

สมบัติทางด้านซีเมนต์ของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามิเนต จากขยะอิเล็กทรอนิกส์

Cementitious Properties of Cement Paste mixed with Laminated Powder from Electronic Waste

กฤษดา เสือเอี่ยม^{1*} อติศักดิ์ ข่ายม่าน¹ บุรฉัตร ฉัตรวีระ¹ และ ณัฐฐ์ มากุล²

Gritsada Sua-iam^{1*}, Adisak Khymarn¹, Burachat Chatveera¹ and Natt Makul²

Received: 13 April 2020, Revised: 5 June 2020, Accepted: 10 June 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางด้านซีเมนต์ของซีเมนต์เพสต์ผสมขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Waste) ในรูปของผงลามิเนต ซึ่งเป็นขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้กลับมาใช้ประโยชน์ เป็นวัสดุซีเมนต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกแทนที่ด้วยผงลามิเนตที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุ สมบัติของซีเมนต์เพสต์ในสภาวะยังไม่แข็งตัวและแข็งตัวแล้ว ผลการทดสอบพบว่า ผงลามิเนตมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 35.95 ความต้องการน้ำและระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามิเนตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นและกำลังอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งผลของการผสมผงลามิเนตมีนัยยะสำคัญในการลดความหนาแน่นแบบแห้งและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์

คำสำคัญ: ขยะอิเล็กทรอนิกส์, ผงลามิเนต, สมบัติทางด้านซีเมนต์, กำลังอัด, การนำความร้อน

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Campus, 99 Moo 18, Paholayothin Road, Klong Nueng, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand.

² สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร 9 ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

² Department of Civil Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, 9 Chaeng Watthana Road, Anusawari, Bang Khen, Bangkok 10220, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): gritsada.s@rmutp.ac.th

ABSTRACT

The objective of this research was to study the cementitious properties of cement paste mixed with electronic-laminated powder (EP), electronic waste and non-degradable, as a cement material. Portland cement Type 1 was partially replaced by EP at a replacement rates of 10, 20, 30, 40 and 50 % by weight. The chemical and physical properties of EP were studied. Properties of fresh and hardened paste were tested. The results showed that EP had silicon dioxide (SiO_2) as a main component of 35.95 % by mass. Water requirement and setting time of EP-cement paste increased as the replacement rate increased. However, the density and compressive strength decreased as the replacement rate increased. In addition, the effect of EP mixed can significantly reduce the dry density and the thermal conductivity property of cement pastes.

Key words: electronic waste, laminated powder, cementitious properties, compressive strength, thermal conductivity

บทนำ

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในการสร้างขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Waste from Electrical and Electronic Equipment, WEEE) ปริมาณมากในแต่ละปี โดยขยะอิเล็กทรอนิกส์หมายถึง ซากเครื่องใช้หรืออุปกรณ์ ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กในการทำงานที่ไม่ได้ตามมาตรฐาน (Off-specification) หรือหมดอายุการใช้งานหรือล้าสมัย (Pollution Control Department, 2016) ซึ่งขยะอิเล็กทรอนิกส์นี้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำ ทำการรีไซเคิล หรือการกำจัดทิ้ง แต่สำหรับในประเทศไทยการจัดการกับขยะอิเล็กทรอนิกส์ยังไม่มีวิธีการกำจัดที่เหมาะสมทำให้มีปริมาณขยะดังกล่าวตกค้างจนอาจเป็นปัญหากับชีวิตและสภาพแวดล้อมทั้งในระยะ

สั้นและระยะยาว (Senthil Kumar and Baskar, 2015) โดยจากข้อมูลรายงานของ E-Waste Green Network (2020) พบว่าปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก ในปี พ.ศ. 2559 มีปริมาณ 44.7 ล้านตันต่อปี และคาดการณ์ว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 49.8 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2561 และ 52.2 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2564 ตามลำดับ โดยเฉพาะในประเทศไทยมีการคาดการณ์ปริมาณซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ใน พ.ศ. 2559 จะมีประมาณ 393,070 ตันต่อปี เพิ่มขึ้นจาก พ.ศ. 2558 ร้อยละ 2.29 ที่คาดการณ์ว่ามีประมาณ 384,233 ตันต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 1 (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2017)

ตารางที่ 1 ปริมาณการเกิดซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับประเทศไทย ในช่วงปี พ.ศ. 2557-2559 (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2017)

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	ปริมาณซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ตัน/ปี)		
		พ.ศ. 2557	พ.ศ. 2558	พ.ศ. 2559
1	โทรทัศน์	103,610	106,335	108,781
2	เครื่องปรับอากาศ	73,469	74,799	76,519
3	ตู้เย็น	64,540	65,765	67,278
4	เครื่องซักผ้า	60,282	60,492	61,883
5	คอมพิวเตอร์	55,195	57,058	58,370
6	เครื่องเล่นวีซีดี/ดีวีดี	17,859	17,912	18,324
7	โทรศัพท์	1,658	1,682	1,721
8	กล้องถ่ายรูปดิจิตอล	188	190	194
รวม		376,801	384,233	393,070

