70 เท่า จากงานวิจัยในอดีตเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้นาโนซิลิกาเพื่อเพิ่มกำลังอัดให้แก่ซีเมนต์มอร์ตาร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตกำลังอัดสูงพิเศษเป็นสิ่งที่น่าสนใจ นาโนซิลิกามีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ในคอนกรีตมากขึ้นเช่นเดียวกับซิลิกาฟูม กอปรกับราคาของนาโนซิลิกาในปัจจุบันไม่ได้แพงมาก (กิโลกรัมละ 300 บาท) และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ แต่ยังคงสูงกว่าซิลิกาฟูม (กิโลกรัมละ 20 บาท) หลายเท่า

งานวิจัยครั้งนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้นาโนซิลิกามาพัฒนา กำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยเน้นไปที่การศึกษาผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกา ซึ่งจากงานในอดีต [2, 3, 7, 8] พบว่าขนาดของอนุภาคนาโนซิลิกาที่แตกต่างกัน ทำให้การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ต่างกันด้วย ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาน่าจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์ ปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและให้ผลโดยตรงต่อต้นทุนของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงคำนึงถึงปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมด้วย นอกจากนี้เนื่องจากนาโนซิลิกามีราคาค่อนข้างสูง เพื่อเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้นาโนซิลิการ่วมกับซิลิกาฟูมและนำเสนอสัดส่วนที่เหมาะสมและคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้เพื่อให้เข้าใจในพฤติกรรมเชิงลึกของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามากขึ้น ได้ทำการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) ของซีเมนต์มอร์ตาร์เหล่านี้ควบคู่กับการศึกษาการพัฒนา กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วย

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่มีต่อการพัฒนากำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์

2. เพื่อศึกษาปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมของนาโนซิลิกาต่อการพัฒนากำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์

3. เพื่อหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างซิลิกาฟุ่มและนาโนซิลิกาต่อการพัฒนากำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1 วัสดุ สัดส่วนผสม และการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.1.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซิลิกาฟุ่ม (Dry-densified silica fume) ซึ่งมีปริมาณ SiO_2 ร้อยละ 88.3 มีขนาดเฉลี่ย 100 นาโนเมตร และนาโนซิลิกา (Nano- SiO_2) ซึ่งมีส่วนผสมของ SiO_2 ร้อยละ 99.8 ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกา ในงานวิจัยนี้จะใช้นาโนซิลิกาชนิดเดียวกันมาจากแหล่งผลิตเดียวกันแต่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ขนาด 40 นาโนเมตร (Type A) 12 นาโนเมตร (Type B) และ 7 นาโนเมตร (Type C) องค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาค และสมบัติพื้นฐานของ

วัสดุเหล่านี้แสดงได้ในตารางที่ 1

3.1.2 ส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์

การศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 จะเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยแปรเปลี่ยนขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกา เมื่อได้ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมแล้วจะนำมาเตรียมตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาในส่วนที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นการศึกษาปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิกาที่เหมาะสม และผลของสัดส่วนผสมระหว่างนาโนซิลิกาและซิลิกาฟุ่ม โดยตัวอย่างทดสอบในการศึกษาทั้ง 3 ส่วน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยควบคุมให้มีค่าการไหลเท่ากับ 110 ± 5 โดยในส่วนที่ 1 จะใช้สัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิการ้อยละ 3 แต่ใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน 3 ขนาด ส่วนที่ 2 จะใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาส่วนที่ 1 ไปแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 3 5 8 10 และ 12 ตามลำดับ ส่วนที่ 3 ใช้นาโนซิลิการ่วมกับซิลิกาฟุ่ม โดยแทนที่นาโนซิลิกาด้วยซิลิกาฟุ่มในสัดส่วนร้อยละ 0 30 50 70 และ 100 ตามลำดับ รายละเอียดของส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาส่วนนี้แสดงดังตารางที่ 2 ส่วนของการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้จะเหมือนกับการทดสอบกำลังอัด แต่จะเตรียมตัวอย่างโดยใช้ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 8 ทั้งหมด

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซิลิกาฟุ่ม และนาโนซิลิกาทั้ง 3 ชนิด

Items	Chemical Composition (%)				
	PC	SF	NS Type A	NS Type B	NS Type C
SiO ₂	22	88.3	99.8	99.8	99.8
Al ₂ O ₃	6.6	1.17	-	-	-
Fe ₂ O ₃	2.8	4.76	-	-	-
CaO	60.1	0.48	-	-	-
MgO	3.3	2.14	-	-	-
SO ₃	2.1	1.05	-	-	-
LOI	2.6	2.1	0.2	0.2	0.2
SSA (m ² /g)	0.38	20	50	200	380
Particle Size (nm)	15,000	100	40	12	7

