



## โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องดื่มเป็นส่วนผสม

ณภัช พรหมรอด

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อำพล วงศ์ษา\* และ วันชัย สะตะ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ปริญญา จินดาประเสริฐ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ภาคีสมาชิก ราชบัณฑิตสภา สนามเสื่อป่า

\* ผู้พิมพ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9174 8338 อีเมล: ampowo@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.015

รับเมื่อ 19 ตุลาคม 2566 แก้ไขเมื่อ 27 ธันวาคม 2566 ตอรับเมื่อ 12 มกราคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 18 กันยายน 2567

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

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ผงตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องดื่มแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 ในทุกอัตราส่วนผสม ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว การไหลแผ่ กำลังรับแรงอัดและวิเคราะห้โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้ SEM/EDS, XRD และ MIP ผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณผงตะกอนน้ำเสียในซีเมนต์เพสต์ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัว การไหลแผ่ และกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน มีค่าลดลง จากโครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน พบว่า การเพิ่มขึ้นของผงตะกอนน้ำเสียในส่วนผสมจะส่งผลให้ความแน่นตัวและความเป็นเนื้อเดียวกันของซีเมนต์เพสต์ลดลง อย่างไรก็ตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียที่สูงถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดยังคงสูงถึงร้อยละ 82 ที่อายุ 7 วัน และร้อยละ 87 ที่อายุ 28 วัน เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม

**คำสำคัญ:** ซีเมนต์เพสต์ ตะกอนน้ำเสีย กำลังรับแรงอัด โครงสร้างทางจุลภาค



## Microstructure and Mechanical Properties of Cement Paste Containing Wastewater Sludge Powder from Beverage Factory

Naphapas Pomrod

Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Khon Khon University, Khon Kaen, Thailand

Ampol Wongsas\* and Vanchai Sata

Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Khon University, Khon Kaen, Thailand

Prinya Chindraprasirt

Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Khon University, Khon Kaen, Thailand

Academy of Science, The Royal Society of Thailand, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08 9174 8338, E-mail: ampowo@kku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.09.015

Received 19 October 2023; Revised 27 December 2023; Accepted 12 January 2024; Published online: 18 September 2024

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

### Abstract

This research aims to study the properties of cement paste containing wastewater sludge powder from a beverage factory, intending to replace Portland cement at weight ratios of 0, 10, 20, 30, and 40%. The water-to-binder ratio was consistently set at 0.3 for all mixtures. The cement paste underwent testing for flow value, setting time, compressive strength, and microstructure analysis using SEM/EDS, XRD, and MIP. The results indicated that the setting time, flow value, and compressive strength of the cement paste decreased with an increase in the amount of wastewater sludge powder in the mixture. Microstructure analysis of the cement pastes at 28 days revealed that an increase in wastewater sludge powder led to a decrease in the denseness and homogeneity of the cement paste. However, the use of 40% wastewater sludge powder by weight yielded a compressive strength of up to 82% and 87% for 7 and 28 days, respectively, compared to the control cement paste.

**Keywords:** Cement Paste, Wastewater Sludge, Compressive Strength, Microstructure

Please cite this article as: N. Pomrod, A. Wongsas, V. Sata, and P. Chindraprasirt, "Microstructure and mechanical properties of cement paste containing wastewater sludge powder from beverage factory," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 3, pp. 1–12, ID. 253-097362, Jul.-Sep. 2023 (in Thai).

## 1. บทนำ

ปูนซีเมนต์ที่เป็นวัสดุหลักในอุตสาหกรรมกรรมการก่อสร้างนั้นมีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในปริมาณมาก โดยมีวัตถุดิบหลักในการผลิตคือหินปูน ที่ได้จากการระเบิดภูเขาหินปูน ซึ่งเป็นการทำลายถิ่นอาศัยทางธรรมชาติของพืชและสัตว์ นอกจากนี้การระเบิดภูเขาและการย่อยหินปูนของโรงโม่ยังก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียงและทางอากาศต่อประชาชนที่อยู่อาศัยใกล้เคียง รวมถึงกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นยังใช้พลังงานที่ค่อนข้างมากและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ประมาณ 0.6–0.7 ตัน ต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน [1], [2] รวมถึงก๊าซอื่นๆ ที่เป็นส่วนหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก จึงเกิดความจำเป็นในการศึกษาวัสดุทางเลือกใหม่เพื่อทดแทนวัสดุหลักในอุตสาหกรรมกรรมการก่อสร้างที่มีแนวโน้มเติบโตตามเศรษฐกิจให้ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนน้อยลง

ตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องตีมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของการบริโภคที่ขยายตัวตามจำนวนประชากรในปัจจุบัน [3] โดยในโรงงานผลิตน้ำดื่มและโซดาจะมีตะกอนน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 100 ตันต่อปี ซึ่งต้องใช้งบประมาณ 400,000 บาท ในการขนส่งและนำไปกำจัด ตะกอนน้ำเสียนี้ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มาจากระบบการล้างขวด กระบวนการผลิตน้ำดื่มและโซดา และกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ตะกอนน้ำเสียเหล่านี้ยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงเป็นของเสียเหลือทิ้ง และมีความจำเป็นที่ต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีที่เหมาะสมหนึ่งในวิธีการกำจัดตะกอนน้ำเสียที่นิยม คือ วิธีการฝังกลบ [4] ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดที่มีค่าใช้จ่ายสูงจากการขนส่งและยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม [5] ดังนั้นการนำตะกอนน้ำเสียกลับมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ จึงเป็นแนวทางการกำจัดที่น่าสนใจ และเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการกำจัดตะกอนน้ำเสียอีกด้วย

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่มีการนำตะกอนน้ำเสียมาแทนที่ปูนซีเมนต์ จากงานวิจัยของ Obaidi และคณะ [6] และ Yusuf และ Noor [7] ได้ศึกษาสมบัติของตะกอนน้ำเสียพบว่าสามารถนำมาใช้งานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสม

ของซีเมนต์มอร์ต้าและคอนกรีตได้ ทำให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสามารถใช้งานก่อสร้างได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ตะกอนน้ำเสียมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกับวัสดุปอซโซลานด้วย Rusanescu และคณะ [8] ได้พบว่า ถ้าตะกอนน้ำเสียมี  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นองค์ประกอบหลัก โดยถ้าตะกอนน้ำเสียที่มีปริมาณ  $\text{P}_2\text{O}_5$  สูง อาจส่งผลเสียต่อการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ [9], [10] เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ จะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์และการพัฒนาความแข็งแรงจะใช้เวลานานมากขึ้น Chen และ Poon [11] ได้ศึกษาการใช้ถ้าตะกอนน้ำเสียแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่า ซีเมนต์มอร์ต้ามีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของถ้าตะกอน ส่งผลให้มีความสามารถในการเทได้ลดลง และการแทนที่ถ้าตะกอนที่ร้อยละ 10 ทำให้ปริมาณโพรงไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้มีความรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมถ้าตะกอนน้ำเสียที่ร้อยละ 5 และ 10 มีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมควบคุม อย่างไรก็ตาม การศึกษาการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยวัสดุจากน้ำเสียที่ผ่านมามักนำถ้าตะกอนน้ำเสียที่ได้จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนหรือโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้จากกระบวนการกำจัดด้วยวิธีการเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงประมาณ 800 องศาเซลเซียส แต่ในกรณีของการนำตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องตีมีที่ยังไม่ผ่านการเผามาแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังมีไม่มากนัก และยังไม่มีการศึกษาทางโครงสร้างทางจุลภาคที่เพียงพอ

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะศึกษาการใช้ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตเครื่องตีมาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่มีต่อความสามารถในการทำงานได้ ความแข็งแรง และโครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ เพื่อเป็นแนวทางของการนำตะกอนน้ำเสียมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีและน่าสนใจสำหรับงานก่อสร้างทางวิศวกรรม การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยตะกอนน้ำเสียไม่เพียงแต่จะเป็นแนวทางในการลดปริมาณและการกำจัดตะกอนน้ำเสียแล้ว ยังเป็นการลดความต้องการของการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อีกด้วย ซึ่งจะส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวของประเทศและทั่วโลก

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

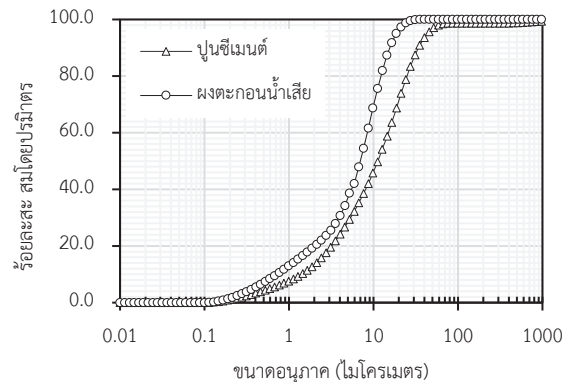
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [12] และตะกอนน้ำเสียจากโรงงานเครื่องตีที่นำมาผ่านกระบวนการบดละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 โดยการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุตั้งรูปที่ 1 พบว่าอนุภาคของผงตะกอนมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังตารางที่ 1 ที่ผงตะกอนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยน้อยกว่าปูนซีเมนต์

การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ดังตารางที่ 2 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักและมี SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นองค์ประกอบรอง ในขณะที่ผงตะกอนน้ำเสียมีองค์ประกอบหลักคือ CaO และมีองค์ประกอบรองคือ SiO<sub>2</sub> และ MgO และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มากถึงร้อยละ 42.48 ซึ่งมีค่ามากกว่าตะกอนน้ำเสียทั่วไป สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Duan และคณะ [13] และ Liu และคณะ [14] พบว่า ตะกอนน้ำเสียที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักสูงเนื่องจากการเผา เนื่องจากตะกอนมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงที่ไม่ได้ผ่านการเผา จึงนำไปสู่การมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังตารางที่ 1

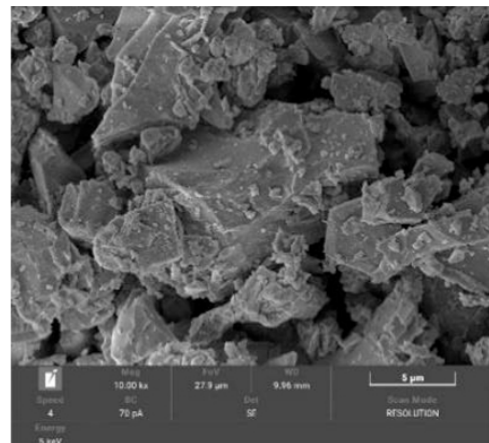
#### ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้น

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์	ผงตะกอนน้ำเสีย
ความถ่วงจำเพาะ	3.16	2.59
ร้อยละค้ำตะแกรงเบอร์ 325	2.0	0.1
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	12.8	7.62

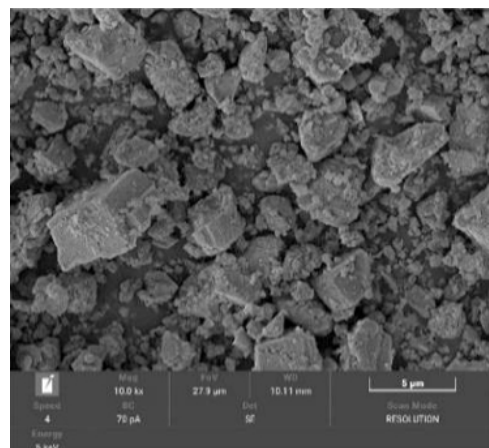
โครงสร้างทางจุลภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงตะกอนน้ำเสียตั้งรูปที่ 2 พบว่า อนุภาคของปูนซีเมนต์และผงตะกอนน้ำเสียมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมและมีรูปร่างไม่แน่นอน เนื่องจากเป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการบดเพื่อให้มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ขนาดอนุภาคของผงตะกอนยังแสดงขนาดที่เล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์อีกด้วย สำหรับ



รูปที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุตั้งต้น



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



(ข) ผงตะกอนน้ำเสีย

รูปที่ 2 โครงสร้างทางสัณฐานของวัสดุประสาน

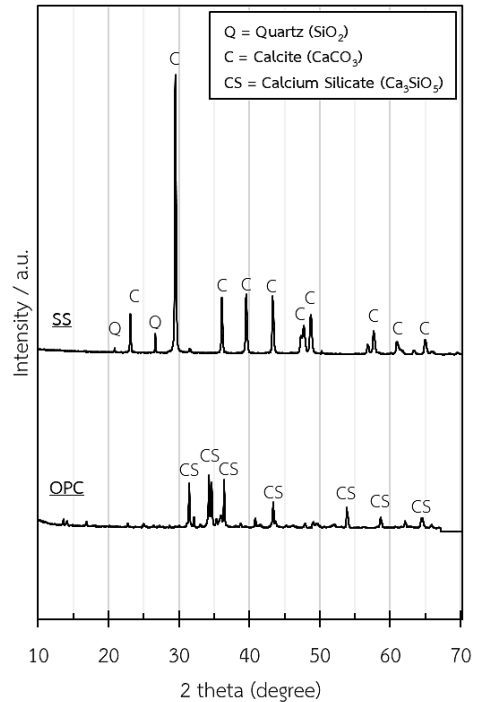
โครงสร้างผลึกของสารประกอบในวัสดุตั้งรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ปรากฏผลึก Calcium Silicate (CS) เป็นหลัก ในขณะที่ผงตะกอนน้ำเสียจะปรากฏผลึกของ Calcite (C) และ Quartz (Q) เป็นหลัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงตะกอนน้ำเสียที่มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักและมี SiO<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบรอง

