วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

บทความวิจัย

สมบัติทางวิศวกรรมของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์

ธิติวัชร์ ศิริวัฒนศานนท์[1] บุรฉัตร ฉัตรวีระ[1*] กฤษดา เสือเอี่ยม[2] และ นิรัตน์ แย้มโอษฐ์[3]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[3] ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

วันที่รับบทความ: 13 กุมภาพันธ์ 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 7 เมษายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 21 เมษายน 2566
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์โดยนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม (Admixture) ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ทำศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาดคละ และลักษณะอนุภาคและพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลวและแข็งตัว ได้แก่ การไหลแผ่ เวลาก่อตัว กำลังอัด กำลังดัด สมบัติทางความร้อนและการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในมอร์ตาร์ ผลการศึกษาพบว่า เส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12-15 μm มีความยาวตั้งแต่ 30 - 200 μm มอร์ตาร์มีแนวโน้มการไหลแผ่และเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังอัด กำลังดัดและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 20 พบว่า มีกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุด เท่ากับ 36.35 MPa และ 15.66 MPa ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ

คำสำคัญ: มอร์ตาร์; เส้นใยแปรใช้ใหม่; ขยะแผงวงจรพิมพ์; สมบัติทางวิศวกรรม; การนำความร้อน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

บทความวิจัย

Engineering Properties of Mortars Incorporating Recycled Fibers from Waste Printed Circuit Boards

Dhitivajra Siriwattanasanon[1], Burachat Chatveera[1*], Gritsada Sua-iam[2] and Nirat Yamoat[3]

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

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

[3] Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[*] Corresponding author, E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

Received: 13 February 2023; Revised: 7 April 2023; Accepted: 21 April 2023
Online Published: 29 June 2023

Abstract: The purpose of this research was to investigate the engineering properties of mortar incorporating recycled fibers from waste-printed circuit boards used as admixtures at varying ratios. The study examined the chemical composition and physical characteristics of the fibers, including particle size gradation, shape, and surface properties, using scanning electron microscopy. Additionally, the study evaluated the fresh and hardened properties of the mortar, such as initial flow, setting time, compressive strength, flexural strength, thermal properties, and heavy metal concentration. The results showed that the majority of recycled fibers from waste electronic circuit boards were cylindrical rods with a diameter of approximately 12-15 μm and lengths ranging from 30 to 200 μm. As the number of recycled fibers from waste printed circuit boards increased in the mortar, the initial flow and setting time increased, while the compressive strength, flexural strength, and thermal conductivity coefficient decreased. Mortars containing 20% recycled fibers from waste electronic circuit boards exhibited the highest compressive strength and flexural strength of 36.35 MPa and 15.66 MPa, respectively, after 28 days. Furthermore, the concentration of heavy metals in the mortar was within the standard specified by the National Environmental Board's notification.

Keywords: Mortars; Recycled fiber; Waste printed circuit board; Engineering properties; Thermal conductivity

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

1. บทนำ

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ หรือ Electronic Waste (E-Waste) หมายถึงเครื่องใช้ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลายที่ชำรุดหรือไม่ได้ใช้งานแล้ว ซึ่งขยะเหล่านี้จะย่อยสลายเองไม่ได้ เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมหากจัดการอย่างไม่เหมาะสม เช่น การนำไปเผาหรือฝังกลบจะก่อให้เกิดสารพิษจากโลหะหนักและสารหน่วงไฟประเภทโบรมีนปนเปื้อนไปกับอากาศและน้ำปัจจุบันปริมาณ E-Waste ทั่วโลกได้พุ่งทะยานสูงขึ้นถึง 20 - 50 ล้านตันต่อปี ใกล้เคียงกับปริมาณขยะพลาสติกทั่วโลก แต่ E-Waste จะมีอันตรายกว่าขยะพลาสติกเป็นอย่างมาก ในขณะที่ประเทศไทยมี E-Waste มากกว่า 380,000 ตัน/ปี แต่ขยะเหล่านี้กลับถูกส่งเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลอย่างถูกวิธีเพียงร้อยละ 7.1 [1] โดยส่วนที่เหลือจะถูกนำไปกองรวมกับขยะมูลฝอยประเภทอื่นๆ เพื่อรอการฝังกลบ ทั้งนี้พบว่ายังมีทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำ E-Waste กลับมาแปรใช้ใหม่ได้ อาทิเช่น การนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น

การนำ E-Waste กลับมาแปรใช้ใหม่ในงานวัสดุก่อสร้างนั้น ส่วนหนึ่งสามารถนำซากแผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) ซึ่งเป็นแผ่นบอร์ดสำหรับติดตั้งวงจรพิมพ์ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ไอซี แอลอีดี ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน รวมถึงหัวแจ็ค และเทอร์มินอลพินต่างๆ ที่ถอดออกหมดแล้วมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมร่วมในการผลิตคอนกรีต [2, 3] รวมถึงคอนกรีตชนิดพิเศษ อาทิเช่น คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ [4] คอนกรีตพรุน [5] และ คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete) [6] เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสามารถนำ E-Waste มาประยุกต์ใช้โดยที่สมบัติด้านกำลังยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ทั้งนี้ ซากแผงวงจรพิมพ์เมื่อทำการบดย่อยจะมีลักษณะเป็นเส้นใย โดยวัสดุดังกล่าวยังมีสมบัติเป็นฉนวนกันเสียงและความร้อนได้อีกด้วย โดยมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ (0.046 W/m.K ที่อุณหภูมิ 25°C) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุฉนวนบางประเภท เช่น แผ่นเวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) แผ่นเพอร์ไลท์ (Perlite) และฉนวนใยหิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังต่ำกว่าวัสดุแปรใช้ใหม่บางชนิด เช่น โพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane Foam) และเศษยางรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า 0.12 W/m.K ถือว่ามีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนในระดับค่อนข้างดี เนื่องมาจากโครงสร้างภายในของซากแผงวงจรพิมพ์ที่มีความพรุนสูงส่งผลทำให้มีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำ [7] ดังนั้น หากนำเส้นใยแปรใช้ใหม่จากซากแผงวงจรพิมพ์มาเป็นวัสดุผสมในวัสดุก่อสร้างจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนและไฟฟ้าได้ดีขึ้นอีกด้วย