เนื่องจากส่วนประกอบของขยะอิเล็กทรอนิกส์มีแร่โลหะที่มีมูลค่าสูง อาทิ ทองคำ เงิน ทองแดง อะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นในหลายอุตสาหกรรมจึงมีแนวทางในการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยสามารถสร้างผลตอบแทนสูงหลายเท่าตัว ดังเช่นในประเทศไทยมีปริมาณการนำเข้าขยะอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า 50,000 ตัน จากประเทศญี่ปุ่น ฮองกง และสิงคโปร์ มาบำบัดและแปรรูปในโรงงานมากกว่าร้อยละ 98 โดยขยะอิเล็กทรอนิกส์ได้แก่ โทรศัพท์มือถือ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ (Isranews Agency, 2018) อย่างไรก็ตามสำหรับประเทศไทย ซึ่งการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ยังมีปัญหาเกี่ยวกับระบบการจัดการที่ครบวงจรตั้งแต่การผลิตสินค้าอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การเก็บรวบรวมที่ยังไม่สามารถคัดแยกออกเพื่อนำไปบำบัดกำจัดแยกต่างหากจากการจัดการขยะทั่วไปตามหลักการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดี ทำให้อาจเกิดอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในระบบนิเวศน์ นอกจากนี้ประเทศไทยยังไม่มีกฎหมายเกี่ยวกับการจัดการสิ่งแวดล้อมของเสีย

อันตรายประเภทขยะอิเล็กทรอนิกส์หรือซากผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่อย่างใด (Nakornjan and Sopa, 2018)

ในบรรดาขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่พบในปริมาณสูงจะเป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยเมื่อนำมาทำการบดย่อยเศษซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีทองแดงบริสุทธิ์ ไยแก้ว และเทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) ในลักษณะผงละเอียดจากการย่อยเศษซากวัสดุชนิดนี้สูงถึง 8.3-9.1 ล้านตัน (Marques *et al.*, 2013) โดยผงที่ได้จากการบดย่อยเศษซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีความละเอียดสูง มีการนำความร้อนต่ำและน้ำหนักเบา ทำให้มีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำผงที่ได้จากการบดย่อยเศษซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม (Ban *et al.*, 2005) หรือแทนที่มวลรวมในมอร์ต้าร์ (Nagajothi and Felixkala, 2015; Premur *et al.*, 2016) และคอนกรีต (Senthil Kumar and Baskar, 2015; Patidar *et al.*, 2017; Bala Subramanian *et al.*, 2018) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของ

งานวิจัยนี้จึงมีความแตกต่างและนับเป็นสิ่งใหม่ในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตทั้งในสภาวะยังไม่แข็งตัวและแข็งตัวแล้วเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเชิงลึกถึงผลกระทบดังกล่าวต่อสมบัติของคอนกรีตต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

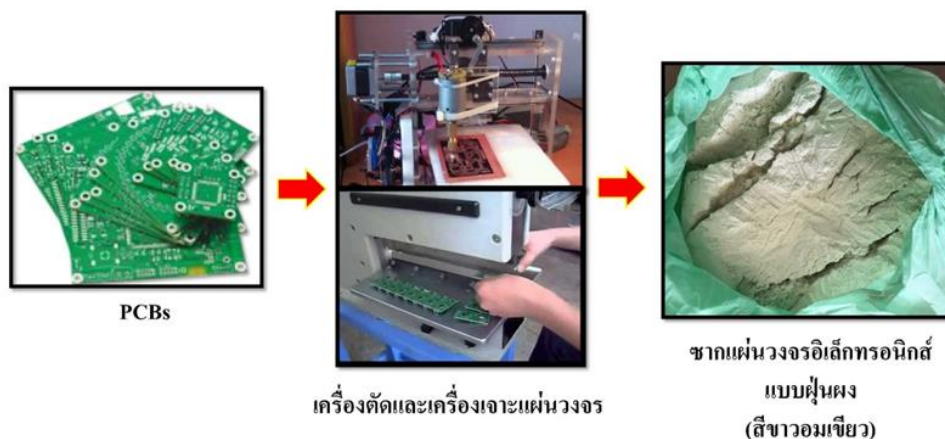
วิธีการดำเนินการวิจัยประกอบได้ด้วย วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ การเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุ

1.1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 (ASTM, 2018a)

1.2. ผุ่นผงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือ “ผงลามีเนต (Ground electronic-laminated powder (EP))” มีลักษณะเป็นผุ่นแป้งสีขาวอมเขียวอ่อนซึ่งได้มาจากกระบวนการตัดหรือเจาะแผ่นวงจรเพื่อนำมาขึ้นรูปและใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิต (Printed Circuit Board: PCBs) ดังแสดงในภาพที่ 1

1.3. น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) เท่ากับ 7.5



ภาพที่ 1 กระบวนการตัดแผ่นหรือเจาะแผ่นวงจร

2. สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์

สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตถูกกำหนดโดยทำการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุผง (water-to-powder ratio) กำหนด

จากความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ในแต่ละสัดส่วนผสม เมื่อเข็มไวแคตจมลงในซีเมนต์เพสต์ 10 ± 1 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 30 วินาที โดย EPz คือ ซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตบดซึ่งแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนร้อยละ z โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ควมและซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต

ส่วนผสม	สัดส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงลามีเนต
EPO (ซีเมนต์เพสต์ควม)	100	-
EP10	90	10
EP20	80	20
EP30	70	30
EP40	60	40
EP50	50	50

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

สำหรับขั้นตอนการผสมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตเป็นไปตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) หลังจากทำการผสมซีเมนต์เพสต์ตามสัดส่วนผสมที่กำหนดแล้วจึงทำการทดสอบสมบัติของซีเมนต์เพสต์ในสภาวะยังไม่แข็งตัวตามมาตรฐาน ASTM จากนั้นจึงทำการเทลงแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. × 5 ซม. × 5 ซม. ทำการอัดแน่นและปิดคลุมด้วยแผ่นพลาสติกเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจึงทำการแกะแบบและบ่มในน้ำจนถึงอายุการทดสอบ การทดสอบสมบัติทางด้านซีเมนต์ของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต ได้แก่

1. ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ตามมาตรฐาน ASTM C187 (ASTM, 2018b) โดยการนำซีเมนต์เพสต์ที่ผสมแล้วใส่ลงในวงแหวนรูปกรวย (Conical Ring) วางบนเครื่องทดสอบ Vicat Consistency Apparatus รุ่น H-3050 ของ Humboldt ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้แกนเหล็ก (Plunger) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. น้ำหนัก 300 กรัม เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมจากระยะการจมลงของแกนเหล็กในซีเมนต์เพสต์ 10 ± 1 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 30 วินาที

2. ระยะเวลาการก่อตัว (Setting time) ตามมาตรฐาน ASTM C191 (ASTM, 2018c) โดยการนำซีเมนต์เพสต์ที่ผสมแล้วใส่ลงในวงแหวนรูปกรวย (Conical Ring) วางบนเครื่องทดสอบ Vicat Consistency Apparatus รุ่น H-3050 ของ Humboldt ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้เข็มทดสอบ (Needle) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. ยาว 50 มม. เพื่อวัดระยะการจมลงของเข็มทดสอบในซีเมนต์เพสต์ภายในระยะเวลา 30 วินาที ทั้งนี้ระยะเวลาที่เข็มทดสอบจมลงในซีเมนต์เพสต์ 25 มิลลิเมตร หมายถึงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาที่เข็มทดสอบไม่สามารถจมลงในซีเมนต์เพสต์ได้ หมายถึงการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time)

3. กำลังอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C109 (ASTM, 2018d) โดยการนำตัวอย่างทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. × 5 ซม. × 5 ซม. ซึ่งทำการบ่มในน้ำจนถึงอายุทดสอบที่ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ มาทำการทดสอบหาแรงกดสูงสุดที่ตัวอย่างทดสอบรับได้ด้วยเครื่อง Concrete Compression Machine รุ่น MC-250 CPF ของ Gilson ประเทศสหรัฐอเมริกา จากนั้นทำการคำนวณค่ากำลังอัด ได้จากสมการที่ (1)

$$\text{กำลังอัด (MPa)} = \text{แรงกดสูงสุด (kN)} / \text{พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกด (mm}^2\text{)} \quad (1)$$

4. ค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต โดยหลังจากบ่มแห้งตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน นำไปอบในเตาอบ (Drying and heating chambers) รุ่น ED 115 ของ BINDER ประเทศเยอรมัน ที่อุณหภูมิ 105°C

เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกระทั่งมีมวลคงที่และทำการชั่งน้ำหนักแห้ง (W_1) จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการชั่งน้ำหนักเปียก (W_2) ทำการคำนวณค่าร้อยละการดูดซึมน้ำได้จากสมการที่

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = [(W_2 - W_1) / W_1] \times 100 \quad (2)$$

5. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต มีขั้นตอนการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน EN12667 (BS, 2001) ด้วยเครื่องมือ Hot Disk Thermal Constants Analyzer รุ่น TPS 2500 S ของ Hot Disk AB ประเทศสวีเดน

เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 65.56 รองลงมาคือซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 19.96 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 4.99 และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 2.68 น้ำหนักที่หายไปจากการเผา (LOI) ร้อยละ 0.19 พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3,376 cm^2/g . และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ในขณะที่ผงลามีเนต มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 35.95 รองลงมาคือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 13.94 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 10.87 และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 1.33 น้ำหนักที่หายไปจากการเผา (LOI) ร้อยละ 37.55 พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1,258 cm^2/g . และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.20

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. องค์ประกอบเคมีและสมบัติกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงลามีเนต

องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงลามีเนต แสดงได้ดังตารางที่ 3 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงลามีเนต

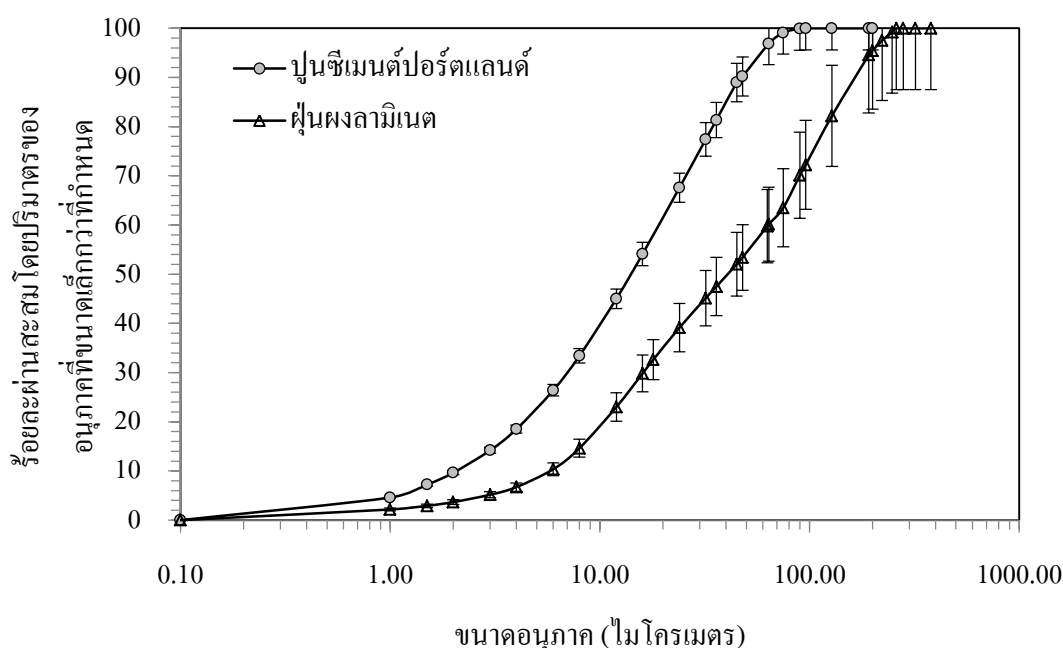
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ผงลามีเนต
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
Silicon Dioxide (SiO_2)	19.96	35.95
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.99	10.87
Iron Oxide (Fe_2O_3)	2.68	1.33
Calcium Oxide (CaO)	65.56	13.94
Magnesium Oxide (MgO)	1.18	0.40
Potassium Oxide (K_2O)	0.48	0.00

