วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ผลกระทบของเส้นใยอิเลคทรอนิกส์ต่อสมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมร่วมเศษแก้วแทนที่มวลรวมละเอียด

Effect of electronic waste fiber on the properties of self-compacting mortar incorporating waste glass as fine aggregate replacement

จุฑาทิพย์ รูปแฉล้ม[1] บุรฉัตร ฉัตรวีระ[1] กฤษดา เสือเอี่ยม[2]*

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ 10800

Jutatip Roopchalaem[1] Burachat Chatveera[1] Gritsada Sua-iam[2]*

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University Pathum Thani 12120

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Bangkok 10800

* Corresponding author.

E-mail: gritsada.s@rmutp.ac.th; Telephone: 0 89985 5852

วันที่รับบทความ 18 ธันวาคม 2567 ; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 19 กุมภาพันธ์ 2568; วันที่ตอบรับบทความ 25 กุมภาพันธ์ 2568

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างกำลังเปลี่ยนเข้าสู่แนวทางปฏิบัติที่ยั่งยืนโดยความพยายามนำวัสดุรีไซเคิลมาใช้เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้นำเสนอการพัฒนามอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองรักษ์โลก (Green self-compacting mortar) โดยใช้เส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ เศษแก้วรีไซเคิลและวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ (แคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิก้าฟูม) ประเมินผลกระทบของวัสดุเหล่านี้ต่อความสามารถในการไหล สมบัติเชิงกลและความทนทาน ส่วนผสมมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองจำนวนสิบห้ารูปแบบถูกเตรียมด้วยการผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ 0–15% การแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วรีไซเคิล 0–50% และการแทนที่ปูนซีเมนต์ 10% (5% แคลเซียมคาร์บอเนตและ 5% ซิลิกาฟูม) การประเมินความสามารถในการไหลผ่านด้วยการทดสอบ mini slump flow และ V-funnel ในขณะที่กำลังอัดและกำลังดัดทำการทดสอบที่อายุ 7, 28, และ 91 วัน รวมถึงการทดสอบความทนทาน ได้แก่ การดูดกลืนน้ำและการต้านทานซัลเฟต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ 5% ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีกำลังอัดและกำลังดัดที่อายุ 91 วัน เท่ากับ 51.63 MPa และ 5.26 MPa ตามลำดับ การแทนที่ปูนซีเมนต์ช่วยปรับปรุงความหนาแน่นของเมทริกซ์ช่วยลดการดูดซึมน้ำลงเหลือ 2.38% และเพิ่มความต้านทานต่อซัลเฟตด้วยการสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น (10% และ 15%) และการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว 50% ส่งผลกระทบเชิงลบต่อสมบัติของมอร์ตาร์เนื่องจากความพรุนที่เพิ่มขึ้น การผสมผสานระหว่างเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ 5%, การแทนที่ซีเมนต์ 10%, และการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว 25% เป็นส่วนผสมที่แนะนำจากผลการศึกษาเนื่องจากให้มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีสมบัติที่สมดุลและยั่งยืน จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้วัสดุรีไซเคิลเพื่อผลิตมอร์ต้าร์สมรรถนะสูงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ

เส้นใยอิเลคทรอนิกส์ เศษแก้ว มอร์ต้าร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง การแทนที่มวลรวมละเอียด

Abstract

The construction industry is recently turning towards sustainability by incorporating recycled materials to reduce environmental impacts. This paper presents the development of green self-compacting mortar (SCM) using E-waste fiber,

waste glass, and cement replacement materials (calcium carbonate and silica fume). The effects of these materials on flowability, mechanical properties, and durability were evaluated. Fifteen different mixes of SCM were prepared, incorporating 0–15% E-waste fiber, 0–50% waste glass as replacement for sand, and 10% cement replacement (5% calcium carbonate and 5% silica fume). Flowability was evaluated by mini slump flow and V-funnel tests. Compressive strength and flexural strength tests were carried out at 7, 28, and 91 days. Durability tests such as water absorption and sulfate resistance were performed. In these results, 5% E-waste fiber gave the best performance, with a compressive strength of 51.63 MPa and a flexural strength of 5.26 MPa at 91 days. Cement replacement improved the densification of the matrix, reducing water absorption to 2.38% and enhancing sulfate resistance with very minimal mass loss. Higher contents of fibers, such as 10% and 15%, along with 50% replacement with waste glass, resulted in detrimental effects on workability and durability due to increased porosity. A combination of 5% E-waste fiber, 10% cement replacement, and up to 25% waste glass replacement is recommended in the production of SCM, which shows balanced properties for sustainability. This research results show the feasibility of producing eco-friendly high-performance mortars with recycled materials.

Keywords

electronic waste fibers; waste glass; self-compacting mortar; fine aggregate replacement

1. บทนำ

การก่อสร้างอย่างยั่งยืน (Sustainable construction) มีบทบาทสำคัญในสังคมสมัยใหม่เนื่องจากเป็นความพยายามลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการก่อสร้าง ดังนั้นสิ่งสำคัญเพื่อให้บรรลุเป้าหมายทางด้านความยั่งยืนต้องได้รับความร่วมมือจากทุกภาคส่วนโดยเฉพาะวิศวกรโยธา เนื่องจากเป็นผู้มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการปฏิบัติงานก่อสร้างที่เกี่ยวกับความรับผิดชอบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม ต้นทุนและผลกำไรของโครงการ [1] เนื่องจากอุตสาหกรรมการก่อสร้างถือได้ว่ามีส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีสาเหตุมาจากความต้องการในการบริโภคทรัพยากรธรรมชาติและพลังงานจำนวนมาก รวมถึงปริมาณขยะที่เกิดจากกระบวนการก่อสร้างในปริมาณมากเช่นกัน [2] การพึ่งพาทรัพยากรจากธรรมชาติและความต้องการพลังงานที่มีอย่างจำกัดของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง รวมถึงเศษวัสดุและขยะที่เกิดจากการก่อสร้างและรื้อถอนมักถูกทิ้งในหลุมฝังกลบหรือมีการกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี จนนำไปสู่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง [3-4] ดังนั้นการแก้ไขปัญหาอย่างยั่งยืนจึงมีความสำคัญต่อสภาวะสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจของโลก หนึ่งในแนวคิดที่สำคัญได้แก่แนวทางการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุทดแทนบางส่วนหรือทั้งหมดในส่วนผสมคอนกรีตแบบดั้งเดิม แนวคิดนี้สามารถช่วยลดการใช้วัสดุจากธรรมชาติและปริมาณขยะจากการฝังกลบลงได้ซึ่งเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย [5] ดังนั้นการวิจัยเพื่อหาแนวทางในการนำวัสดุรีไซเคิลกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นทางเลือกที่มีความน่าสนใจ ที่ผ่านมานักวิจัยได้ทำการศึกษาศักยภาพของการใช้วัสดุรีไซเคิล อาทิ เช่น เศษกระเบื้องจากการก่อสร้าง [6] เศษเสาเข็มจากการก่อสร้าง [7] ตลอดจนเส้นใยรีไซเคิลเพื่อนำมาเป็นทางเลือกสำหรับวัสดุผสมร่วมในกระบวนการผลิตคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์ [8]

