

## การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาด้วยปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในวัสดุงานทาง

ธเนศ ทองเดชศรี<sup>1</sup> ศุภกิจ นนทนานันท์<sup>2\*</sup> สิทธิรินทร์ น้อยภาชี<sup>3</sup> ศรัณยู เรืองฉาย<sup>4</sup> และ อภินิติ โชติสังกาศ<sup>5</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาโดยใช้ซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานและทำการทดลองหาอัตราส่วนของซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ดินซีเมนต์ที่สามารถใช้เป็นวัสดุงานทางได้ตามต้องการ ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วัน ตลอดจนศึกษากลไกของปฏิกิริยาเคมีโดยทำการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนประปาซีเมนต์โดยใช้เครื่อง X - Ray Diffraction (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ตามลำดับ จากผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่าดินตะกอนประปาตากแห้งที่ลานตากตะกอนมีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 120 - 130 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาทดลองผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วน 150, 200, และ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่ามีการพัฒนากำลังอัดค่อนข้างต่ำถึงแม้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม จากการศึกษาพบว่ากำลังของดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์สามารถปรับปรุงได้โดยใช้เทคนิคการปรับลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นก่อนผสมทำให้ได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระยะสั้น อัตราส่วนปริมาณความชื้นของดินตะกอนประปาต่อปริมาณซีเมนต์ (w/c ratio) ในช่วง 3.07 - 1.84 ทำให้ดินตะกอนประปาผสมปูนซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 5.06 - 16.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ในงานถนน ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเคมีกายภาพจากการวิเคราะห์โดย X - Ray Diffraction (XRD) พบว่าสารผลิตภัณฑ์หลัก Calcium Silicate Hydrate (CSH) มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนผสมและอายุการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่าสารผลิตภัณฑ์ Calcium Sulfoaluminate Hydrate (Ettringite) ที่เกิดขึ้นในช่วงต้นของปฏิกิริยามีส่วนสำคัญที่ช่วยทำให้ดินซีเมนต์มีโครงสร้างที่แน่นขึ้นจากการสังเกตภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่าสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite สานตัวปกคลุมทั่วบริเวณพื้นผิวและเชื่อมโยงอนุภาคดินตะกอนซีเมนต์โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีการพัฒนากำลังที่สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD และกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

**คำสำคัญ:** ดินตะกอนประปา; ปูนซีเมนต์; กำลังรับแรงอัดแกนเดียว; XRD; SEM

รับพิจารณา: 8 เมษายน 2564

แก้ไข: 11 พฤษภาคม 2564

ตอบรับ: 18 พฤษภาคม 2564

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>3</sup> นิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>4</sup> ผู้ช่วยนักวิจัยอิสระ

<sup>5</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +66 2797 0999 ต่อ 1324 อีเมล: fengskn@ku.ac.th

## Stabilization of Water Treatment Sludge with Cement for use in Road Materials

Thanet Thongdetsri<sup>1</sup> Supakij Nontananandh<sup>2\*</sup> Sittinon Noipasee<sup>3</sup>  
Sarunyoo Ruangchai<sup>4</sup> and Apiniti Jotisankasa<sup>5</sup>

### Abstract

The objectives of the research aimed at studying the improvement of water treatment sludge by using cement as a binder and analysing the appropriate cement ratio to obtain the soil - cement that can be used as road materials. The research included studying engineering properties of the stabilized water treatment sludge by using the unconfined compression test at curing ages of 3 and 7 days and exploring the reaction mechanisms of major reaction products produced from cement hydration and observation on changes in microstructures by using the X - Ray Diffraction (XRD) and the Scanning Electron Microscopy (SEM), respectively. The research found that in general dried sludge at the sludge lagoons had relatively high moisture content in the range of 120% - 130%. By testing the mixing of cement at the various ratios which were 150, 200, and 250 kg/m<sup>3</sup>, the results showed that although compressive strength seemed to increase with increasing of curing age, the improved compressive strengths of this cement stabilized sludge were relatively low. In addition, the pre-treatment technique of reducing initial moisture content before mixing was proposed, resulting in obtaining the optimal water - cement ratio which significantly increased the compressive strength at the short - term of curing age. The water - cement ratio (W/C ratio) in the range of 3.07 to 1.84 increased compressive strengths of cement stabilized sludge to the range of 5.06 to 16.43 kg/cm<sup>2</sup>, which showed potential to be used as materials for road subbase. According to the X - Ray diffraction analysis, the result indicated that the amount of Calcium Silicate Hydrate (CSH) had markedly increased as increasing of mixing ratio and curing age. In addition, the Calcium Sulfoaluminate Hydrate (Ettringite) which was produced in the early stage of hydration also played an important role in densifying structures of the cement stabilized sludge. By observing the images from Scanning Electron Microscopy (SEM), the research found that the CSH and Ettringite had covered the surface and tightly combined soil particles, especially in specimens having relatively high strengths, which were consistent with the results of XRD analysis and the unconfined compression test.

