



สมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราเป็นส่วนผสม

ณัฐกมล เกิดจันทวัด และ ชุชัย สุจิรกุล*

ภาควิชาครุศาสตร์โยธา, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chuchai.suj@kmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 กรกฎาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 2 ธันวาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 5 กุมภาพันธ์ 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ผสมด้วยยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ สมบัติของคอนกรีตที่ศึกษาประกอบด้วย กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และกำลังดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว ตัวอย่างทดสอบกำลังอัดมีขนาด 50x50x50 mm เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 ส่วนตัวอย่างทดสอบกำลังดัดและการดูดซึมน้ำเป็นแผ่นบางคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ได้จากการพ่นให้ได้ความหนาประมาณ 10 mm ตัวอย่างได้ถูกตัดให้มีขนาด 50x250 mm โดยตัวอย่างได้ทดสอบการดัดตามมาตรฐาน BS EN 1170-5:1998 ปริมาณสารลดแรงดึงผิวที่เหมาะสมสำหรับใช้ร่วมกับยางพาราธรรมชาติได้ถูกหาจากการทดลองผสมเพื่อหาความเข้ากันของส่วนผสม ตัวแปรหลักที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ปริมาณเนื้อยางพาราธรรมชาติหรือเนื้อยางพาราสังเคราะห์ในอัตราส่วนร้อยละ 2 4 และ 6 แทนที่น้ำหนักปูนซีเมนต์ และอายุของตัวอย่างแผ่นบางคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่บ่มน้ำ 7 14 28 และ 56 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารลดแรงดึงผิวที่ร้อยละ 1.0 ช่วยให้ยางพาราธรรมชาติผสมกับมอร์ตาร์ได้เข้ากันอย่างดีโดยไม่จับตัวเป็นก้อน การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงอย่างไรก็ดี การใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์จะช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำ โดยค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดเกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณยางพาราธรรมชาติและยางพาราสังเคราะห์ที่ร้อยละ 2 นอกจากนี้ การใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ในตัวอย่างแผ่นบางจะทำให้หน่วยแรงดัดที่ขีดจำกัดสัดส่วนและหน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าวลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม แต่ค่าความเหนียวของตัวอย่างแผ่นบางมีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างควบคุมเมื่อทำการบ่มน้ำในเวลานานขึ้น

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว; แผ่นบาง; ยางพาราธรรมชาติ; ยางพาราสังเคราะห์

Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete Using Rubber Latex as an Ingredient

Nattakamol Kerdjangwat and Chuchai Sujivorakul*

Department of Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology,
King Mongkut's University of Technology Thonburi

* Corresponding author, E-mail: chuchai.suj@kmutt.ac.th

Received: 10 July 2024; Revised 2 December 2024; Accepted: 5 January 2025

Online Published: 22 April 2025

Abstract: This research is a study of the physical and mechanical properties of glass fiber-reinforced concrete (GRC) mixed with natural rubber latex or synthetic rubber latex. The properties studied include compressive strength, water absorption, and flexural strength of the concrete samples. The test samples for compressive strength had dimensions of 50x50x50 mm according to ASTM C109 standards. The test samples for flexural strength and water absorption were GRC thin plates prepared by spraying to a thickness of approximately 10 mm. Samples were cut into the dimension of 50x250 mm. All samples were tested under bending according to BS EN 1170-5:1998 standards. The appropriate amount of surfactant for use with natural rubber latex was determined through mixing trials to determine the compatibility of the ingredients. The main variables studied include: the amount of natural or synthetic rubber latex in the ratio of 2, 4, and 6 percent by weight of cement replacement. The samples were tested at different ages of 7, 14, 28 and 56 days after water curing. The test results found that using surfactant at 1.0 percent helped the natural rubber to mix well with the mortar without clumping. Replacing Portland cement with natural rubber latex or synthetic rubber latex tended to reduce the compressive strength of the mortar. However, the use of natural rubber latex or synthetic rubber latex would help to reduce water absorption. The lowest water absorption occurred when natural and synthetic rubber latex were used at 2 percent. In addition, the use of natural rubber latex or synthetic rubber latex in samples slightly decreased the stresses at limit of proportionality and modulus of rupture compared to the control sample. However, the toughness of the thin plate samples tended to be higher than those of the control samples when they were cured in water for a longer time.

Keywords: Glass fiber reinforced concrete; Thin plate; Natural rubber latex; Synthetic rubber latex



1. บทนำ

คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Concrete, GFRC) เป็นวัสดุที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เส้นใยแก้วชนิดทนต่าง ทรายละเอียด น้ำ และสารผสมเพิ่ม ในปัจจุบันคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วนิยมนำมาใช้ในการผลิตแผงสถาปัตยกรรมภายนอกอาคารเนื่องจากมีน้ำหนักเบาและสามารถออกแบบให้มีรูปร่างที่หลากหลายได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ถูกใช้งานภายนอกอาคารที่มีอายุมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังดัดสูงสุด และความเหนียวมีค่าลดลง [1] ที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วให้มีความทนทานมากขึ้นได้ดำเนินการโดยนำวัสดุและสารผสมเพิ่มอื่นมาใช้ในส่วนผสม N. Kabay และ B. Amed [2] ได้ใช้ถั่วลอย ตะกรันเหล็ก และ พอลิเมอร์ผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วโดยพบว่า การใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์ผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดและช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำ C. Sujivorakul และคณะ [3] ได้นำถั่วลอย ถั่วกลีบ หรือถั่วปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยได้พบว่าตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่ใช้ถั่วต่าง ๆ ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ให้หน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน (Limit of Proportionality, LOP) เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มในน้ำ ในขณะที่หน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าว (Modulus of Rupture, MOR) เพิ่มขึ้นในช่วง 28 วันแรกของการบ่มและเริ่มลดลงเล็กน้อยตามอายุการบ่มที่มากขึ้น การใช้ปริมาณถั่วแต่ละชนิดไม่เกินอัตราร้อยละ 20 จะไม่กระทบต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว

และยังช่วยลดต้นทุนการผลิต A.J. Majumdar และคณะ [4] ใช้ยางสไตรีนบิวตาไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) ซึ่งเป็นยางพาราสังเคราะห์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับยางพาราธรรมชาติผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยตัวอย่างคอนกรีตถูกเก็บไว้ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ได้แก่ ห้องควบคุมความชื้น แซ่ตัวอย่างในน้ำ และในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ ผลการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 15 ปี พบว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่อยู่ในห้องควบคุมความชื้นมีค่าความเหนียวลดลงเล็กน้อย ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกแช่อยู่ในน้ำสูญเสียความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมอื่นอย่างมีนัยสำคัญ และตัวอย่างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติมีอัตราการลดลงของความเหนียวในระยะยาวช้ากว่าตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มด้วย วิธีอื่น S. Mebarkia และ C. Vipulanandan [5] ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณพอลิเมอร์และปริมาณเส้นใยแก้วต่อสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยการทดสอบจะใช้ปริมาณพอลิเมอร์ตั้งแต่ร้อยละ 10 14 และ 18 โดยน้ำหนักรวมของคอนกรีต และใช้ปริมาณเส้นใยแก้วร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักรวมของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วจะเพิ่มความเหนียวและความเครียดที่จุดความเค้นดัดสูงสุด แต่จะลดมอดุลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวร์ซอง โดยที่พอลิเมอร์ที่ร้อยละ 18 และเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 4 เป็นปริมาณที่ให้ความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วภายใต้แรงดัดสูงสุด

วัสดุยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่ทำรายได้เข้าสู่ประเทศไทย โดยการส่งออกส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของวัตถุดิบยางพาราดิบ ขณะที่การแปรรูป และใช้งานผลิตภัณฑ์ยางพาราภายในประเทศจะมีปริมาณน้อย



จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ราคาอย่างพาราภายในประเทศขาดเสถียรภาพ ส่งผลกระทบต่อทั้งเกษตรกรและผู้ที่เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมยางพาราทั้งระบบ นอกจากนี้มาตรการกระตุ้นให้เกิดการใช้ผลิตภัณฑ์ยางพาราในประเทศยังไม่เพียงพอและไม่เห็นผลเท่าที่ควร ควรเร่งส่งเสริมงานวิจัยเพื่อนำยางพาราไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ให้มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้ยางพาราภายในประเทศเพื่อเพิ่มมูลค่าที่ยั่งยืนของยางพาราตลอดจนนำไปสู่พัฒนาผลิตภัณฑ์ยางพาราคูณภาพต่อไป ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลากหลายที่เกี่ยวข้องกับการใช้ยางพาราในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต P. Plangoen [6] ได้นำยางพาราธรรมชาติชนิดพรีวัลคาไนซ์มาผสมในมอร์ตาร์ในอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยได้พบว่าการรับแรงอัด แรงดัด และแรงดึงของมอร์ตาร์มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมยางพารา และ อัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 ได้ให้ค่ากำลังอัด กำลังดัด และกำลังดึงสูงสุด ส่วนค่าการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำสุด T. Yaowarat และ A. Suddeepong [7] ได้ศึกษากำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยยางพาราธรรมชาติเพื่อใช้ในการก่อสร้างทางเท้า โดยส่วนผสมมีการแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อเนื้อยางพารา จากการศึกษาได้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยยางพารามีค่าลดลงเมื่อใช้ยางพาราหรือปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น ขณะที่กำลังดัดของคอนกรีตสูงสุดเมื่อใช้อัตราส่วนของยางพาราต่อปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0.58 นอกเหนือจากการนำยางพาราธรรมชาติไปใช้

ในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการแล้วยังได้มีงานวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้ยางพาราธรรมชาติกับวัสดุอื่น ๆ A. Buritatum และคณะ [8] ได้ใช้ยางพาราธรรมชาติในปริมาณที่เหมาะสมผสมกับดินซีเมนต์ และทำให้ดินสามารถยึดเกาะกันได้ดีขึ้น K. Zhong และคณะ [9] ได้ศึกษาการประสานกันและสมรรถนะทางกลของยางมะตอยที่ผสมยางพาราสังเคราะห์สำหรับทำผิวทางของถนน โดยได้พบว่ายางมะตอยที่ผสมยางพาราให้ความแข็งแรงมากขึ้น แต่ยังทำให้การไหลตัวของยางมะตอยลดลง

จากงานวิจัยที่ผ่านได้แสดงให้เห็นว่า การนำยางพารามาผสมกับคอนกรีตสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้มีความเหนียวมากขึ้น และยังช่วยลดการซึมผ่านของน้ำได้มากขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำยางพาราธรรมชาติในประเทศไทย และยางพาราสังเคราะห์มาใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือใช้ยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสมในคอนกรีตได้แก่ กำลังอัด การดูดซึมน้ำ กำลังและความเหนียวภายใต้แรงดัด โดยมีตัวแปรหลากหลายประกอบไปด้วยปริมาณยางพาราธรรมชาติ ยางพาราสังเคราะห์ ปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ และอายุการบ่มของตัวอย่างทดสอบ ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการใช้ยางพาราผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยขึ้นตัวอย่างกรณีอุตสาหกรรมแผงสถาปัตยกรรมซึ่งส่วนใหญ่ใช้แผ่นบางที่ทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว ทั้งเป็นการส่งเสริมการใช้ยางพาราธรรมชาติซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย



2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. น้ำยางพาราธรรมชาติโดยมีปริมาณเนื้อยางร้อยละ 60
3. น้ำยางพาราสังเคราะห์ (Bonding agent and water proofing admixture) ยี่ห้อ SikaLatex เป็นของเหลวประเภทอิมัลชันของยางพาราสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion) โดยปริมาณเนื้อยางพาราสังเคราะห์หลังจากอบแห้งเท่ากับร้อยละ 50
4. สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ยี่ห้อ Sika รุ่น ViscoCrete-10
5. ทراساتอะดมีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้ำที่ตะแกรงเบอร์ 50 100 และ 200 เท่ากับ ร้อยละ 37 58 และ 5 ตามลำดับ
6. เส้นใยแก้ว ยี่ห้อ Cem-FIL Fibers
7. สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Surfactants) ยี่ห้อ Plantacare 2000 UP

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์	เนื้อยางใน น้ำยางพารา ธรรมชาติ	เนื้อยางในน้ำ ยางพารา สังเคราะห์	ทราย	สารลดน้ำ พิเศษ	น้ำ	สารลด แรงตึง ผิว	กำลังอัดที่อายุ 7 วัน จากการทดสอบ [MPa]
Control	1	-	-	1	0.005	0.35	-	54.0
0.5P2*	0.98	0.02	-	1	0.005	0.35	0.005	48.1
0.5P4	0.96	0.04	-	1	0.005	0.35	0.005	47.8
0.5P6	0.94	0.06	-	1	0.005	0.35	0.005	39.7
1P2	0.98	0.02	-	1	0.005	0.35	0.010	48.0
1P4	0.96	0.04	-	1	0.005	0.35	0.010	46.0
1P6	0.94	0.06	-	1	0.005	0.35	0.010	39.0
1.5P2	0.98	0.02	-	1	0.005	0.35	0.015	46.0
1.5P4	0.96	0.04	-	1	0.005	0.35	0.015	40.1
1.5P6	0.94	0.06	-	1	0.005	0.35	0.015	36.0