การใช้เศษแก้วเป็นวัสดุรีไซเคิลทดแทนวัสดุผสมธรรมชาติในการผลิตคอนกรีตเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้และสอดคล้องการก่อสร้างอย่างยั่งยืน สามารถช่วยแก้ไขปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้จากงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าขยะจากเศษแก้วสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้ [9] Amin et al [10] ศึกษาพบว่า ส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ (Ultra-High Performance Concrete) ที่มีผงแก้วผสมร่วม 20% สามารถช่วยปรับปรุงกำลังอัด กำลังดึงผ่าซีก กำลังดัด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ในขณะที่การแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วรีไซเคิลในอัตราส่วนที่เพิ่มสูงขึ้นยังช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตอีกด้วย Baikerikar et al [11] พบว่าส่วนผสมคอนกรีตที่มีผงแก้วผสมร่วม 5% และทรายแก้วไซเคิล 10% เป็นส่วนผสมที่ดีที่สุดทั้งในแง่ของสมบัติทางกลและความทนทาน ทั้งนี้การใช้เศษแก้วรีไซเคิลยังทำให้การดูดซึมน้ำและการซึมผ่านของไอออนคลอไรด์ของคอนกรีตลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดอนุภาคและสัดส่วนการแทนที่ของเศษแก้วรีไซเคิลส่งผลกระทบต่อสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้าน

บวกและลบ ในทางกลับกันความทนทานของคอนกรีตที่ผสมร่วมเศษแก้วรีไซเคิลมีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อสัดส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังอัดและกำลังดัดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วในสัดส่วนที่สูงจะส่งผลกระทบทำให้สมบัติของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [12] ที่สำคัญเศษแก้วรีไซเคิลมักมีราคาต่ำกว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตได้อีกด้วย [13]

ปัจจุบันขยะอิเล็กทรอนิกส์ (E-waste) กำลังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม หน่วยงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (The United States Environmental Protection Agency, EPA) ประมาณการว่าการผลิตขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นถึง 6–10 % ต่อปี โดยมีเพียง 5% เท่านั้นที่ถูกรีไซเคิลทั่วโลก แนวทางที่สำคัญในการนำขยะอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้โดยการแปลงขยะเหล่านี้ให้เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาที่พักอาศัยหรือโครงสร้างคอนกรีต [14] โดยแผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) เป็นส่วนหนึ่งขยะอิเล็กทรอนิกส์มีอยู่โดยประมาณ 4% ของขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด ทำหน้าที่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยในปัจจุบันส่วนใหญ่เน้นไปที่การใช้แผงวงจรพิมพ์เป็นทางเลือกในการทดแทนการมวลรวมและปูนซีเมนต์ในบริบทของการผลิตคอนกรีต [8,15-16] Vishnupriyan and Annadurai [17] พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยจากแผงวงจรพิมพ์ 4% เพิ่มขึ้น 32.1% ในขณะที่กำลังดึงเพิ่มขึ้น 44.4% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เมื่อผสมร่วมกับผงซิลิก้าฟูม (Silica fume) และเพิ่มปริมาณเส้นใยให้สูงขึ้น (5%) พบว่าส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ โดยกำลังอัดเพิ่มขึ้น 10% ในขณะที่กำลังดึงเพิ่มขึ้น 10.1% ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมร่วมเส้นใยจากแผงวงจรพิมพ์เพียงอย่างเดียว [18]

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องก่อนหน้ายังไม่พบการศึกษาผลกระทบร่วม (Synergy effect) ของการนำเศษแก้วและเส้นใยจากขยะอิเลคทรอนิกส์มาใช้เป็นวัสดุผสมร่วมกันในการคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาผลกระทบของการนำเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และเศษแก้วกลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อสมบัติของมอร์ต้าร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ซึ่งนิยามถึงมอร์ต้าร์ที่มีความข้นเหลวแต่ยังคงความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ (Homogeneous) และมีเสถียรภาพ (Stable) สามารถไหลลงแบบได้เองโดยไม่ต้องทำการสั่น [19] ผลลัพธ์ของการศึกษานี้จะให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีค่าเกี่ยวกับความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของการใช้วัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ในการผลิตมอร์ต้าร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ซึ่งอาจมีส่วนช่วยในการพัฒนาวิธีการก่อสร้างที่ยั่งยืนมากขึ้นจากการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ตลอดจนลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการสะสมของขยะเหลือทิ้งอีกทางหนึ่งด้วย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุผสม

2.1.1 วัสดุประสาน (Binder materials) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตามมาตรฐาน มอก. เลขที่ 15 [20], ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) มีความถ่วงจำเพาะ 2.71 องค์ประกอบหลักทางเคมีได้แก่ CaO (56.8%) และสารละลายซิลิกาฟูมชนิดน้ำ มีความถ่วงจำเพาะ 2.24 องค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ SiO_2 (91.56%)

2.2.2 วัสดุรวมละเอียด ได้แก่ ทรายแม่น้ำ (RS) ค่าโมดูลัสความละเอียด 2.81, ความถ่วงจำเพาะ 2.61 และเศษแก้วรีไซเคิล (WG) นำมาบดและร่อนคัดขนาด โมดูลัสความละเอียด 2.93, ความถ่วงจำเพาะ 2.53 และการกระจายตัวขนาดคละของวัสดุเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [21]



รูปที่ 1 เส้นใยจากรีไซเคิลซากแผงวงจรพิมพ์

2.2.3 เส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ (E-fiber) จากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรพิมพ์ด้วยการคัดแยกส่วนที่เป็นโลหะโดยวิธีการทางกายภาพ จากนั้นนำไปบดย่อยและแยกโลหะทองแดงออกจนเหลือเป็นซากแผงวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็กลงและมีลักษณะเป็นเส้นใย ดังรูปที่ 1

2.2.4 สารลดน้ำจำนวนมาก (High Range Water-Reducers) ประเภท polycarboxylate ether polymers คุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C494 [21] ประเภท A และ F และน้ำที่ใช้ในการผสมและบ่มมอร์ตาร์ มาจากน้ำประปาที่สะอาดและไม่มีสิ่งเจือปน

2.2 สัดส่วนผสมมอร์ต้าร์

ในการศึกษาครั้งนี้อัตราส่วนของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองถูกแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม (Group I-V) จำนวน 15 ส่วนผสม สรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ (kg/m^3)