หมายเหตุ PC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ SF หมายถึง ซิลิกาฟุ่ม NS หมายถึง นาโนซิลิกา
LOI หมายถึง Loss on Ignition ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา
SSA หมายถึง Specific Surface Area คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมระหว่างนาโนซิลิกาและซิลิกาฟุ่มเทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ร้อยละ 3		ร้อยละ 5		ร้อยละ 8		ร้อยละ 10		ร้อยละ 12	
SF (ร้อยละ)	NS (ร้อยละ)	SF (ร้อยละ)	NS (ร้อยละ)	SF (ร้อยละ)	NS (ร้อยละ)	SF (ร้อยละ)	NS (ร้อยละ)	SF (ร้อยละ)	NS (ร้อยละ)
3	0	5	0	8	0	10	0	12	0
2.1	0.9	3.5	1.5	5.6	2.4	7	3	8.4	3.6
1.5	1.5	2.5	2.5	4	4	5	5	6	6
0.9	2.1	1.5	3.5	2.4	5.6	3	7	3.6	8.4
0	3	0	5	0	8	0	10	0	12

3.1.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกามีขนาดเล็กมาก การเตรียมตัวอย่างทดสอบจึงต้องทำด้วยความระมัดระวัง และมีการป้องกันการฟุ้งกระจายของอนุภาคนาโนซิลิกาเข้าสู่ร่างกาย การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการผสมนาโนซิลิกา ผงซีเมนต์ และซิลิกาฟุ่มให้เข้ากันก่อน จากนั้นเทลงไปผสมกับน้ำในหม้อผสม เริ่มต้นจากการเดินเครื่องผสมโดยใช้รอบช้าสุด เพื่อกวนส่วนผสมและน้ำให้เข้ากันก่อน

จากนั้นเติมทรายลงไปและปรับเปลี่ยนอัตราเร็วของการผสมให้เป็นไปตามมาตรฐาน ในกรณีที่ต้องใช้สารลดน้ำให้ผสมลงไปพร้อมกับน้ำ ซีเมนต์มอร์ตาร์จะต้องควบคุมค่าการไหลให้ได้ 110 ± 5 จากนั้นเทซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อรูปลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลบ.ซม. เมื่อครบ 24 ชั่วโมงจึงนำก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อ และนำไปบ่มในน้ำประปา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบโครงสร้างจุลภาค จะใช้การตัดชิ้นส่วนของซีเมนต์มอร์ตาร์บริเวณที่

สนใจให้มีขนาดเท่าฐานวาง (Stub) แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปวางติดบนฐานวาง แล้วนำไปฉาบผิวด้วยทองหรือโลหะผสมระหว่างทองกับพลาเตียมด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการฉาบผิวเรียกว่า Sputter Coater เมื่อชิ้นส่วนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ที่ทำการฉาบผิวด้วยทองแล้วให้นำตัวอย่างนำมาใส่ในเครื่องทดสอบ SEM และถ่ายภาพขยายในตำแหน่งที่ต้องการจะศึกษาในแต่ละกรณีที่จะศึกษา

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 การทดสอบกำลังอัด

ทำการทดสอบซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ที่ผสมนาโนซิลิกาทุกส่วนผสม เพื่อหาค่ากำลังอัดตามวิธีการทดสอบกำลังอัดมาตรฐาน ASTM C109 โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ที่อายุ 1 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในแต่ละส่วนผสมทำการทดสอบ 3 ตัวอย่าง และหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย

3.2.2 การศึกษาทางโครงสร้างจุลภาค

ในการศึกษาทางด้านโครงสร้างจุลภาคทำโดยการถ่ายภาพขยายด้วยเครื่องถ่ายภาพขยายด้วยอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM-5800 โดยถ่ายภาพที่กำลังขยาย 10,000 เท่า แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 กรณีศึกษา ส่วนที่ 1 ซึ่งจะศึกษาผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่มีต่อโครงสร้างระดับจุลภาค ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกา ส่วนที่ 3 ดูผลของการใช้นาโนซิลิการ่วมกับซิลิกาฟุ่ม โดยการศึกษาทั้ง 3 ส่วน ทดสอบเมื่อซีเมนต์มอร์ตาร์ท์มีอายุ 7 วัน

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ท์

ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ท์ ส่วนที่ 2 ศึกษาหาปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาที่เหมาะสม และเพื่อเป็นการเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จะใช้นาโนซิลิการ่วมกับซิลิกาฟุ่ม และแสดงผลการทดสอบกำลังอัดในการศึกษาส่วนที่ 3

4.1.1 ผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาต่อการพัฒนากำลังอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ท์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 3 และใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน 3 ขนาด แสดงในตารางที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ที่ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดที่ได้สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ควบคุมซึ่งไม่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกา (PC) ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของนาโนซิลิกามีขนาดเล็กมากสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ได้ดี ทำให้เกิดการอัดแน่นของอนุภาคและลดช่องว่างในซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ได้ดี อีกทั้งนาโนซิลิกามีองค์ประกอบของ SiO₂ ในปริมาณที่สูงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความรวดเร็วของปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อเปรียบเทียบการใช้นาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาด พบว่านาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร (Type A) ที่อายุของซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ 1 7 และ 28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด 117 258 และ 332 กก./ตร.ซม. ซึ่งมากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ควบคุม 1.85 1.95 และ 1.69 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นความรวดเร็วในการพัฒนากำลังต้น ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่ 7 และ 12 นาโนเมตร ให้ค่ากำลังอัดน้อยกว่าขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร ทั้งที่มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่มากกว่า สามารถอธิบายได้ว่านาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 7 และ 12 นาโนเมตร เป็นขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไป แทนที่จะสามารถเข้าไปอัดแน่นในช่องว่างของซีเมนต์มอร์ตาร์ท์ได้ดี อาจจะเข้าไปเคลือบผิวรอบๆ อนุภาคของซีเมนต์แทน หรือเกิดการเกาะตัวกันแบบไม่เสถียร ขาดการอัดแน่นของอนุภาค การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ท์ที่ได้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตซึ่งพบว่าการใช้นาโนซิลิขนาด 10-15 นาโนเมตร [2, 3] ผสมลงในมอร์ตาร์ท์ จะพัฒนากำลังได้น้อยกว่าการใช้นาโนซิลิกาขนาด 40-50 นาโนเมตร [7, 8] อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ในการประยุกต์ใช้นาโนซิลิกาเป็นวัสดุเคลือบผิว (Nanocomposite Coating) แสดงให้เห็นเช่นเดียวกันว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวและความทนทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุเคลือบผิว ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมต้องไม่เล็กหรือใหญ่เกินไป [9] สรุปได้