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์	ผงตะกอนน้ำเสีย
CaO	63.22	48.51
SiO <sub>2</sub>	19.85	4.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.23	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.80	0.12
MgO	1.59	2.53
SO <sub>3</sub>	2.21	0.29
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.32
K <sub>2</sub> O	0.21	<0.01
TiO <sub>2</sub>	0.19	<0.01
LOI	3.64	42.48

## 2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสม โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้มีความชื้นเหลวปกติตามมาตรฐาน ASTM C 187-04 [15] เท่ากับ 0.30 เป็นตัวควบคุมในทุกส่วนผสม แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก นำปูนซีเมนต์ ผงตะกอนน้ำเสียและน้ำผสมตามอัตราส่วนตามมาตรฐาน ASTM C305-99 [16] จากนั้นจึงนำซีเมนต์เพสต์ที่ได้เทลงแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร ทำการปาดผิวหน้าให้เรียบ เมื่อผิวหน้าเริ่มเซตตัวจึงห่อด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ปลอ่ยให้ตัวอย่างแข็งตัวในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบและนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวจนถึงอายุวันทดสอบ



รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบในปูนซีเมนต์ (OPC) และผงตะกอนน้ำเสีย (SS)

## 2.3 การทดสอบ

ทดสอบระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เครื่องทดสอบไวแคต (Vicat Needle) ตามมาตรฐาน ASTM C191-99 [17] ทดสอบการไหลแผ่ (Flow Table) ตามมาตรฐาน ASTM C1437-01 [18] ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [19] โดยทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย และทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วัน ได้แก่ การทดสอบการกระจายขนาดของโพรงเป็นการทดสอบและวิเคราะห์โดยใช้หลักการวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) เพื่อวิเคราะห์โพรงขนาดต่างๆ ที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุ การทดสอบโครงสร้างทางสัณฐานของวัสดุโดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy; EDS) การทดสอบ

องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุเพื่อวิเคราะห์ทางองค์ประกอบแร่ของวัสดุโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)

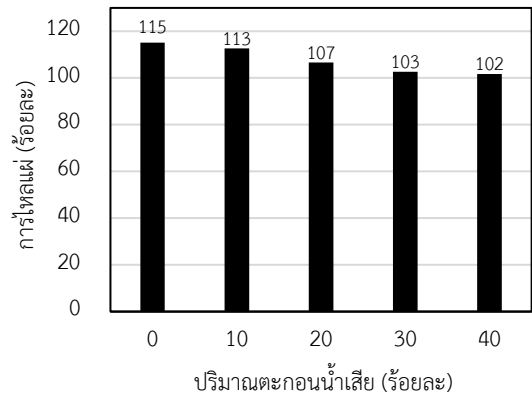
### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ค่าการไหลผ่าน

ผลการทดสอบการไหลผ่านของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมตั้งในรูปที่ 4 พบว่า ซีเมนต์เพสต์ควบคุมมีค่าการไหลผ่านเฉลี่ยร้อยละ 115 เมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียในปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีค่าการไหลผ่านลดลงร้อยละ 2 7 11 และ 12 ตามลำดับ เนื่องจากผงตะกอนน้ำเสียมีความละเอียดมากกว่าและมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นทำให้มีความต้องการน้ำไปเคลือบผิวมากขึ้น จึงมีความสามารถในการทำงานลดลงตามการแทนที่ผงตะกอนน้ำเสียในซีเมนต์เพสต์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gu และคณะ [20] ที่พบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าตะกอนน้ำเสียในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การไหลผ่านมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าตะกอนน้ำเสีย เนื่องจากเถ้าตะกอนน้ำเสียมีรูพรุนและมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ทำให้การดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาคเถ้าตะกอนน้ำเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าตะกอนน้ำเสียทำให้ความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การไหลผ่านลดลง

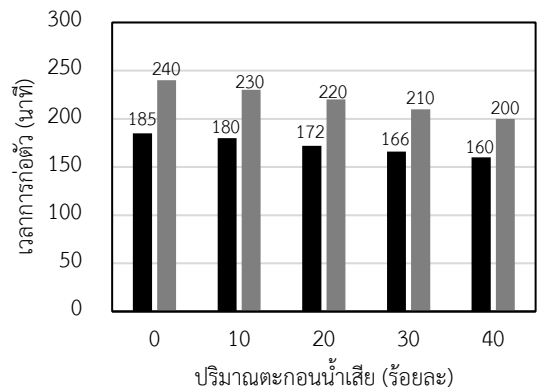
#### 3.2 ระยะเวลาการก่อตัว

ผลทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมตั้งรูปที่ 5 พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของซีเมนต์เพสต์มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดอัตราส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียในปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ทำให้มีระยะเวลาการก่อตัวต้นลดลงร้อยละ 2 4 6 และ 8 ตามลำดับ และมีระยะเวลาการก่อตัวปลายลดลงร้อยละ 5 8 13 และ 19 ตามลำดับ จาก