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1		ผงลามีเนต
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.08	0.09
Sulfur Trioxide (SO ₃)	2.22	0.21
Loss on Ignition (LOI)	0.96	37.55
สมบัติทางกายภาพ		
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.19	0.79
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ม ² /ก.)	3,376	1,258
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	1.20
ความหนาแน่น (กก/ม ³)	1,316	710
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร, μm)	14.06	40.8

เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Size Particle) และการกระจายขนาดคละ (Particle Size Distribution) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงลามีเนต โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer ผลการทดสอบพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดอนุภาค

เฉลี่ยเล็กกว่าผงลามีเนต โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 14.06 ไมโครเมตร และขนาดเฉลี่ยอนุภาคของผงลามีเนต เท่ากับ 40.8 ไมโครเมตร โดยการกระจายขนาดคละ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงลามีเนต แสดงดังภาพที่ 2



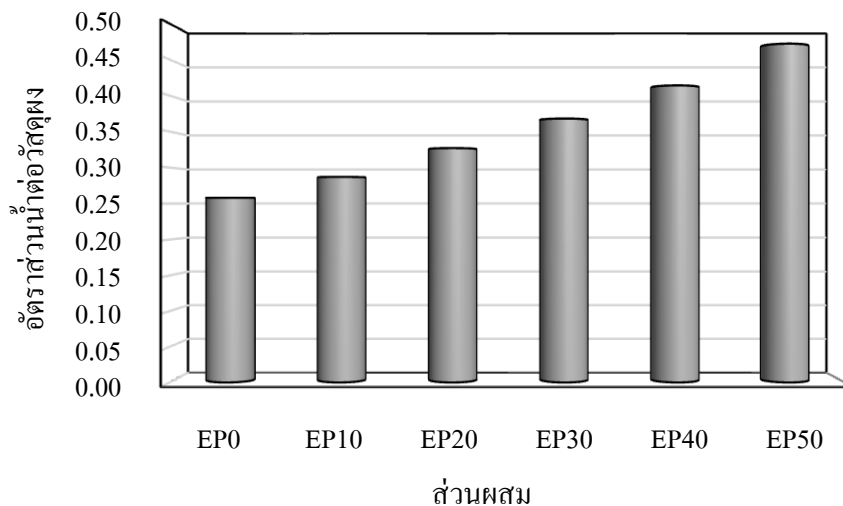
ภาพที่ 2 การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงลามีเนต

2. สมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามิเนตในสถานะยังไม่แข็งตัว

2.1 ความชื้นเหลวปกติ

ปริมาณน้ำในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์เพื่อให้ได้ค่าความชื้นเหลวปกติ เมื่อเข็มโวลูเมตริกจมลงในซีเมนต์เพสต์ 10 ± 1 มิลลิเมตร ภายในระยะเวลา 30 วินาทีของแต่สัดส่วนผสม พบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงลามิเนตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมซึ่งแสดงในรูปของอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุผง (water-to-powder ratio) เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 3 โดยอัตราน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้นจาก 0.26, 0.29, 0.33, 0.37, 0.41 และ 0.46 เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ

ละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากผงลามิเนตที่ได้จากการการบดย่อยเศษซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มีความพรุนสูง (Nagajothi and Felixkala, 2015) ส่งผลให้มีการดูดซับน้ำที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 รวมถึงฝุ่นที่อาจมีปะปนมากับผงลามิเนตที่ได้จากการบดย่อยเศษซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าที่พบว่า การเพิ่มขึ้นของขยะอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตลดลง (Senthil Kumar and Baskar, 2015; Patidar *et al.*, 2017; Bala Subramanian *et al.*, 2018)



