

การพัฒนานาโนซิลิกา ร่วมกับเส้นใยปาล์มน้ำมันและเส้นใยป่านศรนารายณ์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต

Development of Nano-silica Combined with Oil Palm Fibers and Sisal Fibers to improve the Properties of Concrete

ณัฐชัย บรรเทิงสุข¹, ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์^{2*}, ณรงค์เดช อินทร์ต้นชัยกิจ², เอนก เนรมิตครบุรี²,
ธวัชชัย ปัญญาคิด³, ปัญญา คล่องอักษรกุล³ และ เซาฟีร์ ดือราแม⁴

Natthachai Bantoengsuk, Sattawat Haruehansapong, Narongdej Intaratchaiyakit, Anek Neramitkornburi, Thawatchai Phanyakit, Panya Klongaksornkul and Saofee Dueramae

¹นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย

³อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย

⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

¹Master Degree, Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala
University of Technology Tawan-ok (Uthenthawai Campus)

²Assistant Professor, Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok (Uthenthawai Campus)

³Lecturer, Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok (Uthenthawai Campus)

⁴Assistant Professor, Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Krungthep

E-mail address: sattawat_ha@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกา เส้นใยปาล์มน้ำมัน และเส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 12 นาโนเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีความยาว 20 มิลลิเมตร ลงในส่วนผสม ทดสอบสมบัติคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่มีการเติมนาโนซิลิกาและเส้นใยธรรมชาติมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่า การเติมวัสดุเหล่านี้ สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับ

แรงดัดของคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เติมเส้นใยมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ การทดสอบการซึมผ่านของน้ำพบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยธรรมชาติมีค่าการซึมผ่านของน้ำสูงกว่าคอนกรีตควบคุม การเติมนาโนซิลิกา เส้นใยปาล์มน้ำมัน และเส้นใยป่านศรนารายณ์ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต อย่างไรก็ตามการปรับปรุงส่วนผสมเพิ่มเติมจำเป็นต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ ด้านกำลังรับแรงอัดและการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ

คำสำคัญ: นาโนซิลิกา, เส้นใยปาล์มน้ำมัน, เส้นใยป่านศรนารายณ์, กำลังรับแรงดัด, กำลังรับแรงอัด, การซึมผ่านของน้ำ

Abstract

The aim of this study is to investigate the compressive strength, flexural strength, and water permeability of concrete incorporating Nano-silica, oil palm fibers, and sisal fibers. Nano-silica with an average particle size of 12 nanometers was used to replace cement at 3% by weight, while oil palm fibers and sisal fibers with a length of 20 millimeters were added to the mix. The properties of the concrete were tested at 28 days of age.

The results showed that concrete containing Nano-silica and natural fibers exhibited higher flexural strength than the control concrete, indicating that these materials enhance the flexural performance of concrete. However, the compressive strength of fiber-reinforced concrete was lower than that of the control concrete. Additionally, water permeability testing revealed that fiber-reinforced concrete exhibited higher permeability than the control concrete.

In conclusion, the incorporation of nano-silica, oil palm fibers, and sisal fibers enhances the flexural strength of concrete. However, further modification of the mixture is required to improve compressive strength and water resistance.

Keywords: Nano-silica, Oil palm fiber, Sisal fiber, Flexural strength, Compressive strength, Water permeability

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความแข็งแรงและความทนทานสูง อย่างไรก็ตาม คอนกรีตแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความเปราะ (Brittleness) ซึ่งทำให้เกิดรอยแตกร้าวภายใต้แรงดัด นอกจากนี้ คอนกรีตทั่วไปยังมีปัญหาการดูดซึมน้ำและความทนทานต่อสารเคมี ซึ่งส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพในระยะยาว การเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตในด้าน คุณสมบัติทางกล ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และอายุการใช้งานยังคงเป็นประเด็นสำคัญในงานวิจัย และอุตสาหกรรมก่อสร้าง การพัฒนาคอนกรีตให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานในรูปแบบต่างๆ เช่น กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงอัด และความสามารถในการต้านทานการดัด

นาโนซิลิกาได้รับการยอมรับว่าเป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาคอนกรีต ด้วยขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ทำให้นาโนซิลิกา สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของ คอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพิ่มความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีต ลดช่องว่างภายใน และเสริมความแข็งแรงของพันธะระหว่างมวลรวมและซีเมนต์ การใช้สอพอซิลิกา เช่น ซิลิกาฟุ้ง เป็นที่นิยมในอดีต แต่การใช้นาโนซิลิกาถือเป็น ขั้นตอนต่อยอดที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น งานวิจัยในอดีต เช่น การศึกษาของ Hui และคณะ (2010) พบว่า นาโนซิลิกขนาด 10 นาโนเมตร สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ได้ถึง 26% พร้อมทั้งช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขีดสีและแรงกระทำซ้ำ

นอกเหนือจากนาโนซิลิกา การนำเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยปาล์มน้ำมัน และเส้นใยป่านศรนารายณ์ มาผสมในคอนกรีตก็ได้รับความนิยมอย่างมาก เส้นใยเหล่านี้มีคุณสมบัติเด่น ในด้านความเหนียว ความทนทาน และความสามารถในการต้านทานแรงดึง เส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมน้ำมันพืช ซึ่งช่วยลดปริมาณของเสียในอุตสาหกรรมและ เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ ในขณะที่เส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นพืชที่ปลูกง่าย มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยทั้งสองชนิด ช่วยเพิ่มความเหนียวและลดการแตกร้าวของคอนกรีต งานวิจัยในอดีตสนับสนุนศักยภาพของเส้นใยธรรมชาติ และนาโนซิลิกาในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ ญัฐวัฒน์ เสาะสูงเนิน และ คณะ (2565) ได้ทำการทดสอบคอนกรีตผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีความยาว 20 มม., 40 มม. และ 60 มม. ในสัดส่วนร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนัก จำนวน 81 ตัวอย่าง เทียบกับคอนกรีตควบคุมจำนวน 9 ตัวอย่าง พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ทุกตัวอย่าง มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ โดยคอนกรีตที่ผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ความยาว 40 มม. อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 มีกำลังรับแรงดัดสูงสุด รณกฤต กุลธวัชวงศ์ และ คณะ (2562) ได้ทำการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ความยาว 40 มม. อัตราส่วนผสมร้อยละ 0.5, 0.75 และ 1 โดยปริมาตร พบว่าโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ทุกตัวอย่าง มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่าโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม และผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ความยาว 40 มม. อัตราส่วนผสมร้อยละ 0.75 โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่า ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ส่วนวิชญพงศ์ ท้วดาว และ ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์ (2565) รายงานว่าการทดสอบกำลังรับแรงดัดคอนกรีตที่ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันความยาว 20 มม. อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิล ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันความยาว 20 มม. อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนักมีค่ามากกว่าคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบรีไซเคิลควบคุม ในขณะที่การศึกษาของ Mao-Hua และคณะ (2007) แสดงให้เห็นว่าการใช้ Nano-TiO₂ และ Nano-SiO₂ ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดและความทนทานต่อการสึกกร่อนของคอนกรีต จากงานวิจัยของ กาณท์ ทะนนท์ และคณะ (2566) ทดสอบคอนกรีตผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน ความยาว 20 มม. อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และคอนกรีตผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ความยาว 20 มม. อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าทั้ง 2 ส่วนผสม มีค่าความพรุนและค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าของคอนกรีตควบคุม

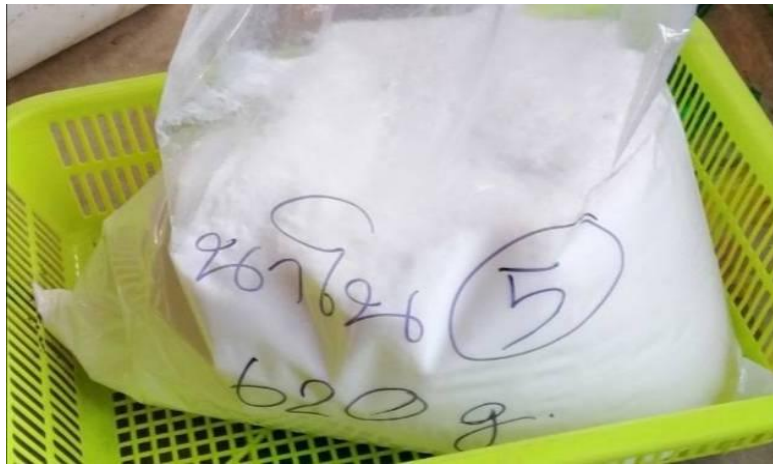
งานวิจัยที่ผ่านมา ได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตโดยใช้ นาโนซิลิกา และ เส้นใยธรรมชาติ อย่างแพร่หลาย เช่น งานของ Hui และคณะ (2010) ที่แสดงให้เห็นว่า นาโนซิลิกาขนาด 10 นาโนเมตรสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ได้ถึง 26% อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้ มุ่งเน้นเฉพาะการพัฒนา คอนกรีตที่เสริมด้วยนาโนซิลิกา หรือการใช้เส้นใยธรรมชาติเพียงชนิดเดียว โดยยังขาดการศึกษาร่วมกันระหว่างวัสดุทั้งสองประเภท

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (OPC), มวลรวมหยาบ (หิน) ขนาด 5 มม.ขึ้นไปและค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, มวลรวมละเอียด(ทราย)ขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐาน No.30 และค้ำตะแกรง No.100 นอก จากนี้ยังใช้นาโนซิลิกาขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร ซึ่งมีปริมาณ SiO₂ ร้อยละ 99.8 ดังแสดงในรูปที่ 1 เส้นใยปาล์มน้ำมันมีสีออกน้ำตาล ขนาดความยาวประมาณ 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยผ่านกระบวนการล้างน้ำให้สะอาดและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนเส้นใยป่านศรนารายณ์ มีลักษณะเส้นสีขาวขนาดเล็ก มีความยาว 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยผ่านกระบวนการแช่ในสารละลาย NaOH 5% เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำที่ผสมกรดอะซิติก 1% เพื่อขจัด NaOH ส่วนเกินออกไป ก่อนผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ในการล้างทำความสะอาดของเส้นใยทั้งสองชนิด ก่อนนำไปใช้ผสมคอนกรีต มีกรรมวิธีที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติของเส้นใยแต่