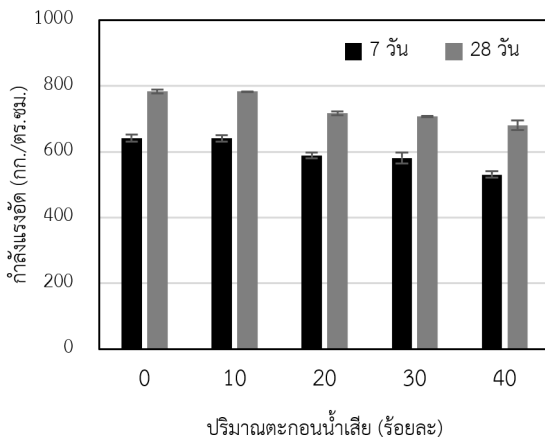
รูปที่ 4 การไหลผ่านของซีเมนต์เพสต์

■ ระยะเวลาการก่อตัวต้น ■ ระยะเวลาการก่อตัวปลาย



รูปที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

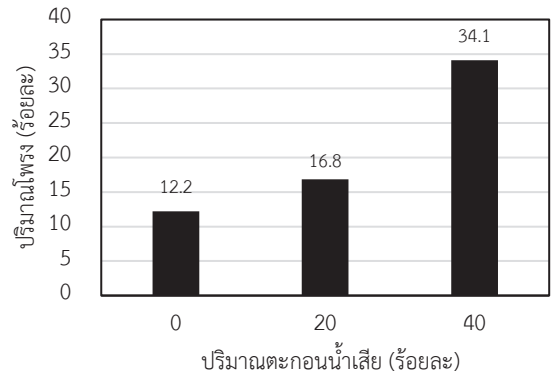
งานวิจัยของ Piasta และ Lukawska [21] พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าตะกอนน้ำเสีย ส่งผลให้ปริมาณซีเมนต์ลดลงและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงตามไปด้วย ทำให้มีระยะเวลาการก่อตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในการทดสอบนี้พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายมีค่าลดลง สัมพันธ์กับการไหลผ่านที่มีค่าลดลงตามการแทนที่ของตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vouk และคณะ [22] ที่ได้ศึกษาการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าตะกอนน้ำเสียในระบบซีเมนต์มอร์ต้าพบว่า เถ้าตะกอนน้ำเสียมีความต้องการน้ำไปเคลือบผิวปริมาณมาก ทำให้มีความสามารถในการทำงานลดลง ซึ่งอาจส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลงได้เช่นกัน



รูปที่ 6 กําลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

### 3.3 กําลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกําลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมดังตารางที่ 3 และรูปที่ 6 พบว่าเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีกําลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง ส่งผลให้ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; CSH) ลดลงตามไปด้วย [23] โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนน้ำเสียในปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม มีค่ากําลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน ร้อยละ 100 91 88 และ 82 ตามลำดับ และที่อายุ 28 วัน มีค่าร้อยละ 100 91 90 และ 87 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมยังคงมีการพัฒนาความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มของตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องตามแนวโน้มของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสม นอกจากนี้ยังพบว่า กําลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักยังคงมีค่าใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม และตะกอนน้ำเสียยังสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีค่ากําลังรับแรงอัดประมาณร้อยละ 80 เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม ซึ่งมากกว่าค่าดัชนีกําลัง (Strength Activity Index) ที่ร้อยละ 75 ตามมาตรฐาน ASTM C618 [24]



รูปที่ 7 ปริมาตรโพรงรวมของซีเมนต์เพสต์

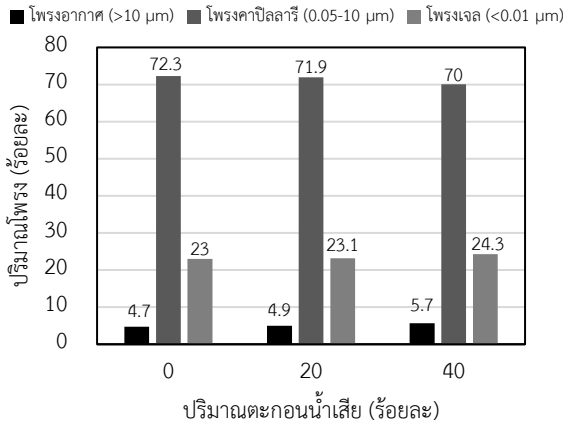
### ตารางที่ 3 กําลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

