



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ผลของขนาดอนุภาคนาโนซิลิกา ต่อความทนทานสารละลายซัลเฟตและกรด และกำลังยึดเหนี่ยวของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา

Influence of nanosilica particle size on the sulfate, acid resistances and bonding strength of cement mortar containing nanosilica

ศตวรรษ หลุหรรษพงศ์¹ วชิรกรณ์ แสนาวัง^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย เขตปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10330

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม อำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม 48000

Sattawat Haruehansapong¹ Wachilakorn Sanawang^{2*}

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Bangkok 10330

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom 48000

* Corresponding author.

E-mail: nanoon45@hotmail.com; Telephone: 0 95939 3598

วันที่รับบทความ 27 ตุลาคม 2562; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 14 พฤศจิกายน 2562; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 20 ธันวาคม 2562

วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 3 9 มีนาคม 2563: วันที่ตอบรับบทความ 13 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอค่าความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตและกรด กับกำลังยึดเหนี่ยวและผลของแรงกระทำค้ำค้ำต่อกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร ทดสอบความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตและกรด ทั้งทางด้านกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนัก รวมทั้งทดสอบค่ากำลังยึดเหนี่ยวและทดสอบผลของแรงกระทำค้ำค้ำของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาลากหลายขนาด จากผลการทดสอบพบว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาส่งผลต่อความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตและกรด นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร ให้ค่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่สูงสุด ในขณะที่ค่าการขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ในส่วนผลของกำลังยึดเหนี่ยวและผลของแรงกระทำค้ำค้ำของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ผลการทดสอบพบว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกายังส่งผลต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวและพฤติกรรมการคืบด้วยเช่นกัน ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกานาโนอนุภาค 40 นาโนเมตร มีค่ากำลังยึดเหนี่ยวและแรงกระทำค้ำค้ำที่สูงกว่านาโนซิลิกานาโนอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตร รวมทั้งวัสดุยึดประสานอ็อกซี่

คำสำคัญ

กำลังรับแรงอัด การขยายตัว การสูญเสียน้ำหนัก ความทนทานต่อซัลเฟต กำลังยึดเหนี่ยว นาโนซิลิกา ซีเมนต์มอร์ตาร์

Abstract

This research presents sulfate and acid resistances with bonding strength and effect of a sustained load on the bonding strength of deformed bar in concrete using cement mortar containing nanosilica with particle sizes of 12, 20, and 40 nm. For the sulfate and acid resistances investigation, the compressive strength, expansions and weight loss

including the bonding strength and sustained load of cement mortar with various nanosilica. The test results indicated that the particle sizes of nanosilica directly affected the sulfate and acid resistances. Nanosilica with particles size of 40 nm gave the highest compressive strength while the expansion and weight loss of cement mortar lower than those of cement mortar with Portland cement types I and V. In the part of bonding strength and effect of a sustained load on the bonding strength of deformed bar in concrete using cement mortar containing nanosilica. The results showed that the particle sizes of nanosilica also affected the bonding strength and creep behavior. Cement mortar with nanosilica particle size of 40 nm gave a highest bonding strength and sustained load than those of nanosilica particle size of 12 and 20 nm, including the epoxy resin.

Keywords

compressive strength, expansion, weight loss, sulfate resistances, bonding strength, nanosilica, cement mortar

1. บทนำ

ปัจจุบันเมื่อสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปตามการเจริญเติบโตของสิ่งก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดสภาพแวดล้อมและมลภาวะเป็นพิษ โครงสร้างที่มาจากคอนกรีตเมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมเป็นพิษ และมีการใช้งานไปเป็นเวลานานๆ จะเกิดการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาก่อให้เกิดความเสียหายกับคอนกรีตในลักษณะต่างๆ เช่น การแตกร้าว การหดตัว และการขยายตัว เป็นต้น การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและพฤติกรรมการเสื่อมสภาพจึงจำเป็นสำหรับการนำมาพัฒนาคุณสมบัติคอนกรีตให้มีกำลังที่สูงขึ้น และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมภายนอก อย่างไรก็ตามมีหลากหลายวิธีในการพัฒนาคุณสมบัติและความทนทานคอนกรีต วิธีการที่นิยมอย่างหนึ่งได้แก่ การใช้วัสดุปอซโซลาน ซึ่งมีการนำมาใช้ในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลายทั้งที่ได้จากการสังเคราะห์และจากธรรมชาติ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้นทั้งในด้านกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาเสื่อมสภาพจากซัลเฟต เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งใต้ดินและในน้ำทะเล ประสิทธิภาพการทำลายของซัลเฟตจะรุนแรงมากยิ่งขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง [1] ซึ่งสภาวะแวดล้อมนี้จะทำให้คอนกรีตมีอายุการใช้งานที่สั้นลงในระยะยาวอาจทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัว แตกร้าว และเสื่อมคุณภาพจนไม่สามารถรับกำลังได้ อีกประเด็นหนึ่งที่มีผลจากการกระทำจากสภาพแวดล้อมที่มีต่อการทำลายสมบัติของคอนกรีต คือการกัดกร่อนของคอนกรีตที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบของกรด เช่น ฝนกรด น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สิ่งเหล่านี้จะทำลายผิวของคอนกรีตทำให้มวล

รวมในคอนกรีตเกิดการหลุดร่อน กระบวนการกัดกร่อนของสารเคมีทำให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพและสูญเสียกำลังรับแรงอัดได้ในเวลาต่อมา การพัฒนาคอนกรีตเพื่อป้องกันหรือลดการกัดกร่อนจากสารประกอบของกรดและสารละลายซัลเฟตสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตโดยการลดอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ การเลือกปูนซีเมนต์ชนิดที่ทนต่อซัลเฟต และการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เช่น แอชานิน แอชกลบเปลือกไม้ และซิลิกาฟูม [2-3] นาโนซิลิกาเป็นวัสดุปอซโซลานอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีต เนื่องจากนาโนซิลิกามีขนาดเล็กและมีความละเอียดมากกว่าผงปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี [4] อีกทั้งในปัจจุบันยังพบว่าสิ่งก่อสร้างมากมายส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสิ่งก่อสร้างเหล่านี้มักจะเกิดความเสียหายหรือชำรุดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างหรือเกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผ่านการใช้งานมาแล้ว ความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กย่อมต้องได้รับการซ่อมแซมหรือแก้ไขอย่างถูกต้องเพื่อใช้งานได้ปกติตามที่ออกแบบไว้ วัสดุยึดประสานระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมจัดเป็นวัสดุที่สำคัญอย่างหนึ่งในงานซ่อมแซมและบำรุงรักษางานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก วัสดุเชื่อมประสานที่ติดต้องทำหน้าที่เชื่อมยึดวัสดุ 2 ประเภทให้มิกำลังยึดเกาะหรือกำลังยึดเหนี่ยวสูง ทนต่อแรงกระแทก การเสียดสี ทนต่อความร้อนและการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี และมีความแข็งแรงทนทาน แต่ปัจจุบันก็มีการนำเอาวัสดุหลากหลายชนิดมาพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานได้แก่ การพัฒนาวัสดุอีโพลีเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน [5] หรือการนำเอาอีพอกซีมาเป็นวัสดุพื้นฐานในการใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม [6] ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่นิยม