ว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เหมาะสมจากการศึกษา
นี้ ในกรณีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และปริมาณ
การแทนซีเมนต์ร้อยละ 3 คือ ขนาดอนุภาค 40 นาโน-
เมตร การพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นเป็นผลร่วมกันระหว่าง

ปฏิกิริยาปอซโซลานและการอัดแน่นของอนุภาค การเลือก
ใช้ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เหมาะสมจะสามารถ
พัฒนากำลังของมอร์ตาร์ให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดเช่นกัน

ตารางที่ 3 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาขนาดแตกต่างกันในปริมาณการแทนที่ร้อยละ 3

Symbol	W/B	Flow (110±5)	Compressive Strength (ksc)		
			1 วัน	7 วัน	28 วัน
PC	0.65	114	63	132	196
NS type A	0.65	107	117	258	332
NS type B	0.65	108	93	208	239
NS type C	0.65	113	90	157	218

หมายเหตุ PC หมายถึง ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งไม่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกา

NS type A หมายถึง ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร

NS type B หมายถึง ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร

NS type C หมายถึง ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาขนาด 7 นาโนเมตร

W/B หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

Flow หมายถึง ค่าการไหลแผ่ของซีเมนต์มอร์ตาร์

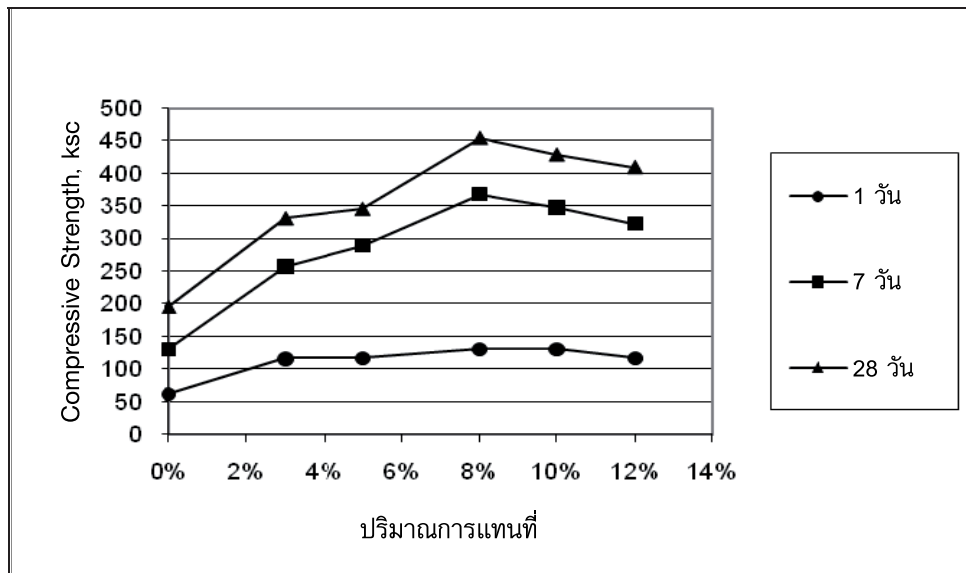
4.1.2 ผลของปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วย นาโนซิลิกาต่อการพัฒนากำลังอัด

รูปที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบกำลังอัดของซีเมนต์
มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร ซึ่ง
เป็นขนาดที่เหมาะสมจากการศึกษาส่วนที่ 1 ในปริมาณ
ร้อยละ 3 5 8 10 และ 12 ตามลำดับ ผลการทดสอบ
แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา
พัฒนามาตามอายุการบ่ม โดยที่อายุของมอร์ตาร์ 1 7 และ
28 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นตามอายุของมอร์ตาร์ ในทุก
ปริมาณการแทนที่ กำลังอัดที่อายุ 7 วัน จะเข้าใกล้ที่อายุ
28 วัน แสดงให้เห็นการพัฒนาที่รวดเร็วของมอร์ตาร์
ผสมนาโนซิลิกา ที่อายุของมอร์ตาร์ 28 วัน ค่ากำลังอัด
จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของนาโนซิลิกา และมีค่าสูงสุดเมื่อ
แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณร้อยละ 8 โดยมีค่า
กำลังอัดเท่ากับ 455 กก./ตร.ซม. มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์
ควบคุมถึง 2.32 เท่า และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็น
ร้อยละ 10 และ 12 กลับพบว่าค่ากำลังที่ได้ลดลง กล่าว

คือปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาที่เหมาะสมคือ
ร้อยละ 8 และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตพบว่ามี
ความแตกต่างอยู่บ้าง เช่น งานของ Jo และคณะ [7] ซึ่ง
ใช้นาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตรและปริมาณน้ำต่อวัสดุ
ประสาน 0.50 พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาใน
สัดส่วนที่มากกว่าร้อยละ 10 ไม่ทำให้กำลังอัดของซีเมนต์
มอร์ตาร์สูงขึ้น ในขณะที่งานวิจัยของ Sadrmomtazi และ
คณะ [8] ซึ่งใช้นาโนซิลิกาขนาด 50 นาโนเมตร และ
ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ระบุว่า การแทนที่ซีเมนต์
ด้วยนาโนซิลิการ้อยละ 7 เป็นปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสม
แสดงให้เห็นว่าปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมขึ้นกับ
สัดส่วนผสมและขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาด้วย ดังนั้น
ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบโดยตรงกับ
งานวิจัยในอดีตได้ [7, 8] เนื่องด้วยสัดส่วนผสม ปริมาณ
น้ำ แห้งผลิต และขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกามีความ
แตกต่างกัน ศึกษาหาปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา
ฟุ่ม พบได้ในงานวิจัยของ Zelic และคณะ [10] เช่นกัน

ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 8 เป็นปริมาณที่พอเหมาะ กล่าวโดยสรุปได้ว่าปริมาณนาโนซิลิกาที่น้อยหรือมากไปไม่ส่งผลดีต่อการพัฒนากำลัง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณที่น้อยไปจะมีปริมาณ SiO_2 ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานน้อย พัฒนากำลังได้น้อยเช่นกัน ปริมาณการแทนที่มากไปหมายถึงต้องลดปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลง ปฏิกริยาไฮเดรชันจึงเกิดได้น้อยตามสัดส่วนของซีเมนต์ และเกิดแคลเซียม

ไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้ในการไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยเช่นเดียวกัน นั่นคือมีอนุภาคของนาโนซิลิกามาก แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานไม่ได้สูงตามไปด้วย ดังนั้นกำลังรวมของซีเมนต์มอร์ตาร์จึงลดลงเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณสูงเกินไป งานวิจัยในอดีต [2, 3, 8] ระบุว่าเมื่อปริมาณของนาโนซิลิกาสูงไป อนุภาคของนาโนซิลิกาจะขาดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ บางจุดเกาะตัวเป็นบริเวณที่มีความอ่อนแอหรือเกิดเป็นช่องว่าง



รูปที่ 1 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาชนิด A ด้วยปริมาณการแทนที่ร้อยละ 3 - 12 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

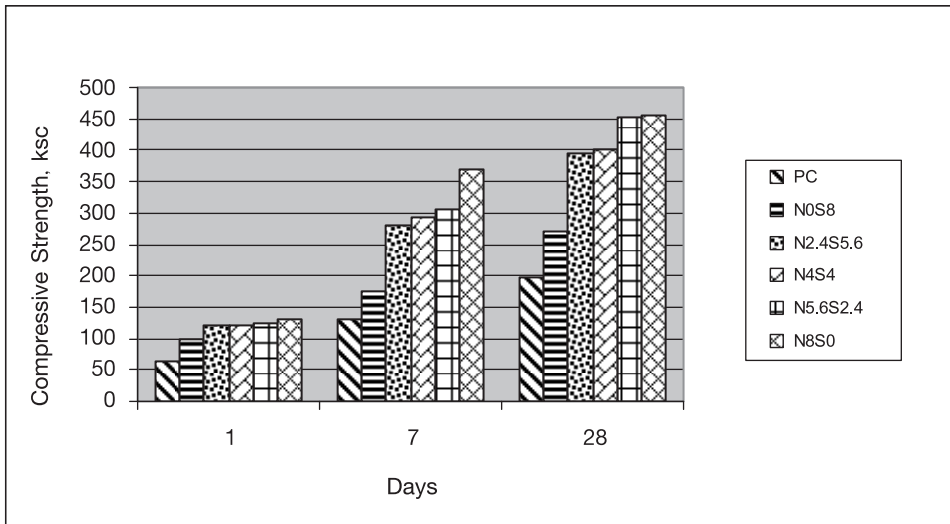
4.1.3 ผลของสัดส่วนผสมระหว่างซิลิกาฟูมและนาโนซิลิกาต่อการพัฒนากำลังอัด

รูปที่ 2 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิการ่วมกันซิลิกาฟูม ในสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 8 ที่อายุของมอร์ตาร์ 1 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนผสมระหว่างนาโนซิลิกาและซิลิกาฟูมส่งผลโดยตรงกับการพัฒนากำลังอัด ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาในสัดส่วนที่มากจะพัฒนากำลังอัดดีกว่า โดยจะเริ่มเห็นผลเมื่อซีเมนต์มอร์ตาร์มีอายุ 7 วันขึ้นไป ทั้งนี้ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานต้องใช้ระยะเวลาในการพัฒนา กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโน

ซิลิกาล้วน (N8S0) หรือแทนที่ร้อยละ 0 ให้ค่ากำลังสูงสุดและลดลงตามสัดส่วนของนาโนซิลิกาที่ลดลง ส่วนผสมที่มีซิลิกาฟูมล้วน (N0S8) หรือแทนที่นาโนซิลิกาด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 100 ให้ค่ากำลังต่ำที่สุด แต่ก็ยังมากกว่าส่วนผสมที่มีเฉพาะซีเมนต์ (PC) การที่ส่วนผสมที่มีนาโนซิลิกามากให้ค่าสูงกว่า น่าจะเป็นผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นได้เร็วที่สุด อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ ส่วนผสมที่มีนาโนซิลิกามากก็จะเป็นส่วนผสมที่มีต้นทุนสูงที่สุดด้วยเช่นกัน นอกจากนี้พบว่า ถ้าระยะเวลาการบ่มมากขึ้น ส่วนผสมที่มีนาโนซิลิการ้อยละ 70 และมีซิลิกาฟูมร้อยละ 30 (N5.6S2.4) ให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียง

เคียงกันกับส่วนผสมที่มีนาโนซิลิกาแล้ว และสามารถทดแทนกันได้ และส่วนผสมที่มีทั้งซิลิกาฟุ่มและนาโนซิลิกาในสัดส่วนอื่นๆ ก็อาจเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับจุด

สมดุลระหว่างกำลังอัดและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นตัวกำหนด



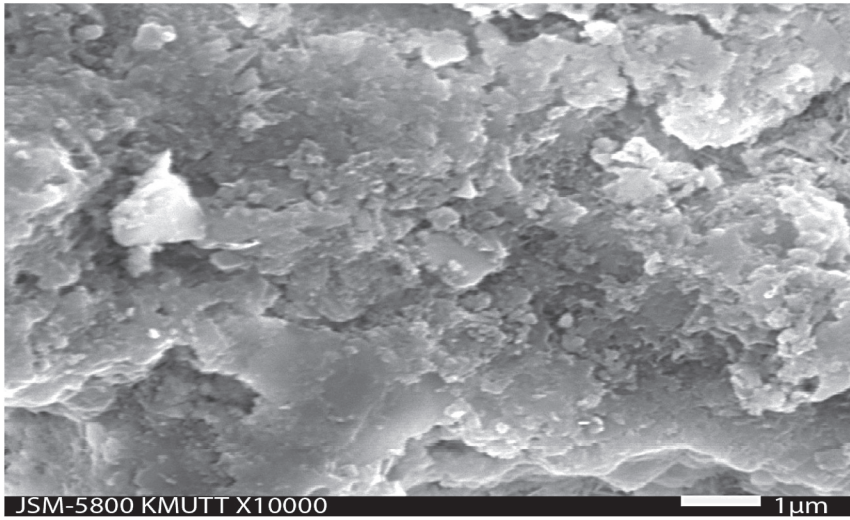
รูปที่ 2 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม (PC) ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มล้วน (N0S8) และซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมทั้งซิลิกาฟุ่มและนาโนซิลิกาในสัดส่วนนาโนซิลิการ้อยละ 30 (N2.4S5.6) ร้อยละ 50 (N4S4) ร้อยละ 70 (N5.6S2.4) และนาโนซิลิกาแล้ว (N8S0)

4.2 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา

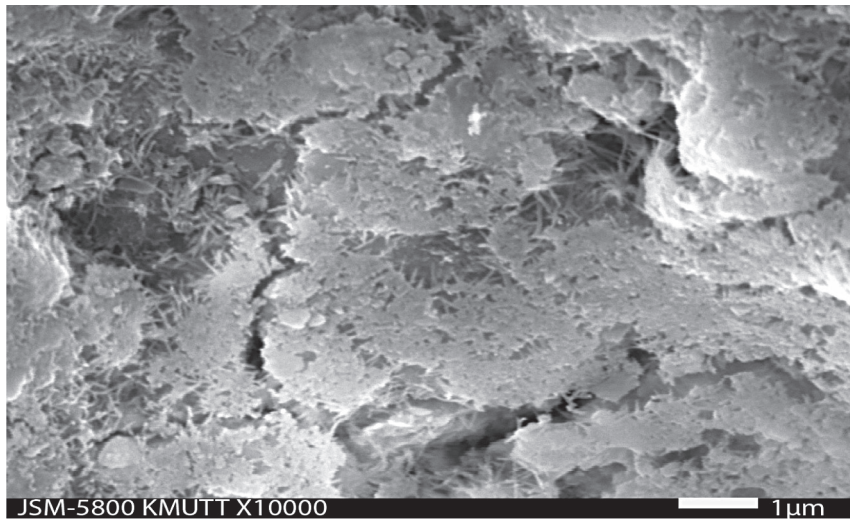
4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคต่อโครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 3-5 เป็นรูปถ่ายขยายของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาขนาดอนุภาคแตกต่างกันร้อยละ 8 โดยใช้กล้อง SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกามีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน จากรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดเล็ก (7 นาโนเมตร และ 12 นาโนเมตร) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ไม่แน่นเต็มที่ มีความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันน้อย และมีพบว่ามีช่องว่าง เกิดขึ้นจำนวนมากเนื่องจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานยังเกิดขึ้นไม่เต็มที่ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5 ซึ่งเป็นมอร์ตาร์ที่ใช้นาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร

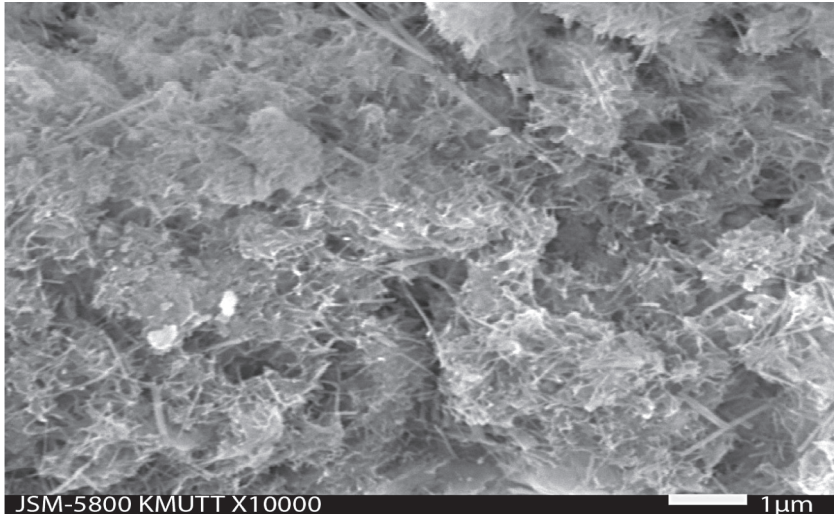
พบว่าโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีความแน่นเต็มที่ และแทบไม่มีช่องว่างปรากฏให้เห็น ทั้งนี้เนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือ C-S-H เกิดได้เร็วกว่า (ภายใน 7 วัน) และสามารถเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างได้เกือบทั้งหมด เนื้อของมอร์ตาร์และเพสต์มีความแน่นมากกว่าและการถ่ายแรงจะทำได้ดีกว่า และส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ได้รับมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นผลร่วมกันระหว่างการอัดแน่นและปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขณะที่มอร์ตาร์ที่ใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็กเกินไป (7 และ 12 นาโนเมตร) ไม่สามารถเติมเต็มช่องของซีเมนต์เพสต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาจเข้าไปยึดเกาะที่ผิวของอนุภาคขนาดใหญ่และขาดการอัดแน่นอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3 ภาพขยายซีเมนต์มอร์ดีอาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 7 นาโนเมตร



รูปที่ 4 ภาพขยายซีเมนต์มอร์ดีอาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร

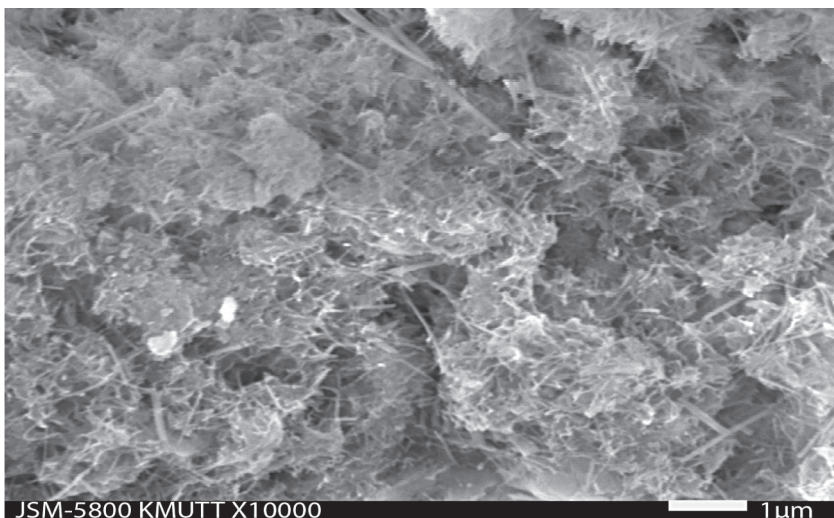


รูปที่ 5 ภาพขยายซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร

4.2.2 ผลของปริมาณการแทนที่ต่อโครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 6 เป็นรูปถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ร้อยละ 3 ที่อายุของซีเมนต์มอร์ตาร์ 7 วัน จะเห็นได้ว่าปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ยังเกิดได้ไม่มาก เอทิงโกต์หรือผลึกเข็มยังไม่รวมตัวกันเป็นโครงสร้างที่แน่น ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิการ้อยละ 3 มีปริมาณ SiO_2 น้อย แต่มี Ca(OH)_2 จากปฏิกิริยา

ไฮเดรชันมาก ทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยกว่า และช่องว่างเกิดขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5 ซึ่งใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ร้อยละ 8 เมื่อมีการใช้นาโนซิลิกาที่มากขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้น จึงทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นอย่างเต็มที่ สม่่าเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มากกว่า ซึ่งสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เป็นสารที่ให้กำลังกับซีเมนต์มอร์ตาร์