ละชนิด เส้นใยปาล์มน้ำมันมีปริมาณลิกนินสูงประมาณ 19% ซึ่งลิกนินมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ช่วยลดการดูดซึมน้ำของเส้นใยและทำให้เส้นใยมีความทนทานต่อสภาพต่างในคอนกรีตได้ดี การล้างด้วยน้ำสะอาดเพียงพอสำหรับขจัดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อนที่ผิวเส้นใยโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี ซึ่งการใช้สารเคมีอาจทำให้เส้นใยเสียหายหรือคุณสมบัติเชิงกลลดลงได้ ส่วนเส้นใยป่านศรนารายณ์ มีสารประกอบธรรมชาติ คือ ลิกนิน (lignin), เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และไขมันเคลือบที่ผิว ทำให้การยึดเกาะกับคอนกรีตได้ไม่ดีและดูดน้ำจากปูนซีเมนต์มากเกินไป ทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้า และมีรอยแตกร้าวได้ การล้างโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และน้ำที่ผสมกรดอะซิติก (Acetic Acid) เป็นการล้างและปรับสภาพผิว (surface treatment) เป็นกระบวนการที่เรียกว่า alkaline treatment โดยกระบวนการนี้จะช่วยกำจัดลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และสารเคลือบผิวอื่น ๆ ทำให้ผิวเส้นใยหยาบและเปิดมากขึ้น เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเนื้อคอนกรีต



รูปที่ 1 นาโนซิลิกา ขนาดอนุภาค 12 นาโนเมตร



รูปที่ 2 เส้นใยปาล์มน้ำมัน ขนาดความยาว 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 3 เส้นใยป่านศรนารายณ์ ขนาดความยาว 20 มิลลิเมตร

2.2 สัดส่วนการผสม

การศึกษานี้ใช้สัดส่วนผสมทั้งหมด 8 ตัวอย่าง โดยใช้อัตราส่วนเส้นใยปาล์มน้ำมัน (PF) และเส้นใยป่านศรนารายณ์ (SF) แทนที่ทรายหยาบในอัตราส่วนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักและใช้นาโนซิลิกา (NS) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก และควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ในช่วง 7.50 – 12.50 เซนติเมตร เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ (COT) ดังแสดงในตารางที่ 1 ในงานวิจัยนี้ใช้นาโนซิลิกาแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 3% โดยน้ำหนัก ซึ่งประสิทธิภาพปฏิกิริยาปอซโซลานิกเมื่อใช้อัตราส่วน 3% จะเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ได้สาร C-S-H ที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต หากใช้นาโนซิลิกาน้อยกว่า 3% ผลที่ได้อาจไม่ชัดเจนหรือมีปริมาณ C-S-H ที่ไม่เพียงพอในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต การกระจายตัวและปัญหาการรวมตัวของอนุภาค การใช้นาโนซิลิกาในอัตรา 3% ช่วยให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีในเมตริกซ์ของคอนกรีต ซึ่งหากใช้อัตราส่วนที่สูงกว่านี้ อาจทำให้เกิดปัญหาอนุภาครวมตัว (agglomeration) ทำให้ประสิทธิภาพลดลงและอาจส่งผลต่อความหนืดและการทำงานของคอนกรีต ความสามารถในการทำงาน (Workability) และคุณสมบัติทางกล การใช้อัตราส่วน 3% ช่วยให้คอนกรีตมีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความสามารถในการปรับตัว ระหว่างการผสม และการก่อสร้าง การใช้นาโนซิลิกามากเกินไปทำให้คอนกรีตมีความหนืดสูง ทำให้การผสมและการทำงานยากขึ้น ดังนั้น 3% จึงถูกเลือกเป็นอัตราส่วนที่ให้ผลดีที่สุด โดยคำนึงถึงทั้งปฏิกิริยาเคมีในระบบคอนกรีต ความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาค การทำงานของคอนกรีตในภาคสนาม

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างและสัดส่วนของวัสดุที่ใช้ผสมในคอนกรีตที่ใช้ทำการทดสอบ

ตัวอย่าง	สัดส่วนส่วนผสม (กก./ม. ³)							
	น้ำ	ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	เส้นใยปาล์ม น้ำมัน(PF)	เส้นใยป่าน ศรนารายณ์ (SF)	นาโนซิลิกา (NS)	ค่าการยุบตัว (ซม.)
COT	210	425	548	1180	0	0	0	10.00
CON	210	412.25	548	1180	0	0	12.75	8.20
CSS	210	425	532	1180	0	16	0	8.50
CSN	210	412.25	532	1180	0	16	12.75	8.00
CPO	210	425	532	1180	16	0	0	8.80

CPS	210	425	516	1180	16	16	0	8.35
CPN	210	412.25	532	1180	16	0	12.75	8.10
CPNS	210	412.25	516	1180	16	16	12.75	7.90

หมายเหตุ	COT = คอนกรีตควบคุม
	CON = คอนกรีตผสมนาโนซิลิกา
	CSS = คอนกรีตผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์
	CSN = คอนกรีตผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์และนาโนซิลิกา
	CPO = คอนกรีตผสมเส้นใยปาล์ม
	CPS = คอนกรีตผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและเส้นใยป่านศรนารายณ์
	CPN = คอนกรีตผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันและนาโนซิลิกา
	CPNS = คอนกรีตผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน, เส้นใยป่านศรนารายณ์และนาโนซิลิกา