ใช้มากอีกทั้งยังหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดแต่วัสดุดังกล่าวยังมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาวัสดุประสาน อย่างเช่นวัสดุนาโนซิลิกาเนื่องจากงานวิจัยในอดีต เช่น Li et al. [7] ได้ชี้ให้เห็นว่า การใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร สามารถเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้อีก 26% และงานของ Zhang et al. [8] ยังพบว่านาโนซิลิกาช่วยทำให้คอนกรีตต้านทานต่อการขัดสีและเพิ่มความสามารถในการต้านแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาให้กับคอนกรีตพื้นถนนได้เป็นอย่างดี ในส่วนของการพัฒนากำลังอัดในงานวิจัยของ Jo et al. [9] พบว่านาโนซิลิกาสามารถพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้มากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเกือบ 2.5 เท่า และจากงานวิจัยของ Haruehansapong et al. [10] ยังพบว่าว่าการใช้นาโนซิลิกาในการแทนที่ซีเมนต์ที่ร้อยละ 9 จะมีค่ากำลังอัดที่มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมถึง 2.54 เท่า จากงานวิจัยที่ผ่านมา [7-10] แสดงให้เห็นว่าการใช้นาโนซิลิกาสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและซีเมนต์มอร์ตาร์ทั้งทางด้านกำลังอัดและความคงทนทานของคอนกรีตและซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ [11] นาโนซิลิกาที่มีความละเอียดทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างรวดเร็วและจะเข้าไปอัดแน่นในช่องว่าง [10] ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์และคอนกรีตมีความทึบน้ำมากจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของกรดต่างๆจากสภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการใช้วัสดุอนุภาคระดับนาโนหลายชนิด [12] และการนำนาโนซิลิกาลากหลายขนาดมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากนาโนซิลิกามีราคาที่ถูกลงกว่าวัสดุนาโนชนิดอื่นๆ [13] แต่เมื่อเทียบกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ นาโนซิลิกายังคงมีราคาที่สูงกว่าหลายเท่าตัว แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้พบว่าการใช้ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาให้กำลังสูงมากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติหลายเท่าตัว [10] อีกทั้งซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกายังสามารถทนทานต่อสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นได้ดีจึงเหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน [14,15] และยังพบว่านาโนซิลิกาช่วยทำให้คอนกรีตต้านทานต่อการขัดสีและเพิ่มความสามารถในการต้านแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาให้กับคอนกรีตพื้นถนนได้เป็นอย่างดี [8,11] ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงสนใจที่จะศึกษาถึงผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาต่อคุณสมบัติในด้านความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตและสารละลาย

กรด รวมทั้งยังศึกษาองค์ประกอบของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุยึดประสานระหว่างคอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อย ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่อาจส่งผลต่อกำลังยึดเหนี่ยว ได้แก่ การทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำค้ำด้วยซึ่งยังไม่มีการศึกษามาก่อนในอดีต ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำนาโนซิลิกามาใช้ในงานทางด้านคอนกรีตต่อไป

2. วิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นยังมีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโดโลไมท์ ($MgCO_3$) เป็นจำนวนเล็กน้อย ซึ่งปูนซีเมนต์ ที่ใช้จะประกอบด้วยออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้ รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15,000 นาโนเมตร [2] แสดงในตารางที่ 1

2.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ปูนซีเมนต์ที่มีความสามารถในการต้านทานซัลเฟตได้สูง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นี้จะมีปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมินेट (C_3A) ต่ำมากไม่เกินร้อยละ 5 เพราะไตรแคลเซียมอลูมินेट ในปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตได้ง่าย ดังนั้นเมื่อปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมินेटมีปริมาณน้อยจึงส่งผลให้ลดการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต [2]

2.1.3 นาโนซิลิกา (Nano- SiO_2)

องค์ประกอบหลักทางเคมีของนาโนซิลิกา คือ ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) [16] ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ นาโนซิลิกาที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดมีซิลิกามากกว่าร้อยละ 99.1 ขึ้นไป ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของนาโนซิลิกาที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจน คือ มีลักษณะเป็นฝุ่นผงสีขาวหรือขาวอมฟ้าที่มีความละเอียดมาก โดยจะใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 12 20 และ 40 นาโนเมตร นาโนซิลิกาที่ใช้ทั้ง 3

ขนาดประกอบไปด้วยออกไซด์หลัก ได้แก่ ซิลิกาไดออกไซด์ ร้อยละ 99.8 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	ปูนซีเมนต์ประเภท 5	นาโนซิลิกา 12	นาโนซิลิกา 20	นาโนซิลิกา 40
SiO ₂	22	21.2	99.8	99.8	99.8
Al ₂ O ₃	6.6	3.98	-	-	-
Fe ₂ O ₃	2.8	4.87	-	-	-
CaO	60.1	61.32	-	-	-
MgO	3.3	2.42	-	-	-
SO ₃	2.1	1.84	-	-	-
LOI	2.6	1.7	-	-	-
อนุภาคเฉลี่ย (นาโนเมตร)	15000	12000	12	20	40

2.1.4 สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄)

สารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 10 โมลาร์ ซึ่งโซเดียมซัลเฟตเป็นเกลือโซเดียมของกรดกำมะถัน เมื่อทำการระเหิดน้ำออกจะมีรูปร่างลักษณะเป็นผลึกสีขาว มีสูตรทางเคมีคือ Na₂SO₄ เรียกว่าเกลือของ Glauber มีลักษณะเป็นของแข็งประกอบด้วยโมเลกุลน้ำ 7 โมเลกุล ใช้ในทางอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ อีกรูปแบบหนึ่งที่พบในธรรมชาติมีโมเลกุลน้ำ 10 โมเลกุล ซึ่งเป็นผลพลอยได้สามารถนำไปใช้ในการผลิตกรดไฮโดรคลอริก [17]

2.1.5 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄)

สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 10 โมลาร์ ซึ่งแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นสารประกอบเคมี ของแมกนีเซียม มีสูตรเคมีคือ MgSO₄ มักอยู่ในรูปของเฮปตาไฮเดรต แมกนีเซียมซัลเฟตมีโมเลกุลน้ำ 7 โมเลกุล เรียกอีกอย่างว่า ดีเกลือฝรั่ง ซึ่งได้มาจากการทำนาเกลือโดยจะตกผลึกปนมากับดีเกลือของไทย [17]

2.1.6 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และ กรดซัลฟูริก (H₂SO₄)

สารละลายกรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริกชนิดเกรดอุตสาหกรรม (commercial grade) ที่มีความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 37 โมลาร์ และกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 98 โมลาร์

2.1.7 สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer)

สารลดน้ำพิเศษที่นำมาใช้คือ ADVA Cast 207 เป็นสารประกอบโพลิเมอร์ที่ออกแบบมาใช้งานที่ต้องการกำลังอัดสูงในช่วงต้น ให้ความสามารถในการไหลตัวได้ดี เป็นน้ำยาผสมคอนกรีตที่มีความสามารถในการกระจายกลุ่มก้อนซีเมนต์สูงกว่าจำพวกน้ำยาลดน้ำทั่วไป สารลดน้ำชนิดนี้มีลักษณะทางกายภาพ ข้นหนืดและเป็นสีขุนดำ

2.1.8 เหล็กข้ออ้อย

ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (SD40) มีค่ากำลังคราก (Yield Strength) และค่ากำลังดึง (Tensile Strength) เท่ากับ 4000 กก./ซม² และ 5700 กก./ซม² ตามลำดับ

2.1.9 อีพ็อกซี (Epoxy)

อีพ็อกซีสำหรับงานเสียบเหล็กและเชื่อมประสานประเภทอิโพรพิกชนิด 2 ส่วนผสม ประกอบด้วยสาร A และสาร B ซึ่งสาร A ประกอบไปด้วย 3-อิมิโนเมทิล-3,5,5-ไตรเมทิลไซโคลเฮกซิลอะมีน:3,6-ไดอะซอกเซน-1,8-ไดอะมีน สาร B ประกอบด้วย ออกซิเรน อนุพันธ์ของโมโน (C12-14-อัลคิลออกซี) เมทิล เมื่อสาร A และสาร B ทำปฏิกิริยารวมกันจะเกิดสารผสมคือ บิสฟีนอล เอ-อีพ็อกซีไฮดรินอีพ็อกซีเรซิน (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย <=700)

2.2 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบความคงทนต่อ

สารละลายซัลเฟตและสารละลายกรด

ส่วนผสมของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 9 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แสดงในตารางที่ 2 สัดส่วนของปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 2.75 และควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 110±5 ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [18] โดยในขั้นตอนการผสมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์จะเหมือนกับงานวิจัยของ Haruehansapong et al. [10,11] จากนั้นทำการถอดแบบที่อายุ 1 วัน หลังจากนั้นแบ่งการแช่ตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 บ่มในน้ำประปาปกติ ส่วนกลุ่มที่ 2 แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) และสารละลาย

แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) กลุ่มที่ 3 แห้งในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โดยหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ในการทดสอบกำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนักจากสารละลายกรด ส่วนตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 28.5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับในการทดสอบการขยายตัวจากสารละลายซัลเฟต

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา

ตัวอย่าง	ปูน (กรัม)	ทราย (กรัม)	น้ำ (มิลลิลิตร)	นาโนซิลิกา (กรัม)	สารลดน้ำ (มิลลิลิตร)	ค่าการไหล (มม)
CT1	500	1375	325	-	-	111
CT5	500	1375	325	-	-	113
NS 12 nm	455	1375	325	45	20	109
NS 20 nm	455	1375	325	45	15	107
NS 40 nm	455	1375	325	45	10	110

