



สมบัติทางวิศวกรรมและการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมรวม خاکแฉะผงจอร์อิเล็คทรอนิกส์แทนที่มวลรวมละเอียด

ปวีณา บัวผาย และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

กฤษฎดา เสือเอี่ยม

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 6565 0335 อีเมล: cburacha@engr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.07.003

รับเมื่อ 14 กันยายน 2565 แก้ไขเมื่อ 21 พฤศจิกายน 2565 ตอบรับเมื่อ 8 ธันวาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 17 กรกฎาคม 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ปัจจุบันขยะจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่หมดอายุการใช้งานได้กลายมาเป็นปัญหาขยะที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะขยะจากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งยากต่อการกำจัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่เป็นโลหะ ซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปใหม่โดยวิธีทางกายภาพมาใช้ในงานผลิตมอร์ตาร์ปรับระดับ กำหนดสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยการนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาทำการแทนที่มวลรวมละเอียดอัตราส่วนร้อยละ 2.5–20 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะเหลวและสภาวะแข็งตัว สมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน การวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอกซ์และพฤติกรรมการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมรวมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ผลการทดสอบพบว่า ลักษณะการกระจายตัวของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีค่าใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ส่วนความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นต่ำกว่ามวลรวมละเอียด มอร์ตาร์ปรับระดับมีแนวโน้มความต้องการน้ำในส่วนผสมและระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นและการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง มอร์ตาร์ปรับระดับมีสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี ส่วนการชะละลายโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด การพิจารณานำมอร์ตาร์ปรับระดับไปใช้งาน ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการผสมรวมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่ควรเกินร้อยละ 15 สำหรับการใช้งานเทรอฟื้น และไม่เกินร้อยละ 7.5 สำหรับงานเทพื้นหน้า

คำสำคัญ: มอร์ตาร์ปรับระดับ ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การแทนที่มวลรวมละเอียด กำลังอัด การชะละลายโลหะหนัก

การอ้างอิงบทความ: ปวีณา บัวผาย, บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ กฤษฎดา เสือเอี่ยม, “สมบัติทางวิศวกรรมและการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมรวมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมละเอียด,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 34, ฉบับที่ 4, หน้า 1–14, เลขที่บทความ 243-126325, ต.ค.-ธ.ค. 2567.



Engineering Properties and Leaching of Heavy Metals on Self-leveling Mortars Mixed with Waste Printed Circuit Boards as Fine Aggregate Replacement

Paweena Buaphai and Burachat Chatveera*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathum Thani, Thailand

Gritsada Sua-lam

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 6565 0335, E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.07.003

Received 14 August 2022; Revised 21 November 2022; Accepted 1 December 2022; Published online: 17 July 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Currently, end-of-life electrical and electronic equipment is the fastest-growing environmental waste problem, with Waste Printed Circuit Boards (WPCBs) being especially difficult to dispose of. As a result, the non-metallic parts of WPCBs were used as physical process recycling waste in the production of self-leveling mortars in this study. WPCBs were used as a fine aggregate replacement in mortars in a mixed proportion of 2.5–20% by weight. WPCB physical properties, mortar fresh and hardened properties, insulating mortar properties, X-ray analysis, and heavy metal leaching were investigated. Results showed that WPCB's grading characteristics were close to those of fine aggregates, while their specific gravity and density were lower than those of fine aggregates. Self-leveling mortars tended to increase water demand and setting time as the percentage replacement of fine aggregates increased, while density and compressive strength tended to decrease. Self-leveling mortars had better insulating properties. As for heavy metal leaching, the amount of heavy metal mixed in the electronic circuit board was within the specified standard. To consider the use of leveling mortars, the optimum amount for mixing WPCBs should not exceed 15% for underlayment or 7.5% for overlayment work.

Keywords: Self-leveling Mortar, Wasted Printed Circuit Board, Fine Aggregate Replacement, Compressive Strength, Heavy Metal Leaching

Please cite this article as: P. Buaphai, B. Chatveera, and G. Sua-lam, "Engineering properties and leaching of heavy metals on self-leveling mortars mixed with waste printed circuit boards as fine aggregate replacement," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 4, pp. 1–14, ID. 243-126325, Oct.–Dec. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

สถาปัตยกรรมอาคารหรือสิ่งก่อสร้างส่วนมากทำขึ้นจากผลิตภัณฑ์คอนกรีต ดังนั้นงานก่อสร้างบ้าน อาคารสถานที่ และสิ่งก่อสร้างอื่น ตั้งแต่อดีตไม่สามารถปฏิเสธได้เลยว่าคอนกรีตมีบทบาทต่ออุตสาหกรรมการก่อสร้างเป็นอย่างมาก ซึ่งในปัจจุบันได้มีการคิดค้น วิจัยและพัฒนานวัตกรรมในการสร้างสรรค์ผลงานเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์คอนกรีตอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับรูปแบบการใช้งาน

การปรับระดับพื้นทั่วไป เพื่อปรับปรุงความได้ระดับและความเรียบของพื้นผิวที่มีอยู่ นิยมใช้มอร์ตาร์เทพปรับระดับไหลได้ด้วยตัวเอง (Self-leveling Mortar) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์คอนกรีตแบบหนึ่งที่สามารถนำไปใช้งานรองพื้น ปิดผิวหรือซ่อมแซม ตามนิยามของ มอก. 3057 [1] มอร์ตาร์เทพปรับระดับไหลได้ด้วยตัวเอง หมายถึง วัสดุที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์และมวลรวมละเอียดเข้าด้วยกัน ซึ่งอาจมีสารผสมเพิ่มหรือสีด้วยก็ได้ เมื่อผสมกับน้ำสะอาดจะเหลว มีประสิทธิภาพที่สามารถเทพปรับระดับไหลได้ด้วยตัวเอง ทั้งนี้เนื่องจากมอร์ตาร์ปรับระดับสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภทจึงมีความต้องการในอุตสาหกรรมการก่อสร้างสูงมากขึ้น จากการศึกษาวิจัยมีความพยายามในการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งมาแปรใช้ใหม่ในการผลิตมอร์ตาร์เทพปรับระดับไหลได้ด้วยตัวเองโดยนำมาทำการแทนที่มวลรวมละเอียด

