

อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานต่อกำลังอัด โครงสร้างจุลภาค และปริมาณการแทนที่ ของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกา

ศตวรรษ หลุณหรรษพงศ์¹ และ ทวิช พูลเงิน¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการใช้คอนกรีต ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย และมีการพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งในด้านกำลังอัด และความทนทานของคอนกรีต โดยคำนึงถึงต้นทุนการผลิตเป็นประการสำคัญ การพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตที่นิยมทำกันในปัจจุบัน ได้แก่ การปรับปรุงอัตราส่วนผสมของคอนกรีตให้เหมาะสม และการใช้สารผสมเพิ่ม สำหรับการปรับปรุงอัตราส่วนผสมให้ดีขึ้นสามารถทำได้โดยการหาอัตราส่วนความเหมาะสมของขนาดกละ ปริมาณปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีนี้จะเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นจำเป็นต้องมีการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน การปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์ ให้มีกำลังสูงขึ้นและทนทานต่อการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อม เป็นสิ่งที่จำเป็นเนื่องจากซีเมนต์มอร์ตาร์ยังคงใช้เป็นวัสดุหลักในงานก่อสร้างผนัง และฉาบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีคุณภาพดีจะช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพและยืดอายุการทำงานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก [1] ดังนั้นงานวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์ยังคงเป็นหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจในปัจจุบัน การศึกษามอร์ตาร์จะเห็นแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตต่อไป จากการศึกษาพบว่าวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือ โดยการใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น ซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบเปลือกไม้ [1] ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากให้ผลชัดเจนทั้งในการด้านกำลังและความทนทาน เนื่องจากซิลิกาฟูมมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร เล็กกว่าผงปูนซีเมนต์ จึงเข้าไปแทรกในช่องว่างทำให้ซีเมนต์ผสมมีความทึบน้ำมากขึ้นช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การที่ซิลิกาฟูมมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบกว่าร้อยละ 90 ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว โดยปกติเมื่อเติมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 จะช่วยเพิ่มแรงอัดได้ประมาณร้อยละ 30 [1]

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าสามารถใช้วัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าซิลิกาฟูม ซึ่งได้แก่ nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃, nano-TiO₂ และ Carbon Nanotubes เพื่อพัฒนากำลัง อัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ และคอนกรีตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนาโนซิลิกาซึ่งถูกใช้มากที่สุดจากงานวิจัยในอดีต เช่น งานวิจัยของ Li และคณะ [2-3] งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้นาโนซิลิกาซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 15 นาโนเมตร แทนที่ร้อยละ 11

สามารถเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้อีก 1.26 เท่า ในส่วนของคอนกรีต Li และคณะ [4-5] ยังพบว่านาโนซิลิกาช่วยทำให้คอนกรีตต้านทานต่อการขีดสีและเพิ่มความสามารถในการต้านแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาให้กับคอนกรีตพื้นถนนได้เป็นอย่างดี ผลของนาโนซิลิกาต่อสมบัติของคอนกรีตสด ได้แก่ ความสามารถในการไหล (Flow ability) ระยะเวลาการก่อตัว (Setting time) และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of hydration) ถูกนำเสนอในงานวิจัยของ Senff และคณะ [6] นอกจากนี้งานอีกชิ้นหนึ่งของ Senff และคณะ [7] ซึ่งทำการศึกษาซีเมนต์มอร์ตาร์โดยใช้นาโนซิลิกาในการแทนที่ร้อยละ 3.5 และ 7 และแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 0.47 และ 0.59 ยังชี้ให้เห็นว่าการใช้นาโนซิลิกาในการแทนที่ร้อยละ 3.5 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงสุดในทุกอัตราส่วนน้ำ อีกชิ้นหนึ่งเป็นงานวิจัยของ Jo และคณะ [8] ซึ่งใช้นาโนซิลิกาในการแทนที่ร้อยละ 3 6 9 และ 12 และแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.23 0.25 0.32 0.35 และ 0.48 ตามลำดับ พบว่าที่อัตราส่วนน้ำ 0.23 การแทนที่นาโนซิลิการ้อยละ 6 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ที่อัตราส่วนน้ำ 0.25 การแทนที่นาโนซิลิการ้อยละ 9 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ที่เหลือคืออัตราส่วนน้ำ 0.32 0.35 และ 0.48 การแทนที่นาโนซิลิการ้อยละ 12 จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ปริมาณน้ำส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ จากการศึกษาในงานวิจัยในอดีตเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้นาโนซิลิกาเพื่อเพิ่มกำลังอัดให้กับซีเมนต์มอร์ตาร์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตกำลังอัดสูงพิเศษ [2-8] เป็นงานวิจัยที่ได้รับความนิยม งานวิจัยบางชิ้น [7-8] ยังชี้ให้เห็นว่าปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานมีอิทธิพลต่อสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้ ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่มีต่อการพัฒนากำลังอัดและปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิกา โดยเลือกใช้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานในสัดส่วนที่สูงขึ้นคือ W/B เท่ากับ 0.65 0.75 และ 0.85 และแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตรในสัดส่วนร้อยละ 3 6 9 และ 12 ตามลำดับ และเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมเชิงกลของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา จะทำการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) ของซีเมนต์มอร์ตาร์เหล่านี้ควบคู่ไปด้วย

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อการพัฒนากำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อต่อปริมาณการแทนที่ (Replacement Content) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา

3. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1 วัสดุ และสัดส่วนผสม และการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.1.1 วัสดุ