ภาพที่ 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามิเนต

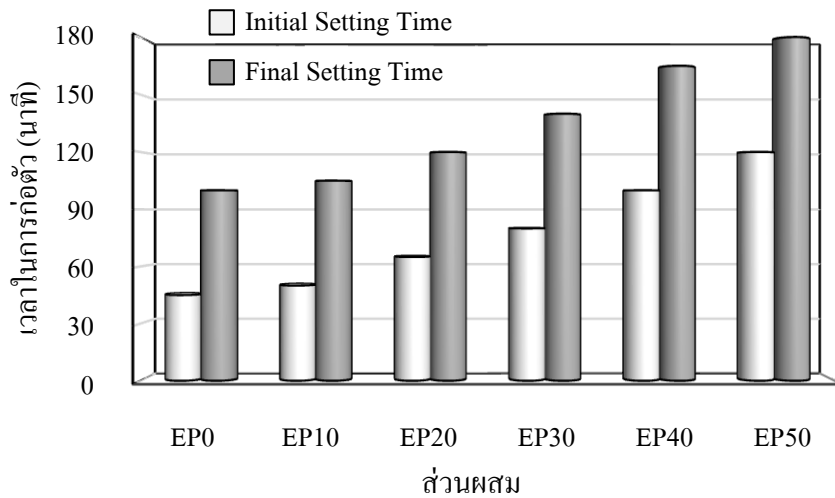
2.2 ระยะเวลาการก่อตัว

เมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงลามิเนตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4 การก่อตัวระยะต้นเพิ่มขึ้นจาก 45 นาที เป็น 50, 65, 80, 100 และ 120 นาที และการก่อตัวระยะปลายเพิ่มขึ้นจาก 100 นาที เป็น 105, 120, 140, 165 และ 190 นาที เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0,

10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณความต้องการน้ำในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้นจากการแทนที่ผงลามิเนตเพิ่มมากขึ้น จากผลของปริมาณน้ำในส่วนผสมมากเกินไปจนทำให้มีน้ำส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ซึ่งส่งผลหน่วงการก่อตัวของเพสต์ด้วย รวมถึงปริมาณแคลเซียมออกไซด์ของเพสต์ที่ลดลงเนื่องจากปริมาณการแทนที่ผงลามิเนตในปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการ

เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงตามไปด้วย



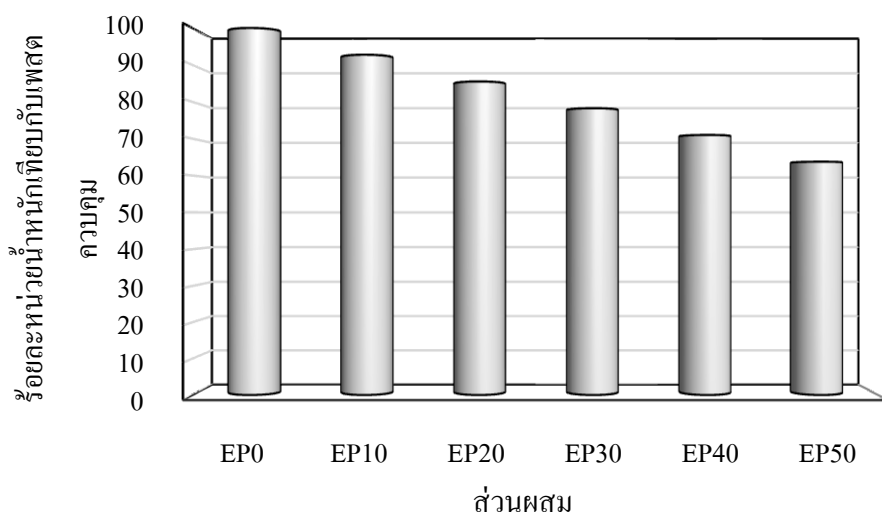
ภาพที่ 4 เวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต

3. สมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตในสถานะแข็งตัวแล้ว

3.1 ความหนาแน่นแห้ง

เมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงลามีเนตเพิ่มขึ้นส่งผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งของซีเมนต์เพสต์ลดลงดังภาพที่ 5 โดยหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม (EP0 = 2,184 kg/m³) เท่ากับ

ร้อยละ 7, 14, 22, 29 และ 36 ตามลำดับ เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของผงลามีเนต (1.20) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (3.15) ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ลดลง (Senthil Kumar and Baskar, 2015; Patidar *et al.*, 2017; Marques *et al.*, 2013)