2.3 การเตรียมวัสดุสำหรับการทดสอบ

งานวิจัยนี้อ้างอิงกระบวนการผสมคอนกรีตจากงานวิจัยในอดีต (Amin and El-Hassan, 2015; Fang et al., 2018; Medina et al., 2014) โดยเริ่มจากการผสมมวลรวมธรรมชาติหรือวัสดุมวลรวมรีไซเคิลกับน้ำในปริมาณครึ่งหนึ่งของที่กำหนด แล้วกวนด้วยความเร็วปกติเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 หรืออนุภาคนาโนซิลิกาลงในน้ำส่วนที่เหลือและกวนด้วยความเร็วสูงเป็นเวลา 2 นาที ก่อนนำไปผสมรวมกับส่วนผสมเดิม และกวนด้วยความเร็วปกติอีก 2 นาที ต่อมานำเส้นใยปาล์มน้ำมันหรือเส้นใยป่านศรนารายณ์ผสมกับปูนซีเมนต์ด้วยความเร็วปกติเป็นเวลา 2 นาที และเติมทรายหยาบลงในส่วนผสมแห้งดังกล่าว พร้อมกวนอีก 2 นาที ในกรณีที่ต้องการใช้สารลดน้ำ ให้ผสมไปพร้อมกับน้ำที่ใช้ในการกวน เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 10 ± 2.5 เซนติเมตร

การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C143 และการทดสอบการไหลแผ่ของคอนกรีตดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C1611 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับใช้ทดสอบ หาค่ากำลังรับแรงอัด และค่าความคงทนของคอนกรีตถูกหล่อเป็น คอนกรีตลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มม. ตามมาตรฐาน BS 1881: PART 3 โดยทำการแบ่งตักคอนกรีตใส่แบบหล่อเป็น 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นถูกกระทุ้งให้แน่น ด้วยเหล็กกระทุ้งขนาด 25×25 มม. ยาว 38 ซม. จำนวน 35 ครั้ง ก่อนเติมคอนกรีตชั้นต่อไป เมื่อครบ 3 ชั้น จะทำการปาดคอนกรีตให้เรียบเสมอปากแบบ และคลุมด้วยแผ่นพลาสติกทันทีเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าคอนกรีตหลังจากครบ 24 ชั่วโมง ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัดจะถูกนำออกจากแบบหล่อและแช่ในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้องทันที สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบค่าความคงทนของคอนกรีต จะถูกนำออกจากแบบหล่อและบ่มในอากาศที่ร้อนที่อุณหภูมิห้อง การทดสอบกำลังรับแรงอัดดำเนินการที่อายุคอนกรีต 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน โดยทดสอบตัวอย่างละ 3 ชั้น แล้วนำค่ามาเฉลี่ย ดำเนินการตามมาตรฐาน BS 1881: PART 4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นและปริมาณช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของคอนกรีต ทำตามมาตรฐาน ASTM C642 (2006) โดยหลังจากครบอายุการบ่ม ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 100 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างคอนกรีตออกจากเตาอบ ทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง แล้วนำไปแช่ น้ำอีก 48 ชั่วโมง ต่อกันนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อหาการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่นและปริมาณช่องว่าง บันทึกข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ต่อไป สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดนั้น จะถูกหล่อเป็นคานท่งปริซึมขนาด $150 \times 150 \times 500$ มม. ตามมาตรฐาน ASTM C192 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C293 เป็นการทดสอบลักษณะ Tree-Point จะดำเนินการที่อายุคอนกรีต 7 วัน,

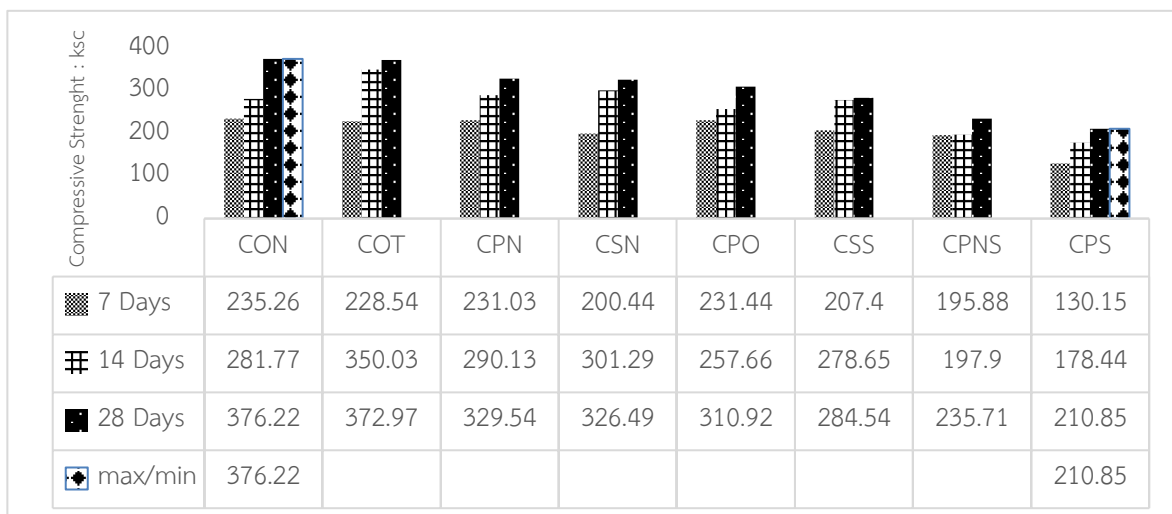
14 วัน และ 28 วัน โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ชิ้น แล้วนำค่ามาเฉลี่ย ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C293 และบันทึกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ต่อไป