No.	Binder			Fine aggregate		E-fiber
	OPC	CC	SF	RS	WG	(%)
Group I: SCM0E0						
1	550	-	-	868	0	-
2	550	-	-	651	217	-
3	550	-	-	434	434	-
Group II: SCM10E0						
4	495	27.5	27.5	868	0	-
5	495	27.5	27.5	651	217	-
6	495	27.5	27.5	434	434	-
Group III: SCM10E5						
7	495	27.5	27.5	868	0	5
8	495	27.5	27.5	651	217	5
9	495	27.5	27.5	434	434	5
Group IV: SCM10E10						
10	495	27.5	27.5	868	0	10
11	495	27.5	27.5	651	217	10
12	495	27.5	27.5	434	434	10
Group V: SCM10E15						
13	495	27.5	27.5	868	0	15
14	495	27.5	27.5	651	217	15
15	495	27.5	27.5	434	434	15

โดยกลุ่มที่ I เป็นส่วนผสมควบคุมที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เศษแก้วแทนทรายแม่น้ำในสัดส่วน 0%, 25% และ 50% ตามลำดับ ในขณะที่กลุ่มที่ II ถึงกลุ่มที่ V เป็นส่วนผสมของมอร์ต้าร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ 10% ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต 5% และซิลิกาฟูม 5% และใช้เศษแก้วแทนทรายแม่น้ำในสัดส่วนเดียวกับกลุ่มที่ I โดยทำการผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0%, 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.37 เท่ากันทุกส่วนผสม และปริมาณสารลดน้ำจำนวนมากแปรผันตามระยะเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลแผ่ 25±2 cm ที่กำหนดตามแนวทาง EFNARC [22]

2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

ส่วนผสมของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองทั้งหมดถูกผสมเข้าด้วยกันโดยเครื่องผสมมอร์ตาร์ (Hobart) โดยปูนซีเมนต์ ทราย เศษแก้ว และเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ถูกผสมเข้าด้วยกันเป็นเวลา 2 นาที ก่อนที่จะเติมน้ำและสารลดน้ำจำนวนมากจนประเมินว่ามีความข้นเหลวตามที่กำหนด (เป็นการคาดการณ์เบื้องต้นว่าเมื่อนำมอร์ตาร์ดังกล่าวมาทดสอบการไหลแผ่ควรมีระยะเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 25±2 cm) จากนั้นทำการผสมต่ออีก 3 นาทีเพื่อให้ได้มอร์ตาร์ที่มีความสม่ำเสมอ ทำการทดสอบความสามารถในการไหล เก็บตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อทำการทดสอบกำลังอัด กำลังดัด การดูดกลืนน้ำและความต้านทานซัลเฟตตามอายุการทดสอบที่กำหนด โดยผลที่ได้จากการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างจำนวน 3 ก้อน

2.4 วิธีการทดสอบ

2.4.1 ความสามารถในการไหล

การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์โดย Mini slump เป็นการทดสอบเพื่อประเมินการไหลของมอร์ตาร์โดยทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลแผ่ของมอร์ตาร์พร้อมทั้งบันทึกเวลาที่ใช้ในการไหลเมื่อถึงระยะเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 cm (T20) นอกจากนี้ยังทำการทดสอบเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านอุปกรณ์ Mini V-Funnel ซึ่งเป็นอุปกรณ์ลดขนาดหน้าตัด ทำการจับเวลาการไหลเริ่มต้นจนมอร์ตาร์ไหลออกจนหมด โดยขั้นตอนการทดลองเป็นไปตามมาตรฐาน EFNARC [22] ดังรูปที่ 2

2.4.2 กำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยใช้แบบหล่อลูกบาศก์ขนาดมาตรฐาน 50 mm ทำการบ่มในน้ำที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM C109 [21]

2.4.3 กำลังดัด

การทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์ โดยใช้แบบหล่อปริซึมขนาดมาตรฐาน 40x40x160 mm. ในช่วงอายุเดียวกับการทดสอบกำลังอัด กำหนดตำแหน่งน้ำหนักทดสอบแบบ Center-Point Loading ตามมาตรฐาน ASTM C78 [21]

2.2.4 การดูดกลืนน้ำ

การทดสอบการดูดกลืนน้ำของมอร์ตาร์ โดยใช้แบบหล่อลูกบาศก์ขนาดมาตรฐาน 50 mm ที่อายุ 28 และ 91 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C642 [21]

2.2.5 การต้านทานซัลเฟต

การทดสอบการต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต โดยตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มม. แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 10% โดยมีการประเมินร้อยละการสูญเสียกำลังอัดและมวลที่อายุ 28 และ 91 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C1012 [21]



รูปที่ 2 การทดสอบการไหลของมอร์ตาร์

ตารางที่ 2 ความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์

No.	HRWR (%)	Mini slump flow		Mini V-funnel flow time (s)
		Dia. (cm)	T20cm (s)	
Group I: SCM0E0				
1	0.29	26.3	2.28	4.10
2	0.33	26.3	3.08	4.98
3	0.41	25.9	4.37	5.84
Group I: SCM10E0				
4	0.27	26.4	1.82	3.19
5	0.29	26.2	2.26	3.58
6	0.32	25.6	3.15	4.56
Group I: SCM10E5				
7	0.30	26.3	2.22	4.04
8	0.35	26.0	3.05	4.85
9	0.55	25.1	4.27	5.54
Group I: SCM10E10				
10	0.41	26.0	2.73	5.03
11	0.52	25.5	3.71	6.11
12	0.77	24.7	4.55	6.62
Group I: SCM10E15				
13	0.52	25.1	3.37	5.93
14	0.78	25.0	4.78	7.14
15	1.15	24.2	6.41	8.88