ปริมาณตะกอนน้ำเสีย (ร้อยละ)	กําลังรับแรงอัด			
	7 วัน		28 วัน	
	ksc	ร้อยละ	ksc	ร้อยละ
0	642	100	784	100
10	641	100	783	100
20	590	91	717	91
30	567	88	708	90
40	531	82	680	87

### 3.4 ปริมาตรโพรงรวมและการกระจายขนาดของโพรง

ปริมาตรโพรงรวมของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีปริมาตรโพรงรวมเพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักจะมีปริมาตรโพรงรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.10 และ 9.30 เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกําลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ที่มีค่าลดลงตามปริมาณผงตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบการกระจายขนาดโพรงช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมดังรูปที่ 8 พบว่า โพรงอากาศ โพรงคาปิลลารี และโพรงเจลของซีเมนต์เพสต์ควบคุมมีปริมาตรร้อยละ 4.7 72.3 และ 23.0

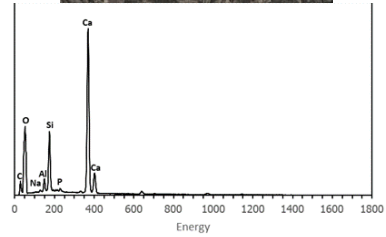
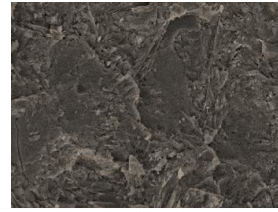


รูปที่ 8 การกระจายขนาดโพรงของซีเมนต์เพสต์

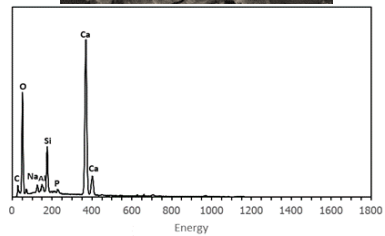
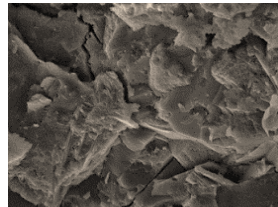
ของปริมาณโพรงรวม เมื่อพิจารณาผลของปริมาณตะกอนน้ำเสียพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียส่งผลให้มีการกระจายขนาดของโพรงที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มมากขึ้นทำให้โพรงคาปิลลารีมีปริมาณลดลง ในขณะที่โพรงอากาศและโพรงเจลมีปริมาณเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพรงรวม (รูปที่ 7) และโพรงอากาศ (รูปที่ 8) ตามปริมาณของตะกอนน้ำเสีย จะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงและความแน่นตัวของซีเมนต์เพสต์ โดยกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์มีค่าลดลงตามการแทนที่ของตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น

### 3.5 โครงสร้างทางสัณฐานและวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

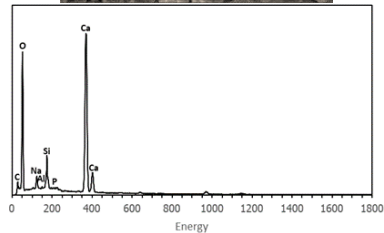
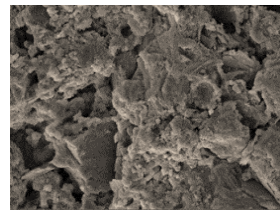
โครงสร้างทางสัณฐานของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 9 พบว่าลักษณะเนื้อของซีเมนต์เพสต์ควบคุมมีความแน่นตัวและเป็นเนื้อเดียวกันดี เมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียในปริมาณที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก จะปรากฏเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่มีความแน่นตัวลดลงและโครงสร้างมีความเป็นเนื้อเดียวกันลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนน้ำเสีย เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าลดลงตามการแทนที่ของตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น



