



สมบัติของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นมวลรวมละเอียด

อนุชิต วิไลวง คักดีชัย แน่นอุดร อำพล วงศ์ษา วันชัย สะตะ* และ ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1592 8191 อีเมล: vancsa@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.06.004

รับเมื่อ 19 ตุลาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 2 ธันวาคม 2563 ตอรับเมื่อ 14 ธันวาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 10 มิถุนายน 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุนำกลับมาใช้ใหม่ แทนทรายธรรมชาติร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยปริมาตร ผลจากการทดสอบพบว่า ความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน และสูงกว่าส่วนผสมควบคุมเล็กน้อย ในขณะที่กำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วัน เกือบเท่ากับส่วนผสมควบคุมโดยต่ำกว่าเพียงร้อยละ 10 นอกจากนี้ มอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์มีอัตราส่วนโพรงและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ร้อยละ 50 มีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 194 และ 202 ตามลำดับ สอดคล้องกับการลดลงของความหนาแน่นที่ร้อยละ 8 และค่าการนำความร้อนที่ร้อยละ 40 บ่งบอกถึงสมบัติการเป็นฉนวนที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมรวมถึงความเร็วคลื่นผ่านตัวอย่างที่ลดลงร้อยละ 16 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุม นอกจากนี้ การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เนื่องจากการกักตัวของกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 ยังมีค่าต่ำลง โดยอัตราการสูญเสียน้ำหนักของส่วนผสมที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ร้อยละ 50 อายุการแช่ 120 วัน ต่ำกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 43 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นมวลรวมในส่วนผสมมอร์ตาร์ทำให้มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมเป็นกรดได้ดีขึ้น

คำสำคัญ: มวลรวมรีไซเคิล ไฟเบอร์ซีเมนต์ กำลังอัด การกักตัวของกรดซัลฟิวริก

การอ้างอิงบทความ: อนุชิต วิไลวง, คักดีชัย แน่นอุดร, อำพล วงศ์ษา, วันชัย สะตะ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, “สมบัติของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นมวลรวมละเอียด,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 32, ฉบับที่ 1, หน้า 97-107, ม.ค.-มี.ค. 2565.



Properties of Mortar Incorporating Fiber Cement Roof Tile Waste Fine Aggregate

Anousit Vilaivong, Sakchai Naenudon, Ampol Wongsa, Vanchai Sata* and Prinya Chindaprasirt
Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1592 8191, E-mail: vancsa@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.06.004
Received 19 October 2020; Revised 2 December 2020; Accepted 14 December 2020; Published online: 10 June 2021
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to investigate the properties of mortar with the use of fiber cement roof tile waste as a recycled aggregate to replace natural fine aggregate by 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% volumetric. The test results showed that the workability of fiber cement mortar gave nearly the same with slightly higher than the control mixture, while 7-day and 28-day compressive strength tended to decrease with an increase in fiber cement content. However, a mixture with 30% fiber cement showed a compressive strength at 90 days almost similar to the control which was 10% lower than that of the control. Furthermore, using fiber cement increased void and water absorption of mortar, a mixture with 50% fiber cement were higher than the control at 194% and 202% respectively. This complies with the decrease of 8% in density and 40% in thermal conductivity showing better insulating capability when compared to the control mixture, as well as congruent with the decrease of ultrasonic pulse velocity which was 16% lower than that of the control. Besides, weight loss of mortar due to 3% sulfuric acid solution decreased with the increase of fiber cement, weight loss of 50% fiber cement content mixture at 120 days of immersion was 43% lower than that of the control indicating that using fiber cement as the recycled aggregate made mortar better resistance to an acidic environment.

Keywords: Recycled Aggregate, Fiber Cement, Compressive Strength, Sulfuric Acid Resistance

Please cite this article as: A. Vilaivong, S. Naenudon, A. Wongsa, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Properties of mortar incorporating fiber cement roof tile waste fine aggregate," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 1, pp. 97–107, Jan.–Mar. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาของมวลมนุษยชาติ ขณะเดียวกันก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะผลกระทบจากการนำทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ในปริมาณมาก ในปี 2019 มีการนำเอาวัสดุธรรมชาติมาใช้เป็นมวลรวมมากกว่า 330 ล้านตัน [1] นอกจากนั้น งานก่อสร้างยังทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก จากงานวิจัยระบุว่าวัสดุเหลือทิ้งมากถึงร้อยละ 10 ถึง 15 ของวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในงานก่อสร้าง การกำจัดวัสดุเหลือทิ้งเหล่านั้น ส่วนมากจะถูกนำไปฝังกลบทำให้เกิดปัญหาหลายอย่างตามมา เช่น เกิดมลพิษทางดิน น้ำ อากาศ ปัญหาของพื้นที่ในการกองเก็บ มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นภาระที่วัสดุให้สูญเปล่าอีกด้วย [2]

การนำเอาวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) ถือเป็นหนึ่งในแนวทางที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ดี โดยสามารถลดทั้งปริมาณวัสดุเหลือทิ้ง และลดปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้ง โดยการนำเศษคอนกรีตมาใช้เป็นมวลรวมสำหรับงานคอนกรีต สามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตได้ โดยไม่ส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตมากนัก [3]

เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ (Fiber Cement Roof Tile Waste) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยซีเมนต์เสริมด้วยเส้นใยเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นความเหนียวกำลังดัดและกำลังดึงให้แก่ซีเมนต์ [4] เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้มาจากขบวนการผลิตติดตั้ง และรื้อถอน ในแต่ละปีมีปริมาณหลายร้อยตันที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุรีไซเคิลได้ [5] ที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเอาเศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์มาใช้เป็นมวลรวมของมอร์ตาร์และคอนกรีต หลายงานวิจัยให้ผลที่สอดคล้องกันคือ อัตราส่วนโพรง และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่น กำลังอัด กำลังดึง และกำลังดัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากคุณภาพของเศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ต่ำกว่า เนื่องจากคุณภาพของเศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ต่ำกว่า เนื่องจากคุณภาพของเศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ต่ำกว่า เนื่องจากคุณภาพของเศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ต่ำกว่า เนื่องจากคุณภาพของเศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ต่ำกว่า

[6]–[9] แต่สมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตเหล่านั้นก็ยังผ่านเกณฑ์สำหรับการนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับน้ำหนักไม่มาก เช่น บล็อกคอนกรีตปูพื้น [9]

ถึงแม้ว่าการใช้เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นมวลรวมจะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ และคอนกรีต แต่สมบัติด้านความทนทานบางอย่างกลับดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เช่น การหดตัวแห้งลดลง ความทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ความทนทานต่อคลอไรด์ ไฮโดรเจนคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต [8] และความทนทานต่ออุณหภูมิที่สูงเพิ่มขึ้น [7] ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษามวลรวมของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์แทนมวลรวมธรรมชาติ เพื่อช่วยให้เข้าใจผลกระทบของวัสดุดังกล่าวต่อสมบัติของมอร์ตาร์ได้ดียิ่งขึ้น และเพื่อศึกษาแนวทางในการนำเอามอร์ตาร์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น ใช้เป็นมอร์ตาร์สำหรับฉาบ

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (OPC) เป็นวัสดุประสาน ใช้น้ำประปาสำหรับผสมซีเมนต์เพสต์ ใช้ทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และร่อนเปียกบนตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อคัดสิ่งเจือปนประเภทฝุ่นออก เป็นมวลรวมละเอียดธรรมชาติ (NA) ส่วนมวลรวมละเอียดเศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ หรือเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ (RA) ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้จากการนำเอาหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์เก่าที่เสียหายจากการรื้อถอน และปรับปรุงอาคารมาทุบให้เล็กลงเอาเข้าเครื่องย่อย หลังจากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อคัดขนาด มวลรวมทั้งสองชนิดจะทำให้อยู่ในสภาพอิมพัลฟ์แห้งก่อนนำไปใช้งาน

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติของทรายธรรมชาติ และเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ รวมทั้งมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงสมบัติที่ด้อยกว่าของมวลรวมไฟเบอร์ซีเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับทรายธรรมชาติ เนื่องจากเศษไฟเบอร์ซีเมนต์มีปริมาณโพรงและการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า แต่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของมวลรวม



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 มวลรวมละเอียดเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ (ก) หลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์เก่า (ข) เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว

ตารางที่ 1 สมบัติของมวลรวมธรรมชาติ (NA) และมวลรวมไฟเบอร์ซีเมนต์ (RA) รวมทั้งมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

สมบัติ \ มวลรวม	NA	RA	มาตรฐาน
ความถ่วงจำเพาะ (SSD)	2.59	2.07	ASTM C128 [11]
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.36	12.24	ASTM C128 [11]
หน่วยน้ำหนัก (กก. ต่อ ลบ.ม.)	1682	1103	ASTM C29 [12]
มอดุลัสความละเอียด	2.74	4.12	ASTM C136 [13]

ไฟเบอร์ซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2 ได้จากการทดสอบ X-ray Fluorescence (XRF) เปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Nuaklong และคณะ [10]

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ออกแบบตามมาตรฐาน ASTM C109 [14] โดยใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110 ± 5 ตามที่มาตรฐานดังกล่าวกำหนดไว้ ทรายถูกแทนด้วยเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยปริมาตร แสดงด้วยสัญลักษณ์ MRT10, MRT20, MRT30,