วัสดุหลักที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และนาโนซิลิกา (Nano-SiO₂) ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณ CaO SiO₂ Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ร้อยละ 60.1 22.0 6.6 และ 2.8 ตามลำดับ มีค่า Specific Surface Area (SSA) เท่ากับ 0.38 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 15,000 นาโนเมตร [1] ในขณะที่นาโนซิลิกาที่ใช้มีเฉพาะ SiO₂ เป็นองค์ประกอบร้อยละ 99.8 มีค่า SSA สูงถึง 50 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่ ทฤษฎีที่ใช้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C778 [9] และสารลดน้ำพิเศษ (Super Plasticizers) ที่ใช้เป็นสารประกอบโพลิเมอร์ (Polymer)

3.1.2 ส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์

การศึกษาในงานวิจัยนี้จะเตรียมตัวอย่างการทดสอบ โดยแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.65 0.75 และ 0.85 ตามลำดับ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยควบคุมให้มีค่าการไหลแต่ละเท่ากับ 110±5 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [10] โดยแต่ละ อัตราส่วนน้ำ จะใช้นาโนซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 6 9 และ 12 ตามลำดับ รายละเอียดของส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องถ่ายภาพขยายด้วยอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) จะใช้ส่วนผสมเหมือนกับการทดสอบกำลังอัด แต่จะใช้ปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และ 0.85 และใช้ปริมาณนาโนซิลิการ้อยละ 3 และ 9 เท่านั้น

3.1.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการผสมนาโนซิลิกา กับผงซีเมนต์ให้เข้ากันก่อน จากนั้นเทลงไปผสมกับน้ำในหม้อผสม เริ่มต้นจากการเดินเครื่อง ผสมโดยใช้รอบช้าสุด เพื่อกวนส่วนผสมและน้ำให้เข้ากันก่อน จากนั้นเติมทรายลงไปและปรับเปลี่ยนอัตราเร็วของการผสมให้เป็นไปตามมาตรฐาน ในกรณีที่ต้องใช้สารลดน้ำ ให้ผสมลงไปพร้อมกับน้ำ ซีเมนต์มอร์ตาร์จะต้องควบคุมค่าการไหล ให้ได้ 110±5 จากนั้นเทซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อรูปลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม. เมื่อครบ 24 ชั่วโมงจึงนำก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อ และนำไปบ่มใน น้ำประปา สำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบโครงสร้างจุลภาค จะใช้การตัดชิ้นส่วนของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อยู่ตรงกึ่งกลางลูกบาศก์ให้มีขนาดเท่าฐานวาง (Stub) ประมาณ 3-5 มิลลิเมตร แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปวางติดกับบน Stub แล้วนำไปฉาบผิวด้วยทองหรือโลหะผสมระหว่างทองกับพลาเดียมด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการฉาบผิวเรียกว่า Sputter Coater เมื่อชิ้นส่วนตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ทำการฉาบผิวด้วยทองแล้ว ให้นำตัวอย่างนำมาใส่ในเครื่องทดสอบ SEM และถ่ายภาพขยายในตำแหน่งที่ต้องการจะศึกษาในแต่ละกรณีที่จะศึกษา

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา

Mixture	W/B ratio	Cement (g)	Sand (g)	Nano-silica (g)
OPC	0.65	800	2,200	-
OPC	0.75	800	2,200	-
OPC	0.85	800	2,200	-
NS3	0.65	776	2,200	24
NS6	0.65	752	2,200	48
NS9	0.65	746	2,200	54
NS12	0.65	704	2,200	96
NS3	0.75	776	2,200	24
NS6	0.75	752	2,200	48
NS9	0.75	746	2,200	54
NS12	0.75	704	2,200	96
NS3	0.85	776	2,200	24
NS6	0.85	752	2,200	48
NS9	0.85	746	2,200	54
NS12	0.85	704	2,200	96

หมายเหตุ W/B หมายถึง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

OPC หมายถึง ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม

NSxx หมายถึง ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิการ้อยละ xx

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 การทดสอบกำลังอัด

ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกาทุกส่วนผสมจะทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดตามวิธีการทดสอบกำลังอัดมาตรฐาน ASTM C109 [11] โดยในงานวิจัยนี้จะทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 17 และ 28 วัน ตามลำดับ ในแต่ละส่วนผสมจะทำการทดสอบ 3 ตัวอย่าง และหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย

3.2.2 การศึกษาทางโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

ในการศึกษาทางด้านโครงสร้างจุลภาคจะทำการถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง SEM รุ่น Nova Nano-SEM 450 โดยจะถ่ายภาพที่กำลังขยาย 10,000 เท่า เมื่อซีเมนต์มอร์ตาร์มีอายุ 7 วัน

