

## สมบัติทางกลและความคงทนของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

### ผสมร่วมขยะจากแผงวงจรพิมพ์และเถ้าลอย

## Mechanical Properties and Durability of Self-compacting Mortar Incorporating Printed Circuit Board Waste and Fly Ash

ธนกร กลางบุรัมย์ชากร<sup>1</sup> บุรฉัตร ฉัตรวีระ<sup>1,\*</sup> และ กฤษดา เสือเอี่ยม<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: cburacha@engr.tu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมบัติทางกลและความคงทนจากสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก เมื่อนำขยะจากแผงวงจรพิมพ์และเถ้าลอยมาผสมร่วมในการผลิตมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง ในการออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ได้นำเอาเถ้าลอยมาทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และขยะจากแผงวงจรพิมพ์นำมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.47 กำหนดระยะการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองคงที่ที่ทุกส่วนผสมอยู่ในช่วง 25±5 เซนติเมตร ทำการทดสอบความสามารถในการไหล กำลังอัด กำลังดัด การดูดซึมน้ำและความคงทนจากสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่อายุการบ่มสูงสุด 90 วัน ผลการทดสอบพบว่าความสามารถในการไหลมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณขยะจากแผงวงจรพิมพ์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังอัด กำลังดัด การดูดซึมน้ำและความคงทนจากสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณขยะจากแผงวงจรพิมพ์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองผสมร่วมขยะจากแผงวงจรพิมพ์ปริมาณที่เหมาะสมไม่ควรเกินร้อยละ 15 ซึ่งมีกำลังอัดและกำลังดัดเท่ากับ 38.25 และ 8.23 MPa ในขณะที่ร้อยละการดูดซึมน้ำและการสูญเสียกำลังอัดจากสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเท่ากับ 7.06 และ 55.05 ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง, ขยะอิเล็กทรอนิกส์, ขยะจากแผงวงจรพิมพ์, สมบัติทางกล, ความคงทน

### Abstract

The purpose of this research was to study the effects on mechanical properties and durability from sulfuric acid corrosion conditions, when waste from printed circuit boards and fly ash are mixed in the production of self-compacting mortar. In the design of the mortar mixture, fly ash was used to replace Type 1 Portland cement in the ratio of 20 percent by weight and printed circuit board waste was added as the binder in the ratio of 5, 10, 15, and 20 by weight of binder. The water to binder ratio was 0.47. The spreading distance of self-compacting mortar was fixed for all mixtures in the range of 2.5±5 cm. The flowability, compressive strength, flexural strength, water absorption and durability from corrosive conditions of sulfuric acid at the maximum curing time of 90 days. The test results showed that the flowability of self-compacting mortar tended to decrease with the amount of printed circuit boards waste in the mix increase. While compressive strength, flexural strength, water absorption and durability due to sulfuric acid corrosion tends to increase with the amount of printed circuit boards waste in the mix increase. The self-compacting mortar incorporation printed circuit boards in the appropriate amount should not exceed 15 percent, with compressive and flexural strengths of 38.25 and 8.23 MPa, while the percentage of water absorption and Loss of compressive strength from sulfuric acid corrosion was 7.06 and 55.05, respectively.