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดเป็นรูปทรงลูกบาศก์มีขนาด 50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 [10] ทั้งหมด 13 ชุด โดย 1 ชุดมี 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างควบคุมมอร์ตาร์มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทราย คือ 1 : 1 โดยมีเนื้อยางพาราธรรมชาติผสมในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 2 4 และ 6 เทียบกับน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุได้ถูกนำมาใช้ในส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ผสมยางพาราธรรมชาติ เนื่องจากการผสมน้ำยางพาราเข้ากับวัสดุประสานจะทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นจึงต้องมีการใส่สารลดแรงตึงผิวเข้าไปในส่วนผสมเพื่อให้ น้ำยางพาราผสมเข้ากับวัสดุประสานได้ โดยได้ทดลองใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ ร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อหาปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก (ต่อ)

S2**	0.98	-	0.02	1	0.005	0.35	-	50.0
S4	0.96	-	0.04	1	0.005	0.35	-	48.0
S6	0.94	-	0.06	1	0.005	0.35	-	47.0

หมายเหตุ: ปริมาณน้ำในตารางเป็นปริมาณที่รวมน้ำในน้ำยาพาราธรรมชาติ หรือน้ำในน้ำยาพาราสังเคราะห์แล้ว

* 0.5P2: ตัวเลขลำดับ 1 หมายถึง ร้อยละของสารลดแรงตึงผิวเทียบกับวัสดุประสาน ตัวอักษรลำดับที่ 2 หมายถึง เนื้อยาพาราธรรมชาติ และตัวเลขลำดับที่ 3 หมายถึง ร้อยละของเนื้อยาพาราธรรมชาติเทียบกับวัสดุประสาน

**S2: ตัวอักษรลำดับที่ 1 หมายถึง เนื้อยาพาราสังเคราะห์และตัวเลขลำดับที่ 2 หมายถึง ร้อยละของเนื้อยาพาราสังเคราะห์เทียบกับวัสดุประสาน

2.3 การเตรียมตัวอย่างแผ่นบางสำหรับทดสอบแรงดัด

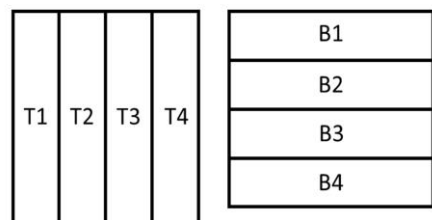
จากการลองผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ยาพาราธรรมชาติ พบว่า ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้ปูนซีเมนต์เข้ากันกับยาพาราธรรมชาติได้เป็นอย่างดี มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.0 โดยเทียบกับน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังนั้น ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้เตรียมตัวอย่างแผ่นบางสำหรับทดสอบแรงดัดมีทั้งหมด 7 ส่วนผสม ได้แก่ Control 1P2 1P4 1P6 S2 S4 และ S6 โดยอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ได้แสดงในตารางที่ 1 ส่วนปริมาณเส้นใยแก้วที่ใช้คงที่ในทุกตัวอย่างเท่ากับร้อยละ 5 เทียบกับน้ำหนักรวมของส่วนผสมทั้งหมด การเตรียมตัวอย่างแผ่นบางคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วทั้งหมดจะใช้วิธีการพ่น (Spraying) โดยที่มอร์ตาร์จะผสมกับเส้นใยแก้วในระหว่างการพ่น ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวอย่างทดสอบจะถูกควบคุมให้มีความหนาคงที่เท่ากับ 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างแผ่นบางจะใช้วิธีการพ่น

2.4 การทดสอบแรงดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว

การทดสอบแรงดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วจะใช้ขนาดตัวอย่างและวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 1170-5 : 1998 [11] โดยตัวอย่างแผ่นบางจะถูกบ่มในน้ำที่อายุเท่ากับ 7 14 28 และ 56 วัน การทดสอบกำลังดัดเป็นการทดสอบแบบ 4 จุด (Four-Points Bending Tests) มีความยาวช่วง (Span) ของการทดสอบเท่ากับ 200 มิลลิเมตร การทดสอบตามมาตรฐานนี้จะใช้ตัวอย่างจำนวน 8 ตัวอย่างต่อหนึ่งชุดการทดสอบ โดยแบ่งแนวการตัดตัวอย่างทดสอบตามขนาดมาตรฐานในแนวยาวจำนวน 4 ตัวอย่าง และแนวขวางจำนวน 4 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยตัวอย่างมีขนาด กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 2 รูปแบบการตัดตัวอย่างคอนกรีตเสริมใยแก้วเพื่อใช้ในการทดสอบกำลังดัด



ตัวอย่างได้ถูกทดสอบทั้ง 2 ด้านของตัวอย่าง ทั้งด้านที่ติดกับแบบหล่อและด้านที่ทำการพ่น โดยใช้ตัวอักษรย่อ คือ T และ B ซึ่งมีความหมายมาจากด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) นำผลที่ได้จากการทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดที่กระทำกับแผ่นตัวอย่างและระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน จากนั้นคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้แก่ หน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน (LOP) และที่จุดแตกร้าว (MOR) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 1 และ 2 และค่าความเครียดที่ LOP และที่ MOR ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ 3 และ 4 [11] โดยตำแหน่งของ LOP และ MOR ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3

$$\sigma_{LOP} = \frac{F_{LOP} \times L}{b \times d^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{MOR} = \frac{F_{MOR} \times L}{b \times d^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{LOP} = \frac{108}{23} \times \frac{\Delta_{LOP} \times d}{L^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{MOR} = \frac{108}{23} \times \frac{\Delta_{MOR} \times d}{L^2} \quad (4)$$

โดย σ_{MOR} คือ หน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าว (MPa) หรือมอดุลัสแตกร้าว

σ_{LOP} คือ หน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน(MPa)

ε_{MOR} คือ ความเครียดที่จุดแตกร้าว

ε_{LOP} คือ ความเครียดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน

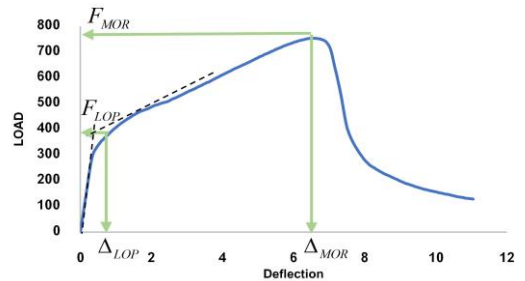
F_{MOR} คือ แรงที่จุดแตกร้าว (N)