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

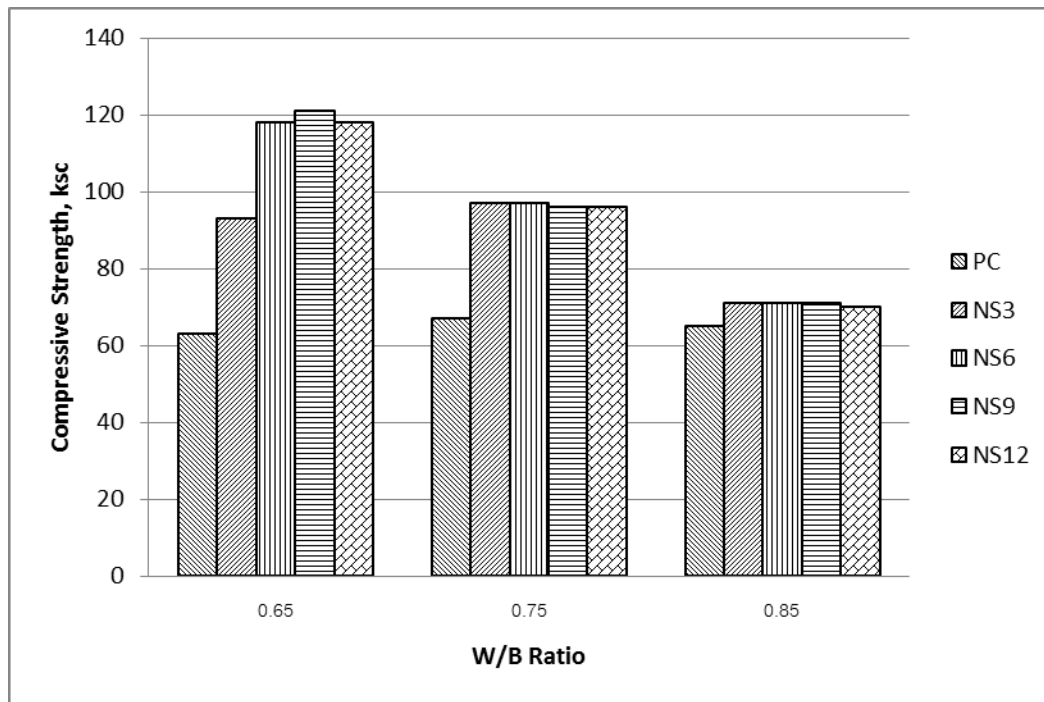
ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งได้ ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาอิทธิพลของ W/B ต่อการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ตาร์ ส่วนที่ 2 ศึกษาอิทธิพล W/B ต่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกา (Replacement Content)

4.1.1 อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานต่อการพัฒนา กำลังอัด

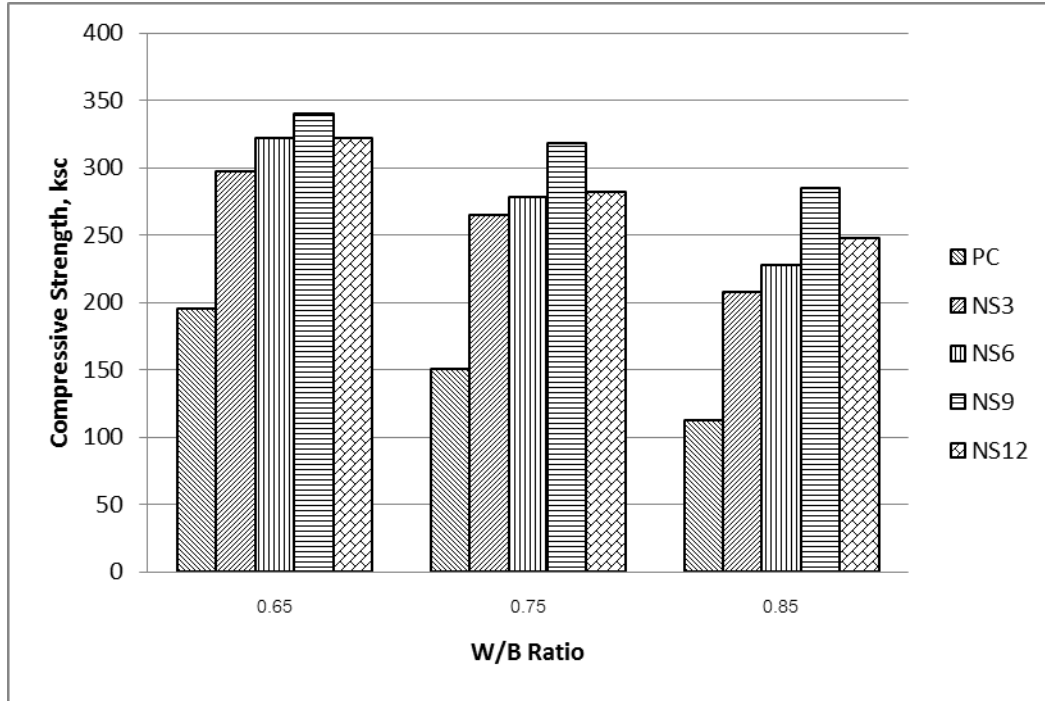
รูปที่ 1-3 เป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่ $W/B = 0.65$ 0.75 และ 0.85 ที่อายุของมอร์ตาร์ 1 7 และ 28 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกาที่ W/B เท่ากับ 0.65 0.75 และ 0.85 เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม เช่นเดียวกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม อย่างไรก็ตามที่อายุ 1 วัน ค่ากำลังอัดที่ได้จะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อเทียบกับที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน เนื่องจาก การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ยังน้อยอยู่ โดยปกติ ปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน [12] เมื่อเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมจะพบว่า การใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดมากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ ควบคุมที่ไม่มีอนุภาคของนาโนซิลิกาในส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ รวมทั้งนาโนซิลิกามีองค์ประกอบของซิลิกา หรือซิลิกอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง ทำให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นได้มีความรวดเร็ว และทำให้มีพันธะที่แข็งแรงขึ้นด้วย