3. ผลการวิจัย

3.1 ความสามารถในการไหล

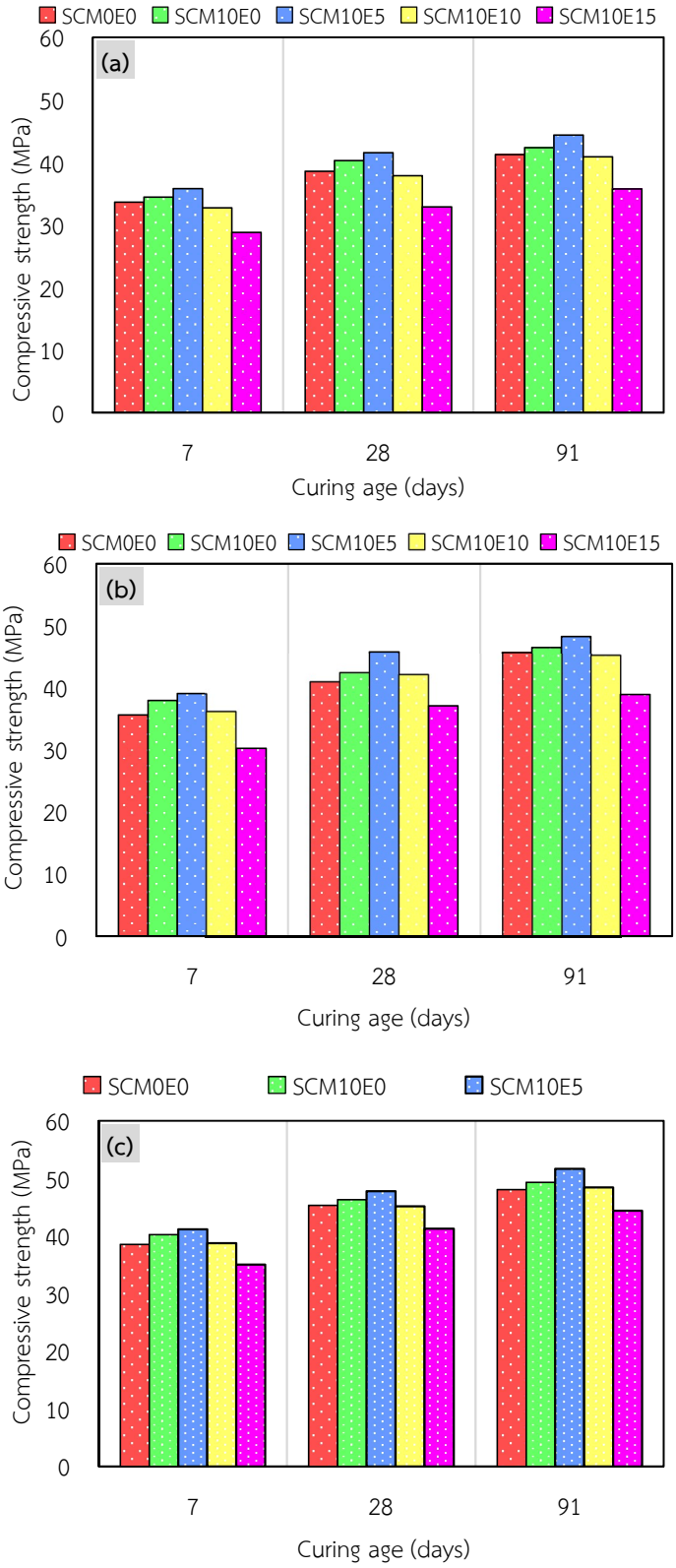
ผลการทดสอบความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเมื่อกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลแผ่ที่ระยะ 25±2 cm ปริมาณความต้องการสารลดน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น อาทิเช่น ส่วนผสมกลุ่ม SCM0E0 ปริมาณสารลดน้ำอยู่ในช่วง 0.29% ถึง 0.41% ในขณะที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น 15% ปริมาณสารลดน้ำเพิ่มสูงขึ้นถึง 1.15% ทั้งนี้ความต้องการปริมาณสารลดน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานภายใน (Internal fiction) ที่เพิ่มขึ้น [6,8] ซึ่งปริมาณสารลดน้ำจากการปรับปริมาณดังกล่าวส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางของการไหลแผ่ในทุกส่วนผสมเป็นไปตามที่กำหนด พบว่าอยู่ในช่วง 24.2-26.3 cm เมื่อพิจารณาเวลาในการไหลเมื่อถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm (T20) พบว่าเวลาที่ใช้ในการ

ไหลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มสูงขึ้น อาทิเช่น ส่วนผสมกลุ่ม SCM10E0 เวลาการไหลในช่วง 1.82 s ถึง 3.15 s ในขณะที่ส่วนผสมกลุ่ม SCM10E15 เวลาการไหลเพิ่มขึ้นในช่วง 3.37 s ถึง 6.41 s สอดคล้องกับเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านอุปกรณ์ Mini V-Funnel พบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น 15% เวลาในการไหลผ่านอุปกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นนี้บ่งชี้ว่าการผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และเศษแก้วในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ที่ลดลง เนื่องจากปัจจัยร่วมกันระหว่างแรงเสียดทานภายในที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ [14,16-18] และลักษณะอนุภาคเหลี่ยมมุมของเศษแก้วส่งผลต่อความหนืดและความต้านทานการไหลที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ [9-13]

3.2 สมบัติของมอร์ต้าร์แข็งตัว

3.2.1 กำลังอัด

ผลทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ต้าร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยการบ่มน้ำที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3(a) ถึง 3(c) พบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่ม เช่น ในกลุ่มควบคุม (SCM0E0) กำลังอัดที่ 28 วันลดลงจาก 45.33 MPa สำหรับการแทนที่ด้วยเศษแก้ว 0% เป็น 38.6 MPa สำหรับการแทนที่ด้วยเศษแก้ว 50% โดยเป็นแนวโน้มในลักษณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่น จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าปริมาณเศษแก้วที่สูงขึ้นมีผลกระทบเชิงลบต่อกำลังอัด เนื่องจากการยึดเกาะที่อ่อนแอระหว่างอนุภาคเศษแก้วที่มีผิวเรียบกับเมทริกซ์ของมอร์ตาร์ รวมถึงรอยแตกภายในที่อาจเกิดขึ้นจากธรรมชาติที่เปราะบางของเศษแก้วในขั้นตอนการบดย่อยลดขนาด [9-13]