มอร์ตาร์เป็นวัสดุผสมของปูนซีเมนต์ มวลรวม ละเอียดและ ซึ่งแนวคิดของการศึกษาเพื่อนำเอาเส้นใยจากขยะแผงวงจรพิมพ์มาแปรใช้ใหม่ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการนำมาใช้ผสมเพิ่มในการผลิตมอร์ตาร์ปรับระดับ (Self Levelling Mortar) ซึ่งจะมีความข้นเหลวที่มีสมรรถนะสูงในการไหล สามารถใช้ในงานปรับระดับได้เป็นอย่างดี โดยไม่เกิดการแยกตัวและทนทานต่อการเกิดการแตกร้าวจากการหดตัวพลาสติกได้ดีกว่าวัสดุปรับระดับทั่วไป สามารถนำไปใช้งานได้อย่างสะดวก เหมาะสำหรับการปรับระดับพื้นทั่วไป หรือใช้ในการปรับปรุงความระดับและความเรียบของพื้นผิวเดิม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

ที่ใช้งานอยู่ โดยอาจใช้งานในลักษณะการเทรองพื้นหรือทับหน้าก็ได้ [8] โดย Mahdi [9] ได้ศึกษาผลกระทบของการผสมเส้นใยในมอร์ตาร์ ทำการทดสอบกำลังดัด พบว่ามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเส้นใยช่วยปรับปรุงค่าโมดูลัสของการแตกหักได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยร้อยละ 1 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ มีค่ากำลังดัดอยู่ระหว่าง 3.10 - 4.45 MPa เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่มีค่ากำลังดัดเท่ากับ 2.25 MPa ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณเส้นใยในส่วนผสมมอร์ตาร์มากขึ้นจะส่งผลต่อกำลังอัดและค่าโมดูลัสของการแตกหักลดลง

Ferrari et al. [10] ได้ศึกษาผลกระทบของการนำขยะจากซากแผงวงจรพิมพ์มาทำการทดแทนทรายในส่วนผสมมอร์ตาร์อัตราส่วนร้อยละ 5-10 (โดยปริมาตร) ทำการทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ ปริมาณช่องว่าง ความหนาแน่น การวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยกล้องอิเลคตรอนแบบส่องกราด และการชะละลายของโลหะหนัก พบว่า การใช้ขยะจากซากแผงวงจรพิมพ์ในส่วนผสมมอร์ตาร์ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของมอร์ตาร์เพียงเล็กน้อย สามารถนำมาใช้งานร่วมการารผลิตมอร์ตาร์ได้แต่จำเป็นต้องควบคุมการใช้งาน เนื่องจากอาจมีผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นในระยะยาว [10] ในด้านการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากการใช้ ขยะจากซากแผงวงจรพิมพ์ไม่พบว่ามีไอออนของโลหะหนักชะละลายออกมาหรือพบในปริมาณที่น้อยมาก [11]

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเส้นใยจากขยะแผงวงจรพิมพ์มาแปรใช้ใหม่ โดยการนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในส่วนผสมของมอร์ตาร์ ทำการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อศึกษาความเป็นไปได้และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาวิจัยระดับสูงต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. เลขที่ 15 หรือ ASTM C150 [12] มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายแม่น้ำที่มีขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C778 [13] สารเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำพิเศษ (High Range Water Reducing Admixtures) ตามมาตรฐาน ASTM C494 Type F [14] ซึ่งมีสารประกอบหลักประเภท Modified Polycarboxylate

เส้นใยจากขยะแผงวงจรพิมพ์นำมาแปรใช้ใหม่ได้มาจากกระบวนการแปรใช้ใหม่ซากแผงวงจรพิมพ์จากผู้ประกอบการในจังหวัดนครปฐม ภายหลังจากการคัดแยกส่วนที่เป็นโลหะโดยวิธีการทางกายภาพซากแผงวงจรพิมพ์ ดังรูปที่ 1 จะถูกนำไปบดย่อยและแยกโลหะทองแดงออกจนเหลือเป็นซากแผงวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็กลงและมีลักษณะเป็นเส้นใย ดังรูปที่ 2 น้ำที่ใช้ในการผสมและบ่มมอร์ตาร์เป็นน้ำประปาที่สะอาด มีค่า pH ในช่วง 6-7