F_{LOP} คือ แรงที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน (N)

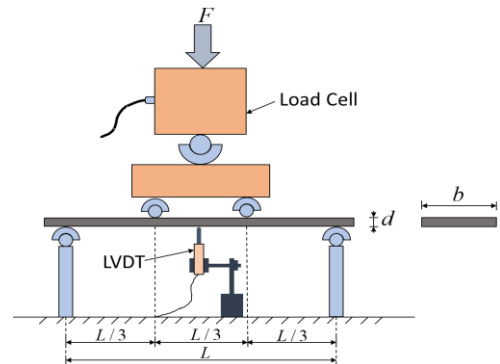
L คือ ความยาวช่วงของแผ่นตัวอย่าง (mm)

b คือ ความกว้างของแผ่นตัวอย่าง (mm)

d คือ ความหนาของแผ่นตัวอย่าง (mm)



รูปที่ 3 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน พร้อมแสดงตำแหน่งที่จุดขีดจำกัดสัดส่วนและที่จุดแตกร้าว



รูปที่ 4 การทดสอบการดัดแบบสี่จุด

2.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำของแผ่นตัวอย่าง

การดูดซึมน้ำของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วได้ถูกทดสอบที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 14 28 และ 56 วัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. วัดขนาดของตัวอย่างทั้งด้านกว้าง ด้านยาว และความหนาของแผ่นตัวอย่าง
2. แช่แผ่นตัวอย่างทดสอบในน้ำสะอาดอุณหภูมิปกติให้น้ำท่วมแผ่นทดสอบจมมิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำแผ่นตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำ จากนั้น ซับน้ำที่ผิวของแผ่นตัวอย่างให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนัก W'



4. ภายหลังการทดสอบแรงดัดเสร็จสิ้น นำแผ่นตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วทำการชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนัก W_s

ค่าการดูดซึมสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6

$$\frac{W' - W_s}{W_s} \times 100 \quad (6)$$

โดย W' คือ น้ำหนักของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำ (กรัม)

W_s คือ น้ำหนักของคอนกรีตหลังจากอบแห้ง (กรัม)

2.6 การหาค่าความเหนียว

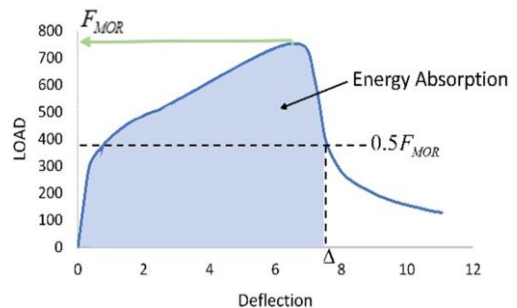
ค่าความเหนียว (Toughness) ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วสามารถหาได้จากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยพื้นที่ใต้กราฟให้พิจารณาตั้งแต่จุดเริ่มต้นถึงจุดที่การโก่งตัวลดลงมาเหลือประมาณร้อยละ 50 ของค่าแรงดัดปลาย ตามที่แสดงในรูปที่ 5 [3]

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

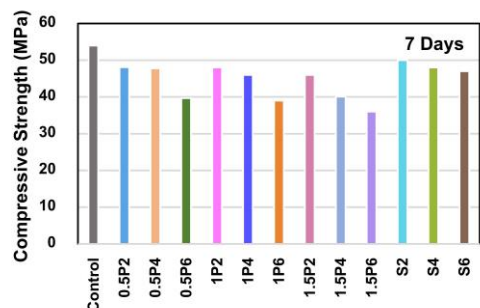
3.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์

กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มียางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสม ได้แสดงในรูปที่ 6 โดยพบว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 54 MPa

โดยเมื่อมีการใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ผสมในมอร์ตาร์ พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงตามปริมาณการใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือการใช้ยางพาราสังเคราะห์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือใช้ยางพาราสังเคราะห์ผสมในอัตราร้อยละ 2 จะ



รูปที่ 5 การหาความเหนียวจากการทดสอบแรงดัด



รูปที่ 6 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน โดยใช้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ

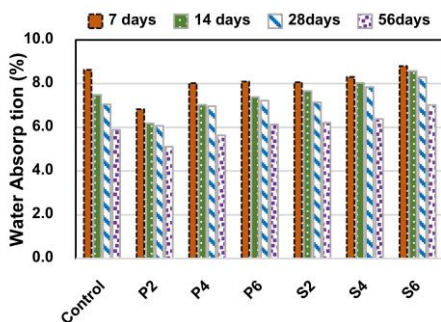
ให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ P. Plangoen [6] ที่ได้นำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์มาผสมในมอร์ตาร์ และได้พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมยางพาราเนื่องจากอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ผสมยางพารามีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง และยางพาราเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าซีเมนต์เฟลส เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยยางพาราจะทำให้กำลังอัดลดลง นอกจากนี้ จากการวิจัยนี้ ได้พบว่า การใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับยางพาราธรรมชาติที่ร้อยละ 0.5 และ 1.0 ให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ใกล้เคียงกัน และ



ให้ค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้สารลดแรงตึงผิวที่ร้อยละ 1.5 อย่างไรก็ดี เนื้อของมอร์ตาร์ที่ใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณน้อยที่ร้อยละ 0.5 เกิดการจับตัวกันของยางพาราเป็นก้อนและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนผสมของมอร์ตาร์นี้จึงไม่สามารถนำไปพ่นผ่านอุปกรณ์พ่น (Spraying Tool) เพื่อผลิตแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วได้ ดังนั้น ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว จึงเลือกใช้ส่วนผสมที่สามารถพ่นได้ดี โดยเลือกใชยางพาราร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่ร้อยละ 1

3.2 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว

เมื่ออายุมากขึ้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ จะช่วยให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง โดยตัวอย่างควบคุมมีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 8.63 ที่อายุ 7 วัน และมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง เมื่อตัวอย่างมีอายุมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7



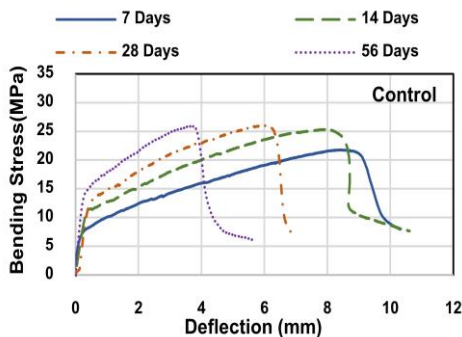
รูปที่ 7 ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยยางพาราที่อายุการบ่มต่าง ๆ