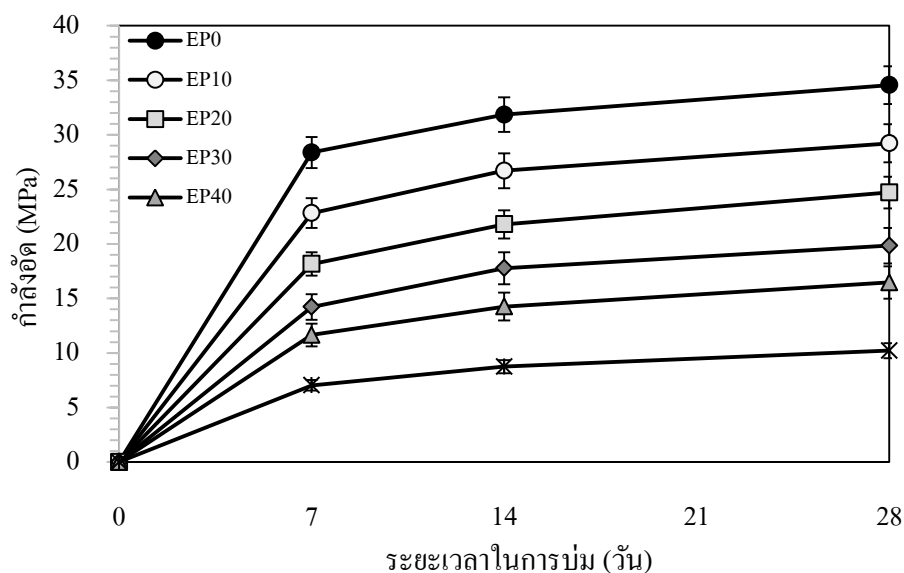


ภาพที่ 5 ร้อยละหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม

3.2 กำลังอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดแสดงได้ในภาพที่ 6 โดยปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงละอามิเนตเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมผงละอามิเนตลดลง สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ที่แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ขะจากการบดย่อยเศษซากแพลงจรรออิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น (Senthil Kumar and Baskar, 2015; Patidar *et al.*, 2017; Bala Subramanian *et al.*, 2018; Nagajothi and Felixkala, 2015; Premur *et al.*, 2016) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ส่วนผสม EP0 เท่ากับ 28.4, 31.9 และ 34.6 เมกะปาสกาล, EP10 เท่ากับ 22.8, 26.7 และ 29.2 เมกะปาสกาล, EP20 เท่ากับ 18.2, 21.8 และ 24.7 เมกะปาสกาล, EP30 เท่ากับ 14.2, 17.8 และ 19.8 เมกะปาสกาล, EP40 เท่ากับ 11.7, 14.3 และ 16.5 เมกะปาสกาล, และ EP50 เท่ากับ 7.0, 8.7 และ 10.2 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อปริมาณการแทนที่ของผงละอามิเนตที่เพิ่มขึ้นจากร้อย

ละ 10, 20, 30, 40 และ 50 มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมผงละอามิเนตที่อายุ 7 วันลดลง เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม เท่ากับร้อยละ 20, 36, 50, 59 และ 75 ตามลำดับ กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมผงละอามิเนตที่อายุ 14 วันลดลงเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมเท่ากับร้อยละ 16, 32, 44, 55 และ 73 ตามลำดับ และกำลังอัดของเพสต์ผสมผงละอามิเนตที่อายุ 28 วันลดลง เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุมร้อยละ 15, 28, 43, 52 และ 70 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณความต้องการน้ำในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ผสมผงละอามิเนตเพิ่มมากขึ้นจากการแทนที่ผงละอามิเนตเพิ่มมากขึ้น จากผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงละอามิเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ลดลงซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สร้างกำลังให้กับซีเมนต์เพสต์จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ลดลง ทำให้การพัฒนากำลังอัดลดลงตามไปด้วย

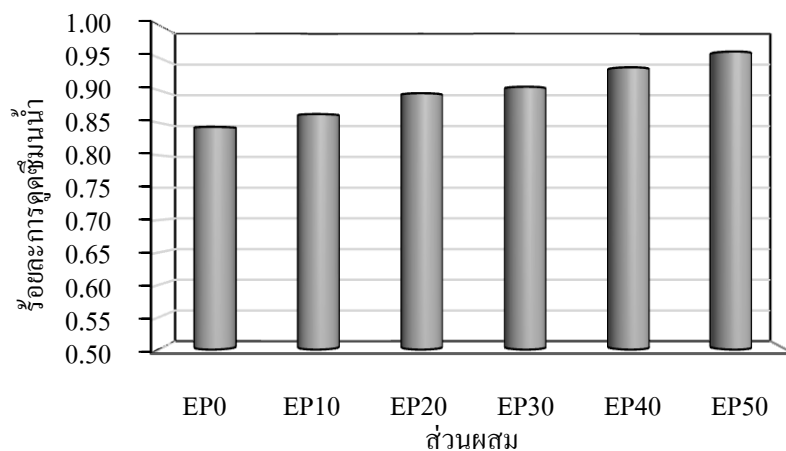


ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาในการบ่มของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสมผงละอามิเนต

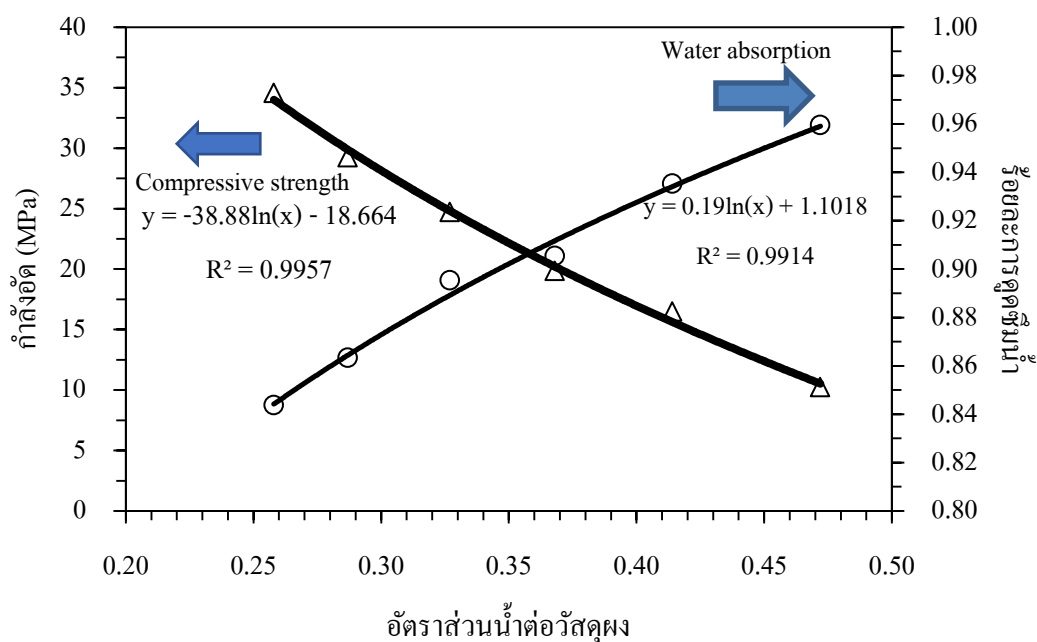
3.3 การดูดซึมน้ำ

จากการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงลามีเนตเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังภาพที่ 7 การดูดซึมน้ำของเพสต์ผสม ผงลามีเนตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.84 เป็นร้อยละ 0.86, 0.89, 0.90, 0.94 และ 0.96 เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0, 10, 20, 30,