**Keywords:** self-compacting mortar, e-waste, printed circuit board waste, mechanical properties, durability

## 1. คำนำ

มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง (self-compacting mortar) ถือได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตนเอง (self-compacting concrete) นิยมใช้ในงานซ่อมแซมและฟื้นฟูโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคุณสมบัติของความสามารถทำงานได้ที่สูง สามารถไหลภายใต้น้ำหนักของตัวเองและเติมเต็มแบบได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่ต้องทำการบดอัดหรือจี้เขย่า ในขณะที่เดียวกันยังคงมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการแยกตัว (Segregation) หรือเยิ้มน้ำ (Bleeding) กล่าวอีกนัยหนึ่งจากคุณสมบัติที่โดดเด่นของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานและคุณภาพของคอนกรีต สามารถลดเวลาในการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายด้านแรงงานคนลดลง ตลอดจนช่วยลดปัญหาจากเสียงรบกวนเนื่องจากการใช้เครื่องจี้เขย่าในหน่วยงานก่อสร้าง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้จึงถือเป็นข้อได้เปรียบที่ทำให้มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองเหนือกว่ามอร์ตาร์ทั่วไป [1,2] การเพิ่มความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองได้โดยไม่ก่อให้เกิดการแยกตัวและเยิ้มในระหว่างการใช้งานสามารถทำได้โดยการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในระดับสูง การใช้ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มในอัตราส่วนสูง [3] ซึ่งส่งผลกระทบต่อตรงทางเศรษฐศาสตร์ทำให้มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีราคาที่สูงกว่ามอร์ตาร์ทั่วไป อันเนื่องมาจากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มที่สูง เพื่อให้มอร์ตาร์ได้คุณสมบัติตามข้อกำหนดดังกล่าว ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในปริมาณที่สูงส่งผลต่อราคาที่สูงขึ้นโดยตรง เพราะปูนซีเมนต์มีราคาแพงที่สุดและเป็นองค์ประกอบหลักของมอร์ตาร์ ดังนั้นแนวคิดในการลดการใช้ปริมาณโดยสามารถใช้วัสดุประสานที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงความต้านทานการแยกตัวมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองในขณะที่ยังคงความสามารถในการไหลที่ดีในสภาวะสด ในปัจจุบันวัสดุประสานส่วนใหญ่ เช่น เถ้าลอยนิยมนำมาใช้เพื่อผลิตมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นที่มีความสามารถในการไหลที่ดี [4] ปัจจุบันเทคโนโลยีมีความสำคัญและเข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตของมนุษย์เพื่อตอบสนองความต้องการด้านต่างๆของผู้ใช้งานทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่รวมถึงมีการประดิษฐ์อุปกรณ์ใช้สอยนานาชนิดออกสู่ตลาด [5] นำไปสู่การแข่งขันทางการตลาดที่เข้มข้นขึ้นเนื่องจาก ผู้ประกอบการมีการเร่งผลิตสินค้าอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ในตลาดจึงตกต่ำลงในระยะเวลานี้ ก่อให้เกิดขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากปีละ 20-50 ล้านตัน [6] ทั้งนี้ขยะอิเล็กทรอนิกส์เมื่อนำมาทำการคัดแยกจะพบเศษซากแผงวงจรพิมพ์ สามารถนำรีไซเคิลเพื่อสกัดโลหะมูลค่าสูง เช่น ทองแดงบริสุทธิ์ หรือใยแก้วแล้วนั้นยังเกิดเทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) ในลักษณะของเส้นใยโดยเส้นใยที่ได้จากการรีไซเคิลเศษซากแผงวงจรพิมพ์มีเส้นผ่าศูนย์กลางหน้าตัดที่เล็ก มีความเหนียว มีการนำความร้อนต่ำและน้ำหนักเบา [7] และคาดว่าจะสามารถรับแรงดึงได้ดี ทำให้มีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยที่ได้จากการรีไซเคิลเศษซากแผงวงจรพิมพ์กลับมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในมวลรวมมอร์ตาร์โดยไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของมอร์ตาร์หากนำมาใช้ในปริมาณที่เหมาะสม จากการศึกษาของ Nagajothi และ Felixkala [8] มีการใช้เส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ผสมรวมใน

ส่วนผสมมอร์ตาร์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2.5 ตามลำดับพบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น กำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 27.43, 29.8, 35.5 และ 42.4 MPa เมื่อปริมาณการผสมรวมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น มอร์ตาร์ผสมรวมเส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์อัตราส่วนร้อยละ 2.5 มีค่ากำลังอัดสูงมากกว่า 40 MPa เส้นใยจากขยะอิเล็กทรอนิกส์จึงเป็นวัสดุชนิดใหม่ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีแนวโน้มการใช้งานที่กว้างขวาง [9] ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยยังมีข้อมูลเกี่ยวกับการใช้วัสดุเพิ่มเข้าไปในปูนซีเมนต์น้อยมาก ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จึงได้ศึกษาถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์ผสมขยะจากแผงวงจรพิมพ์แบบเส้นใย เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการใช้ขยะจากแผงวงจรพิมพ์ในงานมอร์ตาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมีความแตกต่างและนับเป็นสิ่งใหม่ในการนำเส้นใยที่ได้จากการกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์จากขยะอิเล็กทรอนิกส์มาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม (Admixture) ในการผลิตมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง เพื่อหาแนวทางในการนำเอาพลาสติกแบบเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) กลับมาใช้ในงานผลิตมอร์ตาร์ถือเป็นข้อได้เปรียบทั้งทางด้านเศรษฐกิจและทางเทคนิคในการแก้ปัญหาการกำจัดขยะแผงวงจรพิมพ์ ทั้งยังเป็นแนวทางในการจัดการอย่างเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเป็นแนวทางการพัฒนาเพื่อนำไปสู่เป้าหมายที่สำคัญในการลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 หรือมาตรฐาน ASTM C150 [10] (รูปที่ 1)

2.1.3 เถ้าลอยแคลคจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (รูปที่ 2) ตามมาตรฐาน ASTM C618 [11]

2.1.2 เส้นใยจากแผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Boards, PCBs) ซึ่งได้มาจากการกระบวนการรีไซเคิลเศษซากแผงวงจรพิมพ์จากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จากบริษัทกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ ในจังหวัดนครปฐม (รูปที่ 3) ภาพขยายของเส้นใยจากแผงวงจรพิมพ์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปที่ 4)