หมายเหตุ

CT {1, 5} หมายถึง ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5

NS {12 nm, 20 nm, 40 nm} หมายถึง ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีขนาดอนุภาคนาโนซิลิกา 12 20 และ 40 นาโนเมตร ตามลำดับ

2.2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบต่อกำลังยึดเหนี่ยวและความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยว

สำหรับการศึกษานี้ใช้แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นแบบหล่อคอนกรีตในการเสียบเหล็กข้ออ้อยเพื่อทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวและความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยว โดยแบบหล่อคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้มีอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 3 เป็นอัตราส่วนผสมจากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] ที่ให้ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 285 กก./ซม^2 ส่วนการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการยึดประสานระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับคอนกรีต ใช้ทรายมาตรฐานที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 เทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CT 1) อีพ็อกซี (Epoxy) และ นาโนซิลิกา (NS) ที่มีขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้จะใช้

ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิการ้อยละ 9 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ส่วนอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยควบคุมให้มีค่าการไหล ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [18] อัตราส่วนผสมต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยในขั้นตอนการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์จะเหมือนกับงานวิจัยของ Haruehansapong et al. [10,11] จากนั้นหยอดวัสดุประสาน ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา และอีพ็อกซี เป็นตัวยึดประสาน ลงไปในรูเจาะคอนกรีตที่ได้เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ที่เตรียมไว้ตอนแรก จากนั้นทำการเสียบเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร ฝังลงไปในคอนกรีตเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร ทั้งตัวอย่างไว้ในอากาศจนถึงวันทดสอบ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างกำลังยึดเหนี่ยว และความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวจะมีการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่เหมือนกัน

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของตัวอย่างแบบหล่อคอนกรีตลูกบาศก์

วัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต	อัตราส่วนผสม (กก./ม ³)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	350
ทราย	787
หิน	1027
น้ำ (W/C)	188 (0.54)
ค่ายุบตัว	8 ซม.

2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดใช้ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 90 180 270 และ 360 วัน แต่ละอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง แบ่งกลุ่มตัวอย่างทดสอบการบ่มในน้ำประปา การแช่ในสารละลายซัลเฟต และสารละลายกรด โดยทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [19]

2.3.2 การทดสอบการขยายตัวจากสารละลายซัลเฟต

แบ่งตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และกลุ่มที่ 2 แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

(MgSO_4) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ จากนั้นทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ทุก 14 วัน จนตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 180 วัน บันทึกค่าการขยายตัวที่เปลี่ยนไปทุกช่วงอายุ แต่ละอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบการขยายตัวตามมาตรฐาน ASTM C490 [20]

2.3.3 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากสารละลายกรด

แบ่งตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 แห้งในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกลุ่มที่ 2 แห้งในสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ทำการชั่งน้ำหนักหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์ตัวอย่าง โดยทำการชั่งน้ำหนักหาค่าการสูญเสียน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการแช่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายกรดซัลฟูริกทุกอายุ 14 วัน จนตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 180 วัน โดยทำการขัดก่อนตัวอย่างด้วยแปรงขนอ่อนก่อน จึงนำขึ้นผึ่งในอากาศนาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งหาค่าการสูญเสียน้ำหนักในแต่ละช่วงอายุ แล้วบันทึกค่าการสูญเสียน้ำหนักเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักก่อนแช่สารละลายกรด และ คำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก โดยทำการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C694 [21]

2.3.4 การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว

ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวตามมาตรฐาน ASTM C234 [22] เครื่องมือทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวแสดงดังรูปที่ 1 โดยออกแบบให้เป็นกล่องเหล็กขนาด $20 \times 20 \times 20$ ลูกบาศก์เซนติเมตร และนำเหล็ก 2 แผ่นประกบยึดคอนกรีต 2 ด้านภายในกล่องตัวอย่าง และใช้น็อตด้านละ 4 ตัวเพื่อทำการบีบแผ่นเหล็ก จากนั้นยึดจับคอนกรีตให้แน่น เพื่อไม่ให้คอนกรีตเกิดการเคลื่อนในขณะทดสอบ ส่วนด้านล่างของกล่องยึดคอนกรีตจะเชื่อมด้วยแผ่นเหล็กครีบเพื่อให้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) บีบยึดกับกล่องตัวอย่างที่ติดตั้ง

โดยทำการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 3 7 28 และ 90 วัน แต่ละอายุการทดสอบได้จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวของตัวอย่างควบคุมซึ่งเกิดจากการเสียบเหล็กขณะคอนกรีตยังไม่แข็งตัวและทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 28 วัน ค่ากำลังยึดเหนี่ยวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องมือทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของตัวอย่างคอนกรีต

$$u = \frac{P}{\pi D L} \quad (1)$$

โดยที่ u = ค่ากำลังยึดเหนี่ยว (เมกะปาสคาล)

P = ค่าแรงดึงสูงสุดที่กระทำ (นิวตัน)

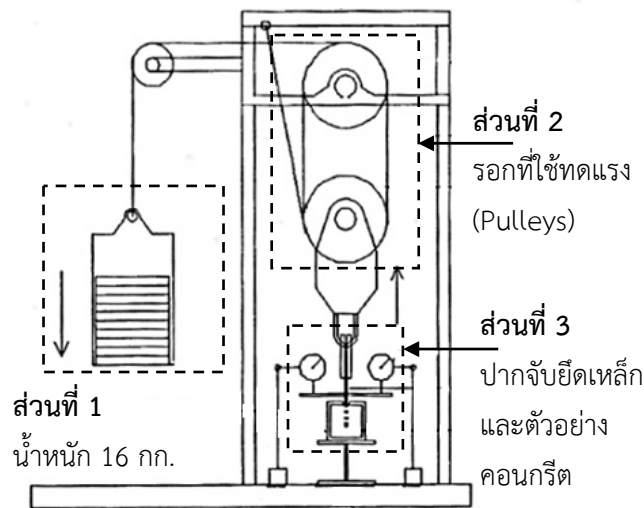
D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กข้ออ้อย (มิลลิเมตร)

L = ระยะฝังเหล็ก (มิลลิเมตร)

2.3.5 การทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยว

การทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำคงค้างตามมาตรฐาน ASTM D2290 [23] จะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของการให้แรงกระทำคงค้างต่อพฤติกรรมการคืบตัวของวัสดุยึดประสาน จะทำการวัดระยะการเลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยออกจากก้อนคอนกรีตที่มีซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม (CT1) ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา (NS) และ อีพ็อกซี (Epoxy) ที่เป็นวัสดุยึดประสานที่เวลาใดๆ โดยจะให้แรงกระทำคงค้างที่ร้อยละ 40 ของค่ากำลังยึดเหนี่ยวประลัยแก่ก้อนตัวอย่าง โดยทำการวัดระยะเลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง เครื่องมือทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวที่กระทำคงค้างระหว่างเหล็กเสริมข้ออ้อยและคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 2 โดยเครื่องทดสอบประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นตะกร้าหนัก 16 กิโลกรัม ที่สำหรับถ่วงโดยน้ำหนักของแผ่นเหล็ก ส่วนที่สองจะเป็นส่วนของรอกที่ใช้ทดแรง (Pulleys) ทำการยึดรอกดังกล่าวไว้ด้วยโครงเหล็ก (Steel

Frame) ร้อยลวดสลิงผ่านระบบรอกทดแรงดังกล่าว สามารถทดแทนแรงดึงได้ 10 เท่าตามทฤษฎี เพื่อเป็นการลดน้ำหนักที่จะนำมาถ่วงแรงดึงให้กับชิ้นตัวอย่าง และส่วนที่สามเป็นส่วนปากจับยึดเหล็กข้ออ้อยและกลองสำหรับจับยึดตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 2 เครื่องมือทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวที่กระทำคงค้างต่อคอนกรีต

ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลการทดสอบ อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D 2290 [23] โดยจะเก็บข้อมูลในนาที่ที่ 1 6 12 และ 30 ตามลำดับ ตามด้วยชั่วโมงที่ 1 2 5 20 50 100 200 500 700 และ 1,000 ตามลำดับ โดยข้อมูลที่เก็บได้นี้