Zhao และคณะ [2] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมด้วยมวลรวมละเอียดจากอิฐบดมาแปรใช้ใหม่ โดยนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 25 และ 50 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณมวลรวมละเอียดจากอิฐบดมาแปรใช้ใหม่เพิ่มขึ้น กำลังอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับลดลงร้อยละ 3.30 สำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 25.00 และ 16.90 สำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 50 จากการศึกษาพบว่า สามารถนำมวลรวมละเอียดจากอิฐบดมาแปรใช้ใหม่โดยแทนที่มวลรวมละเอียดได้ไม่เกินร้อยละ 25 ในขณะที่การนำมวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตมาแปรใช้ใหม่โดยแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 75 ตามลำดับพบว่ามอร์ตาร์ปรับระดับมีอัตราการซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 3 โดย

มอร์ตาร์ปรับระดับทุกส่วนผสมยังสามารถรับแรงดัดได้มากกว่า 2 เมกะปาสกาล [3] ส่วน Candamano และคณะ [4] นำมวลรวมละเอียดที่ได้จากเศษวัสดุก่อสร้างบดละเอียดมาแปรใช้ใหม่โดยแทนที่มวลรวมละเอียดทั้งหมด (100%) ในมอร์ตาร์ปรับระดับพบว่า มอร์ตาร์ปรับระดับมีความสามารถในการไหลลดลง ส่วนการหดตัวแห้งและความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ในขณะที่กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 6 ในขณะที่ทนุซิด และคณะ [5] นำมวลรวมละเอียดที่ได้จากกระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์มาแปรใช้ใหม่ โดยใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยปริมาตรพบว่า มอร์ตาร์ที่ผสมไฟเบอร์ซีเมนต์ร้อยละ 30 ที่อายุการบ่ม 90 วัน ให้กำลังอัดสูงที่สุด แต่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 10 ซึ่งแนวโน้มของการศึกษาเป็นไปในแนวทางเดียวกับการศึกษาก่อนหน้า

ขยะอิเล็กทรอนิกส์หรือที่เรียกกัน “แรนในเมือง (Urban Ore)” เนื่องจากในองค์ประกอบของขยะอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีโลหะที่เข้มข้นและถูกทิ้งกระจายอยู่ตามสภาพแวดล้อมเมือง ซึ่งปัจจุบันมีกระบวนการในการสกัดโลหะมีค่าเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่เหลือแต่เพียงส่วนที่เป็นโลหะซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากและยากแก่การกำจัด ดังนั้นทางเลือกหนึ่งที่มีการศึกษาวิจัยคือความพยายามในการนำเอาขยะอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่เป็นโลหะมาใช้ในการงานคอนกรีตโดยการนำมาเป็นวัสดุทดแทนมวลรวมบางส่วน ซึ่งการศึกษาพบว่า มีความเป็นไปได้ในการนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาทำการแทนที่มวลรวมละเอียดในงานคอนกรีต โดย Iniyani และ Shanmugasundaram [6] ได้นำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอลูมิเนียมมาบดหยาบแล้วนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตอัตราส่วนร้อยละ 10-50 พร้อมทั้งนำเถาถ่านหินมาทำการแทนที่ปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 30 พบว่า ค่าการยุบตัว ความหนาแน่น กำลังอัด กำลังดึงและกำลังดัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแนวโน้มกำลังของคอนกรีตที่ลดลงทำให้ยังสามารถนำไปใช้ได้เพียงในงานโครงสร้างที่ไม่รับน้ำหนัก (Non Load Bearing

Structures) โดยปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมไม่ควรเกินร้อยละ 10 ในขณะที่ Mohamad [7] พบว่า สามารถนำชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะมาใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดในปริมาณไม่เกินร้อยละ 28 สำหรับส่วนผสมของมอร์ตาร์ และไม่เกินร้อยละ 30 สำหรับส่วนผสมของอิฐ เช่นเดียวกับผลการศึกษานำขยะอิเล็กทรอนิกส์มาแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมของมอร์ตาร์พบว่า เหมาะสำหรับการใช้งานเป็นคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากกำลังอัดและกำลังดึงมีแนวโน้มลดลงในขณะที่สมบัติด้านความเป็นฉนวนและการต้านทานการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มดีขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Schneider และคณะ [8] ทำการศึกษามอร์ตาร์ด้วยการนำเอาชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะมาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 25 และ 50 โดยปริมาตร กำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดโดยน้ำหนักเท่ากับ 1 : 3 ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับผลการศึกษาก่อนหน้า [2], [3]

อย่างไรก็ตามพบว่า ชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะยังมีศักยภาพในการนำไปใช้ในงานคอนกรีตส่วนที่ไม่ใช้งานโครงสร้างหลักหรือการผลิตบล็อกคอนกรีต [8] โดยในส่วนของการนำมาเป็นส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก เมื่อนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมพบว่า คอนกรีตบล็อกมีหน่วยน้ำหนักลดลงในช่วงร้อยละ 0.46-4.50 ในขณะที่กำลังอัดมีลดลงในช่วงร้อยละ 14.30-53.20 ตามลำดับ [9] เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการชะละลายของโลหะหนักที่อยู่ในชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0-40 สำหรับการผลิทมอร์ตาร์พบว่า การชะละลายไอออนของโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด [7] นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณการชะละลายของโลหะหนักได้แก่ แบเรียม ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสี นั้นสามารถตรวจพบได้เฉพาะสังกะสีและทองแดงซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดเช่นกัน [9]

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีการศึกษานำชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะมาเป็นวัสดุผสมร่วมในการผลิทมอร์ตาร์เทพัรรระดับไหล