**Keywords:** Water Treatment Sludge; Portland Cement; Unconfined Compressive Strength; XRD; SEM

Received: April 8, 2021

Revised: May 11, 2021

Accepted: May 18, 2021

---

<sup>1</sup> Doctoral student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

<sup>3</sup> Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

<sup>4</sup> Independent Research Assistant

<sup>5</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

\* Corresponding Author, Tel. +66 2797 0999 ext. 1324 e-mail: fengskn@ku.ac.th

## 1. บทนำ

จากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรในประเทศไทย ทำให้ความต้องการในการผลิตน้ำประปายังคงมีอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกปี โดยการผลิตน้ำประปาของจังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑลซึ่งใช้แหล่งน้ำดิบที่สำคัญ 2 แหล่งคือแม่น้ำเจ้าพระยาในจังหวัดปทุมธานีและแม่น้ำท่าจีนในจังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นแหล่งน้ำธรรมชาติในการผลิตซึ่งโดยปกติจะมีสารแขวนลอยปนเปื้อนในแหล่งน้ำเป็นจำนวนมาก จากข้อมูลของการประปานครหลวง โรงงานผลิตน้ำบางเขน มีปริมาณการสูบน้ำดิบจำนวน 4,110,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อนำไปผ่านกระบวนการในการผลิตน้ำประปา โดยมีขั้นตอนการผลิตที่สำคัญดังนี้ คือ 1) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ 2) การเติมสารเคมี 3) การตกตะกอน 4) การกรอง 5) การฆ่าเชื้อโรค 6) การปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา 7) การสูบน้ำประปา และ 8) การควบคุมคุณภาพน้ำ โดยสามารถจ่ายน้ำประปาให้กับประชาชนจำนวน 3,900,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน [1] ตามขั้นตอนการตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปาเมื่อแหล่งน้ำดิบมีการปนเปื้อนของสารแขวนลอยมาก ทำให้มีค่าความขุ่นมาก ส่งผลให้เกิดปริมาณตะกอนน้ำประปาเป็นจำนวนมากขึ้นทุกปี จากสถิติของโรงงาน ผลิตน้ำบางเขนพบว่าปริมาณตะกอนแห้ง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 ถึงปี พ.ศ. 2563 เฉลี่ยสูงถึง 54,000 ตันต่อปี กระบวนการกำจัดดินตะกอนประปามี 2 วิธีหลัก ๆ คือ วิธีตามธรรมชาติโดยการนำดินตะกอนประปาดักแห้งในลานกว้าง ๆ ใช้เวลาในการตากแห้งประมาณ 3 - 5 เดือนบนพื้นที่ประมาณ 750 ไร่ และระบบรีดตะกอนเป็นตะกอนแผ่น (Sludge cake) โดยใช้เครื่องอัดรีดดิน (Filter press) ในทางปฏิบัติการประปานครหลวงใช้วิธีการกำจัดโดยการจ้างขนดินไปทิ้งหรือนำไปถมที่โดยเสียค่าใช้จ่ายเป็นรายปีปีละไม่น้อยกว่า 21 ล้านบาท [2] นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการนำไปผลิตอิฐบล็อกประสาน แผ่นพื้นทางเท้าวัสดุตกแต่งสวนรวมทั้งการนำไปใช้ในภาคการเกษตรเพื่อเพิ่มมูลค่า

กระบวนการผลิตน้ำประปาดังกล่าวทำให้เกิดปัญหาตามมาหลายประการอาทิเช่น กระบวนการจัดการตะกอนน้ำประปาในโรงผลิตน้ำบางเขน ปัญหาด้านพื้นที่เก็บตะกอนที่จำเป็นต้องใช้พื้นที่จำนวนมากเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอน ปัญหาด้านค่าใช้จ่ายในการ

เปลี่ยนสถานะจากตะกอนเหลวเป็นตะกอนแห้งเพื่อให้สะดวกต่อการขนส่ง ปัญหาด้านการขนย้ายตะกอนที่ต้องใช้ระยะเวลา รวมถึงค่าใช้จ่ายในการขนส่ง งานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งหวังที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยนำเสนอทางเลือกในการกำจัดตะกอนประปาที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปาโดยการศึกษาศักยภาพในเบื้องต้นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง(Subbase) สำหรับงานก่อสร้างถนน

## 2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดในการปรับปรุงคุณภาพตะกอนประปาซึ่งมีปริมาณความชื้นสูง โดยเลือกเทคนิคการเชื่อมประสานและการอัดแน่น (Cementation and Densification) ในการพัฒนากำลังของดินให้สูงขึ้นซึ่งแนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการทางด้านวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม (Geo - Environmental Engineering) ในประเด็นการใช้ประโยชน์ของกากอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้าง [3] ทั้งนี้ตะกอนประปาที่ใช้ศึกษามีคุณสมบัติเบื้องต้นสอดคล้องกับหลักเกณฑ์ NICE Criteria ที่เสนอโดย Nontananandh et al. [4] เนื่องจากเป็นดินตะกอนที่ปราศจากการปนเปื้อนและมีงานวิจัยในอดีตที่สนับสนุนการพัฒนากำลังของดินตะกอนต่าง ๆ เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์หรือจีโอโพลิเมอร์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม [5], [6], [7]