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

รูปที่ 1 ซากแผงวงจรพิมพ์

รูปที่ 2 เส้นใยแปรใช้ใหม่จากการบดย่อย

2.2 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์

2.2.1 อัตราส่วนผสม

ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดอัตราส่วนของมอร์ตาร์ โดยใช้สัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์และทรายเท่ากับ 1:2.75 คงที่ทุกส่วนผสม ตามคำแนะนำโดยมาตรฐาน ASTM C109 [15] จากนั้นนำเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรพิมพ์มาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในปริมาณร้อยละ 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ซึ่งพัฒนาต่อยอดจากแนวคิดของ Wang et al. [16] ซึ่งได้นำผงฝุ่นซึ่งมีส่วนผสมของเส้นแปรใช้ใหม่มาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในปริมาณสูงสุดร้อยละ 25 ดังนั้น แนวคิดในการศึกษาครั้งนี้เพื่อให้เห็นแนวโน้มถึงการนำเส้นใยแปรใช้ใหม่มาทำการผสมเพิ่มจนถึงปริมาณสูงสุดร้อยละ 100 (ทั้งนี้จากการทดสอบเบื้องต้นสัดส่วนผสมเพิ่มมากกว่า 100% มอร์ตาร์ไม่สามารถขึ้นรูป) ในขณะเดียวกันทำการเพิ่มความสามารถในการไหลด้วยการผสมสารเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำพิเศษ อัตราส่วนร้อยละ 3 สรุปอัตราส่วนผสมได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

MIX ID	Cement (g)	Sand (g)	Fiber (g)
M0	500	1,375	0
M20	500	1,375	100
M40	500	1,375	200
M60	500	1,375	300
M80	500	1,375	400
M100	500	1,375	500

2.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ผสมปูนซีเมนต์ ทราย น้ำและสารเคมีผสมเพิ่มเข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ จนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันเป็นอย่างดีแล้ว ทำการสอบสมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลว จากนั้นทำการเทส่วนผสมมอร์ตาร์ลงแบบหล่อที่กำหนดในแต่ละการทดสอบ กระทุ้งแน่นและทำการปาดหน้าให้เรียบ พร้อมทั้งหุ้มด้วยพลาสติกพอลิเอทิลีนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อ แล้วนำตัวอย่างมอร์ตาร์เฉพาะการทดสอบกำลังอัดไปบ่มน้ำและบ่มอากาศ รอจนครบ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

ระยะเวลาการบ่มที่กำหนด 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน จึงนำตัวอย่างขึ้นมาเตรียมทำการทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะแข็งตัวและสมบัติเฉพาะของมอร์ตาร์ เพื่อหาค่าเฉลี่ยจากจำนวน 3 ก้อน สรุปจำนวนตัวอย่างมอร์ตาร์ในแต่ละการทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำนวนตัวอย่างมอร์ตาร์ในแต่ละการทดสอบ

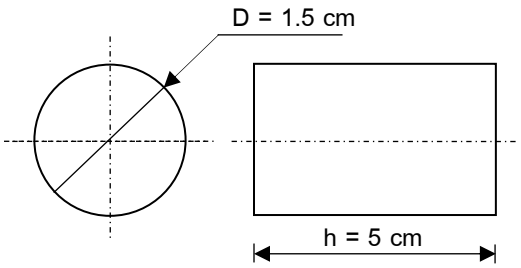
การทดสอบ	ขนาด (mm)	จำนวน
กำลังอัด		
- บ่มน้ำ	50 x 50 x 50	90
- บ่มอากาศ	50 x 50 x 50	90
กำลังดัด	40 x 40 x 160	18
สมบัติทางความร้อน	300 x 300 x 36	3

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลว

การทดสอบการไหลเริ่มต้น (Initial Flow) เป็นการทดสอบระยะการไหลแผ่ของมอร์ตาร์โดยใช้อุปกรณ์ Flow Ring ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3 cm และความสูง 5 cm ดังรูปที่ 3 โดยการนำตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ที่ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วมาเติมลงใน Flow Ring จนเต็ม จากนั้นทำการยก Flow Ring ขึ้นในแนวดิ่งเพื่อปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลแผ่ออกอย่างอิสระในเวลา 240 $\pm$10 วินาที จากนั้นทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์ โดยขั้นตอนการทดลองเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1708 [17] และ มอก. 3057-2563 [8] ที่กำหนดให้ค่าการไหลเริ่มต้นอยู่ในช่วง 125 – 150 mm

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) โดยใช้อุปกรณ์เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm วางแตะที่ผิวด้านบนของมอร์ตาร์ที่บรรจุอยู่ในกรวยตัด จากนั้นบันทึกระยะเวลากับระยะที่เข็มจมลงอย่างอิสระลงในมอร์ตาร์ โดยระยะเวลาที่เข็มจมลงในมอร์ตาร์ที่ระยะ 25 mm เรียกว่าการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ในขณะที่ระยะเวลาที่เข็มไม่สามารถจมลงในมอร์ตาร์ เรียกว่าการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)



รูปที่ 3 Flow Ring

2.3.2 สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะแข็งตัว

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109 [15] โดยใช้แบบหล่อ 50 x 50 x 50 mm ที่ทำการบ่มทั้งในน้ำและในอากาศที่อายุ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อครบอายุการทดสอบนำตัวอย่างมอร์ตาร์มาทำการกดด้วยน้ำหนักจนวิบัติ ดังรูปที่ 4 จากนั้นทำการคำนวณหากำลังอัดจากค่าเฉลี่ยการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

การทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C348 [18] โดยใช้แบบปริซึมขนาด 40 x 40 x 160 มม. กำหนดตำแหน่งน้ำหนักทดสอบแบบ Center-Point Loading ทำการปล่อยน้ำหนักกระทำจนกระทั่งจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 5