หากเปรียบเทียบการใช้ยางพาราธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราแตกต่างกันจะพบว่า ปริมาณยางพาราธรรมชาติที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 24 และ 6 มีค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 7 วัน เท่ากับร้อยละ 6.83 8.03 และ 8.10 ตามลำดับ ผลที่ได้รับแสดงด้านล่างเมื่อใช้ปริมาณยางพาราเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นว่าการดูดซึมน้ำมีค่ามากขึ้น ในงานวิจัยนี้ ปริมาณยางพาราธรรมชาติที่มากกว่าร้อยละ 2 อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไป ซึ่งสังเกตเห็นจากการผสมที่ยึดเกาะกันไม่ดี ส่งผลทำให้เกิดช่องว่างภายในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วมากขึ้น และทำให้เกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้น นอกจากนี้ คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่มากกว่าร้อยละ 2 จะให้ค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ดี หากทำการเปรียบเทียบระหว่างยางพาราทั้ง 2 ชนิดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปริมาณและอายุที่เท่ากับพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติเป็นส่วนผสมให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตน้อยกว่า ซึ่งผลวิจัยที่ได้รับสอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Plangoen [6] ที่ได้พบว่า ยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ที่นำมาผสมในมอร์ตาร์ในอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้น้อยสุดในงานวิจัยได้ให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด

3.3 ผลการทดสอบหน่วยแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว

3.3.1 พฤติกรรมการดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว

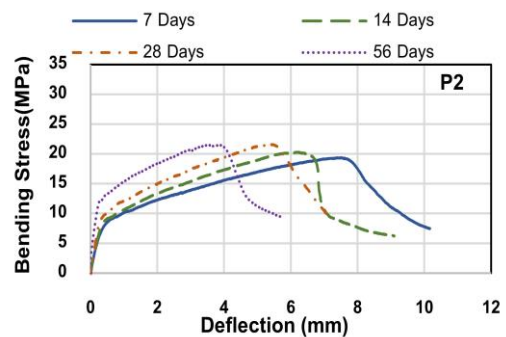
จากรูปที่ 8 และ 9 แสดงตัวอย่างพฤติกรรมการดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่เป็นตัวอย่างควบคุม (Control) และตัวอย่างที่ได้แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยยางพาราธรรมชาติที่ร้อยละ 2 (P2) ตามลำดับ โดยได้ทำการทดสอบที่อายุการบ่มน้ำ 7 14 28 และ 56 วัน พฤติกรรมการดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วจะมี



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการดัดของ
แผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วควบคุม
ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

ลักษณะในช่วงแรกเป็นเส้นตรงจนถึงจุดที่ความชันของกราฟเปลี่ยนไป (หรือจุด LOP) เมื่อคอนกรีตมีอายุการบ่มในน้ำมากขึ้นจะทำให้ค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP สูงขึ้น หน่วยแรงดัดสูงสุดที่เกิดหลังจาก LOP หรือ หน่วยแรงดัดที่ MOR จะขึ้นกับปริมาณของเส้นใยแก้ว แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับคอนกรีต และปัจจัยอื่น ๆ

จากผลการทดสอบแรงดัดได้พบว่า เมื่อทั้งคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วควบคุมและคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์มีอายุการบ่มในน้ำยาวนานขึ้น หน่วยแรงดัดที่ LOP จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดชัดเจน แต่การโก่งตัวที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วจะมีแนวโน้มลดลง หรือมีความเหนียว (Ductility) ลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ยังสังเกตเห็นว่า หน่วยแรงดัดที่ MOR ของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่มียางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสมจะมีแนวโน้มคงที่เมื่ออายุการบ่มในน้ำมากกว่า 28 วัน ซึ่งแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่เป็นตัวอย่างควบคุมที่มีอัตราการลดลงอย่างเห็นได้ชัดชัดเจน ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากคราบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แทรกตัวระหว่างเส้นใยของคอนกรีตเสริม



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการดัดของแผ่น
คอนกรีตเสริมใยแก้วที่มียางพาราธรรมชาติร้อยละ 2
ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

เส้นใยแก้วควบคุมมากกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ผสมยางพารา ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและคอนกรีตมีค่ามากกว่า ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกาวรีบัติของเส้นใยแก้วจากการถอนเป็นการขาดด้วยแรงดึงซึ่งทำให้คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วมีความเปราะ

3.3.2 หน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน่วยแรงดัดที่ LOP และที่ MOR ที่ได้รับการทดสอบการดัดของตัวอย่างแผ่นบางคอนกรีตเสริมใยแก้วจำนวน 8 ชิ้น รูปที่ 10 ได้แสดงค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP ของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วควบคุมและคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ ที่ร้อยละ 2, 4 และ 6 ซึ่งได้พบว่า คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วทั้งที่เป็นตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มในน้ำที่มากขึ้น เนื่องจากหน่วยแรงดัดที่ LOP เป็นค่าที่สัมพันธ์กับการแตกร้าแรกภายใต้แรงดัดของคอนกรีต โดยค่าหน่วยแรงดัดนี้จะสอดคล้องกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต หากคอนกรีตมีการบ่มในน้ำนานขึ้น กำลังอัดรวมถึงกำลัง



บทความวิจัย

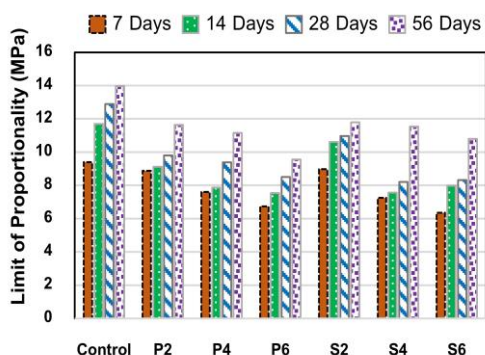
ดัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตามที่ได้อธิบายไว้ในข้อ 3.1 ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างควบคุมมีค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP ต่ำที่สุดที่มีอายุ 7 วัน เท่ากับ 9.40 MPa และมีค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP สูงสุดที่มีอายุ 56 วัน เท่ากับ 13.97 MPa หากพิจารณาปริมาณการใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วจะพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตรา ร้อยละ 2 จะให้ค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP สูงสุด และมีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ยางพาราในปริมาณมากขึ้น