เมื่อเพิ่ม W/B เป็น 0.75 และ 0.85 ก็จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ได้ลดลง ตามปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมเช่นเดียวกับซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติ เนื่องจากมีปริมาณน้ำเกินความจำเป็นในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ส่วนประกอบของน้ำที่เหลือจะเป็นตัวกลางในการนำสารอันตรายเข้ามาทำอันตรายต่อมอร์ตาร์ และถ้ามีส่วนเกินนั้นก็ทำให้เกิดโพรงในมอร์ตาร์ หรือเรียกว่า โพรงคาปิลลารี (Capillary Pores) ทำให้ของเหลวหรือก๊าซที่สามารถทำอันตรายกับมอร์ตาร์ ซึมเข้ามาในโพรง และทำปฏิกิริยากับสารประกอบในมอร์ตาร์ ส่งผลให้เสื่อมสภาพและความทนทานลดลง [12] เมื่อพิจารณาผลของ W/B ต่อปริมาณการแทนที่ (Replacement Content) จากรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ

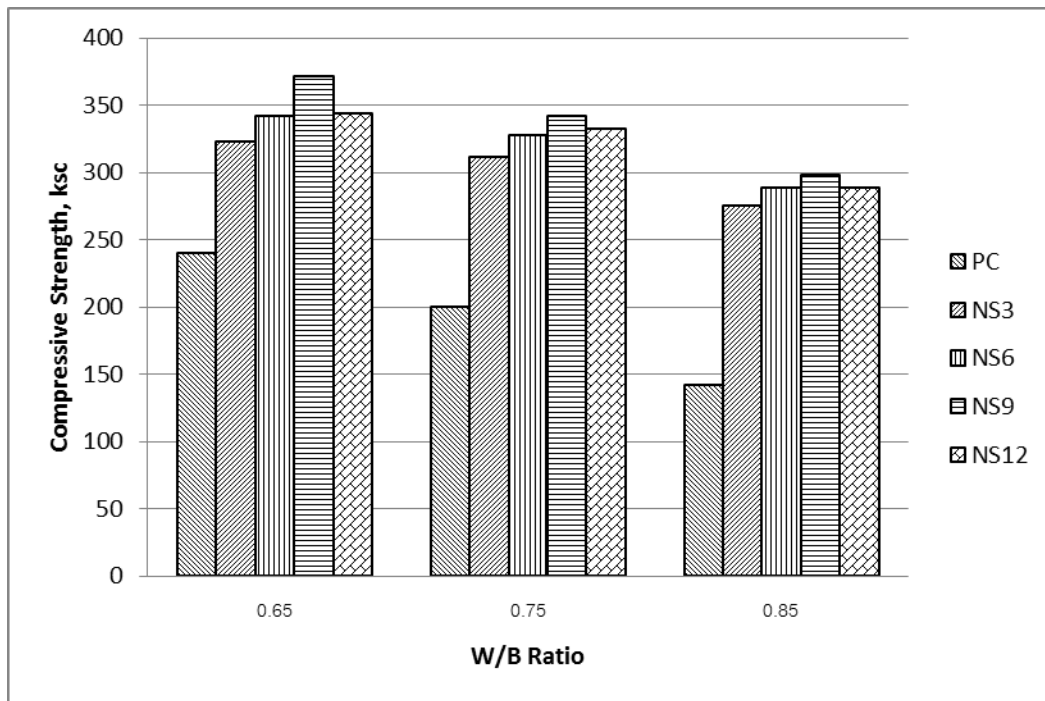
7 และ 28 วัน ในทุกค่า W/B มีค่าสูงสุด ที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 9 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำที่แตกต่างกันนั้นไม่ส่งผลต่อปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิกา ซึ่งสอดคล้องในส่วนของงานวิจัยของ Senff และคณะ [7] ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้นาโนซิลิกาในการแทนที่ร้อยละ 3.5 และ 7 และแปรเปลี่ยน W/B เท่ากับ 0.35 0.47 และ 0.59 งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าใช้นาโนซิลิกาในการแทนที่ร้อยละ 3.5 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงสุดในทุกค่า W/B นอกจากนี้ งานวิจัยของ Jo และคณะ [8] ซึ่งใช้นาโนซิลิกาในการแทนที่ร้อยละ 3 6 9 และ 12 และแปรเปลี่ยนปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.32 0.35 และ 0.48 ตามลำดับ ก็แสดงผลการศึกษาในทิศทางเดียวกัน คือปริมาณการที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิการ้อยละ 12 เป็นปริมาณที่เหมาะสมและให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในทุกอัตราส่วน W/B



รูปที่ 1 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่ W/B = 0.65 0.75 และ 0.85 ที่อายุ 1 วัน



รูปที่ 2 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่ W/B = 0.65 0.75 และ 0.85 ที่อายุ 7 วัน