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ (ร้อยละ)

องค์ประกอบทางเคมี	OPC [10]	RA
Al ₂ O ₃	4.02	1.78
SiO ₂	17.2	3.46
SO ₃	3.9	0.52
K ₂ O	0.64	0.49
CaO	63.1	83.3
TiO ₂	-	1.1
MnO ₂	-	0.2
FeO ₃	3.11	-
Fe ₂ O ₃	-	9.19
CuO	-	0.12
ZnO	-	0.27
SrO	-	0.12
ZrO ₂	-	0.04
MgO	0.94	-

MRT40 และ MRT50 ตามลำดับ โดยส่วนผสม MRT00 เป็นมอร์ตาร์ควบคุม

ผสมมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C305 [15] โดยเติมเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ลงในเครื่องผสมพร้อมกับทรายในขณะผสมหลังจากผสมมอร์ตาร์เสร็จ ทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ แล้วนำเข้าแบบที่ใช้หล่อห่อหุ้มไว้ด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นระเหยออกจาก

อนุชิต วิไลวง และคณะ, “สมบัติของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นมวลรวมละเอียด.”

ตัวอย่าง แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบหล่อออก นำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจันอายุครบตามกำหนด แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ

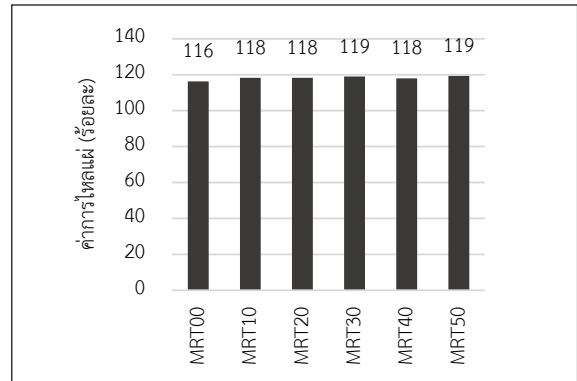
ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย (กก. ต่อ ลบ.ม.)

ส่วนผสม	OPC	น้ำ	NA*	RA*
MRT00	532	266	1463	-
MRT10	532	266	1317	117
MRT20	532	266	1170	234
MRT30	532	266	1024	351
MRT40	532	266	878	468
MRT50	532	266	732	585

*มวลรวมที่ผสมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

2.3 การทดสอบตัวอย่าง

ทดสอบมอร์ตาร์โดยใช้รูปร่าง ขนาด และมาตรฐานในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4 โดยทดสอบความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์สดด้วยวิธีการไหลแม่ ทดสอบกำลังอัดเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 7, 28 และ 90 วัน ทดสอบอัตราส่วนโพรง การดูดซึมน้ำ หน่วยน้ำหนัก ความเร็วคลื่นผ่านตัวอย่าง ตามมาตรฐานที่กำหนด ที่อายุ 28 วัน และทดสอบการนำความร้อน โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 เซนติเมตร ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่แล้ววัดค่าการนำความร้อนด้วยเครื่อง ISOMET 2114 โดยวางหัวทดสอบสัมผัสบนผิวของตัวอย่าง รอประมาณตัวอย่างจะประมาณ 30 นาที จนเครื่องวัดค่าการนำความร้อนเสร็จแล้วบันทึกค่าไว้ ทดสอบความทนทานต่อการกัดกร่อนของ



รูปที่ 2 ค่าการไหลแม่ของมอร์ตาร์

กรดซัลฟิวริก โดยเริ่มแช่มอร์ตาร์ในสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้นร้อยละ 3 เมื่อตัวอย่างมอร์ตาร์มีอายุ 28 วัน แล้วบันทึกน้ำหนักเมื่อแช่ครบ 7, 14, 28, 56, 84 และ 120 วัน ตามลำดับ เพื่อใช้คำนวณหาอัตราการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง

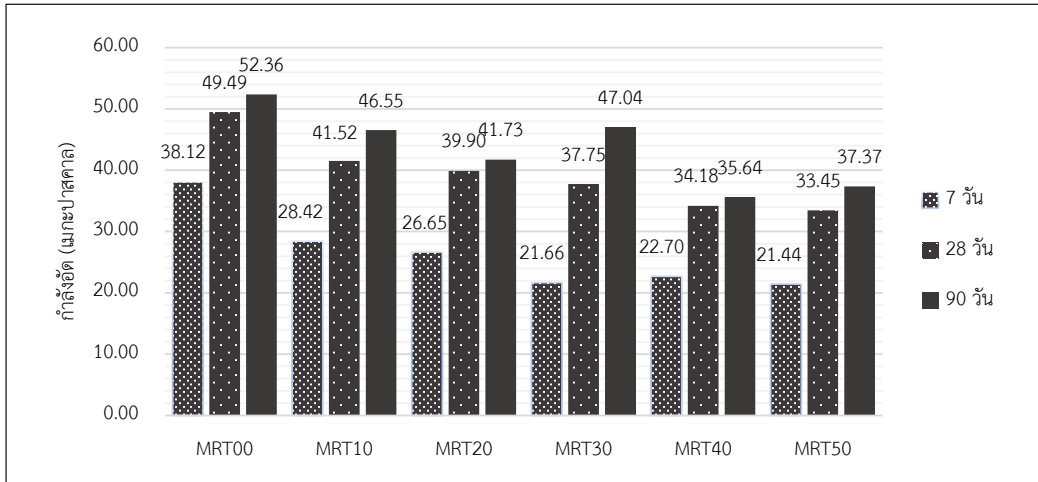
3. ผลการทดลอง

3.1 การไหลแม่

จากการทดสอบพบว่า ค่าการไหลแม่ของมอร์ตาร์ควบคุม และมอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์แทนทรายมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 116 ถึง 119 ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งมอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์มีค่าการไหลแม่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงใกล้เคียงกับค่าการไหลแม่ของมอร์ตาร์สำหรับฉาบตามมาตรฐาน มอก.1776-2542 [20] ที่กำหนดให้ค่าการไหลแม่เบื้องต้นของมอร์ตาร์อยู่ในช่วงร้อยละ

ตารางที่ 4 ลักษณะของตัวอย่าง และมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติมอร์ตาร์

คุณสมบัติ	รูปร่างและลักษณะของตัวอย่าง	มาตรฐานการทดสอบ
การไหลแม่	มอร์ตาร์สด	ASTM C1437 [16]
กำลังอัด	ทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 ซม.	ASTM C109 [14]
ปริมาณโพรง การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น	ทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 ซม.	ASTM C642 [17]
ความเร็วคลื่นผ่านตัวอย่าง	ทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 ซม.	ASTM C597 [18]
การนำความร้อน	ทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 ซม.	-
ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก	ทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 ซม.	ASTM C267 [19]



รูปที่ 3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

110 ± 5 ส่วนสาเหตุที่ทำให้มอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์มีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุมไม่มากนักอาจเป็นเพราะในเวลาผสมน้ำที่ถูกดูดซึมไว้ในโพรงของเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เตรียมให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งก่อนการผสมถูกปล่อยออกมาบางส่วนขณะผสม ทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim และคณะ [21] ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กแทนทรายในมอร์ตาร์ ทำให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ดังกล่าวสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 8

นอกจากนั้น ค่ามอดูลัสความละเอียดที่สูงกว่าของเศษไฟเบอร์ซีเมนต์อันแสดงถึงความหยาบที่มากขึ้น ยังทำให้ความต้องการน้ำของมวลรวมลดลง เมื่อใช้ปริมาณน้ำเท่ากันทุกส่วนผสม ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์จึงเพิ่มขึ้นมากกว่าส่วนผสมควบคุมเล็กน้อย

3.2 กำลังอัด

รูปที่ 3 แสดงผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยกำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่ยังคงสูงกว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์สำหรับฉาบผนังก่อ และฉาบผิวคอนกรีตตามที่มีมาตรฐาน มอก.1776-2542 [20] ได้กำหนดไว้ที่ 2.5 และ 5.0 เมกпасคาล ตามลำดับ โดยในงานวิจัยครั้งนี้ กำลังอัดที่อายุ 7 และ 90 วัน ของมอร์ตาร์มีแนวโน้มแตกต่างจากกำลังอัดที่

28 วัน โดยกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ของส่วนผสม MRT10 มีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสม MRT20 ในขณะที่ส่วนผสม MRT30 ถึง MRT50 มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากเป็นกำลังอัดในช่วงอายุต้น ทำให้การใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันส่งผลต่อกำลังอัดไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนกำลังอัดที่อายุ 90 วัน ของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม แต่ส่วนผสม MRT30 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมมากที่สุด โดยต่ำกว่าเพียงร้อยละ 10 บ่งบอกให้เห็นว่าการใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 90 วัน ซึ่งเป็นกำลังอัดที่พัฒนาได้สมบูรณ์มากที่สุด สาเหตุอาจเป็นเพราะสมบัติการเป็นวัสดุบ่มภายในของเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีปริมาณโพรงมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dang และคณะ [22] ที่ใช้เศษอิฐมอญแทนทรายธรรมชาติในมอร์ตาร์ร้อยละ 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนัก ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน ลดลงตามปริมาณการใช้เศษอิฐมอญที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ที่ใช้เศษอิฐมอญร้อยละ 50 มีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมควบคุม ส่วนสาเหตุที่ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ลดลง อาจเกิดจากอนุภาคไฟเบอร์ซีเมนต์ปะปนด้วยฝุ่นขนาดเล็ก และในขณะที่ผสมน้ำในโพรงของไฟเบอร์ซีเมนต์ถูกปล่อยออกมาบางส่วนทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีค่าสูงขึ้น จึง

อนุชิต วิไลวง และคณะ, “สมบัติของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นมวลรวมละเอียด.”

ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงโดยตรง

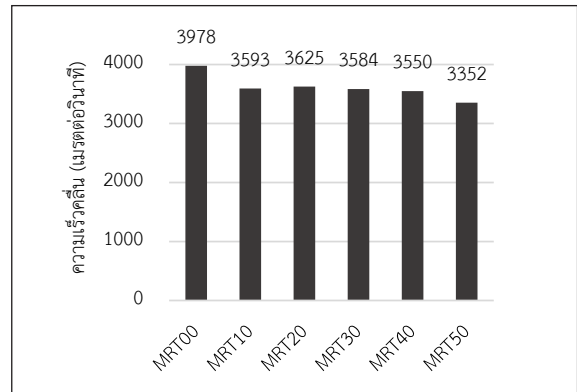
3.3 อัตราส่วนโพรง การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น

ตารางที่ 5 แสดงอัตราส่วนโพรง การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของมอร์ตาร์ จากการทดสอบพบว่า อัตราส่วนโพรง และการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนทรายด้วยเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม MRT50 มีอัตราส่วนโพรง และการดูดซึมน้ำสูงที่สุด สูงกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 194 และ 202 ตามลำดับ สาเหตุเป็นเพราะปริมาณโพรง และการดูดซึมน้ำที่สูงของเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ รวมทั้งมีโพรงเกิดขึ้นในเนื้อมอร์ตาร์ในขณะที่ผสม เนื่องจากน้ำที่ถูกปล่อยจากไฟเบอร์ซีเมนต์ในเวลาผสมไม่ถูกใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งหมด ส่วนที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้เกิดโพรงขนาดเล็ก อันส่งผลให้อัตราส่วนโพรง และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น [10], [23]

ตารางที่ 5 อัตราส่วนโพรง การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของมอร์ตาร์

ส่วนผสม	อัตราส่วนโพรง (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (กก. ต่อ ลบ.ม.)
MRT00	11.46	5.62	2156
MRT10	12.75	6.26	2129
MRT20	15.38	7.62	2095
MRT30	17.60	8.84	2050
MRT40	19.79	10.22	2018
MRT50	22.23	11.36	1974

ความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโพรงโดยตรง จากการทดสอบพบว่า ความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีแนวโน้มการลดลงในลักษณะเดียวกันกับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโพรง และการดูดซึมน้ำ โดยส่วนผสม MRT50 มีความหนาแน่นต่ำที่สุดคือ 1974 กก. ต่อ ลบ.ม. ต่ำกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 8 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nasr และคณะ [24] ที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลชนิดต่างๆ ได้แก่ เศษหินอ่อน เศษหินแกรนิต และเศษเซรามิก แทนทรายในมอร์ตาร์ การใช้มวลรวมรีไซเคิลดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ต่ำกว่า

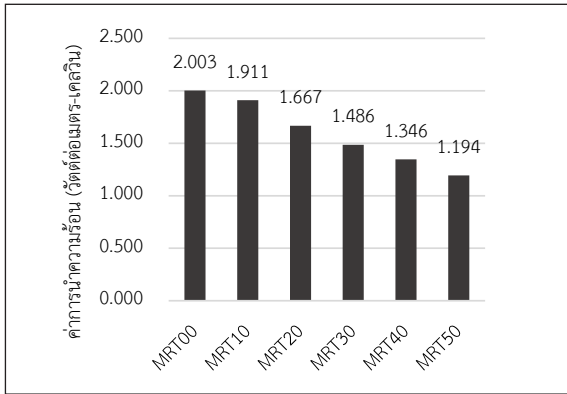


รูปที่ 4 ความเร็วจลื่นผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์

มอร์ตาร์ควบคุมระหว่างร้อยละ 3.8 ถึง 17.1 ส่วนสาเหตุที่ทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ เกิดจากความหนาแน่นของเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ต่ำกว่าทรายธรรมชาติ และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโพรงในมอร์ตาร์เมื่อใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นมวลรวม จึงทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลง

3.4 ความเร็วจลื่นผ่านตัวอย่าง

ความเร็วจลื่นผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์แสดงในรูปที่ 4 จากการศึกษาพบว่า การแทนทรายธรรมชาติด้วยเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ ทำให้ความเร็วจลื่นผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์ลดลง สอดคล้องกับการลดลงของกำลังอัด และความหนาแน่นของมอร์ตาร์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับความเร็วจลื่นผ่านตัวอย่างโดยตรง โดยส่วนผสม MRT10 ถึง MRT40 มีค่าความเร็วจลื่นใกล้เคียงกัน บ่งบอกให้เห็นว่าการใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ในช่วงดังกล่าวไม่ส่งผลให้คุณภาพมอร์ตาร์แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ส่วนผสม MRT50 ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์แทนทรายในปริมาณมากที่สุด มีค่าความเร็วจลื่นลดลงมากที่สุด โดยลดลงร้อยละ 16 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมเมื่ออิงตามมาตรฐาน IS 13311 [25] ที่แบ่งชั้นคุณภาพของคอนกรีตด้วยค่าความเร็วจลื่นผ่านตัวอย่างพบว่า การใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์แทนทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 40 ทำให้มอร์ตาร์ยังคงจัดอยู่ในเกณฑ์คุณภาพดี ในขณะที่การแทนที่ร้อยละ 50 ทำให้มอร์ตาร์มีคุณภาพปานกลาง สาเหตุที่ทำให้



รูปที่ 5 การนำความร้อนของมอร์ตาร์

ความเร็วคลื่นผ่านมอร์ตาร์ลดลง เกิดจากอัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้น และเกิดมีความไม่ต่อเนื่องในเนื้อมอร์ตาร์เมื่อใช้เศษไฟเบอร์เบอร์ซีเมนต์แทนทรายธรรมชาติ

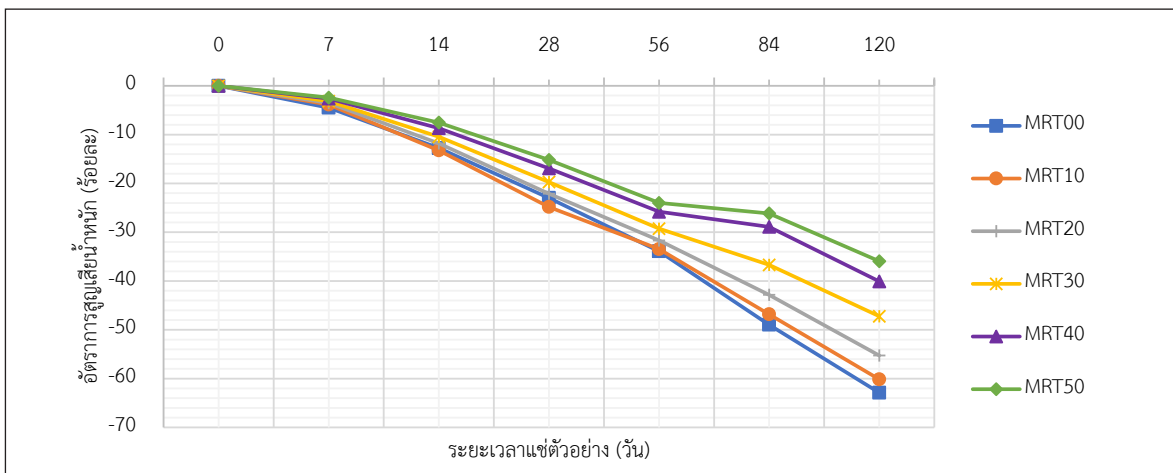
3.5 การนำความร้อน

รูปที่ 5 แสดงค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ จากผลการทดสอบพบว่า การนำความร้อนของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณการใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม MRT50 ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์มากที่สุด มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดคือ 1.194 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ต่ำกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 40.41 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Miličević

และคณะ [7] ที่พบว่า การใช้เศษอิฐมอญ และเศษกระเบื้องแทนมวลรวมธรรมชาติ ทำให้การนำความร้อนของคอนกรีตลดลง ในขณะที่ความทนทานต่ออุณหภูมิสูงกลับเพิ่มขึ้นอย่างเป็นนัยสำคัญ ส่วนสาเหตุที่ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลงเป็นเพราะเศษไฟเบอร์ซีเมนต์มีปริมาณโพรงมากกว่ามวลรวมธรรมชาติ รวมทั้งอัตราส่วนโพรงที่เพิ่มขึ้นในมอร์ตาร์ทำให้การนำความร้อนภายในอนุภาคของมอร์ตาร์ลดลง การลดลงของค่าการนำความร้อน บ่งชี้ให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่เศษใช้ไฟเบอร์ซีเมนต์มีการนำความร้อนต่ำกว่า และเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่ามอร์ตาร์ควบคุม