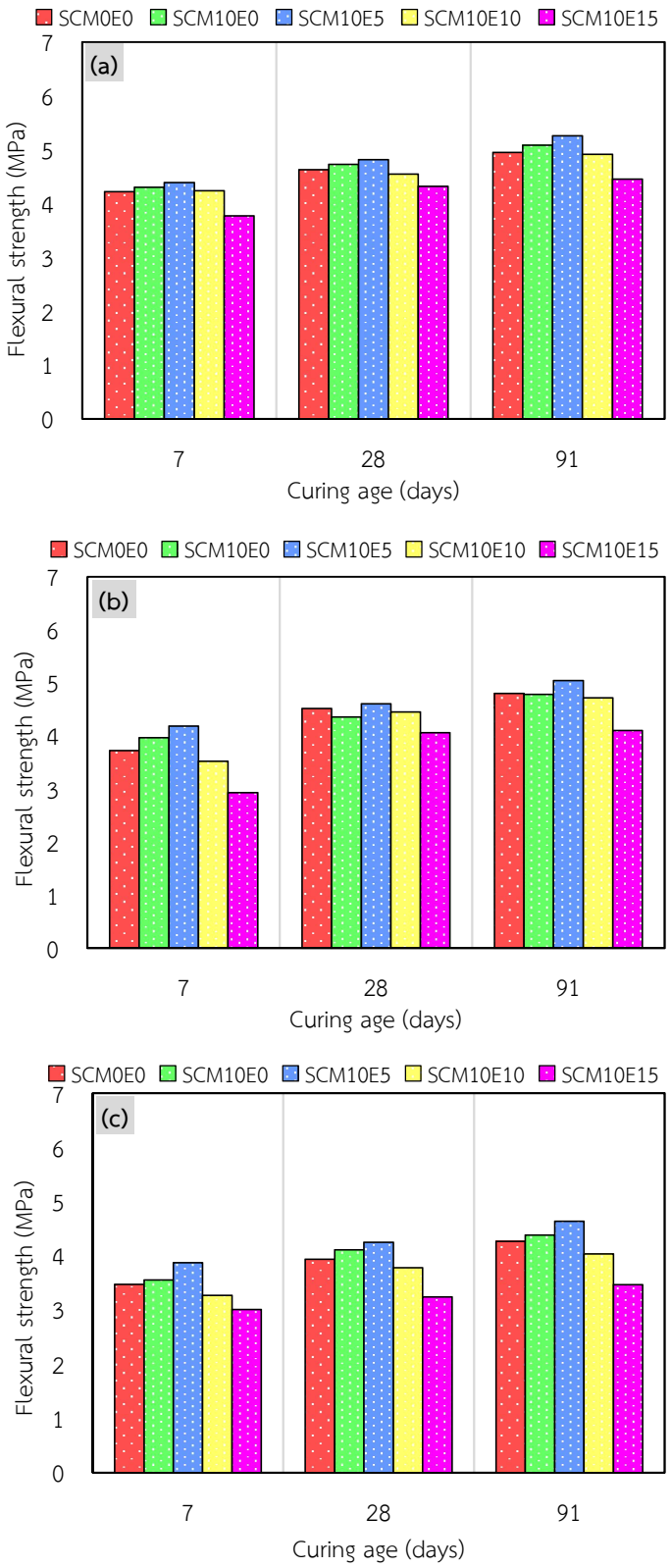


รูปที่ 3 กำลังอัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมร่วมเศษแก้ว (a) 0%, (b) 25% และ (c) 50%

พิจารณาการผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เฉลี่ยในส่วนผสมของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง สังเกตได้ว่าช่วยเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ในทุกช่วงอายุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณเส้นใยต่ำ เช่น ที่อายุ 91 วัน มอร์ตารแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว 0% เมื่อผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ 5% (SCM10E5) มีกำลังอัดสูงถึง 51.63 MPa ซึ่งดีกว่าส่วนผสมที่ไม่ได้ผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ (SCM10E0) ที่มีกำลังอัด 49.31 MPa แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น (10% และ 15%) ส่งผลทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง กำลังอัดที่ลดลงนี้เกิดจากปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนและลดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ส่งผลกระทบเชิงลบต่อความแข็งแรงของมอร์ตาร์ [14,17-18] เมื่อพิจารณาผลกระทบของการผสมร่วมระหว่างเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และเศษแก้วพบว่า มอร์ตาร์ผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ 5% และแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วไม่เกิน 25% เป็นการผสมร่วมกันอย่างสมดุลเนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่สูงสุด 39.11 MPa, 45.18 MPa และ 48.27 MPa ที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตควบคุม (SCM0E0) ในช่วง 0.5%-1.5% ในทางกลับกัน ส่วนผสมที่มีปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และเศษแก้วสูงสุด (Mix 15) พบว่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมถึง 27.4%

3.2.2 กำลังดัด

ผลทดสอบกำลังดัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยการบ่มน้ำที่อายุ 7, 28 และ 91 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4(a) ถึง 4(c) พบว่ากำลังดัดมีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาฟูม (SCM10E0) เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม (SCM0E0) โดยที่อายุ 28 วันกำลังดัดเพิ่มขึ้นจาก 4.63 MPa เป็น 4.73 MPa สำหรับการแทนที่ทราย 0% และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของซิลิก้าฟูม ที่อายุ 91 วันกำลังดัดเพิ่มขึ้นจาก 4.73 MPa เป็น 5.09 MPa (SCM10E0) แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของโครงสร้างภายในของมอร์ตาร์เนื่องจากการผสมร่วมแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาฟูม [8,10,16,18]



รูปที่ 4 กำลังดัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมร่วมเศษแก้ว (a) 0%, (b) 25% และ (c) 50%

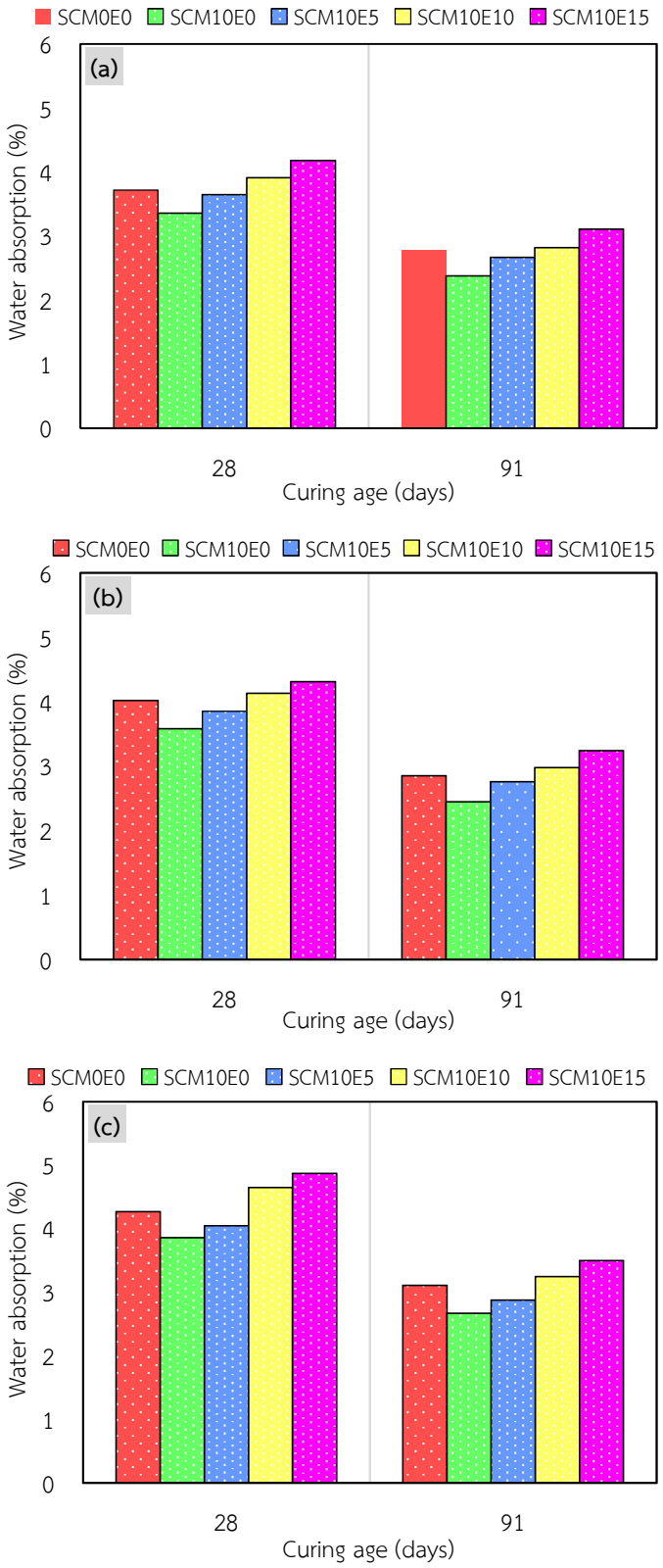
พิจารณาผลกระทบของการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วต่อกำลังดัดพบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเศษแก้วในส่วนผสมเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้กำลังดัดลดลงเล็กน้อยเมื่อแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว 25% (SCM10E5) เช่น ที่อายุ 91 วัน กำลังดัดลดลง 3.9% เมื่อเปรียบเทียบกับแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว 0% แต่เมื่อแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วเพิ่มสูงขึ้นถึง 50% กำลังดัดมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญถึง 11.78% ความแข็งแรงที่ลดลงสามารถเชื่อมโยงกับปริมาณของเศษแก้วที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเนื่องจากลักษณะและการกระจายตัวของอนุภาคเศษแก้ว [9-13]

สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด การผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ 5% ส่งผลให้มอร์ตาร์มีกำลังดัดสูงสุดในทุกระดับการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว เช่นเดียวกันเมื่อผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ เพิ่มสูงขึ้นถึง 15% กำลังดัดมีค่าต่ำสุดที่สังเกตได้ในทุกระดับการแทนที่ทรายด้ยเศษแก้ว เช่น กลุ่ม SCM10E15 กำลังดัดที่อายุ 91 วันเท่ากับ 4.45 MPa, 4.11 MPa, และ 3.47 MPa สำหรับการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว 0%, 25%, และ 50% ตามลำดับ เนื่องปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปทำให้การกระจายตัวไม่ดี เพิ่มช่องว่างและความสมบูรณ์ของเมทริกซ์ลดลง [8,14,16-18]

3.3 สมบัติด้านความทนทาน

3.3.1 การดูดกลืนน้ำ

ผลทดสอบการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยที่อายุ 28 และ 91 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5(a) ถึง 5(c) พบว่าอัตราการดูดกลืนน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาฟูม (SCM10E0) เปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม (SCM0E0) โดยที่อายุ 91 วัน ลดลงจาก 2.77% เหลือ 2.38% ทั้งนี้เมื่อมอร์ตาร์ผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ 5% (SCM10E5), 10% (SCM10E10) และ 15% (SCM10E15) ส่งผลกระทบต่อการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 12.1%, 18.4% และ 30.6% ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่จากขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่ดี มีแนวโน้มทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนเพิ่มมากขึ้น [8,15-16]



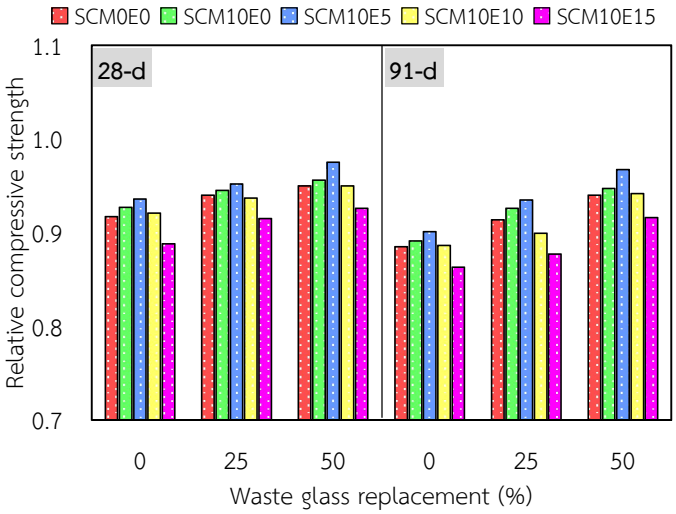
รูปที่ 5 การดูดกลืนน้ำของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมร่วมเศษแก้ว (a) 0%, (b) 25% และ (c) 50%

พิจารณาผลกระทบของการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วต่อการดูดกลืนน้ำของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง เห็นได้ว่าส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว มีอัตราการดูดกลืนน้ำต่ำที่สุดในทุกกลุ่มตัวอย่าง ที่อายุ 28 วัน ส่วนผสม SCM10E0 มีการดูดซึมน้ำ 3.36% โดยการดูดกลืนน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วเพิ่มขึ้นเป็น 25% และ 50% การดูดกลืนเพิ่มขึ้น 6.5% และ 14.8% เนื่องจากลักษณะอนุภาคของเศษแก้วส่งผลต่อความพรุนที่เพิ่มขึ้นของมอร์ต้าร์ [10-11,13]