ความคืบสัมพันธ์ (Relative Creep) สามารถคำนวณได้จากการพัฒนาการเปลี่ยนแปลงของเหล็กข้ออ้อยที่ระยะต้นและปลายดังแสดงได้ในสมการ 2

$$\text{Relative Creep} = \left(\frac{\text{FSD} - \text{ISD}}{\text{ISD}} \right) \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ Final Slip Displacement (FSD) = ระยะเลื่อนของเหล็กข้ออ้อยที่ 1,000 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)

Initial Slip Displacement (ISD) = ระยะเลื่อนเริ่มต้นของเหล็กข้ออ้อยที่เวลา 1 นาที (มิลลิเมตร)

อัตราการคืบ (Creep Rate) สามารถคำนวณได้จากระยะเลื่อนของเหล็กข้ออ้อยที่เวลาใดๆ เทียบกับระยะเลื่อนเริ่มต้น ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\text{Creep Rate} = \left(\frac{\text{SD}(t) - \text{ISD}}{\text{ISD}} \right) \times 100 \quad (3)$$

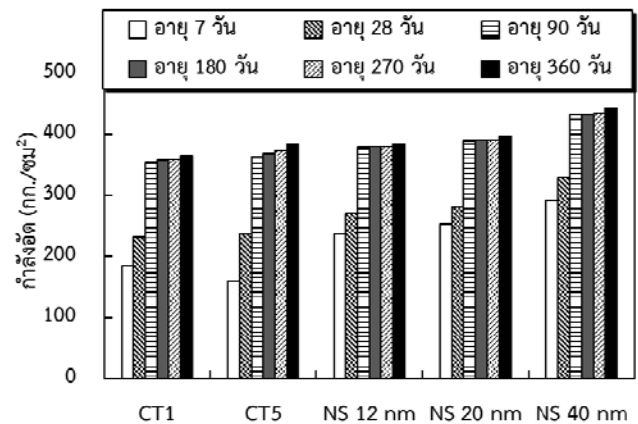
โดยที่ Slip Displacement ($\text{SD}(t)$) = ระยะเลื่อนของเหล็กข้ออ้อยที่เวลาใดๆ (มิลลิเมตร)

Initial Slip Displacement (ISD) = ระยะเลื่อนเริ่มต้นของเหล็กข้ออ้อยที่เวลา 1 นาที (มิลลิเมตร)

3. ผลการวิจัย

3.1 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

การศึกษาผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่บ่มในน้ำประปา ส่วนที่ 2 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต และส่วนที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 กับ 5 และซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่บ่มในน้ำประปา

3.1.1 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แช่ในน้ำประปา

พิจารณากำลังอัดซีเมนต์มอร์ตาร์ที่บ่มในน้ำประปาของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 9 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

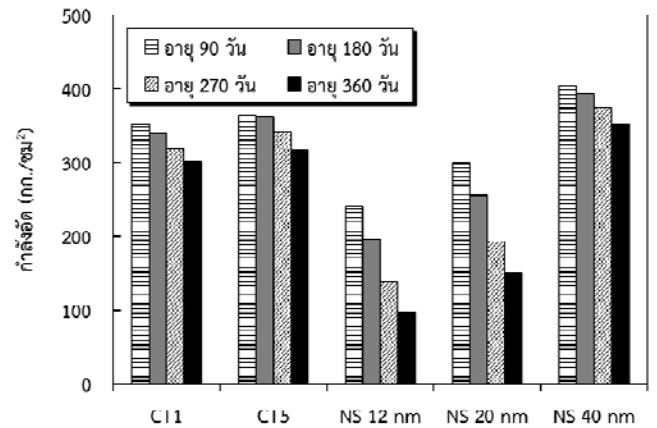
จากรูปที่ 3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของกำลังอัดกับระยะเวลาการบ่มในน้ำประปาที่ระยะเวลา 7 28 90 180 270 และ 360 วัน ของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 กับ 5 และซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 9 พบว่าที่อายุ 7 28 และ 90 วัน กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 (CT1) มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 185 232 และ 354 กก./ชม² หลังจากนั้นที่อายุ 180 270 และ 360 วัน กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์เริ่มมีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือ มีค่าเท่ากับ 357 358 และ 365 กก./ชม² ตามลำดับ โดยพบว่ากำลังอัดช่วงต้นที่อายุ 7 วัน ของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 5 (CT5) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 159 กก./ชม² ซึ่งมีค่ากำลังอัดต่ำกว่า CT1 และที่อายุ 28 วันขึ้นไป กำลังอัดของ CT5 มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีค่ากำลังอัดสูงกว่า CT1 ที่อายุ 28 90 180 270 และ 360 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 237 362 369 374 และ 385 กก./ชม² ซึ่งมีค่าสูงกว่า CT1 เท่ากับร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 5 สังเกตว่าที่อายุ 7 วัน กำลังอัดของ CT5 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่า CT1 อย่างมาก คือมีค่าต่ำกว่าเท่ากับร้อยละ 14 ของ CT1 แม้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน ก็ตาม สาเหตุที่ CT5 มีกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ต่ำกว่า CT1 และเมื่ออายุเพิ่มขึ้นกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นและสูงกว่า CT1 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณ C₃S ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่ทำให้กำลังอัดแก่คอนกรีตในช่วงอายุต้น น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นทำได้ช้ากว่า [2] แต่ปริมาณ C₂S ซึ่งเป็นสารประกอบที่ช่วยพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุปลายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีปริมาณสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงส่งผลให้กำลังอัดที่อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป สามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่า CT1 ได้ ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ อีรติ

และ คณะ [24] ในส่วนผลของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร (NS12) 20 นาโนเมตร (NS20) และ 40 นาโนเมตร (NS40) จากความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาทุกขนาดอนุภาคมีการพัฒนากำลังอัดขึ้นตามอายุการบ่ม โดยซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาที่อายุการบ่ม 7 28 90 180 270 และ 360 วัน NS12 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 237 271 379 380 381 และ 385 กก./ชม² ตามลำดับ ส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา NS20 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 253 282 390 391 391 และ 398 กก./ชม² และซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา NS40 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 292 329 432 433 434 และ 443 กก./ชม² ตามลำดับ จากความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่แตกต่างกัน (12 20 และ 40 นาโนเมตร) มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน นาโนซิลิกาที่มีอนุภาคขนาดเล็ก คือ 12 นาโนเมตร และ 20 นาโนเมตร จะทำให้เนื้อของซีเมนต์มอร์ตาร์ไม่ค่อยเป็นเนื้อเดียวกัน และมีช่องว่างระหว่างซีเมนต์เฟสเกิดขึ้น [25] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เหมาะสม คือ 40 นาโนเมตร จะพบว่าเนื้อของซีเมนต์มอร์ตาร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น [10] ช่องว่างระหว่างซีเมนต์เฟสไม่ปรากฏขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่เหมาะสมสามารถเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างซีเมนต์เฟสได้พอดี ซึ่งขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่มีขนาดเล็ก ไม่สามารถแทรกช่องว่างระหว่างซีเมนต์เฟสได้พอดี แทนที่จะเป็นการเติมเต็มช่องว่างระหว่าง ซีเมนต์เฟส นาโนซิลิกาอาจจะไปเคลือบผิวรอบอนุภาคของซีเมนต์ ทำให้ยังคงเหลือช่องว่างในเนื้อซีเมนต์มอร์ตาร์อยู่ กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพียงอย่างเดียว เพราะนาโนซิลิกาที่ไปเคลือบผิวรอบอนุภาคซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อมีการใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นที่เหมาะสมคือ 40 นาโนเมตร สามารถเข้าไปแทรกตัวระหว่างซีเมนต์เฟสได้พอดี ส่งผลให้เกิดการอัดแน่นระหว่างอนุภาคได้ดี ทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความหนาแน่นมากขึ้น และมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ได้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยเป็นผลรวมระหว่างการเติมเต็มของช่องว่างและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Haruehansapong