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

รูปที่ 4 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

รูปที่ 5 การทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์

2.3.3 สมบัติเฉพาะของมอร์ตาร์

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K-value) และการทดสอบความต้านทานความร้อน (R-value) โดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 300 x 300 x 36 mm ทดสอบด้วยเครื่องมือวัดการไหลมวลความร้อน (Heat flow meter) NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda

ทดสอบหาปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในมอร์ตาร์ โดยทำการเลือกบดละเอียดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีสมบัติด้านกำลังที่ดีที่สุด เพื่อนำไปย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) ของ PerkinElmer รุ่น Titan MPS จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP - OES) และ Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP - MS)

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 สมบัติของวัสดุ

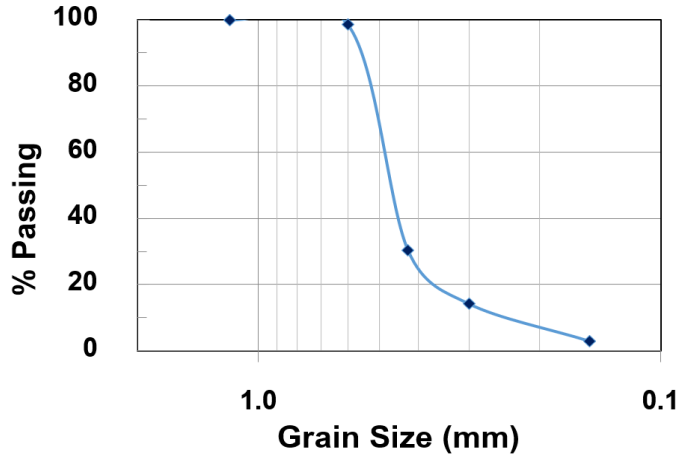
องค์ประกอบทางเคมี (Chemical compositions) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นออกไซด์หลัก ปริมาณร้อยละ 65.56 ส่วนเส้นใยแปรใช้ใหม่จากซากแผงวงจรพิมพ์ มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นออกไซด์หลัก ปริมาณร้อยละ 24.08

สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) เส้นใยแปรใช้ใหม่จากซากแผงวงจรพิมพ์ มีความถ่วงจำเพาะ 0.69 ความหนาแน่น 0.36 kg/l ปริมาณความชื้นร้อยละ 1.07 ส่วนขนาดคละของเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 6

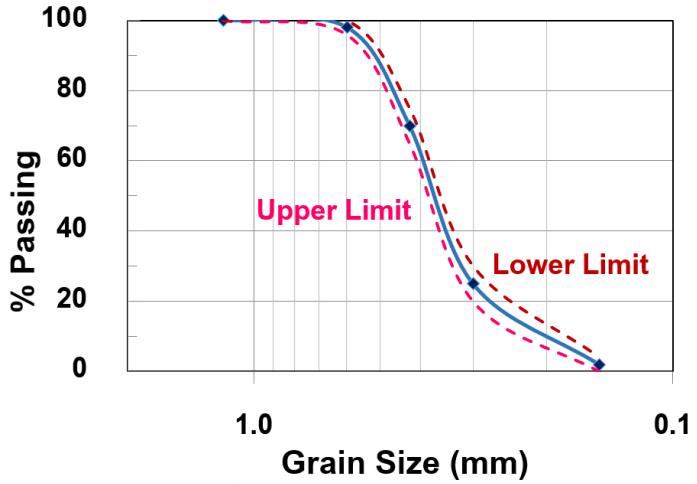
ส่วนมวลรวมละเอียดซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.05 ความถ่วงจำเพาะ 2.56 ความหนาแน่น 1.32 kg/l ปริมาณความชื้นร้อยละ 2.79 และมีค่าการกระจายตัวอยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด ดังรูปที่ 7 ลักษณะอนุภาคและพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 95 - 98 โดยประมาณ มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกยาวและมีหน้าตัดรูปวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12-15 μm ซึ่งบางหน้าตัดอาจจะมีลักษณะ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

ไม่เรียบเนียน ขึ้นอยู่กับกระบวนการย่อยซากแผงวงจรพิมพ์ ส่วนความยาวของเส้นใยทรงกระบอก มีความยาวตั้งแต่ 30 - 200 μm นอกจากนี้ยังพบว่ามีรูปทรงหลายเหลี่ยมปะปนมาในปริมาณเล็กน้อย ร้อยละ 2 - 5 โดยประมาณ มีขนาด 30 - 50 μm ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จะพบว่าองค์ประกอบของเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ ซึ่งมีลักษณะรูปร่างเป็นแท่งทรงกระบอกยาวจะอยู่แบบกระจายตัวไม่ยึดติดกัน พื้นผิวเส้นใยมีความเรียบเนียน ดังรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาพื้นผิวของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ที่กำลังขยาย 300 เท่า จะพบว่าพื้นผิวของมอร์ตาร์มีพื้นผิวเรียบเนียนซึ่งส่งผลดีสมบัติทางด้านกำลังของมอร์ตาร์ ดังรูปที่ 9