40 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากความต้องการน้ำในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณการแทนที่ของผงลามีเนต (Nagajothi and Felixkala, 2015) ส่งผลให้มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำระเหยออกไป เมื่อซีเมนต์เพสต์แข็งตัวทำให้เกิดเป็นโพรงช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์



ภาพที่ 7 ร้อยละการดูดกลืนน้ำของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงกับกำลังอัดและร้อยละการดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต

จากภาพที่ 8 แสดงถึงความความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและการดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ เห็นได้ว่าร้อยละการดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง

เพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์ในลักษณะลอการิทึม (Logarithm) กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง ดังสมการที่ (3)

$$y = 0.1902\ln(x) + 1.1018 \quad (3)$$

เมื่อ y คือร้อยละการดูดซึม และ x คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงและกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังอัดของซีเมนต์

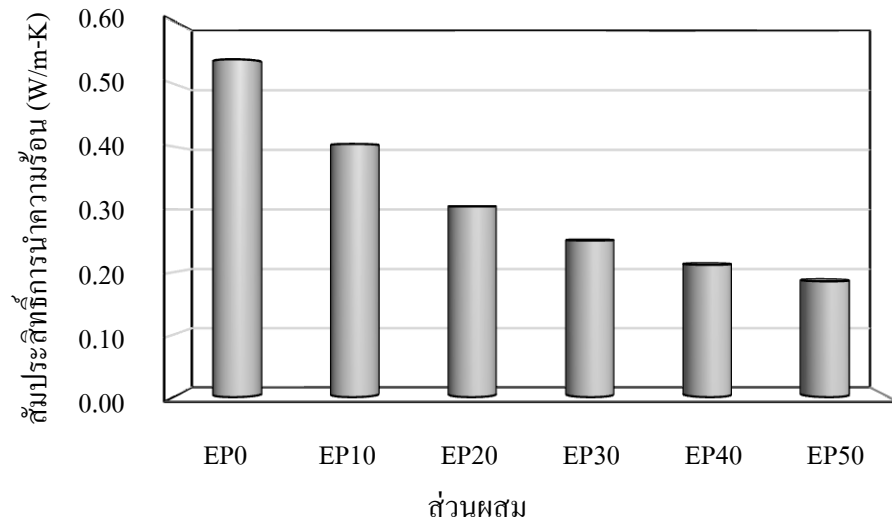
เพสต์ลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้น เป็นความสัมพันธ์ในลักษณะลอการิทึม (Logarithm) ดังสมการที่ (4)

$$y = -38.88\ln(x) - 18.664 \quad (4)$$

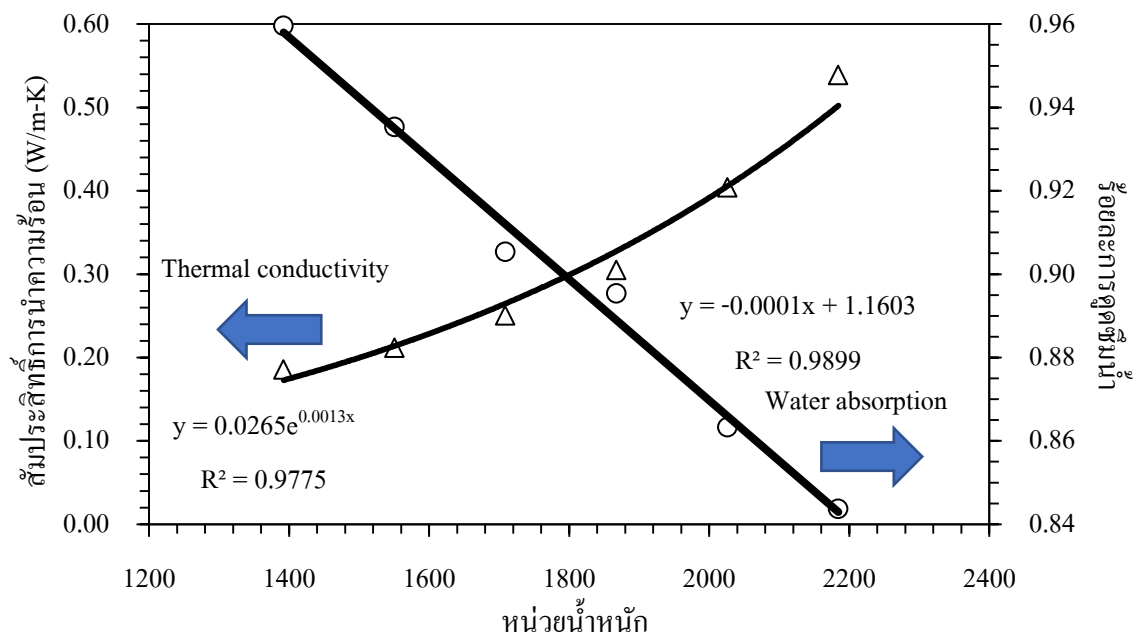
เมื่อ y คือกำลังอัด และ x คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง หรือร้อยละการดูดซึมน้ำลดลงส่งผลให้แนวโน้มกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ลดลงและความต้องการน้ำในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โพรงและช่องว่างที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์ผสมผงละมุนนิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากความพรุนของผงละมุนนิ (Nagajothi and Felixkala, 2015)