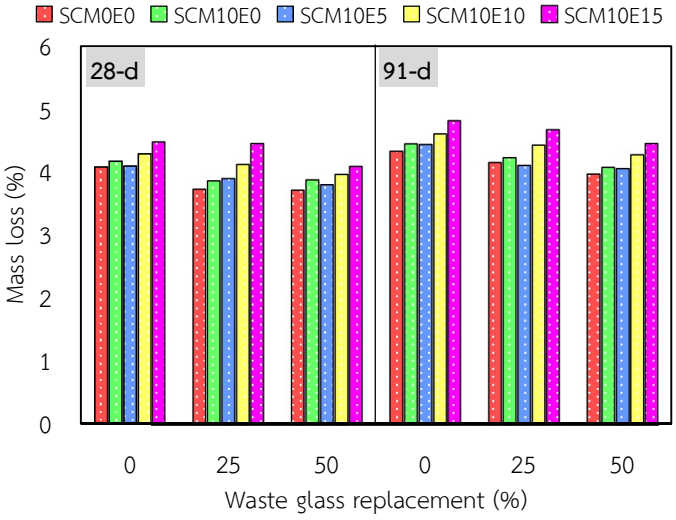
3.3.2 การต้านทานซัลเฟต

ผลการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตต่อการสูญเสียกำลังอัดสัมพัทธ์เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมและร้อยละมวลที่ลดลง ที่อายุ 28 และ 91 วัน ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 กำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการกัดกร่อนโดยสารละลายซัลเฟตเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และการใช้เศษแก้วแทนที่ทรายช่วยเพิ่มความต้านทานต่อสารละลายซัลเฟตได้ โดยมีค่ากำลังอัดสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นหรือหมายถึงการสูญเสียกำลังอัดที่ลดลง พิจารณาผลกระทบเนื่องจากปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองทุกช่วงอายุ มีกำลังอัดสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเมื่อผสมร่วมเส้นใย 5% (SCM10E5) เช่น ที่อายุ 91 วัน กำลังอัดสัมพัทธ์ของส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว 0.901 สูงกว่าส่วนผสมควบคุม (SCM0E0) 1.8% ในทางกลับกันเมื่อปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มสูงขึ้น (10% และ 15%) กำลังอัดสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 0.886 (SCM10E10) และ 0.863 (SCM10E15) ตามลำดับ เนื่องจากผลของการรวมตัวของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์มีความพรุนเพิ่มขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานซัลเฟตที่ลดลง [8,16-18] ในอีกด้านเมื่อพิจารณาผลกระทบจากการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว พบว่ากำลังอัดสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วเพิ่มขึ้น (25% และ 50%) ในทุกส่วนผสม เหตุผลที่เป็นไปได้คือสารละลายซัลเฟตกัดกร่อนเฉพาะที่ผิวของมอร์ตาร์เท่านั้น เนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของอนุภาคเศษแก้วละเอียดที่ช่วยลดระดับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และปรับปรุงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของมอร์ตาร์ทำให้ทนทานต่อการโจมตีของซัลเฟตได้ดีขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Tan and Du [23]

พิจารณาผลร้อยละการสูญเสียมวลของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองแนวโน้มสอดคล้องกับผลกำลังอัดสัมพัทธ์ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการผสมร่วมปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และการใช้เศษแก้วแทนที่ทรายช่วยลดการสูญเสียมวลภายใต้การสัมผัสกับสารละลายซัลเฟต ซึ่งช่วยเพิ่มความทนทานของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มากเกินไป (10% และ 15%) จะทำให้เกิดช่องว่างภายในมอร์ตาร์ ส่งผลให้สูญเสียมวลมากขึ้นเมื่อสัมผัสกับซัลเฟต [13, 23]



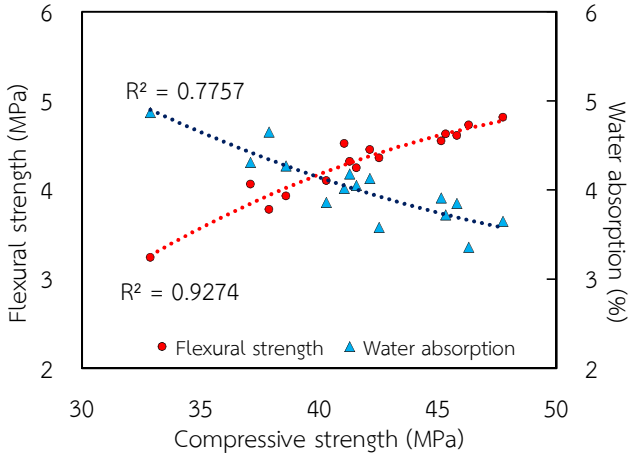
รูปที่ 7 กำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ร้อยละการสูญเสียมวลของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น

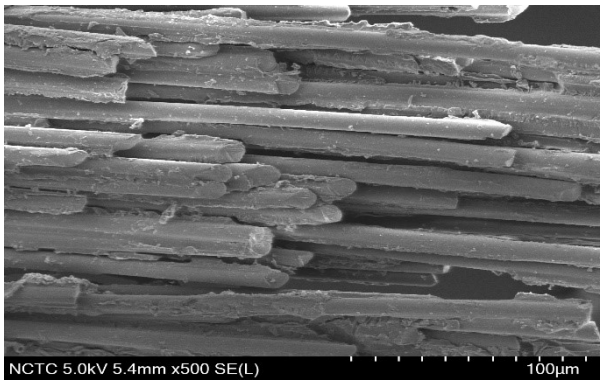
5. การอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลการทดลองพบว่ามอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่อายุ 28 วัน กำลังดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น (R^2 = 0.9274) ซึ่งสะท้อนถึงความสัมพันธ์ในเชิงบวก ขณะดียวกันการดูดกลืนน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อกำลังอัดเพิ่มขึ้น (R^2 = 0.7757) ซึ่งสะท้อนถึงความสัมพันธ์ในเชิงลบ ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยอธิบายได้ว่าเมื่อกำลังอัดเพิ่มขึ้นโครงสร้างภายในของมอร์ต้าร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองมีความหนาแน่นมากขึ้นส่งผลให้สามารถต้านทานแรงดัดได้ดีขึ้นและมีปริมาณรูพรุนลดลงส่งผลต่อความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดียิ่งขึ้น [8, 10, 13, 16]



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังดัด และการดูดกลืนน้ำของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่อายุ 28 วัน

ผลที่ได้จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณการผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ 5% มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากช่วยเพิ่มสมบัติทางกลและความทนทานของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง เส้นใยมีประสิทธิภาพในการกระจายและเชื่อมโครงสร้างภายในมอร์ตาร์ ส่งผลให้มีกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดที่ 51.63 MPa และ 5.26 MPa ที่อายุ 91 วัน นอกจากนี้การผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ยังช่วยลดการกัดกร่อนภายใต้สารละลายซัลเฟตได้ดี โดยมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองมีกำลังอัดสัมพัทธ์สูงสุด (0.967) และร้อยละการสูญเสียมวลต่ำสุด (4.05%) เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้ว 50% อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เป็น 10% และ 15% ทำให้เกิดการรวมตัวและก่อให้เกิดช่องว่างภายในดังลักษณะของเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์แสดงในรูปที่ 10 ทำความเป็นเนื้อเดียวกันลดลงจนส่งผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของมอร์ตาร์ [8,16-18] สิ่งที่เห็นได้ชัดคือกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อาย 91 วันลดลงเหลือ 44.38 MPa ในขณะที่การดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 3.11% สำหรับส่วนผสมกลุ่ม SCM10E15



รูปที่ 10 ภาพขยายลักษณะอนุภาคเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์

นอกจากนี้ควบคู่ไปกับการเพิ่มประสิทธิภาพของเส้นใยด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและ ซิลิกาฟูม เพื่อช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลของการเติมแทรกและปฏิกิริยาปอซโซลาน [8, 10, 12, 16, 18] ลดการดูดกลืนน้ำและปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับการส่วนผสมควบคุม (SCM0E0) ในส่วนของเศษแก้วรีไซเคิลที่ใช้สำหรับการแทนที่ทรายบางส่วนปริมาณสูงสุด 25% ยังคงรักษาความสามารถในการไหล สมบัติเชิงกลและความทนทานที่ยอมรับได้ ดังนั้นผลกระทบจากการทำงานร่วมกัน (Synergy effect) ระหว่างเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และเศษแก้วรีไซเคิลที่ได้รับการปรับสัดส่วนให้เหมาะสม จึงมีความสำคัญต่อการผลิตมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีความสามารถในการไหล สมบัติเชิงกลและความทนทานที่สมดุลตลอดจนเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