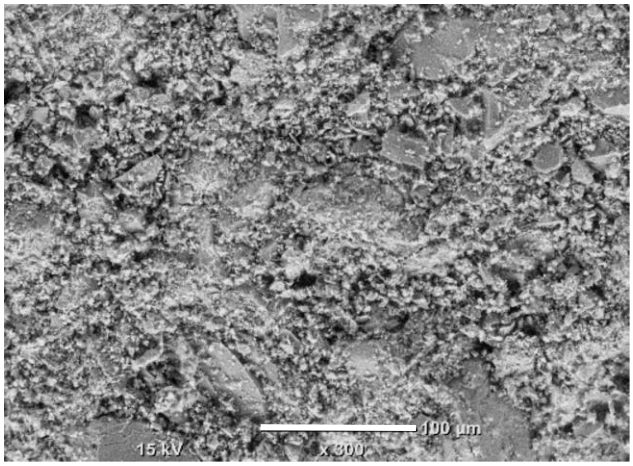
รูปที่ 6 ขนาดคละของเส้นใย



รูปที่ 7 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

รูปที่ 8 รูปขยายของเส้นใย



รูปที่ 9 รูปขยายของมอร์ตาร์ผสมเส้นใย

3.2 สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลว

3.2.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c Ratio) ที่เหมาะสมสำหรับค่าการไหลควบคุมเริ่มต้นพบว่าอยู่ในช่วง 0.79-1.65 โดยมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.79 ทั้งนี้เพื่อให้ค่าการไหลเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่กำหนดตามมาตรฐานนั้น เมื่อปริมาณผสมเพิ่มเส้นใยมากขึ้นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10 เนื่องจากลักษณะอนุภาคของเส้นใยที่ละเอียดรวมถึงอาจมีฝุ่นหรือโลหะปะปนมาจากการกระบวนการบดย่อย สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า [4, 6, 19]

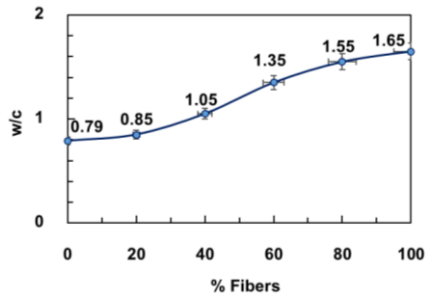
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

3.2.2 ระยะการไหลเริ่มต้น

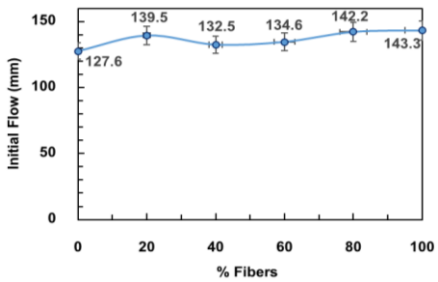
ระยะการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์สำหรับเวลา 240 ±10 วินาที โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) วัดได้ 127.76 mm เมื่อผสมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 20 - 100 ค่าการไหลเริ่มต้นจะอยู่ในช่วง 128.24 – 133.35 mm ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าระยะการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C1708 [17] และ มอก. 3057-2563 [8] กำหนดค่าการไหลเริ่มต้นอยู่ในช่วง 125 - 150 mm จากผลการทดสอบระยะการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผสมเส้นใยเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้นซึ่งมอร์ตาร์มีแนวโน้มไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [3] นอกจากนี้ความเสียดทานในระหว่างการไหลและคุณลักษณะที่เบาของเส้นใยทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลง ส่งผลให้ระยะของการไหลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [6, 19, 20]

3.2.3 ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

จากผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์สำหรับมอร์ตาร์ควบคุม (M0) ซึ่งไม่ผสมเส้นใย มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) 255 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) 375 นาที เมื่อผสมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 20 – 100 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มอร์ตาร์มีแนวโน้มใช้เวลาในการก่อตัวลดลง โดยระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 265 – 386 นาที เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.92 – 51.37 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายอยู่



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของมอร์ตาร์

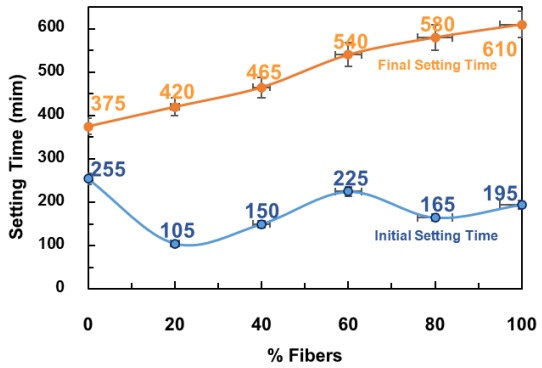


รูปที่ 11 ค่าการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ผสมเส้นใย

ในช่วง 420 - 610 นาที เพิ่มขึ้นร้อยละ 12.00 – 62.67 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ดังรูปที่ 12 เนื่องจากผลของความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมอร์ตาร์เพิ่มมากเกินความต้องการ ทำให้เหลือน้ำส่วนเกิน (Free Water) จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นส่งผลต่อระยะการก่อตัวเพิ่มขึ้น [19]

ทั้งนี้ ตามมาตรฐาน ASTM C1708 [17]และ มอก. 3057-2563 [8] กำหนดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายไม่มากกว่า 1,440 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในครั้งนี้ พบว่ามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ในทุกอัตราส่วนผสมมีระยะเวลาการก่อตัวทั้งในช่วงต้นและระยะปลายอยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002