ฉพล [8] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนพบว่าเลือกใช้สารเชื่อมประสานที่เหมาะสมกับชนิดของดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ดินมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามที่ต้องการ เช่น คุณสมบัติด้านกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติด้านวิศวกรรม ทั้งนี้เป็นผลจากปฏิกิริยาเคมีเกิดสารผลิตภัณฑ์ เช่น Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังซึ่งสามารถยืนยันได้จากงานวิจัยที่เสนอโดย Kamom and Nontananandh [9] ซึ่งประยุกต์ใช้เครื่อง X - ray Diffractometer (XRD) ในการจำแนกสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดในดินแล้วถูกเขาไฟที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากขยะพบว่า Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Sulfoaluminate Hydrate (Ettringite) เป็น สารผลิตภัณฑ์ที่ช่วยพัฒนากำลังดินอ่อนที่มีความไวตัวและปริมาณความชื้นสูง

Nontananandh et al. [10] พบว่าในดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ที่มีกำลังสูง โครงสร้างระดับจุลภาคในดินซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น จากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ทั้งนี้จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปรับปรุงคุณภาพดินบวมตัวโดยใช้ปูนซีเมนต์ Pathivada [11] พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (water - cement ratio) มีผลต่อการเพิ่มขึ้นด้านกำลังของดินซีเมนต์และความเค้นหดตัว (shrinkage strain) เมื่อ w/c ratio เพิ่มขึ้น กำลังของดินซีเมนต์มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณความเค้นหดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

### 3. วิธีการดำเนินการวิจัย

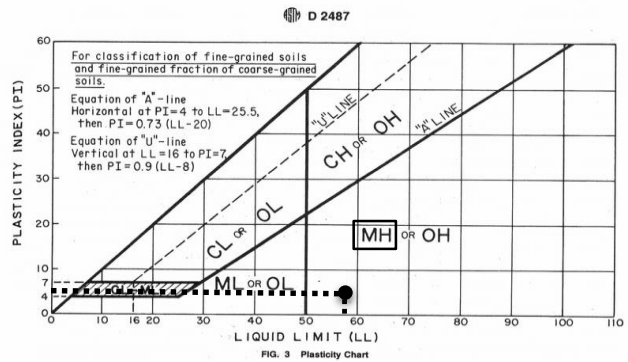
การวิจัยการนำดินตะกอนประปาไปใช้ประโยชน์ เริ่มจากการเก็บตัวอย่างดินจากลานตากตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน กรุงเทพมหานคร โดยการศึกษาเก็บตัวอย่างในช่วงระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2564 ได้ดินตะกอนประปาที่มีความชื้นธรรมชาติเริ่มต้นก่อนผสมซีเมนต์อยู่ในช่วง 120% - 130% จากนั้นนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งในเบื้องต้นพบว่าดินตะกอนประปามีลักษณะเป็นดินเนื้อละเอียดที่มีค่าความชื้นเฉลี่ยในสภาพตากแห้ง ( $W_{air-dry}$ ) เท่ากับ 128.5% และมีค่าคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ก่อนข้างใกล้เคียงกับการศึกษาโดยสุทธิดาและคณะ [12] ยกเว้นค่าดัชนีความเหนียว ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อจำแนกดินทางวิศวกรรมจัดอยู่ในกลุ่ม MH (ดินตะกอนทรายที่มีความเหนียวสูง) เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification ดังแสดงในรูปที่ 1 และจัดอยู่ในกลุ่ม A-7-5 (20) เป็นดินตะกอนทรายที่มีดินเหนียวปนเมื่อจำแนกโดยระบบ AASHTO

**ตารางที่ 1** ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของดินตะกอนประปา

รายการผลทดสอบ	ผลงานวิจัยในอดีต [12]	ผลงานวิจัยนี้
1. ความถ่วงจำเพาะ, $G_s$	2.65	2.58
2. ค่าขีดจำกัดเหลว, LL (%)	77.96	58.70
3. ค่าขีดจำกัดพลาสติก, PL (%)	50.76	53.80
4. ค่าดัชนีพลาสติก, PI (%)	27.20	4.90
5. ประเภทของดินตามวิธี AASHTO	A-7-5 (20)	A-7-5 (20)
6. ประเภทของดินตามวิธี USCS	MH	MH
7. การกระจายตัวของดิน		

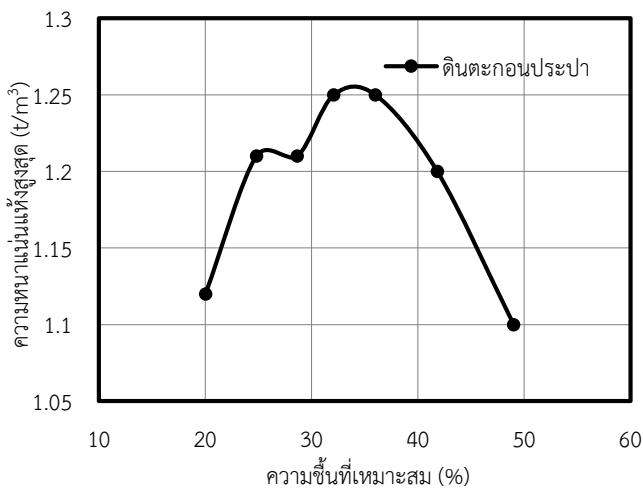
**ตารางที่ 1** ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของดินตะกอนประปา (ต่อ)