2.1.3 มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ (รูปที่ 5) ซึ่งมีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [12] (รูปที่ 6)

2.1.4 น้ำสำหรับผสมและบ่มมอร์ตาร์ ใช้น้ำประปาที่มีความสะอาด มีค่า pH อยู่ในช่วง 6-7

2.1.5 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำพิเศษ (High Range Water Reducer) ประเภท F จำพวกโพลีคาร์บอกซีเลท ตามมาตรฐาน ASTM C494 [13]

2.1.6 กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ประเภท Lab Grade มวลต่อหนึ่งโมล 98.08 กรัม/โมล ลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลว ไม่มีสี ความหนาแน่น 1.84 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถละลายน้ำได้ความเข้มข้นร้อยละ 98 ตามมาตรฐาน ASTM C267 [14]



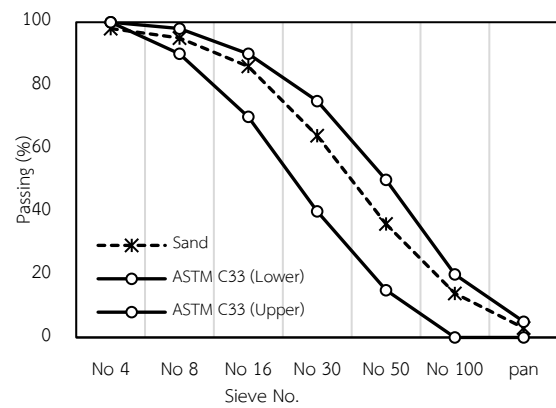
รูปที่ 1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 5 ทราย



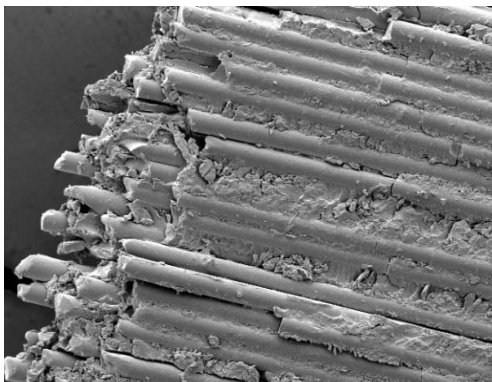
รูปที่ 2 เถ้าลอย



รูปที่ 6 ขนาดคละของทรายตามมาตรฐาน ASTM C33



รูปที่ 3 เส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์



รูปที่ 4 ภาพขยายเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (1000x)

## 2.2 การเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

### 2.2.1 อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานการวิจัยครั้งนี้กำหนดตามแนวทางการออกแบบส่วนผสมตามวิธีของ Okamura [15] ซึ่งเป็นการออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตนเอง ปริมาณวัสดุผสมโดยรวมกำหนด 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ซึ่งอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานของ EFNARC [16] อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.47 โดยทำการปรับปริมาณสารลดน้ำพิเศษในแต่ละส่วนผสมเพื่อคงความสามารถในการไหลแฉให้อยู่ในช่วง 20 - 30 เซนติเมตร ตามคำแนะนำของ EFNARC [16] ทั้งนี้ในการออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์อัดแน่นได้ด้วยตนเองได้นำเอาเถ้าลอยมาทำการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และขยะจากแผงวงจรพิมพ์นำมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังแสดงในตารางที่ 1

### 2.2.2 การหล่อตัวอย่างทดสอบและการบ่ม

ซึ่งตวงส่วนผสมตามที่กำหนด จากนั้นทำการผสมวัสดุทั้งหมดด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C305 [17] จนวัสดุผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองในสภาวะเหลว พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อที่จัดเตรียมไว้ โดยแบบหล่อ

จะต้องทำการทาน้ำมันบริเวณด้านในของแบบหล่อเพื่อป้องกันมอร์ตาร์แข็งตัวติดกับแบบหล่อแน่นจนเกินไปทำให้ไม่สามารถถอดแบบได้ ภายหลังจากการเทมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองลงในแบบหล่อพร้อมทำการกระทุ้งแน่น นำตัวอย่างไปหุ้มด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีนเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบหล่อและนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนถึงระยะเวลาทดสอบ 7, 28 และ 90 วัน

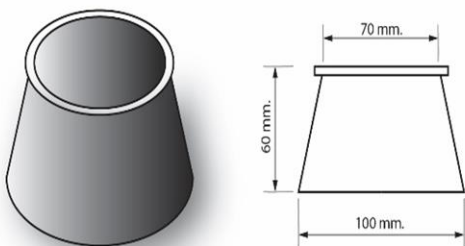
ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง (kg/m<sup>3</sup>)