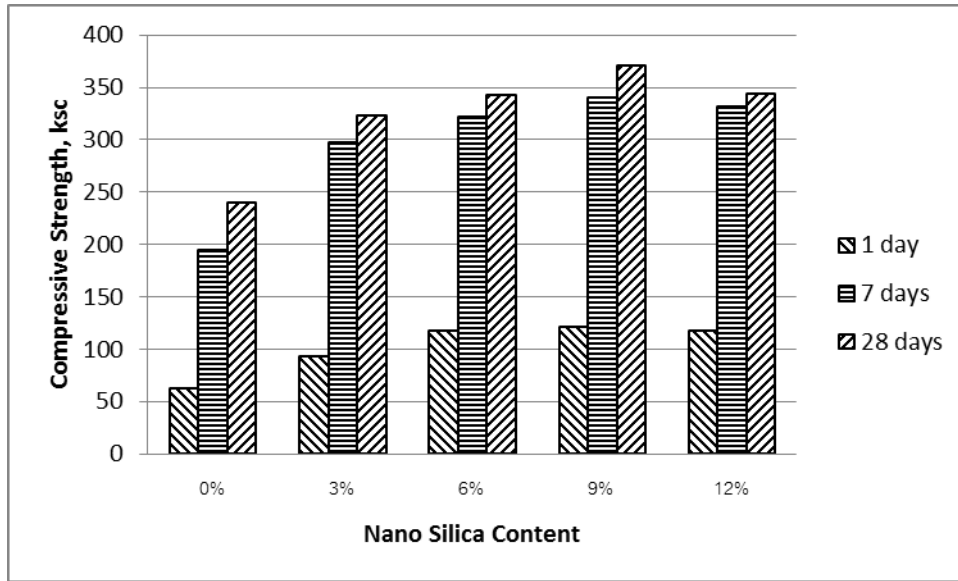


รูปที่ 3 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาที่ W/B = 0.65 0.75 และ 0.85 ที่อายุ 28 วัน

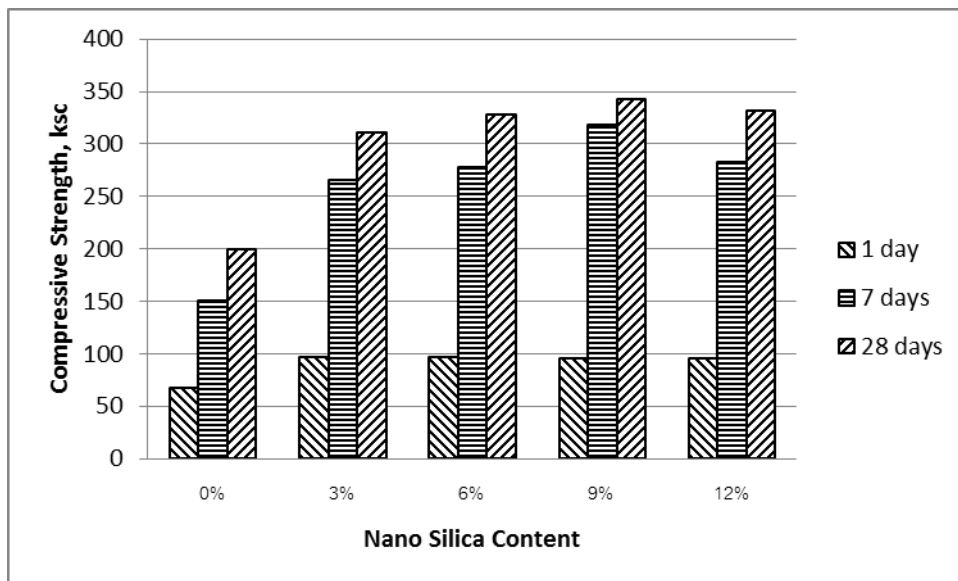
4.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณการแทนที่

รูปที่ 4-6 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ร้อยละ 3 6 9 และ 12 ของปูนซีเมนต์ที่มี W/B 0.65 0.75 0.85 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ที่อายุของมอร์ตาร์ 1 7 และ 28 วัน ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จะสูงขึ้นตามอายุของมอร์ตาร์ ในทุกปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิกา กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน จะเข้าใกล้ที่อายุ 28 วัน แสดงให้เห็นการพัฒนากำลังที่รวดเร็วของมอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของนาโนซิลิกาและมีค่าสูงสุดเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาปริมาณร้อยละ 9 โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน หรือ W/B เท่ากับ 0.65 0.75 และ 0.85 ที่อายุ 7 วัน จะมีค่ากำลังอัดที่มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมถึง 1.74 2.12 และ 2.54 เท่า ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็นร้อยละ 12 กลับพบว่าค่ากำลังที่ได้จะลดลงกล่าวคือปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาที่เหมาะสมคือร้อยละ 9 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณการแทนที่สูงสุด

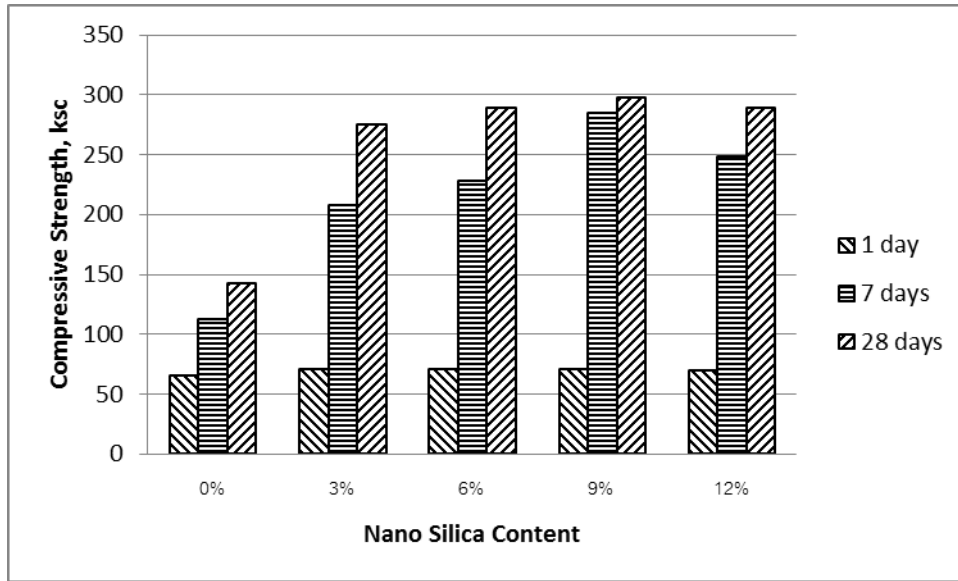
เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตพบว่ามีความแตกต่างอยู่บ้าง เช่น งานวิจัยของ Zelic และคณะ [13] พบว่า ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มร้อยละ 8% เป็นปริมาณที่พอเหมาะ กล่าวโดยสรุปได้ว่าปริมาณนาโนซิลิกาที่น้อยไปหรือมากไปไม่ส่งผลดีต่อการพัฒนากำลัง การแทนที่ใน ปริมาณที่น้อยไปจะมีปริมาณ SiO_2 ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานน้อย พัฒนากำลังได้น้อยเช่นกัน การแทนที่ใน ปริมาณที่มากเกินไปนั้นหมายถึงต้องลดปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลงปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเกิดได้น้อยตามสัดส่วนของซีเมนต์ และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้ในการไปทำปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยเช่นเดียวกัน นั่นคือมีอนุภาคของนาโนซิลิกามาก แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานไม่ได้สูงตามไปด้วย ดังนั้นกำลังรวมของซีเมนต์มอร์ตาร์จึงลดลงเมื่อแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณสูงเกินไป นอกจากนี้ งานวิจัยในอดีต [2-3] ยังระบุว่าเมื่อปริมาณของนาโนซิลิกาสูงไปอนุภาคของนาโนซิลิกาจะขาดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ บางจุดจะเกาะตัวเป็นบริเวณที่มีความอ่อนแอหรือเกิดเป็นช่องว่าง