3.3.3 หน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าว

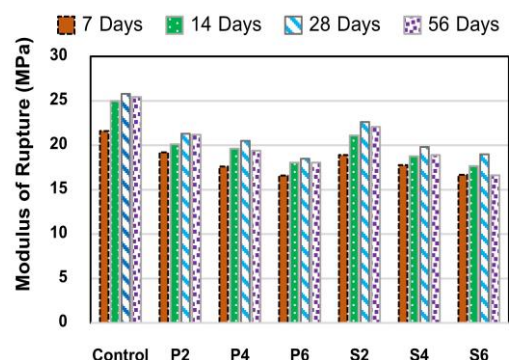
รูปที่ 11 แสดงค่าหน่วยแรงดัดที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 2 4 และ 6 ซึ่งได้พบว่า ตัวอย่างควบคุมมีค่าหน่วยแรงดัดที่ MOR มากขึ้นเมื่ออายุการบ่มในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตาม หน่วยแรงดัดที่มีอายุ 56 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับหน่วยแรงดัดที่มีอายุ 28 วัน เมื่อนำตัวอย่างคอนกรีตเสริมใยแก้วที่บ่มน้ำ อายุ 56 วัน ไปส่องด้วย

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหน่วยแรงดัดที่ LOP และหน่วยแรงดัดที่ MOR (ตัวเลขในวงเล็บ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ตัวอย่าง	ค่าหน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน (MPa)				ค่าหน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าว (MPa)			
	7 days	14 days	28 days	56 days	7 days	14 days	28 days	56 days
Control	9.40(0.61)	11.70(0.81)	12.89(1.21)	13.97(1.41)	21.60(3.02)	25.00(3.52)	25.79(3.31)	25.45(2.92)
P2	8.87(1.03)	9.12(1.04)	9.80(1.03)	11.64(2.11)	19.2(2.61)	20.11(2.81)	21.30(3.04)	21.20(3.41)
P4	7.60(1.21)	7.86(1.23)	9.38(1.01)	11.15(2.81)	17.60 (3.01)	19.61(2.82)	20.5(2.42)	19.40(3.71)
P6	6.74(1.22)	7.54(0.62)	8.50(1.02)	9.55(2.62)	16.60 (3.02)	18.05(2.43)	18.50(2.61)	18.05(3.33)
S2	8.98(1.04)	10.61(1.10)	10.96(1.21)	11.80(1.91)	18.92(2.81)	21.10(2.42)	22.63(3.03)	22.08(3.27)
S4	7.25(0.82)	7.56(1.20)	8.21(1.04)	11.53(2.21)	17.7(2.81)	18.76(2.91)	19.82(2.31)	18.81(3.82)
S6	6.35(1.01)	7.97(1.31)	8.52(1.62)	10.80(2.51)	16.67(2.61)	17.66 (2.81)	19.00(3.01)	16.61(3.84)



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบหน่วยแรงดัดที่ LOP



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบหน่วยแรงดัดที่ MOR



กล้องจุลทรรศน์แบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ได้พบว่า เส้นใยแก้วยังมีผิวเรียบ ไม่ได้รับความเสียหายที่เกิดจากการกัดของด่างในคอนกรีต นอกจากนี้ สังเกตว่ามีคราบของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เกาะติดอยู่ที่ผิวเส้นใย ดังรูปที่ 15 ถึง 17 โดย $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะเข้าไปอุดช่องว่าง ทำให้เส้นใยแก้วเกิดการจับตัวกันแน่นขึ้น หรือมีแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ที่มากขึ้น ผลดังกล่าวอาจทำให้คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วมีความเหนียวลดลง โดยการวิบัติอาจเปลี่ยนรูปแบบจากการถอนของเส้นใยไปเป็นแบบขาดภายใต้แรงดึง ซึ่งส่งผลให้เกิดการวิบัติแบบเปราะ (Embrittlement) ดังได้อธิบายไว้ในงานวิจัยของ C. Sujivorakul และคณะ [3] ที่พบว่าคราบของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและคอนกรีตมากขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการวิบัติของเส้นใยแก้วเป็นแบบเปราะ นอกจากนี้ หน่วยแรงดัดที่ MOR ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ใช้ยางพารามีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากหน่วยแรงที่ MOR ของคอนกรีตเสริมใยแก้วจะมีความสัมพันธ์กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยแก้วกับคอนกรีต โดยเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยยางพาราซึ่งเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัวกว่าคอนกรีตอาจส่งผลให้การยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยแก้วกับยางพาราน้อยลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน

3.3.4 ค่าความเครียดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วที่มียางพาราและยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสม

ตารางที่ 3 ได้สรุปค่าความเครียดที่ LOP และ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว และรูปที่ 12

แสดงความเครียดที่ LOP โดยตัวอย่างควบคุมจะให้ค่าความเครียดที่ LOP มากที่สุดในทุกช่วงอายุ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผสมยางพารา จากการทดสอบได้พบว่าตัวอย่างที่ผสมยางพาราธรรมชาติจะให้ค่าความเครียดที่ LOP สูงกว่าตัวอย่างที่ผสมยางพาราสังเคราะห์ นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณยางพาราทั้งสองแบบจะทำให้ความเครียดที่จุด LOP มีแนวโน้มลดลง หากพิจารณาปัจจัยของอายุของการบ่มในน้ำจะพบว่าความเครียดที่จุด LOP ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วในทุกตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน แต่อัตราการลดลงจะช้าลงเมื่ออายุการบ่มที่ 28 วันขึ้นไป รูปที่ 13 แสดงความเครียดที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว โดยตัวอย่างควบคุมมีค่าความเครียดที่ MOR มากกว่าตัวอย่างที่ใช้ยางพาราที่อายุการบ่มในน้ำระหว่าง 7 ถึง 28 วัน โดยมีค่าความเครียดลดลงอย่างรวดเร็วตามอายุการบ่มในน้ำ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ มีค่าความเครียดที่ MOR ลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อมีอายุการบ่มในน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความเครียดที่ MOR ที่มีอัตราการลดลงค่อนข้างช้าเมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน ดังเช่นสังเกตในผลของความเครียดที่ LOP ตารางที่ 3 ได้สรุปค่าความเครียดที่ LOP และ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว และรูปที่ 12 แสดงความเครียดที่ LOP โดยตัวอย่างควบคุมจะให้ค่าความเครียดมากที่สุดในทุกช่วงอายุ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผสมยางพารา จากการทดสอบได้พบว่าตัวอย่างที่ผสมยางพาราธรรมชาติจะให้ค่าความเครียดที่ LOP สูงกว่าตัวอย่างที่ผสมยางพาราสังเคราะห์