(ก) ส่วนผสมควบคุม



(ข) ซีเมนต์เพสต์ผสมตะกอนน้ำเสียร้อยละ 20



(ค) ซีเมนต์เพสต์ผสมตะกอนน้ำเสียร้อยละ 40

รูปที่ 9 โครงสร้างทางสัณฐานและปริมาณธาตุของซีเมนต์เพสต์



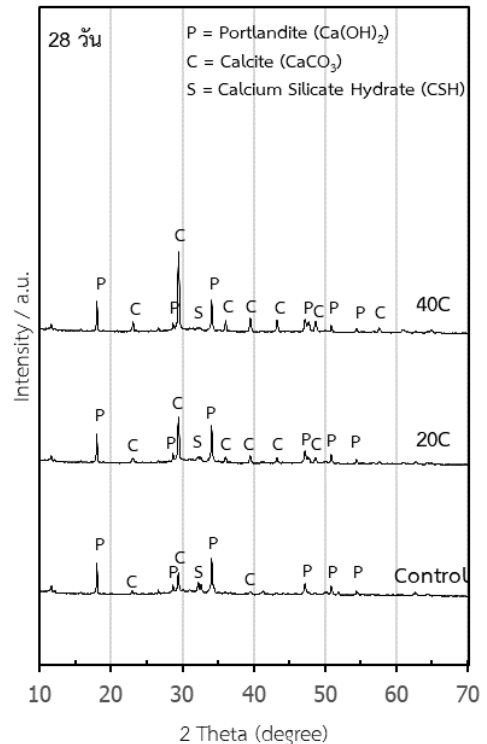
จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิคของ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ดังตารางที่ 4 พบว่า ซีเมนต์เพสต์ควบคุมมีการก่อตัวของธาตุ Ca O C และ Si เป็นองค์ประกอบหลัก พบธาตุ Na Al และ P ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งบ่งชี้ถึงสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide; Ca(OH)<sub>2</sub>) ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว เมื่ออัตราการแทนที่ของตะกอนน้ำเสียในระบบซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น ทำให้ปูนซีเมนต์มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ปริมาณของธาตุ Ca Si และ Al มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากธาตุ Ca Si และ Al เป็นธาตุหลักที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซึ่งมากกว่าผงตะกอนน้ำเสียอีกด้วย

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

ธาตุ	ปริมาณตะกอนน้ำเสีย (ร้อยละ)		
	0	20	40
Ca	34.04	31.53	27.92
O	38.72	40.09	43.01
C	17.63	18.81	20.07
Si	6.92	6.51	5.89
Al	1.39	1.24	0.91
Na	0.59	1.3	1.73
P	0.71	0.52	0.47
Si/Al	4.98	5.25	6.47
Na/Al	0.42	1.05	1.90
Ca/Si	4.92	4.84	4.74
Ca/Al	24.49	25.43	30.68

### 3.6 องค์ประกอบทางแร่

องค์ประกอบทางแร่ของซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 10 พบว่า ซีเมนต์เพสต์ควบคุมประกอบไปด้วยผลึกของ Portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>; P) Calcite (CaCO<sub>3</sub>; C) และ Calcium Silicate Hydrate (CSH; S) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยพบ Portlandite ปรากฏที่ 18 28.5 34 47 51 และ 54° 2theta



รูปที่ 10 โครงสร้างผลึกของสารประกอบในซีเมนต์เพสต์

พบ Calcite ปรากฏที่ 23 29 36 39 43 48 และ 57° 2theta และ Calcium Silicate Hydrate ที่เห็นได้จาก 32° 2theta [25]–[28] สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่มีผงตะกอนน้ำเสียเป็นส่วนผสมมีโครงสร้างผลึกที่คล้ายคลึงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม เมื่อพิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียในซีเมนต์เพสต์พบว่า Calcite มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นแปรผันตรงตามปริมาณการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสีย เนื่องจาก Calcite หรือ CaCO<sub>3</sub> เป็นองค์ประกอบหลักที่มีปริมาณสูงมากในผงตะกอนน้ำเสีย โดยจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงตะกอนน้ำเสียที่มี CaO เป็นองค์ประกอบในปริมาณค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 48.51 ดังตารางที่ 2 อีกทั้งยังพบ Portlandite และ Calcium Silicate Hydrate ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำในปริมาณลดลงตามปริมาณการแทนที่ของผงตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงมีค่าลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ที่มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นของผงตะกอนน้ำเสีย

#### 4. สรุป

จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่ของผงตะกอนน้ำเสียในซีเมนต์เพสต์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะการก่อตัว การไหลแม่ และกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน มีแนวโน้มลดลง โดยการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นว่าความแน่นตัวและความเป็นเนื้อเดียวกันของซีเมนต์เพสต์ลดลง และผลึกของ Portlandite และ CSH ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีปริมาณลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามซีเมนต์เพสต์ที่ผสมตะกอนน้ำเสียปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจะให้กำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม และยังสามารแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงตะกอนน้ำเสียได้สูงถึงร้อยละ 40 เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงอัดที่มากถึงร้อยละ 82 ที่อายุ 7 วันและร้อยละ 87 ที่อายุ 28 วันอีกด้วย