รูปที่ 4 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ ร้อยละ 3 6 9 และ 12 ของปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65



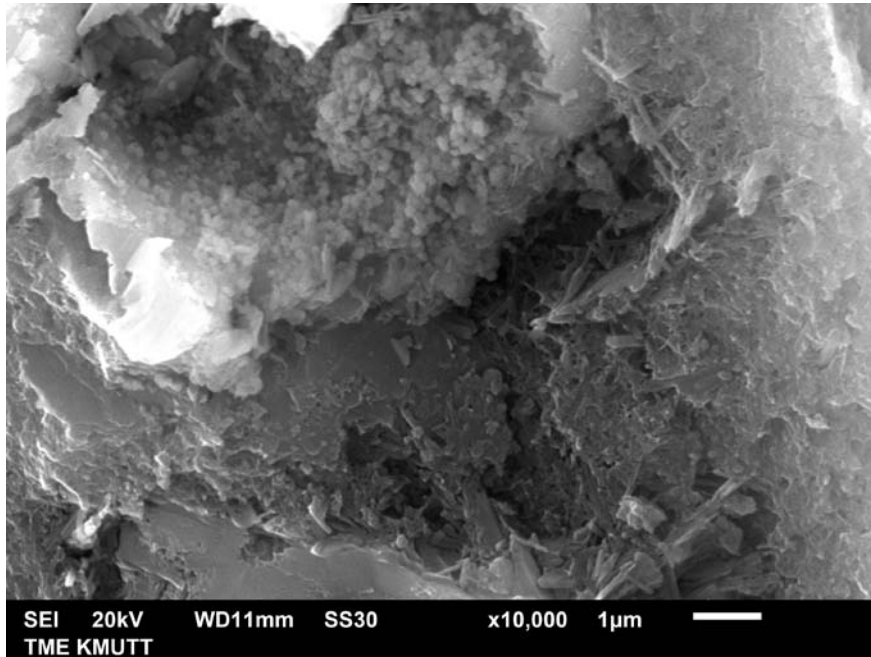
รูปที่ 5 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ ร้อยละ 3 6 9 และ 12 ของปูนซีเมนต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.75



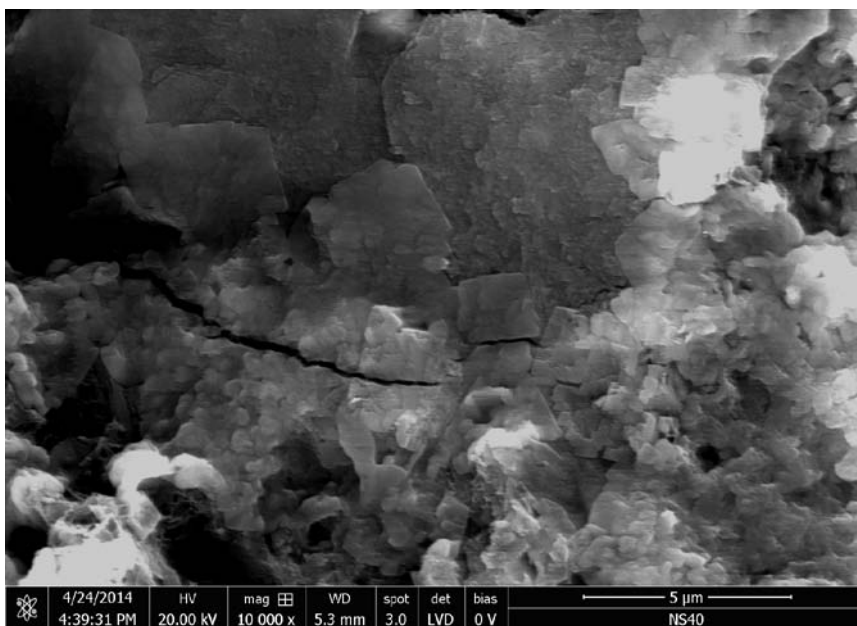
รูปที่ 6 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา แทนที่ ร้อยละ 3 6 9 และ 12 ของปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.85