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

3.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

จากรูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกา (CON) มีค่าสูงสุด เนื่องจากนาโนซิลิกามีอิทธิพลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม เส้นใยทั้งสองชนิดไม่ได้ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังตัวอย่าง CPN และ CSN ค่ากำลังรับแรงอัดของ CON มีค่า 376 ksc สูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง COT ซึ่งมีค่า 373 ksc โดยเมื่อนาโนซิลิกาเข้าไปผสมในส่วนผสมคอนกรีต SiO_2 จะทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 เพื่อสร้างสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นสารที่มีความแข็งแรงสูง และเป็นตัวหลักในการยึดเหนี่ยวของคอนกรีต และนาโนซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็กมาก ทำให้สามารถเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตได้ดี ช่วยลดความพรุน (porosity) ของคอนกรีต ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นสูงขึ้นและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น อีกทั้งนาโนซิลิกามีพื้นผิวจำเพาะสูง ทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในส่วนผสม ซึ่งช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างนาโนซิลิกา และส่วนผสมอื่นๆ ในคอนกรีตเกิดขึ้นได้อย่างเต็มที่ นาโนซิลิกามีปริมาณ SiO_2 สูง จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น (ศตวรรษ ฤทธิ์พรพงศ์, ทวีช พูลเงิน และสมชาย ชูชีพสกุล, 2554)

ส่วนคอนกรีตที่ผสมเส้นใยทั้งสองชนิด มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า COT ทั้งนี้เกิดจาก เส้นใยมีความพรุนและการจัดเรียงตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง และทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า COT (อำพล แพรสสิน และมานิช สรรพกิจทิพากร, 2563; วิชญพงศ์ ท้วด้ว่า, 2566)



ตัวอย่าง CON มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 376.22 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าทุกตัวอย่าง ตัวอย่าง CPS มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 210.85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าทุกตัวอย่าง

รูปที่ 4 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน

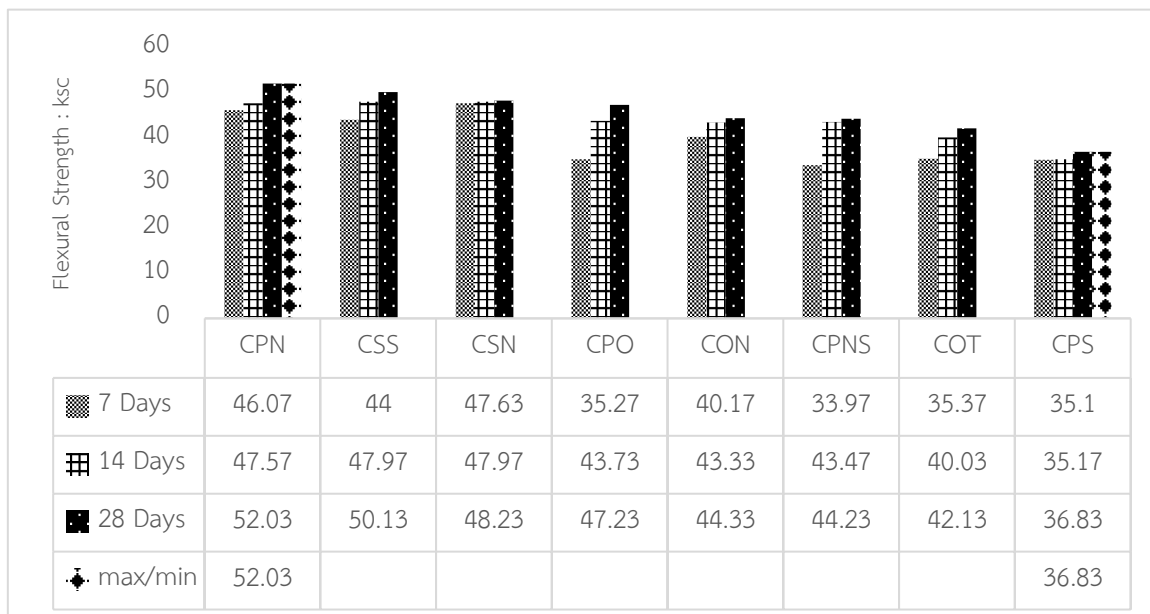
3.2 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต

จากรูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกา ร่วมกับเส้นใยปาล์มน้ำมันและเส้นใยป่านศรนารายณ์ (CPNS) มีค่าสูงกว่า COT

แสดงให้เห็นว่าการใช้นาโนซิลิกาพร้อมกับเส้นใยทั้งสองชนิด มีอิทธิพลทำให้คอนกรีตรับแรงดัดได้สูงขึ้น จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของ CON เท่ากับ 43 กก./ชม.² ซึ่งสูงกว่า COT ที่มีค่า 42 กก./ชม.² เนื่องจาก คุณสมบัติของนาโนซิลิกาที่มีอนุภาคขนาดเล็ก และมี ปริมาณ SiO₂ สูง ซึ่งช่วยในการยึดเหนี่ยววัสดุในส่วนผสม ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และสามารถยึดเหนี่ยวมวลรวมในส่วนผสมได้ดีขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงขึ้น (ธนากร ภูเงินขำ และคณะ, 2560)

ค่ากำลังรับแรงดัดของ CSS เท่ากับ 50 กก./ชม.² และ CPO เท่ากับ 47 กก./ชม.² ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่า COT (42 กก./ชม.²) เนื่องจาก เส้นใยที่ผสมในคอนกรีตมีคุณสมบัติในการต้านทานแรงดึงได้ดี ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดในคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ญัฐวัฒน์ เสาะสูงเนิน และคณะ (2565) ที่พบว่า การผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์ สามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงดัดได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังรับแรงดัดของ CPS เท่ากับ 37 กก./ชม.² ซึ่งต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงดัดของ COT (42 กก./ชม.²) เนื่องจาก การใช้เส้นใยทั้งสองชนิดที่มีความหนาแน่นและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกัน ทำให้เกิดโพรงภายในคอนกรีต ส่งผลให้การยึดเหนี่ยวมวลรวมลดลง (วิชญพงศ์ ท้าวดาว, 2566)