Mix ID (1 m <sup>3</sup> )	ผสมเพิ่ม PCBs ในวัสดุประสาน		เผ้าลอยแทนที่ ปูนซีเมนต์			ทราย	น้ำ	SP (%)
	วัสดุ ประสาน	%	PCBs	%	เผ้าลอย			
SCM0	550	0.0	0.0	20	110.0	930	260	0.5
SCM5	550	5.0	27.5	20	110.0	930	260	1.7
SCM10	550	10.0	55.0	20	110.0	930	260	4.1
SCM15	550	15.0	82.5	20	110.0	930	260	4.9
SCM20	550	20.0	110.0	20	110.0	930	260	5.3

### 2.3 การทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

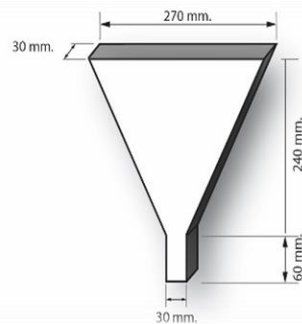
#### 2.3.1 ทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองในสภาวะเหลว

การทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองในสภาวะเหลวมีองค์ประกอบที่สำคัญคือความสามารถในการเติมแทรก ประกอบด้วย การทดสอบการไหลแผ่ (Slump Flow) ใช้เครื่องมือ Mini Slump Flow Test ตามมาตรฐาน EFNARC [16] ซึ่งประกอบด้วยแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างเหมือนกรวยเรียวความสูงเป็น 60 มิลลิเมตรและเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนเป็น 70 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่างเป็น 100 มิลลิเมตร (รูปที่ 7) วางบนแผ่นกระจกหรือพื้นเรียบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดไม่น้อยกว่า 90 เซนติเมตร หลังจากผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันจึงตักมอร์ตาร์ใส่กรวยจนเต็มโดยไม่ต้องทำการตักกระทุ้งอัดแน่น จากนั้นทำการยกกรวยขึ้นในแนวตั้งโดยปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลแผ่โดยอิสระ ปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลแผ่ต่อเนื่องไปจนหยุดแล้วทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการไหลแผ่สูงสุดของมอร์ตาร์จากค่าเฉลี่ยใน 2 ทิศทาง



รูปที่ 7 Mini Slump Flow Test

การทดสอบความต้านทานการแยกตัวของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง สามารถทำได้โดยการทดสอบการไหลของมอร์ตาร์ในลักษณะแนวตั้งเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดด้วยเครื่องมือทดสอบที่มีลักษณะเป็นกล่องแบนรูปทรงวี (V-Funnel) (รูปที่ 8) ตามมาตรฐาน EFNARC [16] โดยทำการปิดช่องด้านล่างของกล่องแบนรูปทรงวีจากนั้นทำการเติมมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองจนเต็มโดยไม่ต้องทำการอัดแน่นและปล่อยให้ระยะเวลา 5 นาที เมื่อครบกำหนด 5 นาที ทำการปล่อยมอร์ตาร์ให้ไหลออกอย่างอิสระ ทำการจับเวลาในการไหลของมอร์ตาร์ที่ตั้งแต่มอร์ตาร์เริ่มต้นการไหลจนกระทั่งมอร์ตาร์ไหลออกจากเครื่องมือทดสอบจนหมด และทำการบันทึกผลเพื่อประเมินการแยกตัวของมอร์ตาร์ตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 8 กล่องแบนรูปทรงวี (V-Funnel)

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยใช้เข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร วางแตะที่ผิวด้านบนของตัวอย่าง หลังจากนั้นปล่อยให้ทับนึ่งที่ระยะเวลาจนกระทั่งการจมของเข็มเป็น 10 มิลลิเมตร ค่าที่ได้คือ ค่าการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาจนกระทั่งไม่มีการจมของเข็ม ค่าที่ได้คือ ค่าการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)

#### 2.3.2 ทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองในสภาวะแข็งตัว ประกอบไปด้วย

การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ที่อายุ 28 วัน การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1403 [18] โดยวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองนั้นพิจารณาจากร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากแช่ในน้ำเปรียบเทียบกับน้ำหนักอบแห้ง

ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C349 [19] ดังรูปที่ 9

การทดสอบกำลังดัด ขนาด 10 x 10 x 35 เซนติเมตร (รูปที่ 10) ที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C348 [20] และการทดสอบกำลังอัดที่สูญเสียเนื่องจากสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก (รูปที่ 11) ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ที่อายุ 90 วัน การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C267 [14]



รูปที่ 9 การทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 10 การทดสอบกำลังดัด



รูปที่ 11 การทดสอบการกัดกร่อนของกรวดซิลฟูริก

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 สมบัติของเคมีและกายภาพของวัสดุ

จากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ หรือ X-ray fluorescence (XRF) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีองค์ประกอบหลักได้แก่ CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 65.66%, 19.92%, 5.02% และ 2.69% ตามลำดับ เถ้าลอยมีองค์ประกอบหลักได้แก่ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO และ Na<sub>2</sub>O เท่ากับ 33.4%, 18.6%, 14.4%, 2.31%, 20.1% และ 2.49%

ตามลำดับ ผลรวมของ SiO<sub>2</sub> +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากกว่าร้อยละ 50 และปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 18 ถือเป็นชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [11] และเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) มีองค์ประกอบหลักได้แก่ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ CaO เท่ากับ 54.30, 19.14, 0.01 และ 21.03 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 สำหรับสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs)

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก		
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	PCBs
Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> )	19.92	33.40	54.30
Aluminium Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.02	18.60	19.14
Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.69	14.40	0.01
Calcium Oxide (CaO)	65.66	20.10	21.03
Magnesium Oxide (MgO)	1.18	2.86	0.63
Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)	0.48	2.31	0.03
Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)	0.08	2.49	0.00
Sulfur Trioxide (SO <sub>3</sub> )	2.22	3.95	0.00
Loss on Ignition (LOI)	0.96	0.59	27.47
Free lime %	0.57	0.62	0.17

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยและเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs)

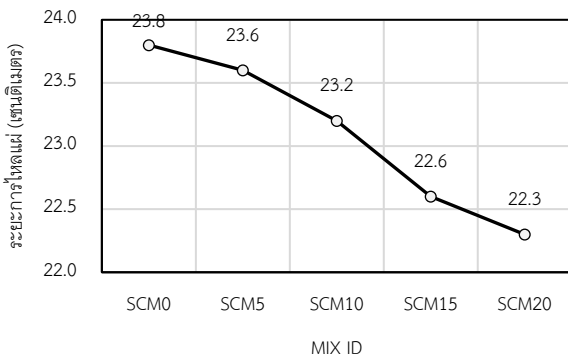
องค์ประกอบทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	PCBs	เถ้าลอย
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	0.69	2.88
ความหนาแน่น	1.00	0.361	0.72
ดัชนีกำลัง (Strength Index, %)			
ที่อายุ 7 วัน	100	34.87	62
ที่อายุ 28 วัน	100	42.25	75

#### 3.2 สมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองในสภาวะเหลว

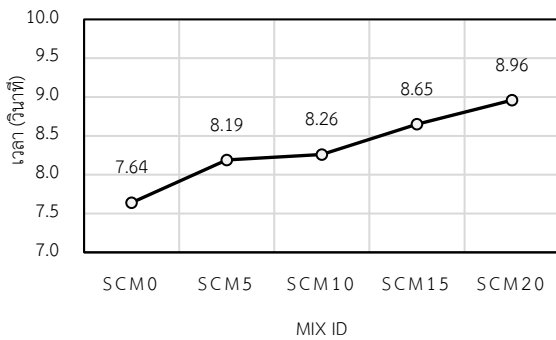
ผลการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ควบคุม เท่ากับ 23.8 เซนติเมตร เมื่อผสมเพิ่มเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ในช่วงร้อยละ 5-20 จะมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 22.3-23.6 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะตามเกณฑ์ที่กำหนดให้ระยะการไหลแผ่ต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20-30 เซนติเมตร

ผลการทดสอบความต้านทานการแยกตัวของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยเวลาของการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-Funnel) ของมอร์ตาร์ควบคุมเท่ากับ 7.64 วินาที เมื่อผสมเพิ่มเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ในช่วงร้อยละ 5-20 จะมีค่าเวลาของการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-Funnel) อยู่ในช่วง 8.19-8.96 วินาที ซึ่งเป็นระยะตามเกณฑ์มาตรฐาน EFNARC [16] ที่กำหนด

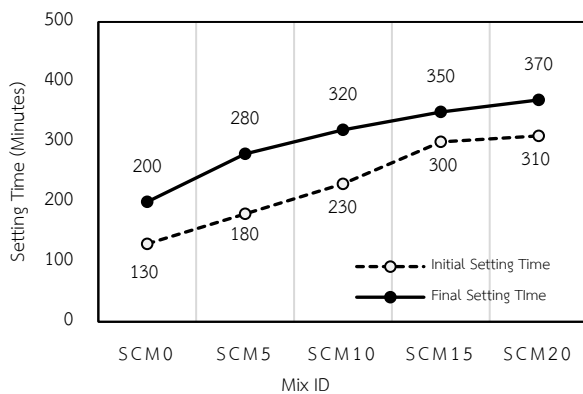
จากรูปที่ 12 และรูปที่ 13 พบว่า ระยะเวลาไหลแผ่ของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่เวลาของการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-Funnel) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผสมเพิ่มเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ เนื่องจากลักษณะอนุภาคของเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ มีลักษณะเป็นเส้น เรียว ผิวเรียบ ทึบตันไม่กลวง ไม่มีลักษณะที่กลมมนที่ช่วยในการไหลและเกิดการกระจายตัวของเส้นใยแบบไม่เป็นระเบียบจึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ ระยะเวลาการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-Funnel) เพิ่มขึ้นและระยะเวลาไหลแผ่ลดลงตามร้อยละการผสมเพิ่มเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ที่มากขึ้น