4.2 อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค

จากรูปที่ 7 และ 8 เป็นรูปถ่ายขยาย ด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่อายุ 7 วัน แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิการ้อยละ ที่มี W/B 0.65 และ 0.85 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และโครงสร้างจุลภาค จากรูปที่ 8 ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.85 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์จะไม่แน่นเต็มที่ มีความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันน้อย และพบว่ามีช่องว่างของโพรงเกิดขึ้น จากน้ำที่เหลือจากการ ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ชัดเจน อนุภาคมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมไม่แน่นอน (Irregular Shape) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 7 ซึ่งเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ W/B เท่ากับ 0.65 พบว่าโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีความแน่นเต็มที่ และแทบไม่มีช่องว่างที่เกิดจากน้ำปรากฏให้เห็น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน นั้นพอเหมาะต่อความต้องการน้ำของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา และสามารถเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างได้ดี เนื้อของมอร์ตาร์และเพสต์มีความแน่นมากกว่าและถ่ายแรงจะทำให้ดีกว่าสอดคล้องกับค่ากำลังอัดที่มากขึ้น



รูปที่ 7 ภาพขยายของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ ร้อยละ 9 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65

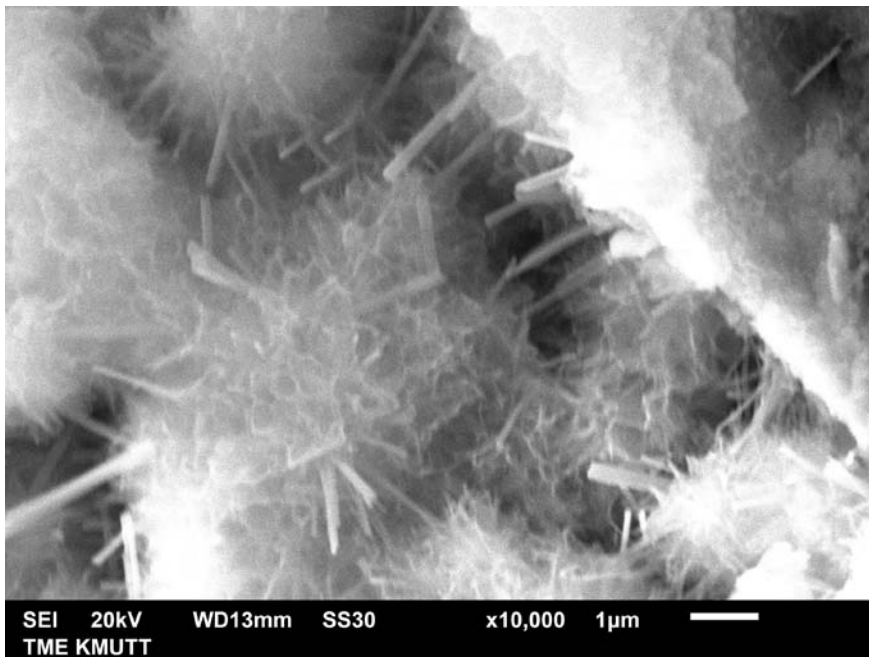


รูปที่ 8 ภาพขยายของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ ร้อยละ 9 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.85

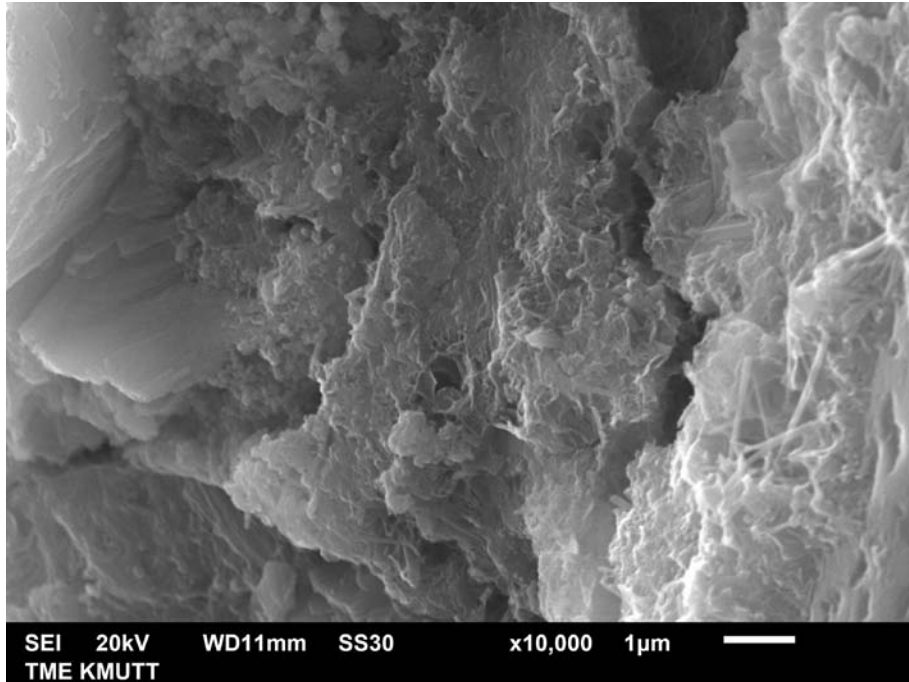
จากรูปที่ 9 เป็นรูปถ่ายขยายของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 อายุ 7 วัน ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า จะเห็นได้ว่า เอททิงไกต์ จะเกิดเป็นลักษณะร่างแหเชื่อมกันเป็นเครือข่าย และในเวลาเดียวกันก็จะเกิดผลึกคริสตัลแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โดยคริสตัล $\text{Ca}(\text{OH})_2$ มีขนาดใหญ่ซึ่ง