ตัวอย่าง CPN มีค่ากำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน เท่ากับ 52.03 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าทุกตัวอย่าง

ตัวอย่าง CPS มีค่ากำลังรับแรงดัดที่ 28 วัน เท่ากับ 36.83 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าทุกตัวอย่าง

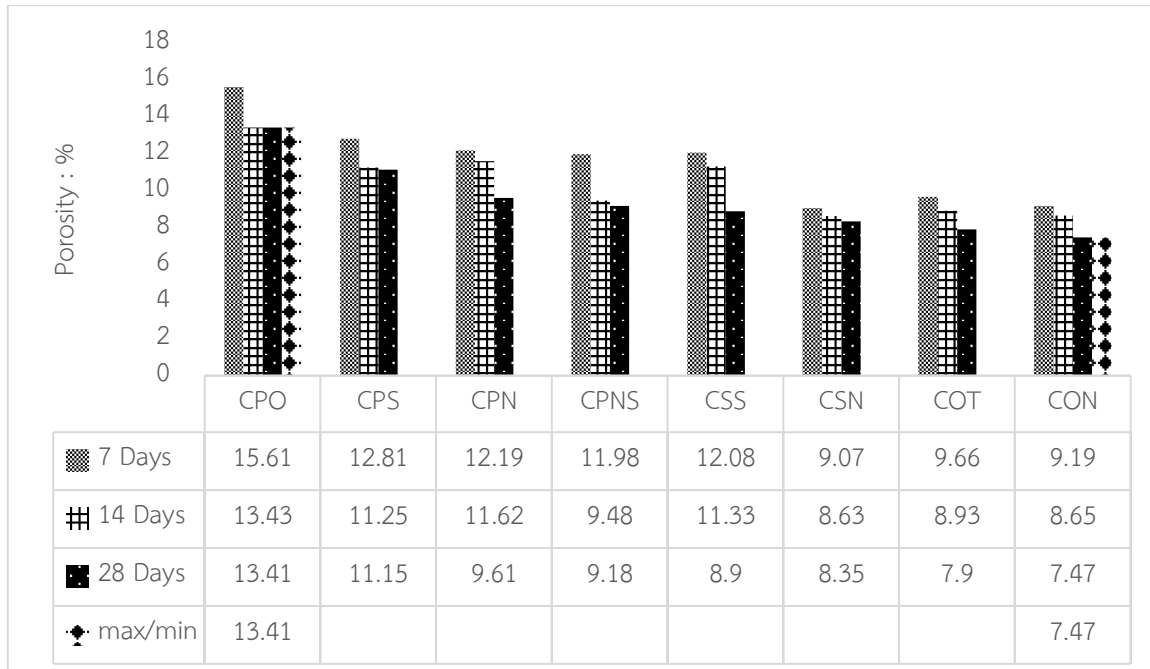
รูปที่ 5 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดัดตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดัด/กำลังรับแรงอัด

ตัวอย่าง	COT	CON	CSS	CSN	CPO	CPS	CPN	CPNS
กำลังรับแรงดัด (ksc.)	42.13	44.33	50.13	48.23	47.23	36.83	50.03	44.23
กำลังรับแรงอัด (ksc.)	372.97	376.22	284.54	326.49	310.92	210.85	329.54	235.71
กำลังรับแรงดัด/กำลังรับแรงอัด (ร้อยละ)	11.29	11.78	17.62	14.77	15.19	17.47	15.18	18.76

3.3 ร้อยละความพรุนในคอนกรีต

จากรูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบค่าร้อยละ ของความพรุนในคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน พบว่าความพรุนของส่วน ผสมที่มีเส้นใยสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่ คอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกามีความพรุนต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม โดยค่าร้อยละของความพรุนในตัวอย่าง CON เท่ากับ 7.47% ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่าง COT ที่มีค่า 7.90% เนื่องจากนาโนซิลิกามีอนุภาคขนาดเล็กมาก สามารถแทรกอยู่ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีต มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภูมิ เหนือคลอง, วันชัย สะตะ และปริญญญา จินดาประเสริฐ (2561) ที่พบว่าคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมนาโนซิลิกามีความพรุนต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกตัวอย่าง



ตัวอย่าง CPO มีค่าร้อยละของความพรุนที่ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 13.41 ซึ่งมีค่าสูงกว่าทุกตัวอย่าง

ตัวอย่าง CON มีค่าร้อยละของความพรุนที่ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 7.47 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าทุกตัวอย่าง

รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าร้อยละของความพรุนในคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนระหว่างความพรุน/กำลังรับแรงอัด และอัตราส่วนระหว่างความพรุน/กำลังรับแรงดัด