ได้ด้วยตัวเอง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของมอร์ตาร์เทพัรรระดับไหลได้ด้วยตัวเองผสมชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เมื่อนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดรวมถึงศึกษาสมบัติความเป็นฉนวนและพฤติกรรมการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์เทพัรรระดับ เพื่อเป็นแนวทางในการนำชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาใช้งานร่วมในการผลิทมอร์ตาร์เทพัรรระดับไหลได้ด้วยตัวเอง เป็นทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าวัสดุและการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากปริมาณขยะที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement; OPC) ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 [10] หรือ ASTM C150 [11]

2.1.2 มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายแม่น้ำที่มีขนาดละเอียดเป็นไปตามทรายซิลิกาธรรมชาติชนิด Grade Sand ตามมาตรฐาน ASTM C778 [12]

2.1.3 ชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Printed Circuit Boards; WPCBs) จากกระบวนการ Recycle คัดแยกส่วนที่เป็นโลหะโดยวิธีการทางกายภาพ จากผู้ประกอบการรับซื้อและ Recycle เศษชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในจังหวัดนครปฐม

2.1.4 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษ (High Range Water Reducing Admixtures) ประเภทเอฟตามมาตรฐาน ASTM C494 [13] ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบประเภทพอลิคาร์บอกซีเลตดัดแปลง (Modified Polycarboxylate)

2.1.5 น้ำที่ใช้ในการผสมและบ่มมอร์ตาร์เทพัรรระดับคือน้ำประปาสะอาดปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต

2.2 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์เทพัรรระดับ

2.2.1 อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานการศึกษาค้างนี้ตั้งสรุปใน

ตารางที่ 1 โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก ทำการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (WPCBs) ในปริมาณร้อยละ 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 และ 20.0 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลได้ด้วยตัวเองของมอร์ตาร์ปรับระดับ ทำการเติมสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 3 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์โดยปริมาณน้ำในแต่ละส่วนผสมแปรผันตามค่าการไหลเริ่มต้นซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 1708 [14] และ มอก. 3057 [1] โดยกำหนดให้อยู่ในช่วง 125-150 มม.

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mix ID	ซีเมนต์ (กรัม)	มวลรวมละเอียด (กรัม)		
		ทราย	%แทนที่	WPCBs
M0	500.00	1,375.00	0.0	0.00
M25	500.00	1,340.63	2.5	34.38
M50	500.00	1,306.25	5.0	68.75
M75	500.00	1,271.88	7.5	103.13
M100	500.00	1,237.50	10.0	137.50
M125	500.00	1,203.13	12.5	171.88
M150	500.00	1,168.75	15.0	206.25
M175	500.00	1,134.38	17.5	240.63
M200	500.00	1,100.00	20.0	275.00

2.2.2 การหล่อตัวอย่างทดสอบและการบ่ม

หลังจากชั่งตวงวัสดุตามที่กำหนด ทำการผสมวัสดุทั้งหมดเข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C305 [15] จนวัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ปรับระดับในสภาวะเหลว พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับลงในแบบหล่อที่จัดเตรียมไว้ ซึ่งแบบหล่อได้ทำการทาน้ำมันบริเวณด้านในของแบบหล่อ เพื่อให้สามารถถอดแบบออกได้ง่ายขึ้น ภายหลังการเทมอร์ตาร์ปรับระดับลงในแบบหล่อพร้อมกระทุ้งแน่นตามมาตรฐานกำหนด นำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีนเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ ปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อและนำตัวอย่างไป



รูปที่ 1 ตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับรอการทดสอบ

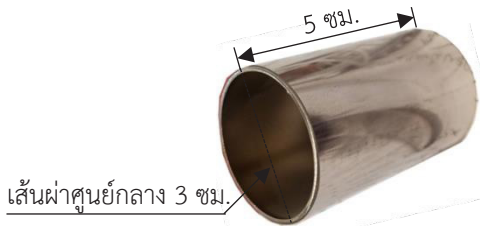
บ่มในน้ำและบ่มในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 7 14 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1

2.3 การทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับ

2.3.1 ทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ปรับระดับในสภาวะเหลว

การทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ปรับระดับในสภาวะเหลวประกอบไปด้วยการทดสอบการไหลเริ่มต้น (Initial Flow) โดยใช้อุปกรณ์ทดสอบการไหลเริ่มต้น (Initial Flow) สำหรับการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ปรับระดับ ใช้ Flow Ring ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3 ซม. และความสูง 5 ซม. ดังรูปที่ 2

นำตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับที่ผสมเสร็จแล้วเติมให้เต็ม Flow Ring หลังจากนั้นยก Flow Ring ขึ้นพร้อมกับจับเวลาจนครบ 240 ± 10 วินาที วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ปรับระดับ การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1708 [14] และ มอก. 3057 [1] และการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวใช้เข็มวัดแคตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. วางแตะที่ผิวด้านบนของตัวอย่าง หลังจากปล่อยเข็มให้บันทึกระยะเวลาจนกระทั่งการจมของเข็มเป็น 25 มม. ค่าที่ได้



รูปที่ 2 Flow Ring

คือ ค่าการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ส่วนระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) เกิดเมื่อไม่มีการจมของเข็ม

2.3.2 ทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ปรับระดับในสถานะแข็งตัว

การทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ปรับระดับในสถานะแข็งตัวประกอบไปด้วยการทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. ที่อายุ 28 วัน โดยความหนาแน่นของตัวอย่างมอร์ตาร์คำนวณได้จากสัดส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ และการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 มม. ที่อายุการบ่ม 3 7 14 21 และ 28 วัน โดยเลือกด้านเรียบตรงข้ามกันเป็นด้านทดสอบปล่อยน้ำหนักกระทำจนตัวอย่างเกิดการวิบัติดังแสดงในรูปที่ 3 การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 [16]

2.3.3 ทดสอบสมบัติเฉพาะของมอร์ตาร์ปรับระดับ

การทดสอบสมบัติเฉพาะของมอร์ตาร์ปรับระดับประกอบไปด้วยการทดสอบค่าต้านทานความร้อน (R) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) โดยตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด $300 \times 300 \times 36$ มม. ด้วยเครื่องทดสอบค่าความต้านทานความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda ตัวเครื่องใช้หลักการไหลของความร้อน (Heat Flow Meter)

การวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอ็กซ์ เป็นการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีโดยเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์บดละเอียดด้วยเครื่องบดอัดตัวอย่างสุญญากาศ ยี่ห้อ QUORUM รุ่น Q150R ES และนำเข้าเครื่องทดสอบ XRF



รูปที่ 3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ยี่ห้อ Olympus รุ่น Vanta M Series

การชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ โดยบดตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับให้ละเอียด นำไปย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Titan MPS สำหรับย่อยสลายตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับให้อยู่ในรูปของสารละลายก่อนนำไปทดสอบการชะละลายด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP – OES) และเทคนิค Inductively Coupled Mass Emission Spectroscopy (ICP – MS) สำหรับทดสอบปรอท (Hg)

3. ผลการทดลอง

3.1 สมบัติของวัสดุผสม

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นออกไซด์หลัก ปริมาณร้อยละ 65.56 โดยมีขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 2–20 ไมครอน ในขณะที่ซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นออกไซด์หลัก ปริมาณร้อยละ 20.86 โดยมีขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 20–2,000 ไมครอน เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ พบว่ามีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ลีบแบน ดังแสดงในรูปที่ 4

เมื่อทำการเปรียบเทียบการกระจายขนาดคลของซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กับมวลรวมละเอียด เห็นได้ว่ามวลรวม



รูปที่ 4 ชากผงวงจรีเล็กทรอนิกส์

ทั้งสองมีลักษณะการกระจายตัวใกล้เคียงกัน และอยู่ในช่วงขอบเขตมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 5

สำหรับสมบัติทางกายภาพของชากผงวงจรีเล็กทรอนิกส์พบว่า มีปริมาณความชื้นร้อยละ 1.63 ความถ่วงจำเพาะ 0.73 และความหนาแน่น 0.47 กิโลกรัมต่อลิตร ในขณะที่มวลรวมละเอียดมีปริมาณความชื้นร้อยละ 2.79 ความถ่วงจำเพาะ 2.56 และความหนาแน่น 1.32 กิโลกรัมต่อลิตร ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2

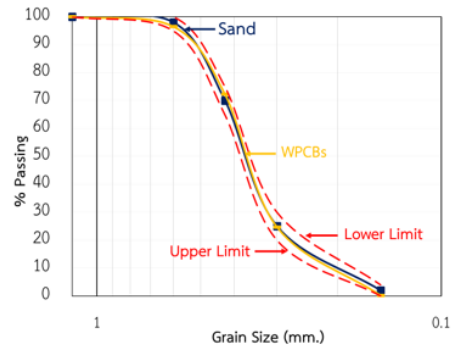
ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุชากผงวงจรีเล็กทรอนิกส์เปรียบเทียบกับมวลรวมละเอียด

สมบัติทางกายภาพ	มวลรวมละเอียด	WPCBs
ปริมาณความชื้น (Moisture Content, %)	2.79	1.63
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.56	0.73
ความหนาแน่น (Bulk Density, kg/l)	1.32	0.47

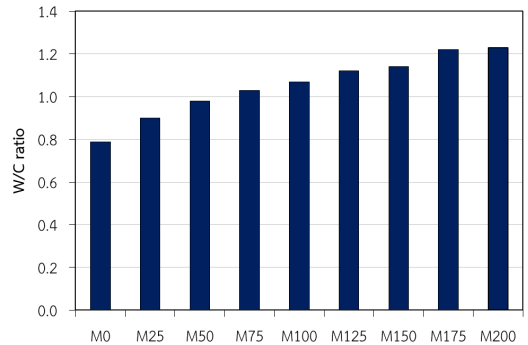
3.2 สมบัติของมอร์ตาร์ปรับระดับในสถานะเหลว

3.2.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c Ratio) ที่เหมาะสมสำหรับค่าการไหลควบคุมเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยชากผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ในส่วนผสมของมอร์ตาร์ปรับระดับ จากรูปที่ 6



รูปที่ 5 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด และ WPCBs

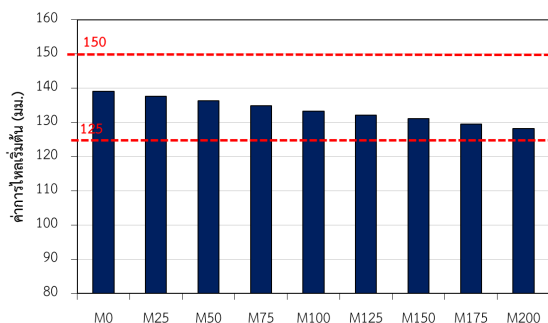


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และปริมาณชากผงวงจรีเล็กทรอนิกส์

พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม (M0) เท่ากับ 0.79 เพื่อคงระดับความสามารถในการไหลให้อยู่ในช่วงกำหนดตามมาตรฐาน ในขณะที่เดียวกันเมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยชากผงวงจรีเล็กทรอนิกส์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

3.2.2 ระยะการไหลเริ่มต้น (Initial Flow)

ผลการทดสอบระยะการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ปรับระดับ ที่ระยะเวลา 240 ±10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) วัดได้ 127.85 มม. และเมื่อมีปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยชากผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ในปริมาณร้อยละ 2.5–20.0 จะมีค่าอยู่ในช่วง 127.80–139.70 มม. ซึ่งเป็นระยะตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 1708 [14] และ มอก. 3057 [1]



รูปที่ 7 ค่าการไหลเริ่มต้นและปริมาณซากผงวงจรรอิเล็คทรอนิกส์

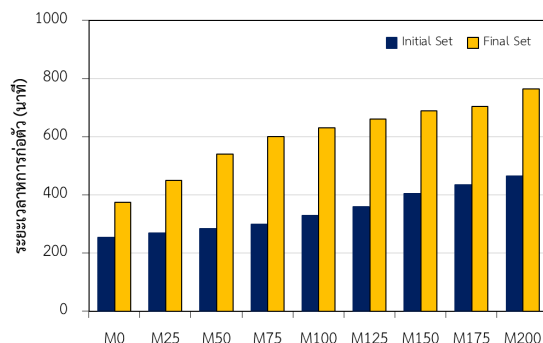
ที่กำหนดให้ระยะการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ต้องมีระยะเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 125–150 มม.