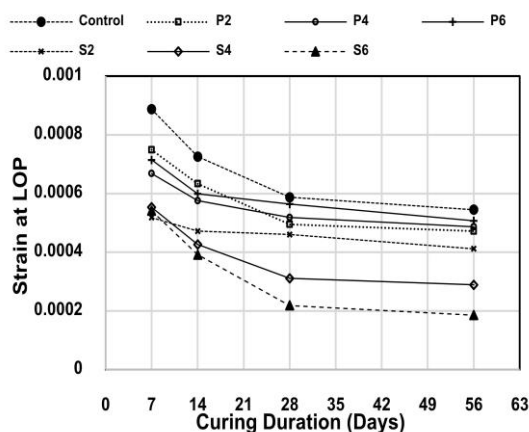


นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณยางพาราทั้งสองแบบจะทำให้ความเครียดที่ LOP มีแนวโน้มลดลง หากพิจารณาปัจจัยของอายุของการบ่มในน้ำจะพบว่า ความเครียดที่

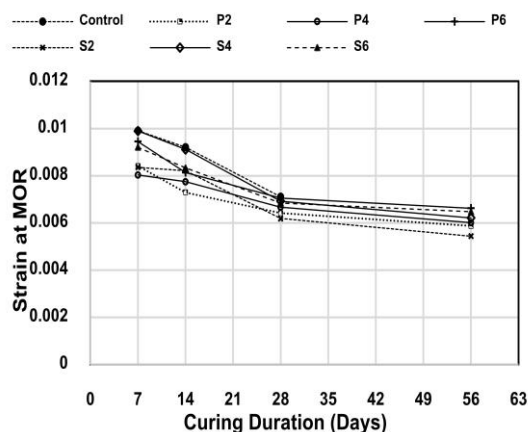
LOP ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วในทุกตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน แต่อัตราการลดลงจะช้าลงเมื่ออายุการบ่มที่ 28 วันขึ้น

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความเครียดที่ LOP และความเครียดที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว

ตัวอย่าง	ค่าความเครียดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน LOP				ค่าความเครียดที่จุดแตกหัก MOR			
	7 days	14 days	28 days	56 days	7 days	14 days	28 days	56 days
Control	0.000887	0.000726	0.000588	0.000545	0.009909	0.009206	0.007109	0.00698
P2	0.000749	0.000634	0.000495	0.000472	0.008411	0.007293	0.006418	0.00587
P4	0.000668	0.000576	0.000518	0.000487	0.008031	0.007743	0.006671	0.00601
P6	0.000714	0.000599	0.000565	0.000507	0.009448	0.008134	0.007051	0.00662
S2	0.000518	0.000472	0.000461	0.000412	0.008353	0.008215	0.006178	0.00544
S4	0.000553	0.000426	0.000311	0.000289	0.009897	0.009114	0.006925	0.00621
S6	0.000542	0.000392	0.000219	0.000186	0.009206	0.008333	0.006844	0.00647



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ LOP ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

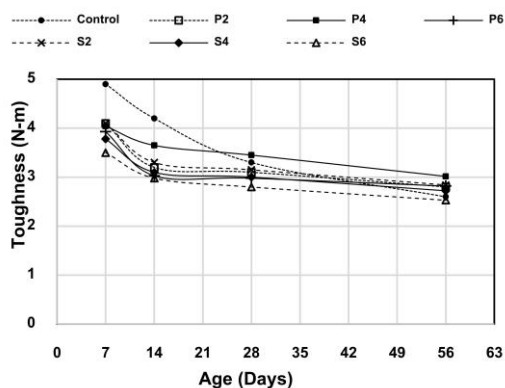


รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ MOR ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

รูปที่ 13 แสดงความเครียดที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว โดยตัวอย่างควบคุมมีค่าความเครียดที่ MOR มากกว่าตัวอย่างที่ใช้ยางพาราที่อายุการบ่มในน้ำระหว่าง 7 ถึง 28 วัน โดยค่าความเครียดได้ลดลงอย่างรวดเร็วตามอายุการบ่มในน้ำ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ มีค่าความเครียดที่ MOR ลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อมีอายุการบ่มในน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความเครียดที่ MOR ที่มีอัตราการลดลงค่อนข้างช้าเมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน ดังเช่นสังเกตในผลของความเครียดที่ LOP

3.3.5 ค่าความเหนียว (Toughness) ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว

ความเหนียวของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน ได้แสดงในรูปที่ 14 ผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างควบคุมมีค่าความเหนียวลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนถึงอายุการบ่มที่ 56 วัน โดยที่อายุการบ่ม 14 วันแรก ตัวอย่างควบคุมจะมีค่าความเหนียวสูงกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ แต่เมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน แผ่นตัวอย่างควบคุมมีค่าความเหนียวต่ำกว่าบางตัวอย่างของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ ทั้งนี้ คาดว่าเกิดจากการใช้ยางพาราลดการจับตัวของคราบ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ผิวของเส้นใยแก้ว



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบความเหนียวของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว

ในช่วงอายุ 14 วันแรกของการบ่มในน้ำ คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราหรือยางพาราสังเคราะห์มีค่าความเหนียวลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อตัวอย่างมีอายุการบ่มในน้ำมากกว่า 14 วัน อัตราการลดลงของค่าความเหนียวจะมีค่าน้อยลงอย่างมาก ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟ โดยคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ ร้อยละ 4 ให้ค่าความเหนียวที่อายุระหว่าง 14 ถึง 56 วันสูงสุด เนื่องจากผลการทดสอบของตัวอย่างที่ใช้ยางพาราธรรมชาติร้อยละ 4 ได้แสดงพฤติกรรมการตัด โดยมีอัตราการลดลงของหน่วยแรงดัดหลังจากจุด MOR ช้ากว่าตัวอย่างอื่น ดังนั้นเมื่อคำนวณค่าพื้นที่ใต้กราฟเพื่อหาความเหนียว จึงทำให้ค่ามากกว่าตัวอย่างอื่น ผลที่ได้รับสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. J. Majumdar และคณะ [4] ที่ได้ใช้ยางสไตรีนบิวตาไดอีนผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วและเก็บให้อยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติมีความเหนียวในระยะยาวลดลงตามอายุของการใช้งาน แต่มีอัตราการลดลงช้ากว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ผสมยางสไตรีนบิวตาไดอีน