รายการผลทดสอบ	ผลงานวิจัยในอดีต [12]	ผลงานวิจัยนี้
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (%)	100.00	99.98
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (%)	99.06	97.32
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (%)	97.08	86.77
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (%)	92.13	74.50
- ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (%)	88.26	69.42



**รูปที่ 1** การจำแนกประเภทดินตะกอนประปาโดยวิธี Unified Soil Classification (ASTM D2487)

ผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (ASTM D698) พบว่าดินตะกอนประปามีลักษณะโค้งการบดอัดแบบ 2 ยอด (Double peak type) สอดคล้องกับลักษณะของดินที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Lee and Suedkamp, 1972) [13] จากการวิเคราะห์โค้งการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่ามีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ  $1.255 \text{ t/m}^3$  และมีค่าความชื้นเหมาะสมเท่ากับ 33.91% ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนประปาที่ความชื้นธรรมชาติพบว่ามีค่าเท่ากับ  $0.07 \text{ kg/cm}^2$  จัดได้ว่าเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ



รูปที่ 2 เส้นโค้งการบดอัดดินตะกอนประปา

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในตารางที่ 2 พบว่าดินตะกอนประปาในแต่ละช่วงมีปริมาณออกไซด์หลักเหมือนกับองค์ประกอบในดินเหนียว ได้แก่  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  และ  $\text{MgO}$  เป็นต้น ปริมาณออกไซด์อาจมีค่าแกว่งตัวอยู่ในช่วงแคบ ๆ ขึ้นอยู่คุณภาพของน้ำดิบ อย่างไรก็ตาม ผลการตรวจวิเคราะห์ทางเคมีไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนักจึงสามารถยืนยันการนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างปลอดภัย [1], [12], [14], [15] แนวคิดในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาในเบื้องต้นเป็นการทดลองหาสัดส่วนผสมของซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อพัฒนากำลังรับแรงอัดให้สูงขึ้นเป็นไปตามเกณฑ์ของการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) โดยในเบื้องต้นได้ทำการทดลองผสมตะกอนประปากับผสมปูนซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 128.5% และปรับลดความชื้นเริ่มต้นเป็น 46.0% เพื่อเพิ่มกำลังในดินซีเมนต์โดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินตะกอนประปาเท่ากับ 150, 200 และ 250  $\text{kg/m}^3$  ตามคำแนะนำของกรมทางหลวง [16] ทั้งนี้การปรับลดค่าความชื้นมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังของดินซีเมนต์โดยเป็นการปรับปรุงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของส่วนผสม อัตราส่วนผสมต่าง ๆ และ w/c ratio ของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา

องค์ประกอบออกไซด์	ดวงกมลและคณะ (2547) [14]	เสริมศักดิ์และคณะ (2559) [15]	สุทธิตาและคณะ (2562) [12]
	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
$\text{SiO}_2$	52.62	61.84	56.30
$\text{Al}_2\text{O}_3$	24.40	24.80	28.60
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.90	9.52	7.78
$\text{K}_2\text{O}$	1.61	1.90	2.15
$\text{CaO}$	0.44	0.60	1.18
$\text{MgO}$	0.79	0.00	1.24
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.00	0.00	0.91
$\text{TiO}_2$	0.81	0.00	0.89
$\text{SO}_3$	0.00	0.59	0.22
$\text{MnO}$	0.10	0.00	0.19
$\text{Na}_2\text{O}$	0.24	0.00	0.36
LOI	0.00	0.55	0.17

การผสมตัวอย่างดินซีเมนต์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดเพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีความสม่ำเสมอ โดยใช้เครื่อง Hobart Mixer ผสมดินตะกอนประปากับซีเมนต์เข้าด้วยกัน จากนั้นบรรจุวัสดุดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ลงในแบบหล่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร โดยมีกรควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างดินและใช้แผ่นพลาสติกปิดผิวด้านบนของแบบหล่อตัวอย่างเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น โดยตั้งสมมติฐานว่าปริมาณความชื้นที่ลดลงเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบในซีเมนต์และอนุภาคดินตะกอนเท่านั้น จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มที่ห้องบ่มตัวอย่าง และรอนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM D2166 ที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วัน ตามลำดับ จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละอัตราส่วนผสม หลังการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวทำการเก็บตัวอย่างดินบริเวณระนาบที่เกิดการพังทลายไปวิเคราะห์หาสารประกอบ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer รุ่น X'Pert PRO MPD Model PW 3040/60 โดยใช้สภาวะ 40 kV และ 30 mA ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มุม  $2\theta$  ในช่วง 10 - 80 องศา เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ดินเหนียวและปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากปฏิกิริยา

ไฮดรเจนได้แก่ CSH และ Ettringite ที่มีม 2θ เท่ากับ 29.54, 29.64, 29.74 องศา และ 22.89 องศาตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่ซ้อนทับกับสารประกอบอื่น

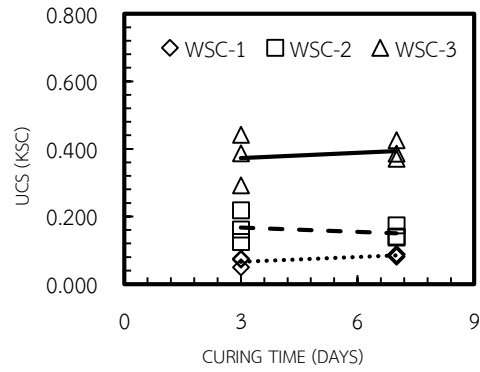
ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมต่าง ๆ ในการปรับปรุงคุณภาพ

Mixture	Cement Content (kg/m <sup>3</sup> )	Initial Water Content (%)	w/c ratio
WSC-1	150	128.5	7.73
WSC-2	200	128.5	5.80
WSC-3	250	128.5	4.64
WSC-4	150	46.0	3.07
WSC-5	200	46.0	2.30
WSC-6	250	46.0	1.84

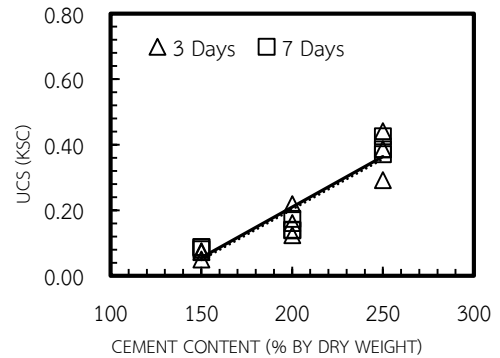
ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนซีเมนต์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น Hitachi SU3500 ที่สภาวะ 10 kV และ 20 mA เพื่อพิจารณาสังเกตลักษณะรูปร่างและปริมาณผลึกของสารผลิตภัณฑ์ตลอดจนการยึดเกาะกับอนุภาคดินที่อัตราส่วนผสมและอายุการบ่มต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 1,000 ถึง 5,000 เท่า

#### 4. ผลการศึกษาและวิจารณ์

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ของดินตะกอนประปา ที่ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น 128.5% ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์พบว่า ดินซีเมนต์ WSC-1, WSC-2 และ WSC-3 มีการพัฒนากำลังตามอายุการบ่มและอัตราส่วนผสมซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ยกตัวอย่างเช่นกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ ที่ 7 วัน มีค่าเป็น 0.393 kg/cm<sup>2</sup> คิดเป็น 553.5% เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของดินตะกอนประปาก่อนผสมซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ (0.071 kg/cm<sup>2</sup>) อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากสัดส่วนผสมนี้ยังต่ำกว่าเกณฑ์ที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานทาง จึงเป็นเหตุผลในการเลือกใช้เทคนิคลดความชื้นเพื่อปรับค่า w/c ratio และเพิ่มกำลังรับแรงอัด

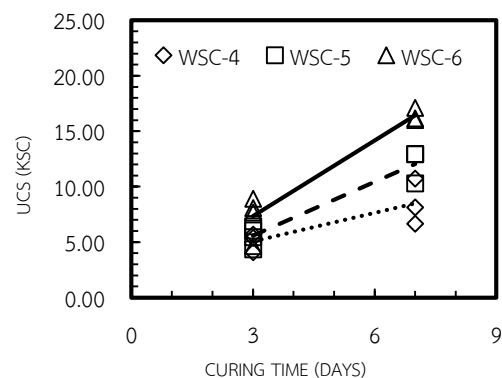


รูปที่ 3 กำลังอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม ( $w_i=128.5\%$ )

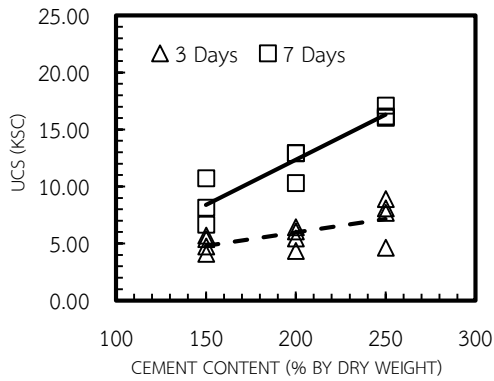


รูปที่ 4 กำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณซีเมนต์ ( $w_i=128.5\%$ )

ผลการทดสอบการปรับปรุงดินตะกอนประปาที่ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น 46.0% ในตัวอย่าง WSC-4, WSC-5 และ WSC-6 พบว่าดินซีเมนต์มีการพัฒนากำลังตามอายุการบ่มและอัตราส่วนผสมซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ดินซีเมนต์ WSC-4, WSC-5 และ WSC-6 มีค่ากำลังอัดแกนเฉลี่ยสูงถึง 5.064 และ 8.531 kg/cm<sup>2</sup>, 5.295 และ 12.056 kg/cm<sup>2</sup>, 7.080 และ 16.428 kg/cm<sup>2</sup> ที่ 3 และ 7 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 5 กำลังอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม ( $w_i=46.0\%$ )