จากรูปที่ 7 พบว่า ค่าการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ปรับระดับมีแนวโน้มลดลง เมื่อการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากผงวงจรรอิเล็คทรอนิกส์เพิ่มขึ้น อนุภาคของซากผงวงจรรอิเล็คทรอนิกส์ที่มีลักษณะลึบแบน ไม่มีความกลมมนเหมือนกับมวลรวมละเอียดธรรมชาติ จึงส่งผลให้ความสามารถในการไหลลดลงตามไปด้วย

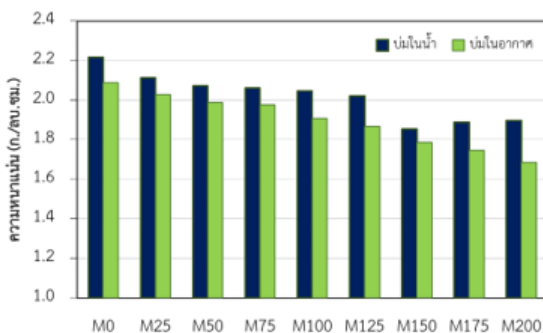
3.2.3 ระยะเวลาก่อตัว (Setting Time)

ระยะเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากผงวงจรรอิเล็คทรอนิกส์ มีแนวโน้มแปรผันตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 255 นาที และระยะเวลาก่อตัวขั้นสุดท้ายเมื่อเวลาผ่านไป 375 นาที พิจารณาปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากผงวงจรรอิเล็คทรอนิกส์ในปริมาณร้อยละ 2.5–20.0 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 270–465 นาที คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้น 1.06–1.82 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่ระยะเวลาก่อตัวขั้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 375–765 นาที คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้น 1.47–2.04 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับในทุกส่วนผสมที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากผงวงจรรอิเล็คทรอนิกส์กับระยะเวลาที่ยอม



รูปที่ 8 ระยะเวลาก่อตัวของมอร์ตาร์ปรับระดับ



รูปที่ 9 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับ

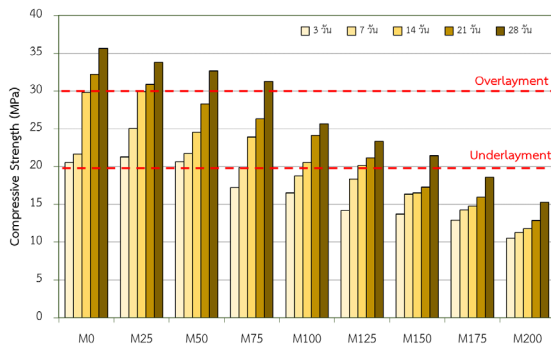
ให้ตามมาตรฐาน ASTM C 1708 [14] และ มอก. 3057 [1] พบว่า มีค่าระยะเวลาในการก่อตัวอยู่ในช่วงยอมรับได้ กล่าวคือ ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และระยะเวลาก่อตัวขั้นสุดท้ายไม่มากกว่า 1,440 นาที

3.3 สมบัติของมอร์ตาร์ปรับระดับในสภาวะแข็งตัว

3.3.1 ความหนาแน่น (Density)

ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมรวมซากผงวงจรรอิเล็คทรอนิกส์เมื่อนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดพบว่า มีแนวโน้มแปรผกผันกับปริมาณซากผงวงจรรอิเล็คทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 9

โดยมอร์ตาร์ควบคุมที่บ่มในน้ำ (2.22 ก./ลบ.ซม.) มีค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์สูงกว่าการบ่มในอากาศ (2.09 ก./ลบ.ซม.) จากรูปที่ 9 เห็นได้ว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงในช่วงร้อยละ 4.95–16.67 สำหรับการบ่ม



รูปที่ 10 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในน้ำ

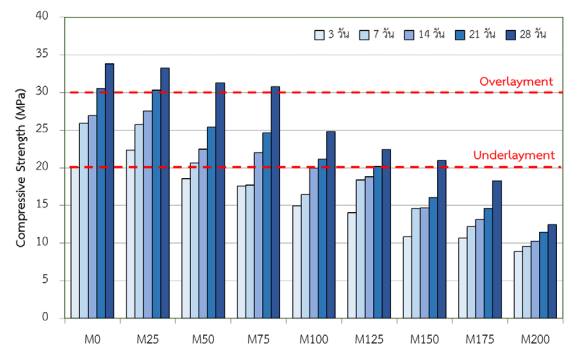
ในน้ำ ส่วนการบ่มในอากาศความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงในช่วงร้อยละ 2.87–19.14 เมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงก์ตอนจิ๋วเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.5–20.0 ตามลำดับ

3.3.2 กำลังอัด (Compressive Strength)

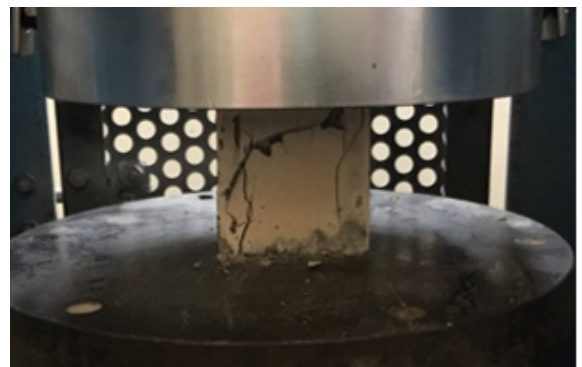
การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์แบ่งออกเป็นการบ่มตัวอย่างในน้ำและบ่มในอากาศ โดยระยะเวลาในการบ่มกำหนด 3 7 14 21 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์สำหรับการบ่มในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่าเท่ากับ 35.62 เมกะปาสกาล เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงก์ตอนจิ๋วในปริมาณร้อยละ 2.5–20.0 กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงในช่วงร้อยละ 5.14–57.13 ตามลำดับ

สำหรับผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์สำหรับการบ่มในอากาศดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า ที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (M0) มีค่าเท่ากับ 33.79 เมกะปาสกาล เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงก์ตอนจิ๋วในปริมาณร้อยละ 2.5–20 กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงในช่วงร้อยละ 1.59–63.04 ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่บ่มในน้ำจะสูงกว่ามอร์ตาร์ที่บ่มในอากาศในช่วงร้อยละ 1.53–22.26 โดยตัวอย่างมอร์ตาร์ปรับระดับทั้งการบ่มตัวอย่างในน้ำและบ่มในอากาศมีลักษณะการวิบัติแบบ Non-Explosive Failure ดังแสดงในรูปที่ 12

เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 1708 [14] และ มอก. 3057 [1] สำหรับการนำมอร์ตาร์ปรับระดับ



รูปที่ 11 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับที่บ่มในอากาศ



รูปที่ 12 การวิบัติแบบ Non-Explosive Failure

ไปใช้งานเทรอฟพื้น (Underlayment) กำหนดค่ากำลังอัด 20 เมกะปาสกาล สามารถผสมรวมซากแพลงก์ตอนจิ๋วปริมาณไม่เกินร้อยละ 15 และสำหรับการนำมอร์ตาร์ปรับระดับไปใช้งานเททับหน้า (Overlayment) กำหนดค่ากำลังอัด 30 เมกะปาสกาล สามารถผสมรวมซากแพลงก์ตอนจิ๋วปริมาณไม่เกินร้อยละ 7.5

3.4 สมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน

การพิจารณาสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนจากผลการทดสอบค่าการต้านทานความร้อน (R) และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) โดยเลือกทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ในส่วนผสม M0 M25 M100 และ M200 ตามลำดับ เพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มของผลการทดสอบสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า R และค่า k ของมอร์ตาร์ปรับระดับ

Mix ID	ค่า R ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)	ค่า K ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
M0	0.106	0.304
M25	0.124	0.286
M50	0.141	0.268
M100	0.177	0.231
M200	0.247	0.158

พบว่า มอร์ตาร์ปรับระดับควบคุม (M0) มีค่าการต้านทานความร้อน $0.106 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $0.304 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณร้อยละ 2.5–20 ค่าการต้านทานความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 1.17–2.33 เท่า ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง 1.06–1.92 เท่า

3.5 การวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์สารประกอบด้วยรังสีเอกซ์จากตัวอย่างทดสอบมอร์ตาร์ส่วนผสม M0 M25 M100 และ M200 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4 ปริมาณธาตุโลหะหนักที่พบมากที่สุดทั้งในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และมอร์ตาร์ปรับระดับ อาทิ เช่น สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) เป็นต้น

สำหรับซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ปริมาณธาตุโลหะหนักที่พบมากที่สุดเรียงตามลำดับ ได้แก่ สังกะสี (Zn) ร้อยละ 1.81 ทองแดง (Cu) ร้อยละ 0.36 บิสมัท (Bi) ร้อยละ 0.20 และไทเทเนียม (Ti) ร้อยละ 0.13 ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ปรับระดับผสมรวมซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่าง ในส่วนผสม M200 ปริมาณธาตุโลหะหนักที่พบมากที่สุดเรียงตามลำดับ ได้แก่ เหล็ก (Fe) ร้อยละ 1.71 ไทเทเนียม (Ti) ร้อยละ 0.31 และแมงกานีส (Mn) ร้อยละ 0.06 ตามลำดับ

การทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของมอร์ตาร์ปรับระดับส่วนผสม M0 M25 M100 และ M200 ตามลำดับพบว่า มีแร่องค์ประกอบหลักได้แก่ คือ แร่ดินเหนียว

(ประกอบด้วยออกไซด์ของอลูมิเนียม โพแทสเซียม และซิลิกอน) ปริมาณร้อยละ 5.13–12.11 และแร่ควอตซ์ (SiO_2) ปริมาณร้อยละ 32.44–45.65 ส่วนโมเลกุลของโลหะหนักที่พบ คือ แร่ไพไรต์ (FeS_2) ปริมาณร้อยละ 1.01–4.05 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 13

ตารางที่ 4 ปริมาณโลหะหนักจากการทดสอบ XRF

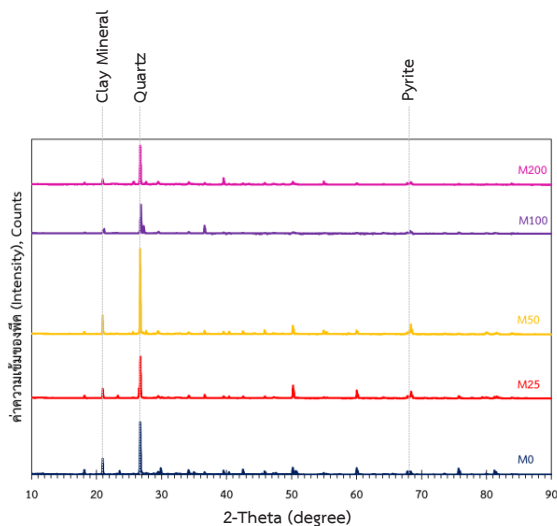
ธาตุ	ปริมาณธาตุ (%)					
	WPCBs	M0	M25	M50	M100	M200
Ag	LOD	0.01	LOD	LOD	LOD	0.01
As	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Cd	LOD	0.01	LOD	LOD	0.01	0.01
Co	0.01	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Cr	0.01	0.04	0.04	LOD	LOD	LOD
Cu	0.36	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
Fe	0.05	1.76	1.51	1.56	1.70	1.71
Mn	0.01	0.05	LOD	LOD	0.04	0.06
Ni	LOD	0.01	LOD	LOD	LOD	LOD
Pb	0.03	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Ti	0.13	0.25	0.28	0.25	0.20	0.31
Zn	1.81	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Hg	0.02	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Bi	0.20	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD

หมายเหตุ: LOD = Less of Detected

โดยสรุปผลการทดสอบมอร์ตาร์ปรับระดับส่วนผสม โดยการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์ เห็นได้ว่าปริมาณธาตุโลหะหนักพบมากที่สุด ได้แก่ เหล็ก ไทเทเนียม สังกะสี และทองแดง และโมเลกุลที่พบจากการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ คือ แร่ไพไรต์ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Pianchaiyaphum และคณะ [9] ที่มีการตรวจปริมาณธาตุโลหะหนักพบว่า มีธาตุสังกะสี และทองแดงมากที่สุด

3.6 การชะละลายโลหะหนัก

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการพิจารณาถึงความปลอดภัยเมื่อมีการนำมอร์ตาร์ผสมรวมซากแผงวงจร



รูปที่ 13 ดิฟแฟรกโทแกรมผลการทดสอบ XRD ของมอร์ตาร์ปรับระดับ

อิเล็กทรอนิกส์ไปใช้งานจริง โดยได้ทำการเลือกทดสอบส่วนที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ ในปริมาณร้อยละ 2.5 (M25) ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีกำลังอัดสูงสุด โดยทำการพิจารณาปริมาณการชะละลายของโลหะหนักจำนวนทั้งสิ้น 13 ธาตุ ได้แก่ Silver (Ag), Arsenic (As), Cadmium (Cd), Cobalt (Co), Chromium (Cr), Copper (Cu), Iron (Fe), Manganese (Mn), Nickel (Ni), Lead (Pb), Titanium (Ti), Zinc (Zn) และ Mercury (Hg) ตามลำดับ โดยปริมาณโลหะหนักที่พบในมอร์ตาร์ปรับระดับจากผลการทดสอบพบว่า ธาตุโลหะหนักที่มีปริมาณการชะละลายมากที่สุดเรียงตามลำดับ ได้แก่ เหล็ก (Fe) ปริมาณ 8,095.89 มก./กก. ไทเทเนียมปริมาณ 481.13 มก./กก. แมงกานีสปริมาณ 274.67 มก./กก. ทองแดงปริมาณ 257.18 มก./กก. สังกะสีปริมาณ 55.73 มก./กก. และปรอทปริมาณ 0.17 มก./กก. ตามลำดับ ส่วนธาตุโลหะหนักชนิดอื่นตรวจพบในปริมาณที่น้อยมาก สอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้า [8]

4. อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

4.1 อภิปรายผล

พิจารณาสมบัติของมอร์ตาร์ปรับระดับในสถานะเหลว

เนื่องจาก خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์มีความชื้นต่ำ ส่งผลทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มสูงขึ้น เพื่อเพิ่มความอิมตัวและความสามารถในการไหล สอดคล้องกับการศึกษาของ Oliveira และคณะ [3] ซึ่งพบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 75 ส่งผลต่อปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มสูงขึ้น 1.18 เท่า เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยค่าการไหลเริ่มต้นของทุกส่วนผสมยังอยู่ในช่วงกำหนด สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Oliveira และคณะ [3] พบว่า ระยะการไหลเริ่มต้นมีความสม่ำเสมอและมีแนวโน้มลดลงแต่ยังคงอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด ทั้งนี้จากการศึกษาพบว่า มอร์ตาร์ปรับระดับส่วนผสม M25 มีค่าการไหลเริ่มต้นสูงที่สุด สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zhao และคณะ [2] ที่เมื่อทำการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษอิฐในปริมาณน้อยที่สุดจะให้ค่าระยะการไหลเริ่มต้นมากที่สุด

สำหรับความหนาแน่นและกำลังอัดในสถานะแข็งตัว เห็นได้ว่าเนื่องจาก خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่ามวลรวมละเอียด 2.80 เท่า เมื่อนำมาแทนที่เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลงสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้า [2]–[4], [6]–[7] ส่วนผลของกำลังอัดพบว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกำลังอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของ خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์มีค่าน้อยกว่าทราย 2.3 เท่า (ตารางที่ 2) เมื่อปริมาณ خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง จึงทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลงตามไปด้วย รวมถึงลักษณะทางกายภาพของ خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์มีผิวสัมผัสเรียบลื่น การยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคจึงไม่มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับทรายธรรมชาติ นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ปรับระดับลดลงเช่นกัน สอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้า [2], [4]–[6], [8]

จากผลการทดสอบความเป็นฉนวนกันความร้อนของมอร์ตาร์ปรับระดับเมื่อผสมรวม خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจาก خاکแฉวงจรีอิเล็กทรอนิกส์เป็นอโลหะ ส่งผล

ให้มอร์ตาร์ปรับระดับมีพฤติกรรมการต้านทานความร้อน และการนำความร้อนคล้ายคลึงกับฉนวน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mohamad [7] ที่มีการนำซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนโลหะมาใช้ทดแทนทรายแล้วทำให้สมบัติด้านความเป็นฉนวนมีแนวโน้มดีขึ้น ทั้งนี้เมื่อตรวจสอบปริมาณธาตุโลหะหนักโดยการทดสอบการเรืองรังสีเอกซ์พบว่า เหล็ก ไทเทเนียม สังกะสี และ ทองแดง เป็นธาตุที่พบมากที่สุด แต่เมื่อตรวจสอบการชะละลายของโลหะหนักจากข้อมูลปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการทดสอบ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณตามเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักทั้งในส่วนของ European Standard (BSEN 12457/3) [17], European Compost Network (ECN – QAS Harmful Matter) [18] และคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน) [19] ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า ปริมาณโลหะหนักมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ยกเว้นธาตุทองแดงที่มีปริมาณสูงเกินกว่าค่าที่มาตรฐาน European Standard (BSEN 12457/3) [17] แต่ไม่เกินค่ากำหนดของทั้ง European Compost Network [18] และคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ [19] กำหนด