รูปที่ 12 ระยะเวลาไหลแผ่ของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง



รูปที่ 13 เวลาในการไหลของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง



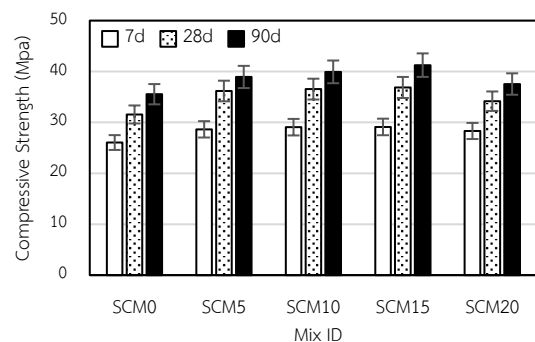
รูปที่ 14 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองที่มีการผสมเพิ่มเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) มีแนวโน้มแปรผันตามปริมาณการผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยมอร์ตาร์ควบคุม มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเมื่อเวลาผ่านไป 130 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเมื่อเวลาผ่านไป 200 นาที พิจารณาปริมาณการผสมเพิ่มเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ในปริมาณร้อยละ 5 – 20 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นอยู่ในช่วง 180-310 นาที คิดเป็นอัตราเพิ่มขึ้น 1.38-2.38 เท่า เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายอยู่ในช่วง 280-370 นาที คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้น 1.4-1.85 เท่า เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองในทุกส่วนผสมที่มีการผสมเพิ่มเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) กับระยะเวลาพบว่าค่าระยะเวลาในการก่อตัวอยู่ในช่วงยอมรับได้ตามมาตรฐานกำหนด เท่ากับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายไม่มากกว่า 375 นาที

### 3.3 สมบัติของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองในสภาวะแข็งตัว

#### 3.3.1 กำลังอัด (Compressive Strength)

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์เป็นการบ่มในน้ำ โดยระยะเวลาในการบ่มกำหนด 7, 28, และ 90 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 15 พบว่าที่อายุ 90 วัน กำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์เรียงตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 38.25, 37.93, 37.54, 35.54 และ 32.98 เมกะปาสคาล (Mpa) สำหรับส่วนผสม SCM15, SCM10, SCM5, SCM20 และ SCM0 ตามลำดับ กำลังอัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณขยะจากแผงวงจรพิมพ์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณขยะจากแผงวงจรพิมพ์เพิ่มสูงขึ้นจนถึงร้อยละ 15 โดยค่ากำลังอัด หลังจากนั้นค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง แต่ยังคงสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม

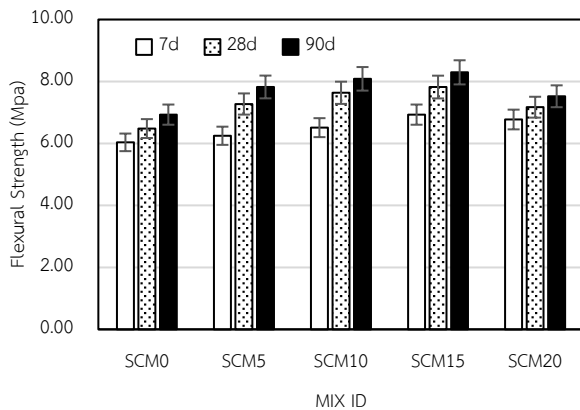


รูปที่ 15 กำลังอัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

#### 3.3.2 กำลังดัด (Flexural Strength)

การทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7, 28, และ 90 วัน ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 16 พบว่าที่อายุ 90 วัน กำลังดัดสูงสุดของมอร์ตาร์เรียงตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 8.23, 8.09, 7.83, 7.80 และ 6.93

เมกะปาสคาล (Mpa) สำหรับส่วนผสม SCM15, SCM10, SCM5, SCM20 และ SCM0 ตามลำดับ กำลังตัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณขยะจากแผงวงจรพิมพ์ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยกำลังตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณขยะจากแผงวงจรพิมพ์เพิ่มสูงขึ้นจนถึงร้อยละ 15 โดยค่ากำลังตัดหลังจากนั้นค่ากำลังตัดมีแนวโน้มลดลง แต่ยังคงสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม



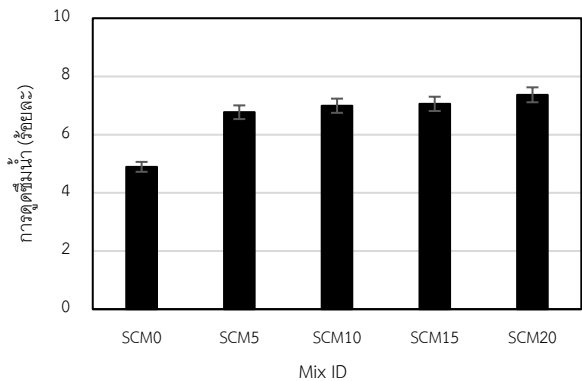
รูปที่ 16 กำลังตัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัดสูงสุดกับกำลังตัดสูงสุดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองในทุกส่วนผสมที่มีการผสมเพิ่มเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) พบว่า กำลังตัดสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 21.69 ของกำลังอัดสูงสุด ซึ่งการรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจากปกติ คือประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัดสูงสุด จึงพบว่าเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดโดยปริมาณผสมเพิ่มเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ที่เหมาะสมจึงไม่ควรเกินร้อยละ 15

### 3.3.3 ร้อยละการดูดซึมน้ำ (water absorption)

ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองทดสอบที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 17) เมื่อพิจารณาผลการทดสอบพบว่าร้อยละการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผสมเพิ่มของเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ที่เพิ่มขึ้น โดยที่มอร์ตาร์ SCM0, SCM5, SCM10, SCM15 และ SCM20 มีร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 4.89, 6.99, 7.06 และ 7.37 ตามลำดับ

ทั้งนี้เนื่องจากมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น อันเป็นผลมาจากปัจจัยร่วมกันของลักษณะรูปทรง ด้วยลักษณะของเส้นใยที่สั้นเรียว ขนาดเล็ก ทำให้อนุภาคของเส้นใยกระจายตัวทั่วเนื้อวัสดุประสานทำให้มีโพรงช่องว่างและการดูดซึมน้ำของอนุภาคเส้นใยขนาดเล็กทรอนิกส์ซึ่งเมื่อผสมเข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลทำให้มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

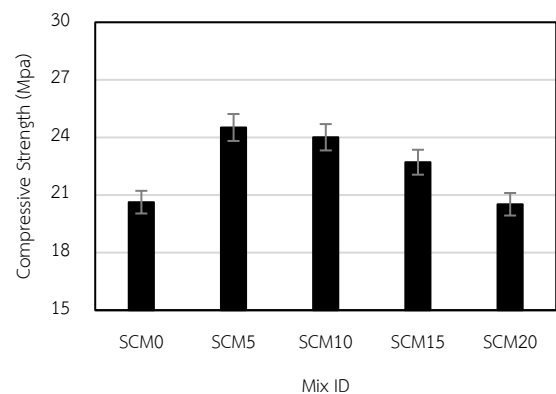


รูปที่ 17 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

### 3.3.4 ความคงทนจากสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดจากสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง ทดสอบที่อายุ 90 วัน (รูปที่ 18) เมื่อพิจารณาผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการผสมเพิ่มของเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ที่เพิ่มขึ้น โดยที่มอร์ตาร์ SCM0, SCM5, SCM10, SCM15 และ SCM20 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 20.63, 24.52, 24.01, 22.71 และ 20.52 เมกะปาสคาล (Mpa) ตามลำดับ

ผลของสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกต่อมอร์ตาร์ผสมเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักที่มากขึ้นตามปริมาณการผสมเส้นใยที่มากขึ้น กำลังรับแรงอัดจึงมีแนวโน้มต่ำลงตามการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเกิดจากการทำปฏิกิริยากับเพสต์เป็นหลัก ดังนั้นพฤติกรรมการกัดกร่อนที่กระทำกับมอร์ตาร์จึงเป็นการกัดเซาะที่อยู่รอบๆผิวของมอร์ตาร์ด้วยลักษณะของเส้นใยที่สั้นเรียว ขนาดเล็ก กระจายตัวทั่วเนื้อวัสดุประสานทำให้พื้นที่ผิวรอบนอกของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์มีลักษณะขรุขระ ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกมากขึ้น ทำให้เกิดการกัดกร่อนที่สูงขึ้นหากสัดส่วนผสมเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 18 กำลังอัดจากสภาวะการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก

#### 4. สรุป

4.1 เส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ที่นำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม (Admixture) มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , และ  $\text{CaO}$  เท่ากับ 54.30, 19.14, 0.01 และ 21.03 ตามลำดับ ในขณะที่องค์ประกอบทางกายภาพ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น และดัชนีกำลังมีค่าต่ำปุ่นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