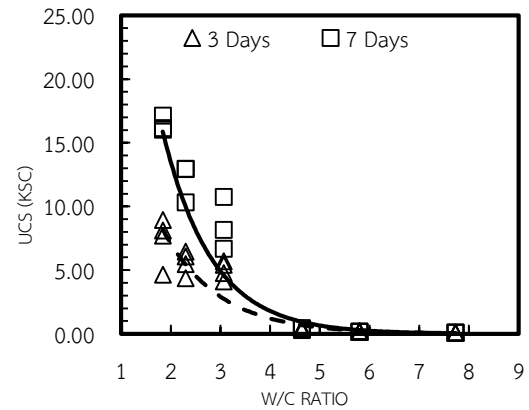
รูปที่ 6 กำลังอัดแกนเดี่ยวกับปริมาณซีเมนต์ ( $w_f=46.0\%$ )



รูปที่ 7 ตัวอย่างหลังการทดสอบที่อายุการบ่ม 7 วัน

รูปที่ 7 แสดงระนาบการพังทลายของตัวอย่างดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน จากการสังเกตพบว่าในดินที่มีกำลังรับแรงอัดสูงรอยแตกจะมีความชันที่ใกล้เคียงซึ่งมีลักษณะคล้ายกับรอยแตกของตัวอย่างคอนกรีต (WSC-6) ในขณะที่ WSC-4 ที่กำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามีระนาบพังทลายในแนวเฉียงแบบดินธรรมชาติ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (UCS) กับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) ของดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 46.0% พบว่าเมื่อ w/c ratio มีค่าเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์มีแนวโน้มลดลง จากมาตรฐานกรมทางหลวงที่กำหนดคุณสมบัติวัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Subbase) ของถนน ต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่อายุการบ่ม 7 วันไม่น้อยกว่า  $7 \text{ kg/cm}^2$  [16] ดังนั้น จากผลการศึกษาพบว่าดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ที่มีค่า w/c ratio ประมาณ 3 หรือน้อยกว่าจะส่งผลให้ดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ของวัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ของถนนดังแสดงในรูปที่ 8

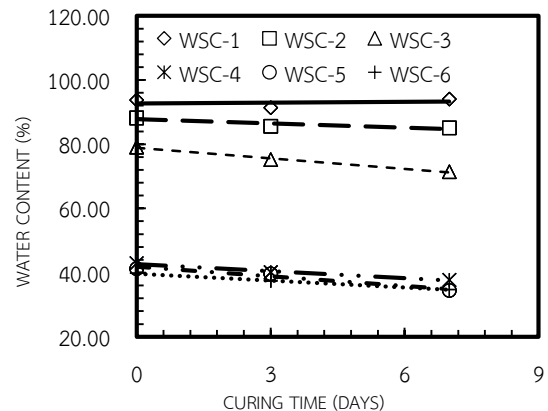


รูปที่ 8 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวกับ w/c ratio

การทดสอบปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ สรุปในตารางที่ 4 เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นกับอายุการบ่มพบว่าในทุกสัดส่วนผสมปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลงตามอายุการบ่ม ในช่วงเริ่มต้นของการทำปฏิกิริยาอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นมีค่าค่อนข้างสูง และจะมีแนวโน้มลดลงที่อายุการบ่มมากขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟแนวโน้มในรูปที่ 9

ตารางที่ 4 ปริมาณความชื้นในดินตะกอนประปาซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

Mixture	ปริมาณความชื้นในดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ที่อายุการบ่ม (ร้อยละ)		
	0 Days	3 Days	7 Days
WSC-1	97.19	91.31	94.00
WSC-2	88.12	85.58	85.07
WSC-3	79.06	75.16	71.42
WSC-4	42.31	40.13	37.74
WSC-5	41.75	39.63	34.41
WSC-6	40.20	37.40	34.75