3.4 การนำความร้อน

จากการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงละมุนนิเพิ่มขึ้นส่งผลให้การนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมผงละมุนนิลดลงดังภาพที่ 9 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ลดลงจาก 0.54 เป็น 0.40, 0.30, 0.25, 0.21 และ 0.19 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m-k) เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์แปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์



ภาพที่ 9 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและร้อยละการดูดซับน้ำของซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต

จากภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและการนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์พบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์

ผสมผงลามีเนตเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น เป็นความสัมพันธ์ในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) ดังสมการที่ (5)

$$y = 0.0265e^{0.0013x}$$

(5)

เมื่อ y คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและ x คือหน่วยน้ำหนัก ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและร้อยละการดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตซึ่งจะเห็นได้ว่าร้อยละการดูด

ซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ลดลงเมื่อหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น เป็นความสัมพันธ์ในลักษณะลอการิทึม (Logarithm) เช่น กัน ดัง สมการ ที่ (6)

$$y = -0.0001x + 1.1603 \quad (6)$$

เมื่อ y คือร้อยละการดูดซึมน้ำ และ x คือหน่วยน้ำหนัก หรือสรุปได้ว่าร้อยละการดูดซึมน้ำลดลงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงขึ้น เห็นได้ว่าผงลามีเนตทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง (Marques *et al.*, 2013; Nagajothi and Felixkala, 2015) จึงมีความเป็นไปได้ในการนำผงลามีเนตไปเป็นฉนวนกันความร้อนได้อีกด้วย

สรุป

จากการศึกษาสมบัติทางด้านซีเมนต์ของซีเมนต์เพสต์ผสมขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic waste) ในรูปของผงลามีเนต โดยทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงลามีเนตจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อสรุปดังนี้

1. ผงลามีเนตมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก (ร้อยละ 35.95 โดยมวล) และมีแคลเซียมออกไซด์ (ร้อยละ 13.94 โดยมวล) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (ร้อยละ 10.87 โดยมวล) โดยมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) ร้อยละ 37.55

2. ความชื้นเหลว และระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงลามีเนตเพิ่มขึ้น

3. ความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มมากขึ้น

4. การนำความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงลามีเนตเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตมีค่าเพิ่มขึ้น

5. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดในช่วง 28 วัน หลังการผสมของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง ในขณะที่การดูดซึมน้ำของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนตแปรผันตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแปรผกผันกับความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ ในขณะที่การดูดซึมน้ำแปรผันตามความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ผสมผงลามีเนต

เอกสารอ้างอิง

- ASTM. 2018a. ASTM C150. Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Philadelphia, USA.
- ASTM. 2018b. ASTM C187. Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste. Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and

- Materials, West Conshohocken, Philadelphia, USA.
- ASTM. 2018c. ASTM C191. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Philadelphia, USA.
- ASTM. 2018d. ASTM C109. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Philadelphia, USA.
- Bala Subramanian, B., Gopala Krishna, Gvt. and Saraswathy, V. 2018. Review of Literature on Electronic Waste Materials Used in Concrete. **International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR)** 3(2): 31-35.
- Ban, B.C., Song, J.Y., Lim, J.Y., Wang, S.K., An, K.G. and Kim, D.S. 2005. Studies on the reuse of waste printed circuit board as an additive for cement mortar. **Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering** 40(3): 645-56.
- BS. 2001. BS EN 12667. Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. British Standards Institution, London, United Kingdom.
- E-Waste Green Network. 2020. **Increase amount of E-Waste**. Available Source: <https://ewastethailand.com/en/content-en/the-amount-of-electronic-waste-is-increasing-all-over-the-world-en/>, March 25, 2020.
- Isranews Agency. 2018. **Department of industrial works reveals e-waste found 'mobile - circuit board - computer' imported the highest amount**. Available Source: <https://www.isranews.org/thaireform/thaireform-news/66441-ewaste-66441.html>, March 25, 2020. (in Thai).
- Marques, A.C., Marrero, J.C., and Malfatti, C.F. 2013. A review of the recycling of non-metallic fractions of printed circuit boards. **SpringerPlus** 2(521): 1-11.
- Nagajothi, P.G. and Felixkala, T. 2015. A Study on Reusing Waste Printed Circuit Board Powders and Chips in Cement Mixes International. **Journal of Earth Sciences and Engineering** 8(2): 460-464.
- Nakornjan, C. and Sopa, S. 2018. Problem of Enforcement Law of Environment Relating to E-Waste Management in Thailand. **Journal of Pacific Institute of Management Science** 4(1): 242-259.
- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. 2017. **Environmental Quality Situation Report 2017**. Available Source: <https://www.onep.go.th/ebook/soe/soereport2017.pdf>, March 25, 2020. (in Thai).

- Patidar, S., Patidar, V., Raj, S., Nema, S. and Nim, A. 2017. E Waste as a Replacement of Aggregate in M 25 Concrete. **International Journal for Research & Development in Technology** 7(5): 384-387.
- Pollution Control Department. 2016. **Hazardous Waste Management Guideline (WEEE)**. Available Source: http://pcd.go.th/info_serv/haz_battery.htm, March 25, 2020. (in Thai).
- Premur, V., Vučinić, A.A., Vujević, D. and Bedeković, G. 2016. The Possibility for Environmental Friendly Recycling of Printed Circuit Boards. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems** 4(1): 14-22.
- Senthil Kumar, K. and Baskar, K. 2015. Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries. **Journal of Material Cycles and Waste Management** 17: 718-724.