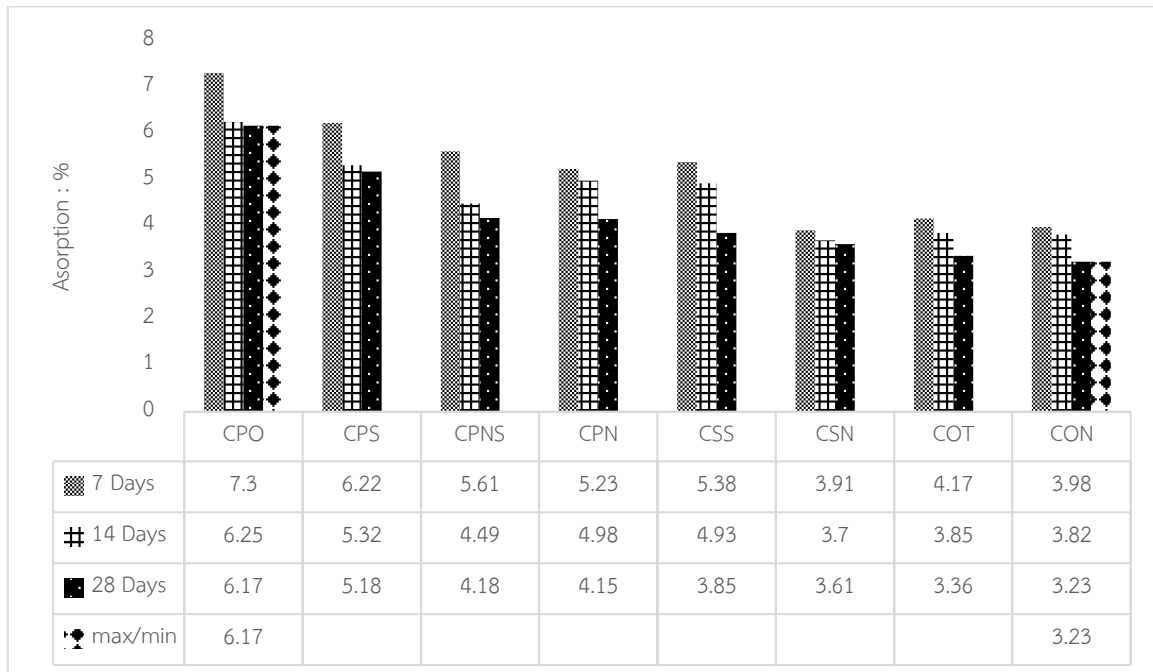
ตัวอย่าง	COT	CON	CSS	CSN	CPO	CPS	CPN	CPNS
กำลังรับแรงอัด (ksc.)	372.97	376.22	284.54	326.49	310.92	210.85	329.54	235.71
กำลังรับแรงดัด (ksc.)	42.13	44.33	50.13	48.23	47.23	36.83	50.03	44.23
ความพรุน (ร้อยละ)	7.9	7.47	8.9	8.35	13.41	11.15	9.61	9.18
ความพรุน/กำลังรับแรงอัด	2.12	1.96	3.13	2.56	4.31	5.29	2.92	3.89
ความพรุน/กำลังรับแรงดัด	18.75	16.85	17.75	17.31	28.39	30.27	19.21	20.76

3.4 ผลการทดสอบหาค่าร้อยละของการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต

จากรูปที่ 7 แสดงค่าร้อยละของการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเส้นใย ทุกตัวอย่างล้วนมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่ ค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตผสมนาโนซิลิกา

ลิกามีค่าต่ำกว่า COT โดยค่าการซึมผ่านของน้ำใน CON เท่ากับ 3.23% ต่ำกว่าค่าของ COT ที่มีค่า 3.36% เป็นผลมาจากคอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกามีความหนาแน่นสูงและความพรุนต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (Ji et al., 2009)

อย่างไรก็ตาม ค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมเส้นใย สูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกตัวอย่าง เนื่องจากเส้นใยในคอนกรีตทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น ทำให้ความหนาแน่น ของคอนกรีตลดลง สอดคล้องกับ งานวิจัยของกานต์ ทัศนนท์ (2566) ที่พบว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นใยมีการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตควบคุม



ตัวอย่าง CPO มีค่าร้อยละของการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 6.17 ซึ่งมีค่าสูงกว่าทุกตัวอย่าง ตัวอย่าง CON มีค่าร้อยละของการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 3.23 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าทุกตัวอย่าง
รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าร้อยละของการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน