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] R. M. Andrew, "Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production, 1928–2018," *Earth System Science Data*, vol. 11, pp. 1675–1710, 2019.
- [2] M. Á. Sanjuán, C. Andrade, P. Mora, and A. Zaragoza, "Carbon dioxide uptake by cement-based materials : A spanish case study,"

- [3] Reportlinker. (2023, Dec.). Food And Beverages Global Market Report 2023. [Online]. Available: <https://www.researchandmarkets.com/report/food-beverage>
- [4] Pollution Control Department. (2009, Oct.). *Sanitary Landfill*. (1st ed.) [Online] (in Thai). Available: <https://www.pcd.go.th/publication/4995>
- [5] M. Kacprzaka, E. Neczaja, K. Fijalkowska, A. Grobelaka, A. Grossera, M. Worwaga, A. Rorata, H. Brattebob, A. Almasc, and B. R. Singhc, "Sewage sludge disposal strategies for sustainable development," *Environmental Research*, vol. 156, pp. 39–46, 2017.
- [6] A. R. Al-Obaidi, R. H. Al-Anbari, and M. S. Hassan "Sewage sludge reuse in concrete industry: A review," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 779.
- [7] R. O. Yusuf and Z. Z. Noor "Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete – A review," *International Journal of Global Environmental Issues*, vol. 12, no. 2–4, 2012.
- [8] C. O. Rusănescu, G. Voicu, G. Paraschiv, M. Begea, L. Purdea, I. C. Petre, and E. V. Stoian, "Recovery of sewage sludge in the cement industry," *Energies*, vol. 15, no. 2664, 2022.
- [9] E. Haustein, A. Kuryłowicz Cudowska, A. Łuczkiwicz, S. Fudala Książek, and B. M. Cieślík, "Influence of cement replacement with Sewage Sludge Ash (SSA) on the heat of hydration of cement mortar," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 1547, 2022.
- [10] B. Krejcirikova, L.M. Ottosen, G. M. Kirkelund,

- C. Rode, and R. Peuhkuri, "Characterization of sewage sludge ash and its effect on moisture physics of mortar," *Journal of Building Engineering*, vol. 21, pp. 396–403, 2019.
- [11] Z. Chen and C. S. Poon, "Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 791–803, 2017.
- [12] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM C150-0, 2001.
- [13] W. Duan, Y. Zhuge, P. N. Pham, C. W. K. Chow, A. Keegan, and Y. Liu, "Utilization of drinking water treatment sludge as cement replacement to mitigate Alkali-silica reaction in cement composites," *Journal of Composites Science*, vol. 4, no. 4, pp. 171, 2020.
- [14] M. Liu, Y. Zhao, Y. Xiao, and Z. Yu, "Performance of cement pastes containing sewage sludge ash at elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 211 pp. 785–795, 2019.
- [15] *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*, ASTM C 187-04, 2009.
- [16] *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*, ASTM C305-99, 2002.
- [17] *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, ASTM C191-99, 2001.
- [18] *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, ASTM C1437-01, 2007.
- [19] *Standard Test Method Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*, ASTM C109/C109M, 2021.
- [20] C. Gu, Y. Ji, Y. Zhang, Y. Yang, J. Liu, and T. Ni, "Recycling use of sulfate-rich sewage sludge ash (SR-SSA) in cement-based materials: Assessment on the basic properties, volume deformation and microstructure of SR-SSA blended cement," *Journal of Cleaner Production*, vol. 282, no. 124511, 2021.
- [21] W. Piasta and M. Lukawska, "The effect of sewage ash on properties of cement composites," *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 1018–1024, 2016.
- [22] D. Vouk, M. Serdar, and A. A. Vučinić, "Use of incinerated sewage sludge ash in cement mortars: Case study in Croatia," *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, vol. 24, no. 1, pp. 43–51, 2017.
- [23] G. C. Bye, "Introduction and composition of Portland cement," *Portland Cement. Composition, Production and Properties*, 2nd ed., Thomas Telford Publishing, 1999.
- [24] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C618, 2014.
- [25] L. Lam, Y. Wong, and C. Poon, "Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 747–756, 2000.
- [26] R. Maddalena, K. Li, P. A. Chater, S. Michalik, and A. Hamilton, "Direct synthesis of a solid calcium-silicate-hydrate (C-S-H)," *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 554–565, 2019.
- [27] W. Hunnicutt, "Characterization of calcium-silicate-hydrate and calcium-alumino-silicate-hydrate," M.S. thesis, Department of Science



in Civil Engineering, University of Illinois Urbana-Champaign, 2013.

- [28] R. Maddalena, J. J. Roberts, and A. Hamilton, "Can Portland cement be replaced by low

carbon alternative materials? A study on thermal properties and carbon emissions of innovative cements," *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 933–942, 2018.