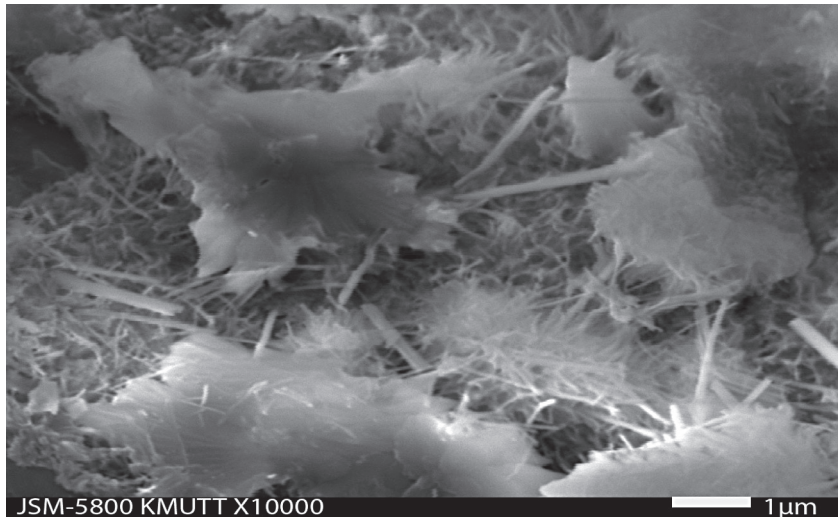


รูปที่ 6 ภาพขยายซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิการ้อยละ 3

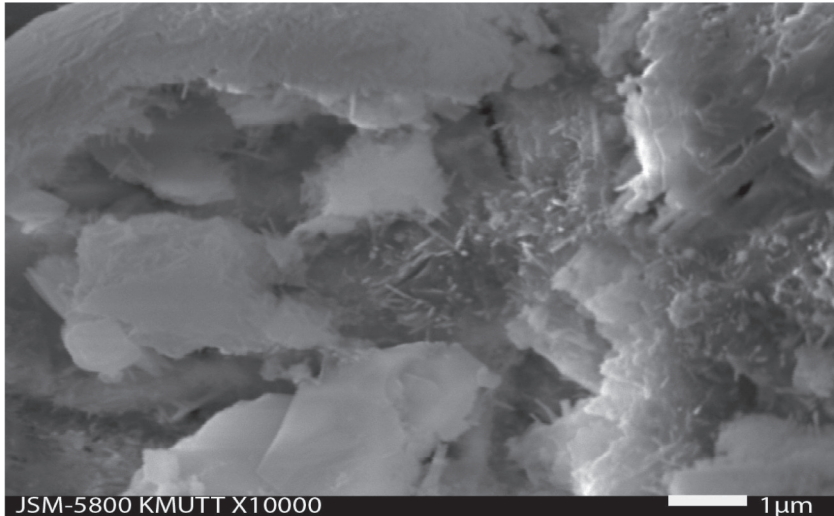
4.2.3 ผลของสัดส่วนผสมระหว่างนาโนซิลิกา และซิลิกาฟูล์มต่อโครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 7 เป็นรูปถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ของซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติ (PC) ที่มีเฉพาะซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าเอททิงโกต์ จะเกิดเป็นลักษณะร่างแหเชื่อมกันเป็นเครือข่าย และในเวลาเดียวกันก็จะเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และ CaOH_2 ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 8 ซึ่งเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แทนปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 8 (N0S8) เอททิงโกต์จะแทรกเข้าไปในช่องว่างและเชื่อมกันเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ช่องว่างมีขนาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาฟูมมีสารประกอบ SiO_2 มาก มีขนาดเล็ก จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และเมื่อมีการแทนที่ซิลิกาฟูมด้วยนาโนซิลิการ้อยละ 50 (N4S4) จะเห็นได้ว่าเนื้อของซีเมนต์

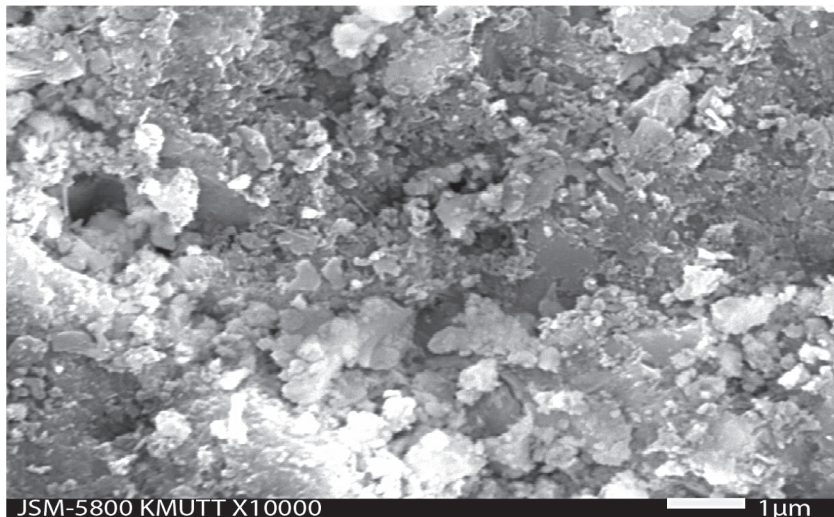
มอร์ตาร์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ช่องว่างต่างๆ จะมีค่าน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 9 เนื่องจากนาโนซิลิกาที่เพิ่มเข้าไปเป็นวัสดุปอซโซลานมีขนาดเล็กกว่าซิลิกาฟูม และมีสารประกอบ SiO_2 มากกว่า ปฏิกิริยาจึงเกิดได้เร็วกว่า นอกจากนี้จะสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างได้ดีกว่า ซิลิกาฟูมทั้งช่องว่างขนาดใหญ่และระดับนาโนเมตร และเมื่อย้อนไปเปรียบเทียบกับรูปที่ 5 ซึ่งเป็นภาพขยายของซีเมนต์มอร์ตาร์เมื่อมีการใช้นาโนซิลิกาเพียงอย่างเดียว โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิการ้อยละ 8 (N8S0) พบว่าเนื้อของซีเมนต์มอร์ตาร์กรณีที่มีปริมาณนาโนซิลิกามากกว่าจะมีความแน่นเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ส่งผลต่อการถ่ายแรง ทำให้รับกำลังอัดได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ก่อนหน้า