4. สรุปผลการทดลอง

1. จากคุณสมบัติของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีความหนาแน่นน้อยกว่ามวลรวมละเอียด (ทราย) ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง ส่งผลค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและ การเติมนาโนซิลิกาในส่วนผสมของคอนกรีตผสมเส้นใยสามารถช่วยให้มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยสูงขึ้นได้ในระดับหนึ่ง
2. ความต้านทานแรงดึงของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปาล์มน้ำมัน เส้นใยที่ผสมในคอนกรีตจะทำหน้าที่ช่วยรับแรงดึงในลักษณะเดียวกันกับ เหล็กเสริมในคอนกรีตทำให้คอนกรีตผสมเส้นใย มีกำลังรับแรงดัดได้สูงกว่า กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตควบคุม การเติมนาโนซิลิกาในส่วนผสมของคอนกรีตผสมเส้นใยสามารถช่วยให้มีกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมเส้นใยสูงขึ้นอีกได้
3. เส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปาล์มน้ำมัน มีความพรุนมากกว่ามวลรวมละเอียด (ทราย) และการใช้เส้นใยในส่วนผสมคอนกรีตมีการอัดตัวกันไม่แน่น ทำให้ค่าร้อยละของความพรุนและค่าร้อยละของการซึมได้ของน้ำในคอนกรีตของคอนกรีตผสมเส้นใยมีค่าสูงกว่าในคอนกรีตควบคุม การเติมนาโนซิลิกาในส่วนผสมของคอนกรีตผสมเส้นใย สามารถช่วยให้ค่าร้อยละของความพรุนและค่าร้อยละของการซึมได้ของน้ำในคอนกรีตผสมเส้นใยมีค่าลดลงได้
4. ปริมาณเส้นใยมีผลทำให้กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนอุดหนุนการวิจัยภายใต้แผนปฏิบัติการด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 โครงการวิจัยพื้นฐาน กรอบการวิจัย “ระบบนิเวศสีเขียว” และผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เขตพื้นที่อุเทนถวาย ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณ ผศ.ดร.ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์ ผศ.ดร.วชิราภรณ์ เสนาวัง และ ผศ.ดร.เอนก เนรมิตรครบุรี อีกทั้งคณะอาจารย์ บุคลากรสถานศึกษา และทางครอบครัวของผู้วิจัยที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและสนับสนุนจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กานท์ ทะนนท์. (2566). ความสามารถทำงานได้และความสามารถดูดซึมน้ำของนาโนซิลิกากับแร่ใยธรรมชาติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล. ใน **การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28**. ภูเก็ต: สมาคมวิศวกรรมโยธาแห่งประเทศไทย. หน้า 1-10.
- ณัฐวัฒน์ เสาะสูงเนิน, จักขดา อารังวุฒิ, ศิธาสิทธิ์ ขาวทวีป, ภัทรดิษฐ์ โพธิ์ลา, ชาญชัย เจาปะก, & กรกต เลิศชัยพงศ์. (2565). การตรวจสอบพฤติกรรมเชิงกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์สำหรับประยุกต์ใช้งานก่อสร้าง. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 61**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 1-10.
- นพรัตน์ ฤทธิ์กระจ่าย, สฤณี พรหมสายใจ, นิวัติ คลังสีดา, เสาวลักษณ์ ยอดวิญญูวงศ์, และ สุรเชษฐ์ ตุ่มมี. (2564). ผลของเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของไฟเบอร์ซีเมนต์. ใน **การประชุมเทคโนโลยีอุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 2 เนื่องในโอกาสครบรอบ 65 ปี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช**. นครศรีธรรมราช: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช. หน้า 1-10.
- กิม เหนือคลอง, วันชัย สะตะ, และ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ. (2561). การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และนาโนซิลิกาในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย. **วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)**, 19(2), เมษายน-มิถุนายน 2562.
- วิญญูพงศ์ ท้วมดำ. (2565). คุณสมบัติเชิงกลโครงสร้างจุลภาคของนาโนซิลิกาและแร่ใยธรรมชาติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตมวลรวมรีไซเคิล. ใน **การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27**. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมโยธาแห่งประเทศไทย. หน้า 1-10.
- ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์, ทวีช พูลเงิน, และ สมชาย ชูชีพสกุล. (2554). กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์ผสมนาโนซิลิกา. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.**, 34(3), กรกฎาคม-กันยายน 2554.
- อำพล แพรสิน, และ มาโนช สรรพกิจทิพากร. (2563). กำลังอัดและกำลังคัตของมอร์ตาร์โดยวิธีการอัดขึ้นรูปที่มีการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นและเสริมเส้นใยปาล์มน้ำมัน. ใน **การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25**, 15-17 กรกฎาคม 2563, จังหวัดชลบุรี.
- Amin, & El-Hassan. (2015). Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, 118, 2.3 Mixing procedure. <https://www.elsevier.com/locate/conbuildmat>
- ASTM International. (1980). BS 1881: Part 4: British Standard Institute method of testing concrete for strength. In **Engine coolant testing: State of the art** (ASTM Selected Technical Papers). <https://doi.org/10.1520/STP29209S>
- ASTM International. (1982). BS 1881: Part 3: British Standard Institute method of making and curing test specimens. In **Extending aggregate resources** (ASTM Selected Technical Papers). <https://doi.org/10.1520/STP32463S>

- ASTM International. (2007). BS 1881-105: 1984: Testing concrete – Methods for determination of flow. **Journal of Testing and Evaluation**, 35(6), 602–608. <https://doi.org/10.1520/JTE100685>
- ASTM International. (2010). ASTM C192: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. **Journal of ASTM International**, 7(1), 1–6. <https://doi.org/10.1520/JAI101951>
- ASTM International. (2014). ASTM C293: Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading). **Geotechnical Testing Journal**. <https://doi.org/10.1520/GTJ20130040>
- ASTM International. (2019). ASTM C143: Standard test method for slump of hydraulic cement concrete. **Journal of Testing and Evaluation**. <https://doi.org/10.1520/JTE20160430>
- ASTM International. (2020). ASTM C124: Standard method of test for flow of portland-cement concrete by use of the flow table. **Journal of Testing and Evaluation**. <https://doi.org/10.1520/JTE20180152>
- ASTM International. (2021). BS 12350-5: Specifies a method for determining the flow of fresh concrete. **Advances in Civil Engineering Materials**. <https://doi.org/10.1520/ACEM20190233>
- ASTM International. (2022). ASTM C642: Standard test method for density, absorption and voids in hardened concrete. **Advances in Civil Engineering Materials**. <https://doi.org/10.1520/ACEM20210010>
- Fang, G., et al. (2018). Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. **Construction and Building Materials**, 172, 476–487.
- Hui, C., et al. (2010). Preparation of nano-silica materials: The concept from wheat straw. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 365(50–51), 2781–2785.
- Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G. H., & Park, J. B. (2007). Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particle. **Construction and Building Materials**, 21(6), 1351–1355.
- Medina, C., et al. (2014). Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, 68, 216–225.