et al. [10] ที่พบว่านาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตร

3.1.2 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต

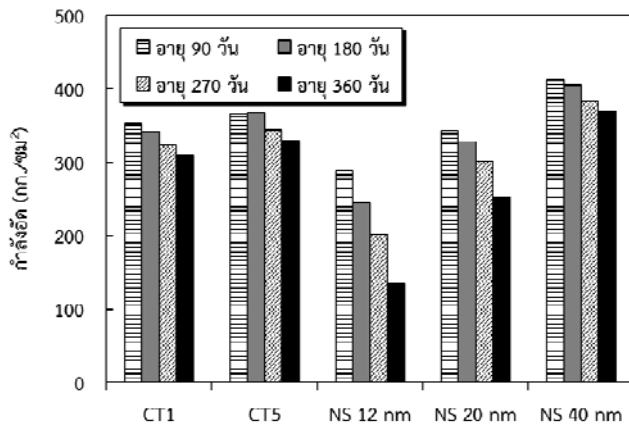
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 กับซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 9 พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาทั้ง 3 ขนาดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาในการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต โดยกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ NS12 NS20 และ NS40 ที่อายุ 360 วันมีค่าเท่ากับ 97 151 และ 352 กก./ซม² ตามลำดับ ซึ่ง NS40 มีการลดลงของกำลังอัดเนื่องจากการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมซิลเฟตน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ CT1 ที่ใช้ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตร ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่า CT1 มาก ทั้งนี้เนื่องจากซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตร มีความต้องการน้ำในส่วนผสมสูงมาก ถึงแม้ว่านาโนซิลิกาจะช่วยพัฒนา กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว แต่ผลของปริมาณน้ำอาจมีผลกระทบสูงกว่า จึงทำให้กำลังอัดโดยรวมลดลงมากกว่า CT1 และค่ากำลังอัดที่ลดลงส่งผลให้ความสามารถการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซิลเฟตลดลงด้วย [26] ทำให้เกิดความเสียหายกับซีเมนต์มอร์ตาร์แต่กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร มีขนาดอนุภาคที่เหมาะสมทำให้กำลังอัดโดยรวมของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกานี้สูงกว่า CT1 ถึง 1.17 เท่า และสูงกว่า CT5 ถึง 1.11 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 กับ 5 และ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต

3.1.3 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 กับซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต ให้ผลสอดคล้องมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีที่แช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต อย่างไรก็ตามการลดลงของกำลังอัดกรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตมีค่าการลดลงของกำลังอัดมากกว่ากรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตเมื่อเปรียบเทียบที่อายุการแช่เดียวกัน เพราะว่าการเกิดของเอทิงไกต์ และยิปซัมในกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตมีมากกว่า จึงเป็นผลให้การกัดกร่อนของแมกนีเซียมซิลเฟตเกิดขึ้นมากกว่า ส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่แช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตมีค่าที่มากกว่าที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต [27]



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกําลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 กับ 5 และ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

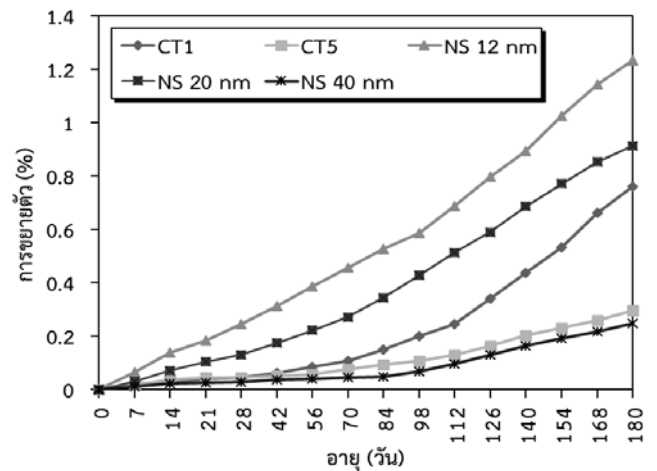
3.2 การขยายตัวของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์

การศึกษาผลการขยายตัวของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แสดงผลการขยายตัวของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และส่วนที่ 2 แสดงผลการขยายตัวของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 10 โมลาร์

3.2.1 การขยายตัวของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6 การขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 กับซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบการใช้นาโนซิลิกา ทั้ง 3 ขนาดอนุภาคที่อายุ 180 วัน พบว่าแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ CT1 และ CT5 มีร้อยละการขยายตัวเท่ากับ 0.7618 และ 0.2961 ตามลำดับ นอกจากนี้แท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร มีค่าร้อยละการขยายตัวเท่ากับ 0.2471 ซึ่งต่ำกว่า CT1 ถึง 3.08 เท่า และต่ำกว่า CT5 ถึง 1.19 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ของนาโนซิลิกาที่มีความละเอียดสูง และอนุภาคขนาดเล็กมากในปริมาณที่เหมาะสมทำให้ขนาดอนุภาคนาโนซิลิกาสามารถแทรกเข้าไปช่องว่างของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ดี ทำให้ลด

ปริมาณ C_3A และยิบซั่มที่ทำให้เกิดการขยายตัว รวมทั้งนาโนซิลิกายังมีองค์ประกอบของ SiO_2 ในปริมาณที่สูงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความรวดเร็วในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานด้วยเหตุนี้จึงส่งผลโดยรวม ทำให้การขยายตัวของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์เกิดขึ้นน้อย [14] แต่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคเป็น 12 และ 20 นาโนเมตร จะมีค่าร้อยละการขยายตัวเท่ากับ 1.2349 และ 0.9142 ซึ่งมีการขยายตัวสูงกว่า CT1 1.62 และ 1.20 เท่า ตามลำดับ และค่าการขยายตัวสูงกว่า CT5 มากถึง 4.17 และ 3.09 เท่า ตามลำดับ โดยขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตรให้ค่าการขยายตัวมากกว่าขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตรทั้งที่มีพื้นผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าเนื่องจากนาโน ซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตรมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก แทนที่จะเข้าไปอัดแน่นในช่องว่างของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ดี นาโนซิลิกาอาจจะเข้าไปเคลือบรอบๆ อนุภาคของปูนซีเมนต์แทนทำให้เกิดการเกาะตัวกันแบบไม่เสถียร ขาดการอัดแน่นของอนุภาค [11] ดังนั้นขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาส่งผลต่อการขยายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์

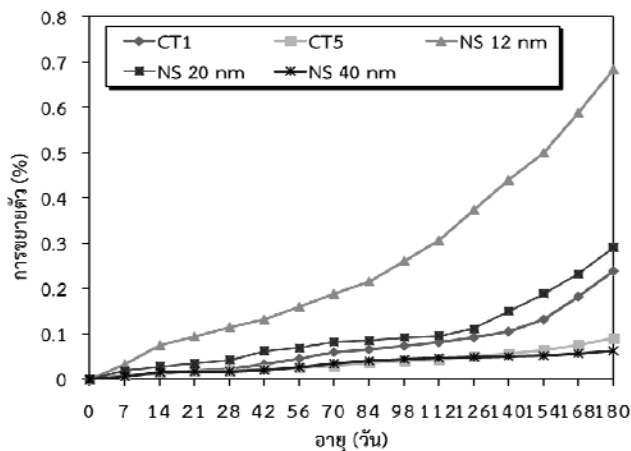


รูปที่ 6 การขยายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ประเภทที่ 1 กับ 5 และ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

3.2.2 การขยายตัวของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างของการขยายตัวกับระยะเวลาในการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 กับซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 20

และ 40 นาโนเมตร พบว่าการขยายตัวและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ปริมาณการขยายตัวของกรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการขยายตัวต่ำกว่ากรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 7 การขยายตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ประเภทที่ 1 กับ 5 และ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

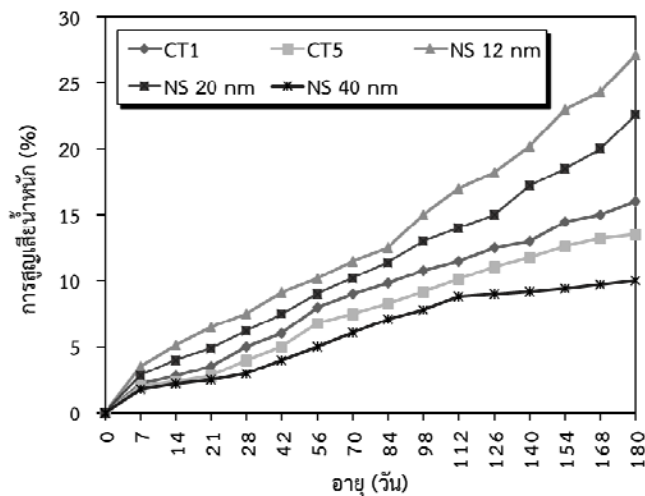
3.3 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์เนื่องจากสารละลายกรด

การศึกษาผลการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แสดงผลการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 37 โมลาร์ และส่วนที่ 2 แสดงผลการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์เมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 98 โมลาร์

3.3.1 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริก

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนัก กับระยะเวลาในการแช่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 กับซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตรทุกอัตราช่วงอายุมีการสูญเสีย

น้ำหนักที่น้อยกว่า CT1 และ CT5 ที่อายุ 180 วัน การแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์ต่ำสุดคือ ร้อยละ 8.78 ซึ่งเมื่อเทียบกับ CT1 และ CT5 ทำให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าถึง 1.78 และ 1.52 เท่า ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ส่งผลให้น้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์มีความหนาแน่นมากขึ้นและมีการยึดเกาะระหว่างมวลรวมดีขึ้น ความเป็นด่างในมอร์ตาร์ลดลง ส่งผลให้ลดการกัดกร่อนจากกรดไฮโดรคลอริกอย่างเห็นได้ชัด [28] ส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตรให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 27.12 และ 22.61 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับ CT1 พบว่ามีค่าการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าถึง 1.54 และ 1.28 เท่าตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่มีความละเอียดสูงจึงมีความต้องการอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นแปรผันตรงตามความละเอียด การสูญเสียน้ำหนักจะลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง เนื่องจากส่วนผสมจะมีปริมาณในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานลดลง ส่วนที่เพิ่มขึ้นคือปริมาณน้ำ ทำให้ผลผลิตของปฏิกิริยาทั้งสองลดลง แต่จะมีโพรงที่เต็มไปด้วยน้ำ การซึมผ่านของกรดเพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาจึงง่ายขึ้น ส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ตาร์ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน และเกิดการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นซึ่งสอดคล้องตามผลของกำลังอัดเช่นเดียวกัน พบว่านาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักน้อยสุดเมื่อเทียบกับ CT1 CT5 NS12 และ NS20 ซึ่งตัวอย่างมีความทึบแน่นมากขึ้น การกัดกร่อนของกรดซึมผ่านได้ยากส่งผลให้นาโนซิลิกาที่ขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าสูงสุด ทั้งนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมา [29] ได้มีการประยุกต์ใช้นาโนซิลิกาเป็นวัสดุเคลือบผิว (Nano-composite Coating) แสดงให้เห็นได้ว่าขนาดของอนุภาคนาโนซิลิกาส่งผลโดยตรงต่อกำลังยึดเหนี่ยวและความทนทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุเคลือบผิว ทำให้นาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตรสามารถช่วยลดการกัดกร่อนจากกรดได้

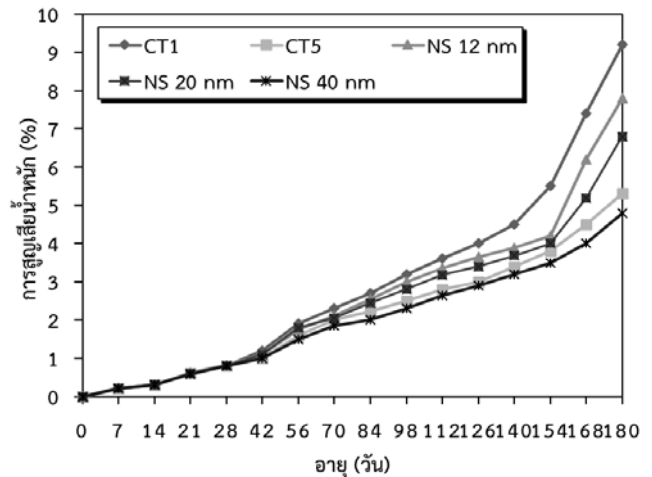


รูปที่ 8 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ประเภทที่ 1 กับ 5 และ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่แช่ในกรดไฮโดรคลอริก

3.3.2 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์เนื่องจากกรดซัลฟูริก

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาที่แช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก ดังแสดงในรูปที่ 9 ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับการแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกแต่มีความรุนแรงที่น้อยกว่า เนื่องจากลักษณะการกัดกร่อนของกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก มีความแตกต่างกัน คือ กรดไฮโดรคลอริกจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมในซีเมนต์มอร์ตาร์ทำให้เกิดเกลือแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) สามารถละลายน้ำและถูกชะล้างออกได้ง่าย ในขณะที่กรดซัลฟูริกจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมในซีเมนต์มอร์ตาร์เช่นเดียวกัน แต่จะเกิดเป็นเกลือแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งจะทำการก่อเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้ [30] จากผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์เนื่องจากกรดซัลฟูริก พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดเนื่องจากนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร มีขนาดที่เหมาะสมในการแทรกซึมช่องว่างของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ ส่วนนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตรมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก แทนที่จะเข้าไปอัดแน่นในช่องว่างของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ดี นาโนซิลิกาอาจจะเข้าไปเคลือบรอบๆอนุภาคของปูนซีเมนต์แทน ทำให้เกิดการเกาะตัวกันแบบไม่เสถียร ขาดการอัดแน่นของอนุภาคทำให้ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์

ด้าร์มีความพรุนช่องว่างเกิดขึ้น [11] การซึมผ่านของกรดเพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาจึงง่ายขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน และเกิดรอยละการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์มากขึ้น

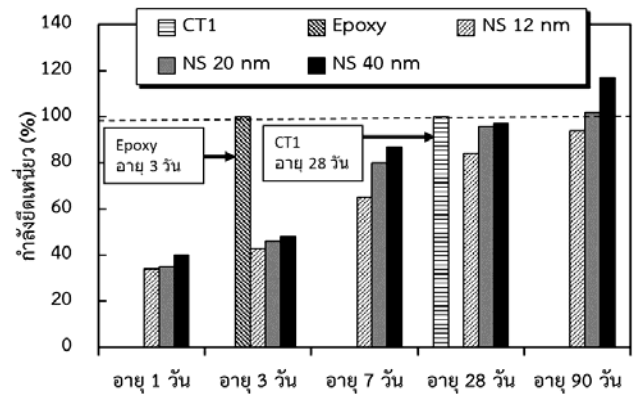


รูปที่ 9 การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ประเภทที่ 1 กับ 5 และ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่แช่ในกรดซัลฟูริก

3.4 กำลังยึดเหนี่ยวของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา

จากรูปที่ 10 แสดงกำลังยึดเหนี่ยวของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 28 วัน และวัสดุประสานอีพ็อกซี ที่อายุ 3 วัน กับซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร ที่อายุ 1 3 7 28 และ 90 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 และ 20 นาโนเมตร ในทุกช่วงอายุการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กเกินไปในที่นี้คือนาโนซิลิกาขนาด 12 นาโนเมตร ไม่ส่งผลดีต่อการพัฒนา กำลังยึดเหนี่ยว เป็นการพัฒนากำลังที่เกิดมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานเท่านั้น ซึ่งนาโนซิลิกาอนุภาคขนาดเล็กมากแทนที่จะสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างที่เหลืออยู่ในซีเมนต์มอร์ตาร์เพื่อทำให้เกิดการอัดแน่น แต่อาจจะเข้าไปเคลือบผิวรอบๆอนุภาคของซีเมนต์แทนทำให้การอัดแน่นระหว่างอนุภาคของซีเมนต์ไม่ดีเมื่อมีการใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นมา ซึ่งในที่นี้คือนาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร ปฏิกริยาปอซ