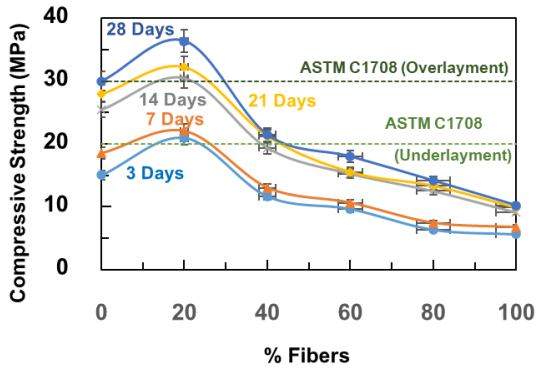
รูปที่ 12 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ผสมเส้นใย

3.3 สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะแข็งตัว

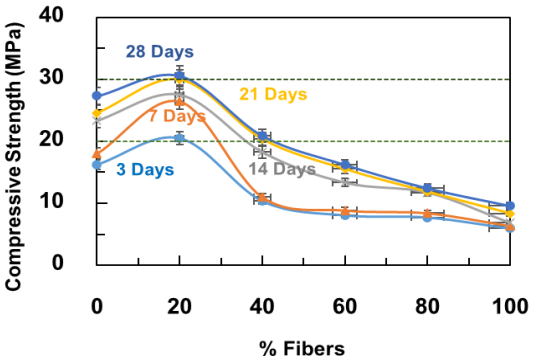
3.3.1 กำลังอัด

ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ทั้งการบ่มในน้ำและบ่มในอากาศที่อายุ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14 สำหรับมอร์ตาร์เมื่อบ่มในน้ำ กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่าอยู่ในช่วง 15.04-29.98 MPa ที่อายุการบ่มในช่วง 3-28 วัน เมื่อพิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 20 (M20) มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 36.35 MPa ซึ่งสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 21.24 ในขณะเดียวกันเมื่อผสมเส้นใยมากกว่าร้อยละ 20 เห็นได้ว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง โดยมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 100 (M100) มีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 10.21 MPa ซึ่งต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 34.05

สำหรับมอร์ตาร์เมื่อบ่มในอากาศ กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่าอยู่ในช่วง 16.24- 27.32 MPa ที่อายุการบ่มในช่วง 3-28 วัน เมื่อพิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 20 (M20) มีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 30.58 MPa ซึ่งสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 11.93 ในขณะเดียวกันเมื่อผสมเส้นใยมากกว่าร้อยละ 20 เห็นได้ว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง โดยมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 100 (M100) มีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 9.59 MPa ซึ่งต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 35.10



รูปที่ 13 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ช่วงอายุ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน เมื่อบ่มในน้ำ



รูปที่ 14 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ช่วงอายุ 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน เมื่อบ่มในอากาศ

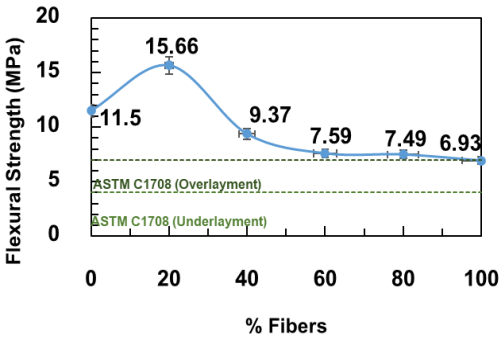
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

เมื่อผสมเส้นใยร้อยละ 20 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากผลของเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่าทรายทำให้สามารถเข้าไปเติมแทรกโพรงช่องว่างระหว่างอนุภาคส่วนผสมได้ดีที่สุด ทำให้มีความทึบแน่นและลดปริมาณโพรงในเนื้อมอร์ตาร์ส่งผลให้สมบัติทางด้านกำลังจะสูงขึ้น [3-5, 10] ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มผสมเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้นจนเกินกว่าปริมาณโพรงช่องว่างที่มี ซึ่งปริมาณเส้นใยเหล่านี้จะเข้ามาเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลในหัวข้อ 3.2.1 ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง รวมถึงลักษณะพื้นผิวเส้นใยที่เรียบทำให้กำลังยึดเกาะระหว่างอนุภาคลดลง ตลอดจนปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณที่เพิ่มของเส้นใย ส่งผลให้มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างซีเมนต์กับน้ำระเหยออกไป เมื่อมอร์ตาร์แข็งตัวจะทำให้เกิดรูพรุนในช่องว่างภายในมอร์ตาร์มากขึ้น ส่งผลให้มอร์ตาร์มีสมบัติด้านกำลังลดลง [4-6, 16, 19]

ทั้งนี้ กำลังอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1708 [17]และ มอก. 3057-2563 [8] กำหนดกำลังอัดของมอร์ตาร์สำหรับใช้ในงานเทรองพื้น (Underlayment) และงานเททับหน้า (Overlayment) ต้องไม่น้อยกว่า 20 และ 30 MPa ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกำหนด พบว่า มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 20 (M20) มีกำลังอัดเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งการเทรองพื้นและเททับหน้า ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 40 (M40) มีกำลังอัดเป็นไปตามเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ได้เฉพาะงานเทรองพื้นเท่านั้น ส่วนมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มากกว่าร้อยละ 40 ขึ้นไป ไม่สามารถนำไปใช้ในงานเทปรับประดับได้เนื่องจากมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