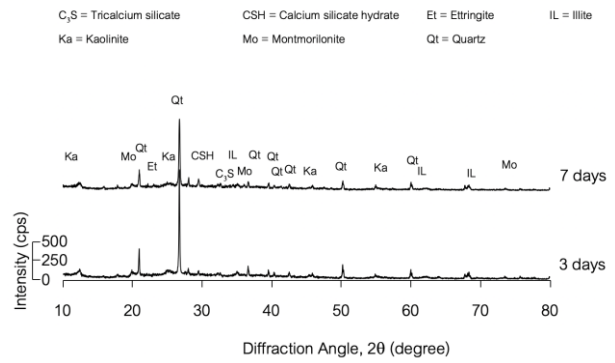


รูปที่ 9 ปริมาณความชื้นในดินตะกอนประปาหลังผสมซีเมนต์กับอายุการบ่ม

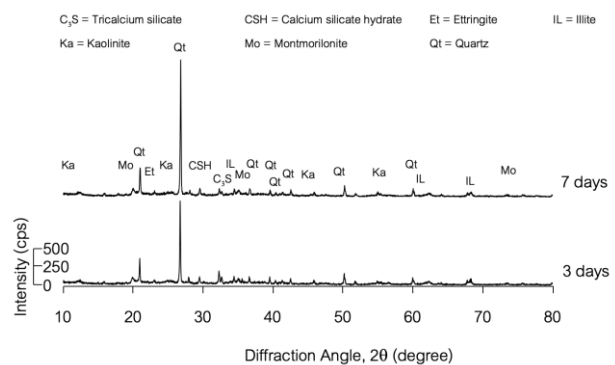
อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นในบางอายุการบ่มมี การแกว่งตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่ำ (ตัวอย่าง WSC-1, WSC-2 และ WSC-3) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุ เนื่องมาจากการสุ่มเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์มาทดสอบหา ปริมาณความชื้นภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกน เดียว เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ของ สัดส่วนผสมดังกล่าวมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงยังคงมี ปริมาณน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาก่อนข้างสูง ในโครงสร้าง ดินซีเมนต์ที่ยังไม่แข็งแรงเนื่องอนุภาคดินกับสาร ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีการเชื่อมเกาะกันแต่ยังขาดความ ต่อเนื่องซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด แกนเดียว

ในทางตรงกันข้าม ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีความชื้น เริ่มต้นต่ำกว่าและอยู่ในช่วงที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม (ตัวอย่าง WSC-4, WSC-5 และ WSC-6) อัตราการลดลงของปริมาณความชื้น ในช่วงอายุการบ่มน้อยจะมีแนวโน้มค่อนข้างสูงกว่า ในขณะที่การแกว่งตัวของผลการทดสอบปริมาณความชื้น จึงมีน้อยกว่า เนื่องจากน้ำส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ปฏิกิริยา ไฮเดรชันเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เชื่อมและยึดโยงกับ อนุภาคดิน เกิดเป็นโครงสร้างดินซีเมนต์ที่แข็งแรงส่งผล ให้ดินซีเมนต์มีการพัฒนากำลังอย่างมาก ความสัมพันธ์ ระหว่างสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ตลอดจนลักษณะ โครงสร้างของดินซีเมนต์ในแต่ละช่วงอายุการบ่มที่ สัมพันธ์กับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

จากผลการวิเคราะห์ XRD แบบ Semi-quantitative Analysis ของตัวอย่าง WSC-3 และ WSC-6 ดังแสดงใน รูปที่ 10 และรูปที่ 11 พบว่าในตัวอย่างดินตะกอน ประ ปามีแร่ดิน เหนียว เช่น Kaolinite, Illite, Montmorillonite และ Quartz เป็นองค์ประกอบหลัก ทางเคมี นอกจากนี้ ยังตรวจพบสารตั้งต้นและสาร ผลิตภัณฑ์ในดินตะกอนประปาสผสมซีเมนต์ปรากฏตาม ตำแหน่งต่าง ๆ ตารางที่ 5 แสดงปริมาณสารผลิตภัณฑ์ จากปฏิกิริยา Hydration ได้แก่ CSH และ Ettringite พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ส่งผลให้กำลังรับ แรงอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผล การศึกษาของ Kamon and Nontananandh [9] และวฤธ [17]



รูปที่ 10 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอน ประปาศีเมนต์ WSC-3



รูปที่ 11 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอน ประปาศีเมนต์ WSC-6

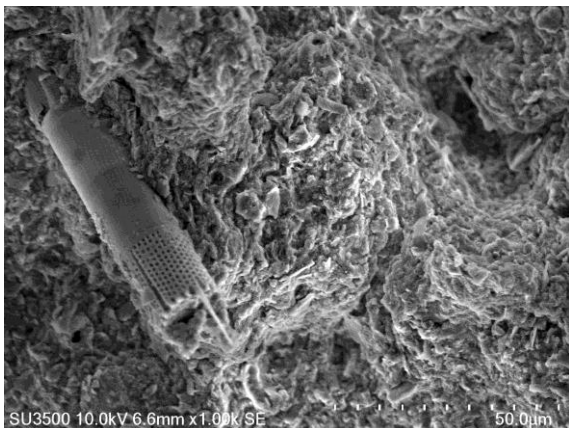
ตารางที่ 5 CSH and Ettringite ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

Mixture	CSH at Curing Time (cps)		Ettringite at Curing Time (cps)	
	3 Days	7 Days	3 Days	7 Days
WSC-1	130	116	96	102
WSC-2	119	108	110	107
WSC-3	126	180	88	95
WSC-4	115	73	77	109
WSC-5	137	178	76	78
WSC-6	112	149	73	72