รูปที่ 7 ภาพขยายซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมที่ผสมซีเมนต์ล้วน



รูปที่ 8 ภาพขยายของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูล์มล้วน



รูปที่ 9 ภาพขยายซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูล์มร่วมกับนาโนซิลิการ้อยละ 50

5. สรุปผลการทดลอง

1. ขนาดของนาโนซิลิกาส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนา กำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์ นาโนซิลิกาที่มีอนุภาคเล็กเกินไป คือ 7 และ 12 นาโนเมตร จะไม่สามารถอัดแน่นในช่องว่างของซีเมนต์เฟสดีได้อย่างเหมาะสม การพัฒนา กำลังอัดที่ได้จะมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นหลัก และเมื่อใช้นาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดอนุภาคที่พอ

เหมาะ ประสิทธิภาพในการอัดแน่นจะเพิ่มขึ้น การพัฒนา กำลังที่ได้เป็นผลร่วมกันระหว่างปฏิกิริยาปอซโซลานและการอัดแน่นของอนุภาค

2. การใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนที่น้อยกว่าร้อยละ 8 การพัฒนา กำลังอัดจะแปรตามปริมาณการแทนที่ ที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 8 จะให้ค่ากำลังอัดมากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 2.32 เท่า และมากกว่า

ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มล้วน 1.67 เท่า การที่กำลังอัดลดลงเมื่อแทนที่นาโนซิลิกาในปริมาณที่สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการแทนที่ส่งผลให้ปริมาณซีเมนต์ลดลง รวมถึงทำให้ปริมาตรไฮเดรชันและปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน

3. การใช้นาโนซิลิกาพร้อมกับซิลิกาฟุ่ม พบว่าค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของนาโนซิลิกา ส่วนผสมที่มีสัดส่วนของนาโนซิลิกามากจะให้ค่ากำลังอัดที่สูง และถ้าต้องการลดต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ สามารถใช้นาโนซิลิกาพร้อมกับซิลิกาฟุ่มได้ แต่ต้องเพิ่มระยะเวลาการบ่มให้ยาวขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท Elkem Silicon Materials ที่ได้อนุเคราะห์ซิลิกาฟุ่ม ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย และขอขอบคุณโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

7. เอกสารอ้างอิง

1. Chindaprasert, P. and Jaturapitakkul, C., 2008, *Cement Pozzolan and Concrete*, Sixth Edition, Thailand Concrete Association. (In Thai)
2. Li, H. Xiao, H.G., and Qu, J.P., 2004, "A Study on Mechanical and Pressure-sensitive Properties of Cement-Mortar with Nanophase Materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 435-438.
3. Li, H., Xiao, H.G., and Qu, J.P., 2004, "Micro-structure of Cement Mortar with Nano Particles", *Cement Composite Part B*, Vol. 35, pp. 185-189.

4. Li, H., Zhang, M.H., and Qu, J.P., 2006, "Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement", *Wear*, Vol. 260, pp. 1262-1266.
5. Li, H., Zhang, M.H., and Qu, J.P., 2007, "Flexural Fatigue Performance of Concrete Containing Nano-particles for Pavement", *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 1292-1301.
6. Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira V.M., Hotza, D., and Repette W., 2009, "Effect of Nano-Silica on Rheology and Fresh Properties of Cement Paste and Mortars", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2489-2491.
7. Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G.H., and Park J.B., 2007, "Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1351-1355.
8. Sadrmomtazi, A., Fasihi, A., Balalaci, F., and Haghi, A.K., 2009, "Investigation of Mechanical and Physical Properties of Mortars Containing Silica Fume and Nano-SiO₂", *Proceeding of the Third International Conference of Concrete & Development*, April 27-29, Tehran, Iran, Paper No. CD11-001, pp. 1153-1160.
9. Yuan, J., Zhou, S., Gu, J., and Wu, L., 2005, "Effect of Particle Size of Nanosilica on the Performance of Epoxy/Silica Composite Coatings", *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 3927-3932.
10. Zelic, J., Krstulovic, R., Tkalcec, E., and Krolo, P., 2000, "The Properties of Portland Cement-Limestone-Silica Fume Mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 145-152.