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในมอร์ตาร์ปรับระดับกับเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (มก./กก.)			
	มอร์ตาร์ปรับระดับ M25	BSEN 12457/3 Hazardous [17]	ECN – QAS Harmful Matter [18]	มาตรฐานคุณภาพดิน [19]
Ag	LOD	-	-	-
As	LOD	25	-	6
Cd	LOD	5	1.3	67
Co	LOD	-	-	-
Cr	LOD	70	60	17.5
Cu	257.18	100	300	2,920
Fe	8,095.89	-	-	-
Mn	274.67	-	-	1,710
Ni	LOD	40	40	436.5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในมอร์ตาร์ปรับระดับกับเกณฑ์มาตรฐานกำหนด (ต่อ)

ธาตุ	ปริมาณธาตุ (มก./กก.)			
	มอร์ตาร์ปรับระดับ M25	BSEN 12457/3 Hazardous [17]	ECN – QAS Harmful Matter [18]	มาตรฐานคุณภาพดิน [19]
Pb	LOD	50	130	400
Ti	481.13	-	-	-
Zn	55.73	200	600	-
Hg	0.17	2	0.45	22

4.2 สรุป

จากการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ปรับระดับผสมร่วมซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์แทนที่มวลรวมละเอียด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) ซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุผสม มีการกระจายตัวใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียดและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ในขณะที่ความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นของซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์มีค่าต่ำกว่ามวลรวมละเอียด

2) มอร์ตาร์ปรับระดับมีความต้องการน้ำ และระยะเวลาการก่อตัวในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละการผสมร่วมซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น

3) สำหรับการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์ ที่อายุ 28 วัน ความหนาแน่นและกำลังอัดมีแนวโน้มลดลง โดยส่วนผสม M25 ที่ป่มในน้ำมีกำลังอัดสูงที่สุด (33.79 เมกะปาสกาล) และสูงกว่ากำลังอัดใช้งานตามเกณฑ์กำหนดตาม มอก. 3057 คิดเป็นร้อยละ 68.95 สำหรับงานเทรื่องพื้น และร้อยละ 18.95 สำหรับงานเทพื้นหน้า

4) มอร์ตาร์ปรับระดับผสมร่วมซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มของสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีขึ้นเมื่อปริมาณซากแพลงจอร์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น

5) การชะละลายปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในมอร์ตาร์ปรับระดับ M25 มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนดตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25

(พ.ศ. 2547) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อที่อยู่อาศัย

6) ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการนำซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาผสมรวมไม่ควรเกินร้อยละ 15 สำหรับการนำมอร์ตาร์ปรับระดับไปใช้งานเทรองพื้น และไม่เกินร้อยละ 7.5 สำหรับงานเทพื้นหน้า

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศรัญญาพรหมโคตร อาจารย์ ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำวิธีการและขั้นตอนในการดำเนินการทดสอบ คุณวรพงศ์ รัตนจิโรจน์ ที่ได้ให้การสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการศึกษา และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติที่อำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทดสอบ ตลอดจนผู้สนับสนุนที่อาจไม่ได้กล่าวถึงตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] *Self-leveling Mortar*, TIS 3057, 2020 (in Thai).
- [2] Z. Zhao, J. Xiao, Z. Duan, J. Hubert, S. Grigoletto, and L. Courard, "Performance and durability of self-compacting mortar with recycled sand from crushed brick," *Journal of Building Engineering*, vol. 57, no. 1, 2022.
- [3] T. V. Oliveira, L. N. P. Cordeiro, and S. A. L. Bessa, "Experimental study of self-leveling mortars produced with recycled concrete aggregates," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, no.1, 2022.
- [4] S. Candamano, F. Tassone, I. Iacobini, F. Crea, and P. D. Fazio, "The properties and durability of self-leveling and thixotropic mortars with recycled sand," *Applied Sciences*, vol. 12, March 2022.
- [5] A. Vilaivong, S. Naenudon, A. Wongsu, V. Sata, and P. Chindapasirt. "Properties of mortar incorporating fiber cement roof tile waste fine aggregate," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no.1, pp. 97–107, 2022.
- [6] L. N. A. Iniyan, and M. Shanmugasundaram. "Utilization of waste printed circuit boards as partial replacement for fine aggregate in concrete," *PAIDEUMA Journal of Research*, vol. 3, pp. 28–32, 2010.
- [7] S. S. B. Mohamad, "Potential reuse of recovered nonmetallic printed circuit board waste as sand replacement in construction materials," M.S. thesis, Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, 2014.
- [8] E. L. Schneider, H. M. Veit, W. L. Hartmann, C. M. Stolz, L. C. Robinson, C. T. Oliveira, and A. S. Vargas, "Cement matrix containing lightweight aggregates based on Non-Metallic Fraction Printed Circuit Boards (NMFPCB'S)," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 14, pp. 2992–2997, 2021.
- [9] P. Pianchaiyaphum, S. Kwonpongsagoon, P. Kanchanapiya, and C. Tuakta, "Recycling of non - metallic residue from waste printed circuit boards to produce interlocking concrete blocks," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 12, no. 6, pp.169–174, 2021.
- [10] *Portland Cement*, TIS 15, 2004 (in Thai).
- [11] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM C150, 2012.
- [12] *Standard Specification for Standard Sand*, ASTM C 778, 2002.
- [13] *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM C 494, 2017.
- [14] *Standard Test Method for Self-leveling Mortars*



- Containing Hydraulic Cements, ASTM C1708, 2016.
- [15] Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM C305, 2006.
- [16] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM C109, 2007.
- [17] *Characterization of Waste Leaching Compliance Test for Leaching of Granular Waste Materials and Sludges*, BS EN 12457, 2000.
- [18] *European Quality Assurance Scheme for Compost and Digest*, EU: ECN – QAS, 2014.
- [19] *Soil Quality Standard*, Announcement of the National Environment Board, 2021 (in Thai).