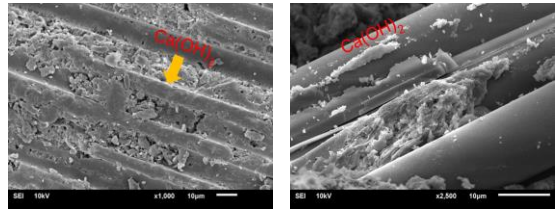
3.3.6 ภาพขยายคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การขยายภาพของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วดำเนินการโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เพื่อดูการกัดกร่อนที่ผิวของเส้นใย การแทรกตัว และยึดเหนี่ยวของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และเนื้อยางพารา กับเส้นใยแก้ว โดยตัวอย่างที่นำไปทดสอบมีจำนวน 3 ตัวอย่าง ประกอบด้วย ตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างที่ใช้ยางพาราธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 2 และตัวอย่างที่ใช้ยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 2 ที่ตัวอย่างทั้งหมดได้บ่มน้ำจนกระทั่งอายุ 56 วัน ผลที่ได้ได้แสดงได้ดังรูปที่ 15 ถึง 17

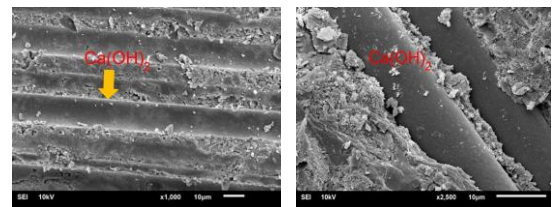
จากรูปที่ 15 สังเกตเห็นว่า ผิวเส้นใยแก้วในตัวอย่างควบคุมไม่ถูกกัดกร่อนจากความเป็นด่างของปูนซีเมนต์ และสังเกตเห็นคราบของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เกาะติดที่ผิวเส้นใย นอกจากนี้ ตัวอย่างที่มียางพาราธรรมชาติ และยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสมที่ร้อยละ 2 มีการยึดเกาะกันที่ผิวของเส้นใยมากกว่าตัวอย่างควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ โดยการยึดเกาะที่มากขึ้นเกิดจาก $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และเนื้อยางพารา ซึ่งทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลง สอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยลงตามที่อธิบายไว้ในข้อที่ 3.2 นอกจากนี้ ได้พบว่า เส้นใยไม่ถูกกัดกร่อนจากความเป็นด่างของปูนซีเมนต์

4. สรุปผลการวิจัย

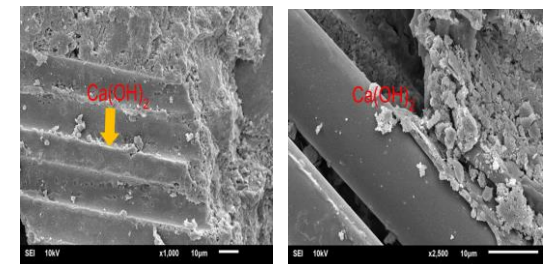
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และกำลังดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราและยางพาราสังเคราะห์ โดยผลที่ได้จากการศึกษาสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 15 ภาพถ่ายของตัวอย่างควบคุม (บ่มน้ำ 56 วัน)



รูปที่ 16 ภาพถ่ายของตัวอย่างที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ ร้อยละ 2 (บ่มน้ำ 56 วัน)



รูปที่ 17 ภาพถ่ายของตัวอย่างที่ใช้ยางพาราสังเคราะห์ ร้อยละ 2 (บ่มน้ำ 56 วัน)

1. มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยยางพาราหรือยางพาราสังเคราะห์มากขึ้นจะมีกำลังอัดลดลง โดยกำลังอัดมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีการแทนที่ด้วยยางพารา ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงเมื่อมีการนำยางพาราที่มีกำลังอัดน้อยกว่ามาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์



2. การดูดซึมน้ำของแผ่นบางที่ทำจากคอนกรีตเสริมใยแก้วมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการบ่มน้ำมากขึ้น เนื่องจากความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากขึ้น นอกจากนี้ คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ถูกแทนที่ด้วยยางพาราหรือยางพาราสังเคราะห์จะมีการดูดซึมน้ำน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมเนื่องจากการแทรกตัวของเนื้อยางพาราที่เกิดขึ้นในช่องว่างของคอนกรีต

3. อายุของการบ่มน้ำมากขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดัดที่ LOP ของทั้งตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ เนื่องจากหน่วยแรงดัดที่ LOP มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังอัดของคอนกรีต

4. ในช่วงอายุ 28 วันแรก หน่วยแรงดัดที่ MOR ของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราหรือยางพาราสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นตามอายุของการบ่มน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่อายุ บ่มน้ำ 56 วัน หน่วยแรงดัดที่ MOR มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

5. หน่วยแรงดัดที่ MOR ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ใช้ยางพารามีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม

6. ความเครียดที่ LOP และ MOR ของตัวอย่างควบคุม และคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ใช้ยางพารามีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออายุการบ่มในน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความเหนียวของคอนกรีตเสริมใยแก้วลดลง อย่างไรก็ตามการใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ช่วยให้มีอัตราการลดลงของความเครียดและความเหนียวน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI 544.1R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, MI, 2002.
- [2] N. Kabay and B. Amed, Glass fiber-reinforced sprayed concrete: Physical, mechanical, and durability properties, Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(1), 04020396.
- [3] C. Sujivorakul, C. Jaturapitakkul and A. Taotip, Utilization of fly ash, rice husk ash, and palm oil fuel ash in glass fiber-reinforced concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(9), 1281-1288.
- [4] A.J. Majumdar, B. Singh and J.M. West, Properties of GRC modified by styrene-butadiene rubber latex, Journal of Composites for Construction, 1987, 61-64.
- [5] S. Mebarkia and C. Vipulanandan, Compressive behavior of glass-fiber reinforced polymer concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 1992, 4, 91-105.
- [6] P. Plangoen, The development of irrigation canal mix with rubber latex for farm irrigation system, KMUTT Research and Development Journal, 2016, 41(2), 211-223. (in Thai)



- [7] T. Yaowarat, A. Suddeepong, M. Hoy, S. Horpibulsuk, T. Takaikaew, N. Vichitcholchai, A. Arulrajah and A. Chinkulkijniwat, Improvement of flexural strength of concrete pavements using natural rubber latex, *Construction and Building Materials*, 2021, 282, 122704.
- [8] A. Buritaton, T. Takaikaew, S. Horpibulsuk, A. Udomchai, M. Hoy, N. Vichitcholchai and A. Arulrajah, Mechanical strength improvement of cement stabilized soil using natural rubber latex for pavement base applications, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(12), 04020372.
- [9] K. Zhong, M. Sun, M. Zhang, Y. Qin and Y. Li, Interfacial and mechanical performance of grouted open-graded asphalt concrete with latex modified cement mortar, *Construction and Building Materials*, 2020, 234, 117394.
- [10] ASTM C109/C109M-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, PA 2002.
- [11] BS EN 1170-5, Precast concrete products- Test methods for glass-fiber reinforced cement: Part 5 measuring bending strength, Complete bending test method, British Standards Institution, London, 1998.