โซลานยังคงทำได้มากเนื่องจากปริมาณซิลิกายังอยู่ในระดับสูงเช่นเดิม แต่สิ่งที่ได้เพิ่มคืออนุภาคนาโนขนาดใหญ่ขึ้นสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างของซีเมนต์ได้มากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ผลของค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นจะเป็นผลร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานและการอัดแน่นของอนุภาค สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [10] ซึ่งพบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกัน จะมีการพัฒนากำลังอัดไม่เท่ากัน และผลที่ได้ยังมีความสอดคล้องกับงานของ Yuan et al. [28] ซึ่งได้มีการใช้ขนาดนาโนซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกันเคลือบผิวคอนกรีตพบว่าขนาดอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีขนาดปานกลางมีค่าการเคลือบยึดเกาะกับผิวคอนกรีตได้ดีกว่าขนาดอนุภาคอื่นๆ จากการวิจัยในครั้งนี้ชี้ให้เห็นชัดเจนถึงผลของขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาซึ่งส่งผลต่อการพัฒนากำลังยึดเหนี่ยว เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม (CT1) ที่อายุ 28 วัน และกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยอีพ็อกซี (Epoxy) ที่อายุ 3 วัน ซึ่งเป็นตัวยึดประสานที่นิยมใช้ในท้องตลาดพบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร ให้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวน้อยกว่าอย่างชัดเจนในช่วงอายุต้น แต่มีกำลังที่ใกล้เคียงกับ CT1 (ร้อยละ 84-95) ที่อายุ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานระหว่างเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีตเดิมได้ แต่ต้องการระยะเวลาในการพัฒนากำลังยึดเหนี่ยวให้สูงไม่น้อยกว่า 28 วัน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาของนาโนซิลิกาเป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งโดยปกติปกติปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน [2] อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบในเรื่องของต้นทุน เปรียบเทียบกับวัสดุประสานอีพ็อกซีพบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามีต้นทุนที่ถูกกว่าพอควร ซึ่งอัตราส่วนในการผสมตัวอย่างวัสดุประสานแต่ละครั้งสามารถนำไปใช้ได้หลายตัวอย่างทดสอบ [25]



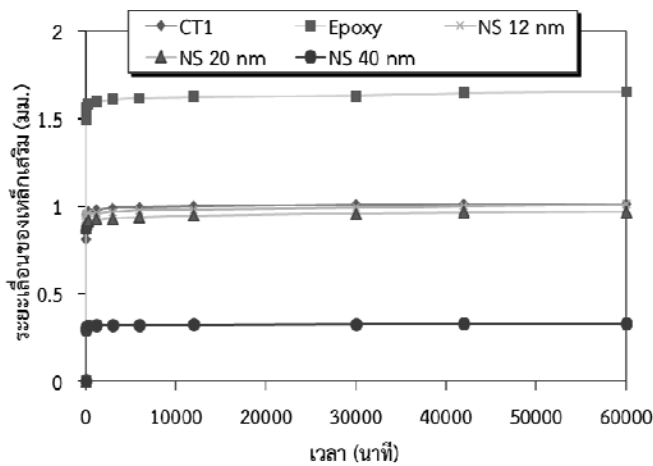
รูปที่ 10 กำลังยึดเหนี่ยววัสดุประสานของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา และ อีพ็อกซี

3.5 กำลังยึดเหนี่ยวของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาต่อแรงกระทำค้ำ

การศึกษามูลของน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำต่อกำลังยึดเหนี่ยวในการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนตัว (Slip Displacement) ของเหล็กเสริมเทียบกับเวลาของวัสดุยึดประสาน ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอผลการค้ำสัมพันธ์และอัตราการค้ำของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตซึ่งยึดประสานเมื่อรับแรงค้ำ โดยทั้ง 2 ส่วนเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่อายุ 28 วัน และวัสดุประสานอีพ็อกซีที่อายุ 3 วัน

3.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนตัวของเหล็กเสริมเทียบกับเวลา

จากการทดสอบความคงทนของวัสดุประสานที่ทำจากซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง โดยใช้แรงกระทำค้ำ (Sustained load) ที่ร้อยละ 40 ของกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุประสาน และนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริม (Slip Displacement) เทียบกับระยะเวลา แสดงดังกราฟรูปที่ 11



รูปที่ 11 ระยะเลื่อนตัวหลักเสริมของวัสดุประสานซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา และ อีพ็อกซี

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุยึดประสานที่ทำจากซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 และ 20 นาโนเมตร มีระยะเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมและต่ำกว่าวัสดุยึดประสานอีพ็อกซี โดยเฉพาะอย่างยิ่งซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมนาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตร มีระยะเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและต่ำกว่าวัสดุยึดประสานอีพ็อกซี ดังนั้นวัสดุผสมที่ทำจากซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 40 นาโนเมตรมีแนวโน้มที่จะมีความคงทนต่อแรงกระทำค้ำได้มากที่สุด

3.5.2 อัตราการคืบของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต

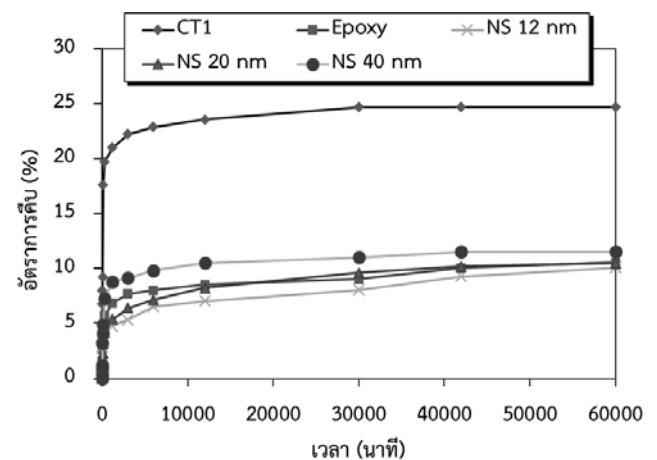
ค่าการคืบสัมพัทธ์ (Relative Creep) ที่ต่ำแสดงถึงความคงทนต่อแรงกระทำค้ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าการคืบสัมพัทธ์ที่สูงแสดงให้เห็นว่าวัสดุยึดประสานมีความคงทนต่อน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำต่ำ จากผลการคำนวณค่าการคืบสัมพัทธ์ที่ 1,000 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4

จากตารางพบว่า CT1 มีอัตราการคืบสูงถึงร้อยละ 24.69 อีพ็อกซีสำหรับงานยึดประสานในท้องตลาดมีอัตราการคืบร้อยละ 10.54 และซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาขนาด 12 20 และ 40 นาโนเมตร มีอัตราการคืบร้อยละ 10.08 10.46 และ 11.53 ตามลำดับ ซึ่งวัสดุประสานซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามีการคืบสัมพัทธ์ไม่แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ว่าการคืบสัมพัทธ์ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาในทุกขนาดอนุภาคจะมีความใกล้เคียงกัน เมื่อวัสดุยึดประสาน

ของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิการับแรงกระทำค้ำเท่ากัน และขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาไม่ส่งผลต่อค่าการคืบสัมพัทธ์ ผลการทดสอบที่ได้คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Lincy et al. [31] ที่พบว่านาโนซิลิกามีผลต่อคุณสมบัติการคืบ (Creep Properties) ที่น้อย

ตารางที่ 4 การคืบสัมพัทธ์ที่ 1,000 ชั่วโมง เมื่อให้น้ำหนักค้ำที่ร้อยละ 40 ของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีตซึ่งยึดประสาน

ตัวอย่าง	ความคืบสัมพัทธ์ (%)
CT1 (อายุ 28 วัน)	24.69
Epoxy (อายุ 3 วัน)	10.54
NS 12 nm (อายุ 28 วัน)	10.08
NS 20 nm (อายุ 28 วัน)	10.46
NS 40 nm (อายุ 28 วัน)	11.53



รูปที่ 12 อัตราการคืบของกำลังยึดเหนี่ยววัสดุประสานของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา และ อีพ็อกซี

ทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาอัตราการคืบ (Creep Rate) หรือปริมาณการคืบที่เวลาใด ๆ ในแต่ละช่วงเวลากการเก็บข้อมูล ดังแสดงในกราฟรูปที่ 12 พบว่าวัสดุยึดประสานด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา ที่มีขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตร และอีพ็อกซีสำหรับงานยึดประสานในท้องตลาด มีอัตราการคืบเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกัน โดยในระยะแรกอัตราการคืบจะเพิ่มขึ้นอย่าง

รวดเร็วกว่าและจะเริ่มคงที่ในช่วงหลัง และเมื่อเปรียบเทียบกับ CT1 พบว่าอัตราการคืบสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา และอีพ็อกซีสำหรับงานยึดประสาน จากข้อมูลเหล่านี้สรุปได้ว่าวัสดุประสานที่ทำจากซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา เป็นวัสดุยึดประสานที่มีความคงทนต่อแรงกระทำค้ำได้ดี สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโครงสร้างได้ [28] จากการทดสอบพฤติกรรมการคืบที่ผ่านมาจะเห็นว่า ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาที่มีกำลังยึดเหนี่ยวประลัยสูงจะมีความคงทนต่อพฤติกรรมการคืบได้ดีด้วยเช่นกัน และมีความสอดคล้องกับกำลังอัดประลัยของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา [10,11] ด้วยกล่าวคือ ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาที่มีกำลังอัดประลัยสูงจะส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวสูงขึ้นตามไปด้วย

6. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ พบว่า

- 1) ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกา ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนา กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แช่น้ำประปา และแช่ในสารละลายซิลเฟตกับสารละลายกรด ซึ่งซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร ทุกอายุการทดสอบมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตร และซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมทั้งประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 การใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร จะเพิ่มประสิทธิภาพของค่ากำลังอัด เนื่องจากเป็นผลรวมระหว่างการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและการอัดแน่นของอนุภาคที่มีขนาดเหมาะสม
- 2) ความทนทานต่อสารละลายซิลเฟตในรูปของการขยายตัว พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร มีการขยายตัวที่ต่ำกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เมื่อแช่ในสารละลายซิลเฟตนาน 180 วัน นอกจากนี้การใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตรที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากพบว่าการขยายตัวของแท่งซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าการขยายตัวที่เพิ่มขึ้น

- 3) ความทนทานต่อสารละลายของกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายของซัลฟูริกในรูปของการสูญเสียมวลหนัก พบว่าเมื่อใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร ที่อายุ 180 วัน มีค่าการสูญเสียมวลหนักน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาค 12 และ 20 นาโนเมตร กับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5
- 4) กำลังยึดเหนี่ยวของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาค 12 20 และ 40 นาโนเมตรให้ค่าที่น้อยในช่วงอายุดัน แต่ที่อายุ 28 วัน ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามีกำลังใกล้เคียงซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วัน กับอีพ็อกซีที่อายุ 3 วัน แสดงให้เห็นว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานระหว่างเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีตเดิมได้ แต่ต้องการระยะเวลาในการพัฒนากำลังยึดเหนี่ยวให้สูงไม่น้อยกว่าที่อายุ 28 วัน
- 5) วัสดุยึดประสานด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาให้ค่าสัดส่วนของระยะเลื่อนจากการคืบต่อแรงกระทำค้ำต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และต่ำกว่าอีพ็อกซีสำหรับงานยึดประสานด้วยเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าการคืบของวัสดุยึดประสานที่ทำจากซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกาเกิดขึ้นน้อย
- 6) ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาไม่ส่งผลต่อค่าการคืบสัมพันธ์และอัตราการคืบ เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม และอีพ็อกซีสำหรับยึดประสานในห้องตลาด ซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกามีค่าการคืบสัมพันธ์และอัตราการคืบค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วงเดียวกับอีพ็อกซี และต่ำกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมอย่างเห็นได้ชัดแสดงถึงความคงทนต่อแรงกระทำค้ำที่สูง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยจากกองทุนวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยนครพนม (สัญญาทุนเลขที่ 3764/2563) และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ วิทยาเขตอุเทนถวาย สาขาวิศวกรรมโยธา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ditao N, Lei J, Qiannan F. Deterioration mechanism of sulfate attack on concrete under freeze-thaw cycles. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science*. 2013; 28(6): 1172-1176.
- [2] Chindaprasert P, Jaturapitakkul C. Cement pozzolan and concrete. *Thailand Concrete Association*. 2008; 11:235-340.
- [3] คุณาพจน์ วงษ์คำ, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์, เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง, จักขดา อารังวุฒิ, ชยกฤต เพชรช่วย. กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรัง-กากกาแฟปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2561; 11(2): 65-73.
- [4] Ye Q, Zhang Z, Kong D, Chen R. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*. 2007; 21: 539-545.
- [5] Veronica S, Alisson C, Noan T, Eduardo S, Fernanda S, Sergio N. Mechanical and microstructural characterization of geopolymers concrete subjected to fatigue. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018; 7(4): 566-570.
- [6] Saccani A, Magnaghi, V. Durability of epoxy resin-based materials for the repair of damaged cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 1999; 29: 95-98.
- [7] Li H, Zhang M.H, Ou J.P. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement-mortar with nanophase materials. *Cement and Concrete Research*. 2004; 34: 435-438.
- [8] Zhang M.H, Li H, Ou J.P. Flexural fatigue performance of concrete containing nanoparticles for pavement. *International Journal of Fatigue*. 2007; 29: 1292-1301.
- [9] Jo B.W, Kim C.H, Tae G.H, Park J.B. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Construction and Building Materials*. 2007; 21: 1351-1355.
- [10] Haruehansapong S, Pulngern T, Chucheepruk S. Effect of the partial size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂. *Construction and Building Materials*. 2014; 50: 471-477.
- [11] Haruehansapong S, Pulngern T, Chucheepruk S. Effect of nanosilica partial size on the water permeability, abrasion resistance drying shrinkage, and repair work properties of cement mortar containing nano-SiO₂. *Advance in Materials Science and Engineering*. 2017; 1-11.
- [12] Jason J, Ahmed B, Yen S.C, Alain D, Michael K.D. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2018; 9: 1050-1074.
- [13] Paratibha A, Rahul P.S, Yogesh A, Raja R.H. Use of nano-silica in cement based materials-a review. *Cogent Engineering*. 2015; 2(1): 1-11.
- [14] Iqbal G, Ali A.J, Maan S.H. Sulfate and chloride resistance of nanosilica and microsilica contained self-consolidation concretes. *Kufa Journal of Engineering*. 2018; 9(4): 23-44.
- [15] Nader G, Iani B, Meysam. Sulfate resistance of nanosilica and microsilica contained mortars. *Aci Materials Journal*. 2016; 113(4): 459-469.
- [16] Vital A, Klotz U, Graulet T, Mueller R, Kammler H.K, Pratsinis S.E. Synthesis of spherical, non-aggregated silica nanoparticle. *NATO Advanced Research Workshop on Nanostructured Materials and Coatings*. 2002; 102: 203-210.
- [17] วิเชียร ชาลี, กิรติกร เจริญพร้อม. การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน *วารสารและวิจัยพัฒนา มจร.* 2555; 35(2): 157-171.

- [18] ASTM C1437. *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. West Conshohocken: ASTM International; 2007.
- [19] ASTM C109. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 2 in. or [50 mm.] Cube Specimens)*. West Conshohocken: ASTM International; 1997.
- [20] ASTM C490. *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete*. West Conshohocken: ASTM International; 2001.
- [21] ASTM C490. *Standard Test Method for Weight Loss (Mass Loss) of Sheet Steel During Immersion in Sulfuric Acid Solution*. West Conshohocken: ASTM International; 2016.
- [22] ASTM C234. *Standard Test Method of Comparing Concrete on the Basis of Bond Developed with Reinforcing Steel*. West Conshohocken: ASTM International; 1997.
- [23] ASTM D2290. *Standard Test Method for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics*. West Conshohocken: ASTM International; 2010.
- [24] อธิติ ศรีจันทร์, บุรณัฏฐ์ ฉัตรวีระ, พงษ์ศักดิ์ โชคทวี กาญจน์, สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. การศึกษาผลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ชนิดของปูนซีเมนต์และวัสดุประสานร่วมกัน. *วารสารและวิจัยพัฒนา มจร*. 2554; 34(4): 383-394.
- [25] ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์, ทวีช พูลเงิน, สมชาย ชูชีพสกุล. กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา. *วารสารและวิจัยพัฒนา มจร*. 2554; 34(3): 231-244.
- [26] Chengsheng O, Antonio N, Wen F.C. Internal and external sources of sulfate ions in portland cement mortar: two types of chemical attack. *Cement and Concrete Research*. 1988; 18: 699-709.
- [27] Al-Amoudi O.S.B. Mechanisms of sulfate attack in plain and blended cement: a review. *Proceedings of the International Seminar*. University of Dundee, Scotland: UK; 1999. p. 247-260.
- [28] Wee T.H, Arvind K.S, Wong S.F, Anisur R. Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures. *Journal of the American Concrete Institute*. 2000; 97: 536-549.
- [29] Yuan J, Shuxue Z, Guangxin G, Limin W. Effect of the particle size of nanosilica on the performance of epoxy/silica composite coatings. *Journal of Materials Science*. 2005; 40: 3927-3932.
- [30] Menashi D, Cohen B, Arnon B. Durability of portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solution. *Journal of the American Concrete Institute*. 1988; 85: 148-157.
- [31] Lincy V, Kanta R, Lakshmy P. Effect of nanosilica on drying shrinkage and creep properties of cement concrete. *Advance Materials Proceedings*. 2017; 2(1): 56-60.