6. สรุปผลการศึกษา

1. ผลกระทบจากการผสมร่วมกันของเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และเศษแก้วส่งผลต่อความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ลดลง จากผลของเวลาในการไหลแผ่และไหลผ่าน

อุปกรณ์ Mini V-funnel ที่นานขึ้นและเส้นผ่าศูนย์กลางการไหลที่ลดลง รวมถึงความต้องสารลดน้ำที่สูงขึ้นเพื่อคงความสามารถในการไหลตามเป้าหมาย

2. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาฟูม ส่งผลต่อสมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง แนวโน้มดีขึ้นเนื่องจากผลของการเติมแทรกและปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์

3. ปริมาณผสมร่วมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ 5% มีความสมดุลที่ดีที่สุดระหว่างความสามารถในการไหล สมบัติเชิงกลและความทนทาน ส่วนผสมกลุ่ม SCM10E5 มีกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดถึง 51.63 MPa และ 5.26 MPa ที่อายุ 91 วันตามลำดับ ในขณะที่การดูดกลืนน้ำลดลงและความต้านทานซัลเฟตเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันปริมาณเส้นใยที่เพิ่มสูงขึ้น (10% และ 15%) ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของมอร์ต้าร์ลดลง

4. ความสามารถในการไหล สมบัติเชิงกลและความทนทานของมอร์ต้าร์ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วไม่เกิน 25% อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่ด้วยปริมาณที่สูงขึ้นถึง 50% ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของมอร์ตาร์ดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5. การศึกษาเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์และเศษแก้วเพื่อเพิ่มความความสามารถในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของวัสดุผสมกับเมทริกซ์ของมอร์ตาร์เป็นประเด็นที่น่าสนใจศึกษาเพิ่มเติม

6. องค์ความรู้จากงานวิจัยนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานจริงโดยการถ่ายทอดเทคโนโลยีผ่านแนวทางการพัฒนามาตรฐานวัสดุ การส่งเสริมการใช้งานในโครงการนำร่องและความร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรมเพื่อการผลิตในระดับเชิงพาณิชย์ เป็นการสนับสนุนการก่อสร้างอย่างยั่งยืน (Sustainable construction) ของประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้รับทุนการศึกษาระดับมหาบัณฑิตจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำในทุกขั้นตอนของการทำวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Khan M, McNally C. A holistic review on the contribution of civil engineers for driving sustainable concrete construction in the built environment. *Developments in the Built Environment*. 2023;16:100273.

[2] Meyer C. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*. 2009;31(8):601-605.

[3] Vieira DR, Calmon JL, Coelho FZ. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*. 2016;124:656-666.

[4] Amaral REC, Brito J, Buckman M, Drake E, Ilatova E, Rice P, et al. Waste management and operational energy for sustainable buildings: A review. *Sustainability*. 2020;12:5337.

[5] Sua-iam G, Makul N. Potential future direction of the sustainable production of precast concrete with recycled concrete aggregate: A critical review. *Engineered Science*. 2024;28:1075.

[6] Sua-iam G, Jamnam S. Influence of calcium carbonate on green self-compacting concrete incorporating porcelain tile waste as coarse aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;19:e02366.

[7] Sua-iam G, Makul N. Recycling prestressed concrete pile waste to produce green self-compacting concrete. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:4587-4600.

[8] Jittamaro P, Maho B, Pongsopha P, Nicomrat D, Jamnam S, Makul N, et al. Enhancing the usability of electronic waste fibers in high-performance self-compacting mortar incorporating corn cob ash and silica fume: Fresh

and hardened properties. *Construction and Building Materials*. 2024;416:135194.

[9] Ahmed KS, Rana LR. Fresh and hardened properties of concrete containing recycled waste glass: A review. *Journal of Building Engineering*. 2023;70:106327.

[10] Amin M, Agwa IS, Mashaan N, Mahmood S, Abd-Elrahman MH. Investigation of the physical mechanical properties and durability of sustainable ultra-high performance concrete with recycled waste glass. *Sustainability*. 2023;15:3085.

[11] Baikerikar A, Mudalgi S, Ram VV. Utilization of waste glass powder and waste glass sand in the production of eco-friendly concrete. *Construction and Building Materials*. 2023;377:131078.

[12] Gebremichael NN, Jadidi K, Karakouzian M. Waste glass recycling: The combined effect of particle size and proportion in concrete manufactured with waste recycled glass. *Construction and Building Materials*. 2023;392:132044.

[13] Hakim SJS, Mhaya AM, Mokhatar SN, Kamarudin AF, Tong YG, Chik TNT. Towards greener concrete: A comprehensive review of waste glass powder as a partial fine aggregate substitute. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024;1347:012072.

[14] Ullah Z, Qureshi MI, Ahmad A, Khan SU, Javaid MF. An experimental study on the mechanical and durability properties assessment of E-waste concrete. *Journal of Building Engineering*. 2021;38:102177.

[15] Sua-iam G, Chatveera B. Effect of printed circuit board dust on the workability and mechanical properties of self-compacting concrete: A preliminary study. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16:e00862.

[16] Makul N, Hussain Q, Nawaz A, Saingam P, Sua-iam G. Effect of para-wood ash and calcium carbonate on the properties of eco-friendly self-compacting mortar reinforced with electronic waste fibers. *Journal of Building Engineering*. 2024;95:110353.

[17] Vishnupriyan M, Annadurai R. A study on the macro-properties of PCB fiber-reinforced concrete from recycled electronic waste and validation of results using RSM and ANN. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2023;24:1667-1680.

[18] Priyan MV, Annadurai R, Alaneme GU, Ravella DP, Pradeepkumar S, Olaiya BC. A study on waste PCB fibres reinforced concrete with and without silica fume made from electronic waste. *Scientific Reports*. 2023;13:22755.

[19] Nécira B, Abadou Y. Properties of self-compacting mortar made with various mineralogical sources different types of sands and fillers. *World Journal of Engineering*. 2021;18(6):861-869.

[20] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก.15-2562 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม; 2562.

[21] American Society for Testing and Materials. *Annual book of ASTM standards. Volume 04.02: Concrete and aggregates*. West Conshohocken (PA): ASTM; 2023.

[22] EFNARC. *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. Surrey (UK): Association House; 2002. Available from: https://efnarc.org/publications [Accessed 8th December 2024].

[23] Tan KH, Du H. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites*. 2012;35(1):109-117.