3.6 ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก

ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกของมอร์ตาร์แสดงด้วยผลการทดสอบอัตราการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยมอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นมวลรวมมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ทรายธรรมชาติ รวมทั้งมีสภาพทางกายภาพที่ดีกว่า ดังแสดงในรูปที่ 7 บ่งบอกถึงความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกที่ดีกว่า โดยส่วนผสม MRT50 มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดในทุกช่วงอายุ โดยสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 120 วันเพียงร้อยละ 36 ในขณะที่ส่วนผสมควบคุมสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 63 เมื่อเปรียบเทียบกับกันแล้ว ส่วนผสม MRT50 สูญเสีย



รูปที่ 6 อัตราการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก



รูปที่ 7 สภาพตัวอย่างมอร์ตาร์หลังแช่กรดซัลฟิวริก 120 วัน

น้ำหนักน้อยกว่าส่วนผสมควบคุมร้อยละ 43 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zafar และคณะ [26] ที่ใช้เศษผงหินแกรนิตแทนทรายร้อยละ 5 ถึง 20 ทำให้คอนกรีตมวลเบาทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 ได้ดีขึ้น และงานวิจัยของ Thomas และคณะ [27] ที่ใช้เศษยางเก่า (Crumb Rubber) แทนทรายร้อยละ 2.5 ถึง 20 ทำให้คอนกรีตทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 ดีขึ้น ส่วนสาเหตุที่ทำให้ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ดีขึ้น อาจเป็นเพราะการยึดเหนี่ยวของอนุภาคที่เล็กของไฟเบอร์ซีเมนต์กับซีเมนต์เพสต์ ทำให้โครงสร้างเพสต์แน่นขึ้น โดยเพสต์ดังกล่าวสามารถยึดเหนี่ยวกับเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ได้ดีกว่ายึดเหนี่ยวกับอนุภาคทรายขนาดใหญ่ที่มีผิวเรียบ และสามารถหลุดร่อนได้ง่ายเมื่อเกิดการกัดกร่อน รวมทั้งการใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ทำให้ปริมาณทรายที่หลุดร่อนได้ง่ายลดลง จึงทำให้มอร์ตาร์สามารถต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกได้ดีขึ้น

ส่วนประชุม [28] ได้กล่าวในงานวิจัยของเขาที่ใช้เศษหินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียดในมอร์ตาร์ไว้ว่า โดยทั่วไปการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยากับเพสต์ แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับมวลรวมละเอียด แต่งานวิจัยครั้งนี้สมบัติทางเคมีของเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์ อาจส่งผลต่อปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟิวริกกับเพสต์ โดยมีส่วนทำให้เกิดชั้นยับยั้งหุ้มห่อผิวของมอร์ตาร์ไว้ โดยชั้นดังกล่าวจะทำหน้าที่ป้องกันการทำลายโครงสร้างของมอร์ตาร์เนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริก แต่ก็อาจถูกชะล้างได้ง่าย ดังที่ได้กล่าวไว้ในวิทยานิพนธ์ของ Joorabchian [29] ถึงอย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของผลกระทบของ

สมบัติทางเคมีของเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ โดยเฉพาะผลกระทบของอนุภาคไฟเบอร์ซีเมนต์บางส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาเนื่องจากสารเคมีชนิดอื่นๆ จะทำให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

4. สรุป

จากการศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์สามารถสรุปได้ว่า

- 1) ความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน และสูงกว่าส่วนผสมที่ไม่มีเศษไฟเบอร์ซีเมนต์เล็กน้อย
- 2) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่กำลังอัดของส่วนผสม MRT30 ที่อายุ 90 วัน มีค่าต่ำกว่าส่วนผสมควบคุมเพียงร้อยละ 10
- 3) อัตราส่วนโพรงและการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับแนวโน้มการลดลงของความหนาแน่น เป็นผลสอดคล้องกับความถ่วงจำเพาะของเศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ต่ำกว่าทรายธรรมชาติ และบ่งบอกถึงปริมาณโพรงในเนื้อมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น
- 4) ความเร็วคลื่นผ่านมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับการลดลงของกำลังอัด และความหนาแน่น แต่การใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์แทนทรายในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 40 คุณภาพของมอร์ตาร์ยังคงจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี
- 5) การนำความร้อนของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณการใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุมีสมบัติการเป็นฉนวนดีขึ้น
- 6) การใช้เศษไฟเบอร์ซีเมนต์แทนทราย ทำให้มอร์ตาร์



ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกที่ขึ้น

7) จากผลการทดสอบในงานวิจัยในครั้งนี้พบว่า มอร์ตาร์ที่ได้จากการนำเศษไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นมวลรวมบางส่วนมีคุณสมบัติบางส่วนเพียงพอที่จะประยุกต์ใช้งานได้ เช่น ใช้งานเป็นมอร์ตาร์สำหรับฉาบ แต่ทั้งนี้ควรมีการศึกษารายละเอียดที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมเมื่อนำไปผลิตใช้จริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Garside. (2019, February). *Global industrial sand and gravel production 2008–2019*. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/728756/industrial-sand-and-gravel-production-worldwide/>
- [2] Wikipedia. (2020, November). *Construction waste*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_waste
- [3] K. Nitichote and W. Yodsudjai, “Development of sustainable concrete by using of recycled aggregate in concrete,” *Thailand Concrete Association Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 29–35, 2017 (in Thai).
- [4] K. Schabowicz, D. Jozwiak-Niedzwiedzka, Z. Ranachowski, S. Kudela, and T. Dvorak, “Microstructural characterization of cellulose fibres in reinforced cement boards,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 1068–1078, 2018.
- [5] A. Muller, T. Schnellert, and M. Seidemann, “Material utilization of fibre cement waste,” *ZKG International*, vol. 64, no. 3, pp. 60–72, 2011.
- [6] T. M. Maya and N. Philip, “Mechanical properties of concrete containing roof tile aggregate subjected to elevated temperature,” *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, vol. 1, no. 8, pp. 255–261, 2014.
- [7] I. Miličević, N. Štirmer, and I. B. Pečur, “Residual mechanical properties of concrete made with crushed clay bricks and roof tiles aggregate after exposure to high temperatures,” *Materials*, vol. 9, no. 4, pp. 295, 2016.
- [8] A. B. Ceesay and S. Miyazawa, “Strength development and durability of concrete containing recycled roof tile aggregate,” *Recycling*, vol. 4, no. 3, pp. 29, 2019.
- [9] I. Miličević, D. Bjegović, and R. Siddique, “Experimental research of concrete floor blocks with crushed bricks and tiles aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 94, pp. 775–783, 2015.
- [10] P. Nuaklong, A. Wongsu, V. Sata, K. Boonserm, J. Sanjayan, and P. Chindaprasit, “Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymers mortar containing recycled aggregate,” *Heliyon*, vol. 5, no. 9, 2019.
- [11] *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C128, 2015.
- [12] *Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate1*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C29/C29M, 2009.
- [13] *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, Annual Book of

- ASTM Standard ASTM C136/C136M, 2014.
- [14] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens)*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C109/C109M, 2013.
- [15] *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C305, 2014.
- [16] *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C1437, 2013.
- [17] *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C642, 2013.
- [18] *Standard Specification for Pulse Velocity Through Concrete*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C597, 2009.
- [19] *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*, Annual Book of ASTM Standard ASTM C267, 2012.
- [20] *Dry Mortar for Plastering*, Thai Industrial Standards TIS.1776-2542, 1999 (in Thai).
- [21] J. H. Kim, A. Qudoos, S. H. Jakhriani, A.-ur-Rehman, J. B. Lee, S. S. Kim, and J.-S. Ryou, "Mechanical properties and sulfate resistance of high volume fly ash cement mortars with air-cooled slag as fine aggregate and polypropylene fibers," *Materials*, vol. 12, no. 3, pp. 469, 2019.
- [22] J. Dang, J. Zhao, W. Hu, Z. Du, and D. Gao, "Properties of mortar with waste clay bricks as fine aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 166, pp. 898–907, 2018.
- [23] L. Berredjem, N. Arabi, and L. Molez, "Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 246, 2020.
- [24] M. S. Nasr, A. A. Shubbar, Z. A. A. R. Abed, and M. S. Ibrahim, "Properties of eco-friendly cement mortar contained recycled materials from different sources," *Journal of Building Engineering*, vol. 31, 2020.
- [25] *Non-Destructive Testing of Concrete - Methods of Test*, Bureau of Indian Standards IS 13311 (Part 1) : 1992, 2004.
- [26] M. S. Zafar, U. Javed, R. A. Khushnood, A. Nawaz, and T. Zafar, "Sustainable incorporation of waste granite dust as partial replacement of sand in autoclave aerated concrete," *Construction and Building Material*, vol. 250, 2020.
- [27] B. S. Thomas, R. C. Gupta, and V. J. Panicker, "Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: Durability-related performance," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 504–513, 2016.
- [28] P. Khamput, "A study of deterioration on mortars used quarry dust as fine aggregate due to sulfuric acid," *Srinakharinwirot Engineering Journal*, vol. 1, no. 1, 2006 (in Thai).
- [29] S. M. Joorabchian, "Durability of concrete exposed to sulfuric acid attack," M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architectural Science, Ryerson University, 2010.