3.3.2 กำลังดัด

ผลการทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์เมื่อบ่มในน้ำอายุ 28 วัน สำหรับมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่ากำลังดัดเท่ากับ 11.50 MPa เมื่อผสมเส้นใยในปริมาณร้อยละ 20 - 100 ค่ากำลังดัดจะอยู่ในช่วง 6.93 – 15.66 MPa ดังแสดงในรูปที่ 15 โดยพบว่ามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 20 (M20) มีค่ากำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 15.66 MPa ซึ่งสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 36.17 เนื่องจากขนาดของเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้เข้าไปอุดช่องว่างภายใน มอร์ตาร์ส่งผลให้มีความทึบแน่นมากขึ้น [3-5] ในขณะเดียวกันเมื่อผสมเส้นใยมากกว่าร้อยละ 20 เห็นได้ว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง โดยมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ปริมาณร้อยละ 100 (M100) มีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 6.93 MPa ซึ่งต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมร้อยละ 39.74 ทั้งนี้ผลการศึกษาที่ได้มีแนวโน้มเป็น ไปในแนวทางเดียวกับผลการทดสอบกำลังอัด [6, 16, 19]



รูปที่ 15 กำลังดัดของมอร์ตาร์ผสมเส้นใย

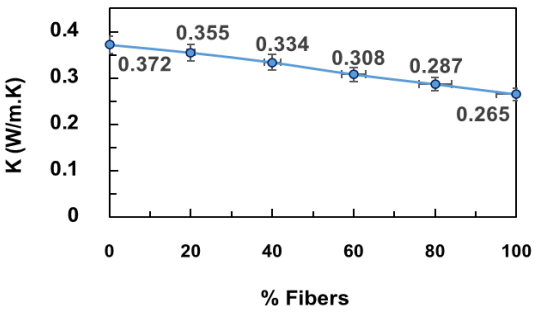
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

ทั้งนี้ กำลังอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C1708 [17] และ มอก. 3057-2563 [8] กำหนดกำลังดัดของมอร์ตาร์สำหรับใช้ในงานเทรองพื้น (Underlayment) และงานเททับหน้า (Overlayment) ต้องไม่น้อยกว่า 4 และ 7 MPa ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานกำหนด พบว่า มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ทุกอัตราส่วนผสม มีค่ากำลังดัดเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งการเทรองพื้นและเททับหน้า

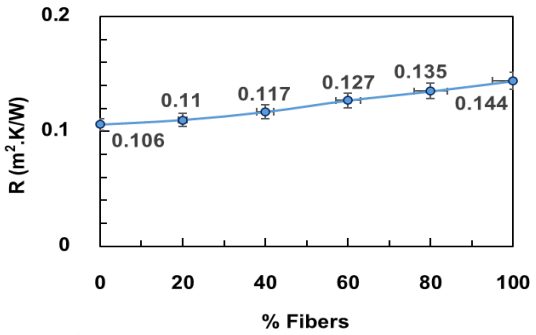
3.4 สมบัติทางด้านความร้อน

ผลการทดสอบสมบัติทางด้านความร้อนของมอร์ตาร์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K value) ของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่า 0.372 W/m.K เมื่อนำมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 (M20) ถึง 100 (M100) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลงอยู่ในช่วง 0.265 - 0.355 W/m.K หรือลดลงร้อยละ 4.56-29.03 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมดังแสดงในรูปที่ 16

สำหรับผลการทดสอบการต้านทานความร้อน (R-value) ของมอร์ตาร์ พบว่า มอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่าการต้านทานความร้อนเท่ากับ 0.106 m^2.K/W เมื่อนำมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 (M20) ถึง 100 (M100) ค่าการต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.110 - 0.144 m^2.K/W หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.77-35.85 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 17 สอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้าที่พบว่าการนำขยะจากแผงวงจรพิมพ์มาผสมร่วมในซีเมนต์เพสต์ส่งผลต่อสมบัติทางด้านความร้อนที่ดีขึ้น [19]



รูปที่ 16 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมอร์ตาร์



รูปที่ 17 ค่าการต้านทานความร้อนของมอร์ตาร์

3.5 การตรวจหาปริมาณโลหะหนักในมอร์ตาร์

สำหรับผลการวิเคราะห์ตรวจหาปริมาณโลหะหนักในมอร์ตาร์นั้น ได้ทำการเลือกมอร์ตาร์ที่มีสมบัติที่ดีที่สุดหรือที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดซึ่งได้แก่ มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 20 (M20) โดยทำการตรวจหาปริมาณโลหะหนักที่จำนวน 8 ธาตุ เกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (พ.ศ. 2564) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน [20] ได้แก่ สารหนู (As), แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), ปรอท (Hg), ตะกั่ว (Pb), แมงกานีส (Mn), และนิเกิล (Ni) พบว่า มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 20 มีปริมาณโลหะหนักตรวจพบโดยเรียง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

จากมากไปหาน้อย ได้แก่ ทองแดง (Cu) จำนวน 279.50 mg/kg, แมงกานีส (Mn) จำนวน 220.83 mg/kg, และปรอท (Hg) จำนวน 0.08 mg/kg ตามลำดับ ส่วนโลหะหนักชนิดอื่นตรวจพบในปริมาณที่น้อยมาก สอดคล้องกับการศึกษาของ Ban et al. [11] พบว่าไม่มีไอออนของโลหะหนักชะละลายออกมา เนื่องจากการถูกยึดตรึงไว้โดยซีเมนต์ไฮเดรต

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักกับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (พ.ศ. 2564) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน [20] นั้น พบว่ามอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มีปริมาณโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

Heavy Metal	Criteria [20] (mg/kg)	In Mortar (mg/kg)	Remark
As	6	LOD	✓
Cd	67	LOD	✓
Cr	17.5	LOD	✓
Cu	2,920	279.50	✓
Hg	22	0.08	✓
Pb	400	LOD	✓
Mn	1,710	220.83	✓
Ni	436.5	LOD	✓