4.2 มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองต้องการปริมาณสารลดน้ำพิเศษเมื่อคงระยะเวลาไหลที่กำหนด รวมถึงระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละการผสมเพิ่มของเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์เพิ่มขึ้น

4.3 มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีความสามารถในการไหลผ่านที่ต่ำลง ในขณะที่เวลาการไหลผ่านกล่องแบนรูปทรงวี (V-Funnel) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละการผสมเพิ่มของเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์เพิ่มขึ้น แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

4.4 การผสมรวมเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์มอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองช่วยเพิ่มกำลังอัดและกำลังคัต ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ควบคุมประมาณร้อยละ 10

4.5 ร้อยละการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผสมเพิ่มของเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ (PCBs) ที่เพิ่มขึ้น

4.6 ผลของสภาวะการกักตัวของกรดซัลฟูริกต่อมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเองผสมเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์ ส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงร้อยละ 62.98, 60.13, 58.04, 55.05 และ 54.66 เมกะปาสคาล (Mpa) เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ผ่านการกักตัวของกรดซัลฟูริก สำหรับส่วนผสม SCM5, SCM10, SCM0, SCM15 และ SCM20 ตามลำดับ

4.7 ปริมาณเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำเส้นใยจากการรีไซเคิลแผงวงจรพิมพ์มาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มไม่ควรเกินร้อยละ 15 สำหรับการนำไปใช้ในมอร์ตาร์ไหลอัดแน่นด้วยตนเอง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัย ได้รับทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คุณวรงค์ รัตนจิโรจน์ ที่ให้การสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการศึกษา และคุณนพดล มังกรทอง เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่อำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทดสอบ

#### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Makul, N., Sua-lam, G., and Sokrai, P. (2015). Properties of self-compacting mortar made with binary and ternary cementitious blend of untreated rice husk ash

and silica fume. *Engineering Journal of Research and Development*, 26(3), pp.33-41.

- [2] Sua-iam, G., and Chatveera, B. (2021). A study on workability and mechanical properties of eco-sustainable self-compacting concrete incorporating PCB waste and fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 329, 129523.
- [3] Turk, K. (2012). Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 37, pp.321-330.
- [4] พิรนาฎ คิตติ (2559). การขับเคลื่อนและอุปสรรคของการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, ปีที่ 8, ฉบับที่ 8, หน้า 130-148.
- [5] โมกข์ ต้นติपालกุล (2559). สภาพการณ์ในการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ของภาครัฐและประชาชนในเขตกรุงเทพมหานคร. วารสารระบบสารสนเทศด้านธุรกิจ (JISB), ปีที่ 2, ฉบับที่ 3, หน้า 11-20.
- [6] Huang, K., Guo, J., and Xu, Z. (2009). Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, 164, pp.399-408.
- [7] กฤตภาส บัวศิริ และคณะ. (2563). ความสามารถในการต้านทานแรงดัดของมอร์ตาร์ผสมขยะอิเล็กทรอนิกส์แบบเส้นใย. ปรินญาณิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.
- [8] Nagajothi, P.G., and Felixkala, T. (2014). Compressive strength of concrete incorporated with efiber waste. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(4), pp.23-27.
- [9] Wang, R., Zhang, T., and Wang, P., (2012). Waste printed circuit boards nonmetallic powder as admixture in cement mortar. *Materials and Structures*, 45 pp.1439-1445.
- [10] American Society for Testing and Material. (2014). ASTM C150/C150M Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.01, Eagan, MN, USA.
- [11] American Society for Testing and Material. (2013). ASTM C618-12a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in



- concrete. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Eagan, MN, USA.
- [12] American Society for Testing and Material. (2013). ASTM C33/C33M-13 Standard Specification for Concrete Aggregate. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Eagan, MN, USA.
- [13] American Society for Testing and Material. (2013). ASTM C494/C494M-13 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Eagan, MN, USA.
- [14] American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM C672-01, Standard test method for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Eagan, MN, USA.
- [15] Okamura, H., and Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advance Concrete Technology*, 1, pp. 6-12.
- [16] European Federation of national trade associations representing producers and applicators of specialist building products (EFNARC). (2005). *The European and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Surrey, UK.
- [17] American Society for Testing and Material. (2002). ASTM C305 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Eagan, MN, USA.
- [18] American Society for Testing and Material. (2002). ASTM C349-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Eagan, MN, USA.
- [19] American Society for Testing and Material. (2002). ASTM C348-02 Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars; ASTM International). Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Eagan, MN, USA.
- [20] American Society for Testing and Material. (2013). ASTM C1403 Standard test method for water absorption. Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Eagan, MN, USA.