จะแพร่กระจายแทรกอยู่รอบ ๆ ของซีเมนต์เพสต์ จากรูปที่ 10 เป็น รูปถ่ายขยายของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 จะเห็น ได้ว่าจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และเอทิงไกต์เป็นจำนวนมาก แต่ผลึกคริสตัล Ca(OH)_2 มีขนาดที่เล็กลงเมื่อเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ทั่วไป แต่ก็ยังส่งผลมอร์ตาร์เกิดช่องว่างที่มากขึ้น ซึ่งการแทนที่ร้อยละ 3 มีปริมาณ SiO_2 น้อย แต่มี Ca(OH)_2 มาก การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อย ช่องว่างเกิดขึ้นเยอะขาดการเติมเต็ม เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 7 ใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาที่แทนที่ร้อยละ 9

การศึกษาพบว่าเมื่อมีการใช้นาโนซิลิกาที่มากขึ้นก็จะส่งผลให้เกิด ปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้น จึงทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นมากขึ้นและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และจะเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) มากกว่าแทนที่ร้อยละ 3 ซึ่งสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เป็นสารที่ทำให้กำลังกับคอนกรีต ซึ่งการแทนที่ร้อยละ 9 มีปริมาณ SiO_2 มากแต่มี Ca(OH)_2 น้อยกว่า การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าไม่มาก ช่องว่างมีการเติมเต็มการอัดแน่นของอนุภาคได้ดีกว่า ทำให้กำลังสุดท้ายดีกว่า จะเห็นได้ว่าปริมาณนาโนซิลิกาไม่เพียงพอที่จะไปทำปฏิกิริยาทำให้เนื้อมอร์ตาร์ไม่ค่อยมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ยังเกิดช่องว่างของเนื้อมอร์ตาร์อยู่เมื่อมาเปรียบเทียบกับการใช้นาโนซิลิกาแทนที่ร้อยละ 9 รูปที่ 7 นาโนซิลิกามีการอัดแน่นของอนุภาคดีกว่าทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงกว่าการแทนที่ร้อยละ 3



รูปที่ 9 ภาพขยายของซีเมนต์มอร์ตาร์ควมคุม ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65



รูปที่ 10 ภาพขยายของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65

5. สรุปผลการทดลอง

1. ปริมาณ W/B มีอิทธิพลต่อการพัฒนา กำลังอัด ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งถ้าใช้ปริมาณน้ำมากเกินไปค่ากำลังอัดจะลดลง น้ำที่เกินความจำเป็นต่อการทำปฏิกิริยาจะเป็นตัวกลางในการนำสารอันตรายเข้ามาทำอันตรายต่อมอร์ตาร์ และและเกิดโพรงใน ซีเมนต์มอร์ตาร์ทำให้ของเหลวหรือก๊าซ เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบในซีเมนต์มอร์ตาร์ได้

2. การใช้นาโนซิลิกาในการแทนที่ซีเมนต์ในส่วนที่น้อยกว่าร้อยละ 9 การพัฒนา กำลังอัดจะแปรตามปริมาณการแทนที่ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 0.75 และ 0.85 ที่อายุ 7 วัน จะมีค่ากำลังอัดที่มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมถึง 1.74 2.12 และ 2.54 เท่า การที่ กำลังอัดลดลงเมื่อแทนที่ในปริมาณที่สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการแทนที่ส่งผลให้ปริมาณซีเมนต์จะลดลง รวมถึงปฏิกิริยาไฮเดรชันและทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน

3. ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ไม่มีอิทธิพลกับ ปริมาณการแทนที่ของนาโนซิลิกา เมื่อมีการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 0.75 และ 0.85 ค่ากำลังอัดที่สูงสุดจะอยู่ที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 9 ในทุกอัตราส่วนน้ำ

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย.
- [2] Li H, Xiao H, Ou J, 2004. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement-mortar with nanophase materials. *Cement and Concrete Research*, 34: 435-438.
- [3] Li H, Xiao H, Ou J, 2004. Microstructure of cement mortar with nano particles. *Composite Part B*, 35:185-189.
- [4] Li H, Zhang M, Ou J, 2006. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear*, 260:1262-1266.
- [5] Li H, Zhang M, Ou J, 2007. Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29:1292-1301.
- [6] Senff L, Labrincha JA, Ferreira VM, Hotza D, Repette W, 2009. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement paste and mortars. *Construction and Building Materials*, 23:2489-2491.
- [7] Senff L, Labrincha JA, Ferreira VM, Hotza D, Repette W, 2010. Mortar with nanosilica investigated by experimental design. *Construction and Building Materials*, 24:1432-1437.
- [8] Jo, BW, Kim CH, Tae GH, Park JB, 2007. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Construction and Building Materials*, 21:1351-1355.
- [9] ASTM C778. Standard specification for standard sand. Standards American Society for Testing and Materials, 2000.
- [10] ASTM C 1437. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. American Society for Testing and Materials; 2007
- [11] ASTM C 109/C109M. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortar (Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens). American Society for Testing and Materials; 2011.
- [12] จักพล กลิ่นมันคง, ดนัย สีนา และ ธนวัฒน์ โชคสว่างเนตร, 2543, การศึกษาสัณฐานภาพของเจ้าปาล์ม น้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 59
- [13] J.Zelic, R.Krstulovic, E.Tkalcec, P.Krolo, 2000. "The properties of Portland Cement-limestone-silica fume mortars" *Cement and Concrete Research*, 30: 145-152.