Remark: LOD = Limit of Detection
✓ = Lower than the criteria

4. บทสรุป

1. มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มีความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเพื่อคงระยะการไหลเริ่มต้นตามมาตรฐานกำหนด เมื่อปริมาณเส้นใยในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

2. การนำเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มาเป็นส่วนผสมเพิ่มในมอร์ตาร์ ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่ากำลังอัดสูงสุดเมื่ออัตราส่วนผสมเส้นใยร้อยละ 20 เท่ากับ 35.61 MPa เมื่อบ่มในน้ำที่อายุ 28 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมเส้นใยมากกว่าร้อยละ 20

3. มอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มีแนวโน้มทางด้านสมบัติความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอัตราส่วนผสมเส้นใยเพิ่มขึ้น

4. ปริมาณโลหะหนักส่วนใหญ่ที่ปะปนอยู่ในมอร์ตาร์ผสมเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์ร้อยละ 20 นั้น มีค่าเป็นไปเกณฑ์มาตรฐานกำหนดตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ

5. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำเส้นใยแปรใช้ใหม่จากขยะแผงวงจรพิมพ์มาเป็นส่วนผสมเพิ่มในงานมอร์ตาร์ปรับประดับนั้น พบว่าอัตราส่วนผสมเพิ่มไม่เกินร้อยละ 40 สำหรับงานเทรองพื้น (Underlayment) และอัตราส่วนผสมเพิ่มไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับงานเททับหน้า (Overlayment)

6. ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต พิจารณาจากอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์ทำผลิตภัณฑ์คอนกรีต อาทิเช่น อิฐบล็อคซีเมนต์หรือปูนฉาบ เนื่องจากสมบัติทางด้าน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

การต้านความร้อนที่ดี และน้ำหนักของวัสดุที่เบาช่วยลดน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศรัญญา พรหมโคตร อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น อาจารย์พงศกร พรหมสวัสดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์เครื่องมือในการทดสอบรวมถึงคำแนะนำวิธีการและขั้นตอนในการทดสอบ ขอขอบคุณบริษัท เจี๋ยฮง อินเตอร์ จำกัด คุณวุฒินันนท์ หนูทอง และบริษัท มาย คอนกรีต จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เส้นใย สารเคมีผสมเพิ่ม และสารผสมเพิ่ม ตามลำดับ ตลอดระยะการทดลอง และผู้สนับสนุนทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านข้อมูลและการทดสอบ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] https://www.testtech.co.th/th/news/41. (Accessed on 30 October 2022)

[2] A. Khymarn, Effect of waste printed circuit boards (WPCBs) powder on engineering properties of cement paste, Thesis, Thammasart University, Thailand, 2018. (in Thai)

[3] V. Marimuthu and A. Ramasamy, Investigation of the mechanical properties of M40-grade concrete with PCB fiber from recycled electronic waste, Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2023, 27(1), 04022034.

[4] K. Panyawee, S. Kwongpongsagoon, P. Kanjanapiya and C. Tuakta, Study on the properties of cellular lightweight concrete with nonmetallic parts from the process of recycling the remains of electrical circuit boards as an ingredient, The 25th National Civil Engineering Symposium, Proceeding, 2020, STR06, (in Thai)

[5] K. Sriwatanakul, S. Kwongpongsagoon, P. Kanjanapiya and C. Tuakta, Development of pervious concrete with non-metallic part from recycling of printed circuit boards as constituent, The 25th National Civil Engineering Symposium, Proceeding, 2020, STR08. (in Thai)

[6] G. Sau-iam and B. Chatveera, 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.

[7] Z. Sun, Z. Shen, S. Ma and X. Zhang, Novel application of glass fibers recovered from waste printed circuit boards as sound and thermal insulation material, Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22, 3140–3146.

[8] TIS 3057-2563, Standard Specification for Self-Leveling Mortar, 2020. (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002

[9] R.S. Mahdi, Experimental study effect of using glass fiber on cement mortar, Journal of Babylon University for Engineering Sciences, 2014, 22(1), 162-181.

[10] J.R. Ferrari, R.V. Silva, D.M. Louzada and I.M. Tinti, Reuse of printed circuit boards substrate in the production of mortars, Technology in Metallurgy, Materials and Mining, 2022, 19, e2656.

[11] B.C. Ban, J.Y Song, J.Y. Lim, S.K. Wang, K.G. An and D.S. Kim, Studies on the reuse of waste printed circuit board as an additive for cement mortar, Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2005, 40(3), ESE-200046618, 645-656.

[12] ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement, 2012.

[13] ASTM C778, Standard Specification for Standard Sand, 2002.

[14] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, 2017.

[15] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), 2007.

[16] R. Wang, T.F. Zhang, and P.M Wang, Waste printed circuit boards nonmetallic powder as admixture in cement mortar, Journal of Materials and Structures, 2012, 45, 1439–1455.

[17] ASTM C1708, Standard Test Method for Self-Leveling Mortars Containing Hydraulic Cements, 2016

[18] ASTM C348, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, 2002.

[19] G. Sau-iam, A. Khymarn, B. Chatveera and N. Makul Cementitious properties of cement paste mixed with laminated powder from electronic waste, Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal, 2021, 13(3), 676-691. (in Thai)

[20] Quality Standard for Soil, Ministry of Natural Resources and Environment, 2021. (in Thai)