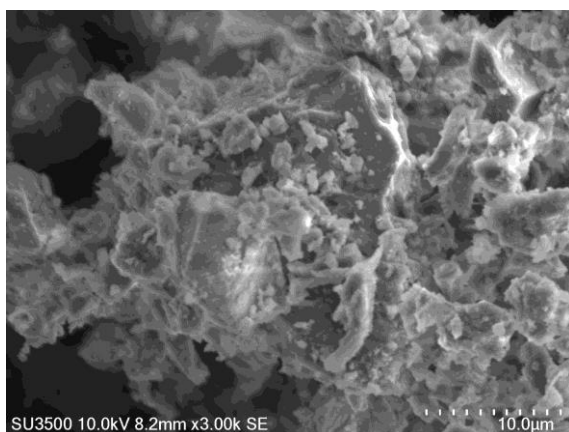
การอธิบายกลไกของการพัฒนากำลังสามารถยืนยัน ได้จากการวิเคราะห์ XRD ร่วมกับการสังเกตโครงสร้าง ดินตะกอนประปาสผสมซีเมนต์ในระดับจุลภาคที่ เปลี่ยนแปลงไปตาม w/c ratio และอายุการบ่ม โครงสร้างในดินตะกอนประปาสผสมซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ผสม กับซีเมนต์จะมีลักษณะคล้ายแผ่นผ้าแสดงดังรูปที่ 12



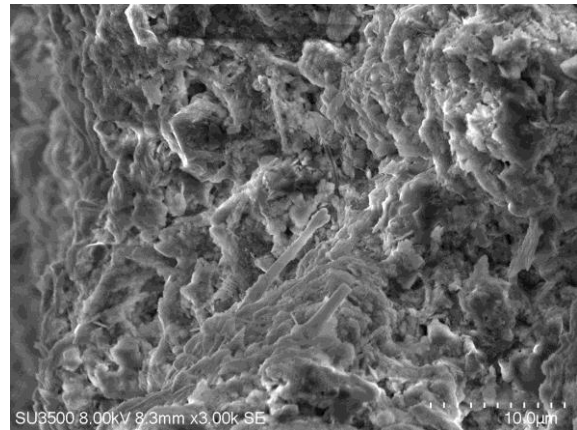
เช่นเดียวกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ก่อนทำปฏิกิริยา (Anhydrous cement) ก็จะมีลักษณะเป็นผลึกที่มีเหลี่ยมคมมีขนาดประมาณ 5 - 20 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 13 ในดินซีเมนต์ที่ไม่มีการพัฒนากำลังอย่างชัดเจน โครงสร้างก็จะมีลักษณะคล้ายกับดินธรรมชาติ ก่อนผสมปูนซีเมนต์ เช่นในโครงสร้างดิน WSC-1 ที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 14 และรูปที่ 15 แม้ว่าโครงสร้างของ WSC-3 จะสังเกตพบว่ามีสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ปกคลุมพื้นผิวมากขึ้นกว่าที่พบใน WSC-1 (ดูรูปที่ 16 และรูปที่ 17) แต่เนื่องจากในโครงสร้างเดิมมีโพรงซึ่งเคยมีน้ำอยู่มาก เมื่อสารประกอบตั้งต้นหลักในปูนซีเมนต์ เช่น  $C_3S$  (Tricalcium Silicate) และ  $C_3A$  (Tricalcium Aluminate) ใช้น้ำทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ขึ้น จึงเกิดโพรงช่องว่างกระจายตัวมีผลทำให้ดินตะกอนประปามีการพัฒนากำลังมากขึ้นได้ในระดับหนึ่ง



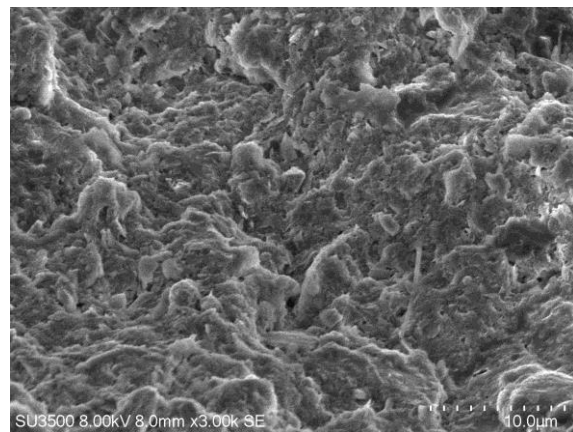
รูปที่ 12 โครงสร้างดินตะกอนประปตามธรรมชาติ (กำลังขยาย  $\times 1,000$  เท่า)



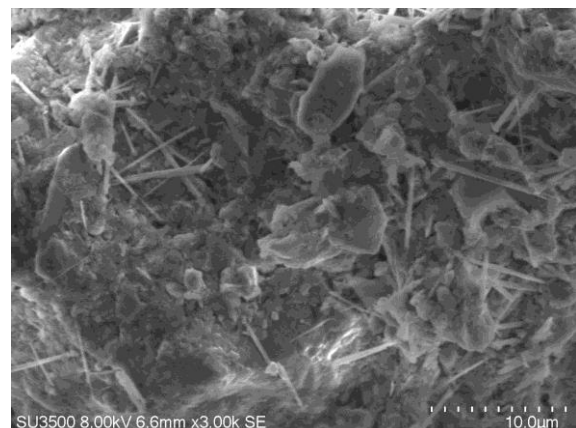
รูปที่ 13 โครงสร้างดินปูนซีเมนต์ (กำลังขยาย  $\times 3,000$  เท่า)



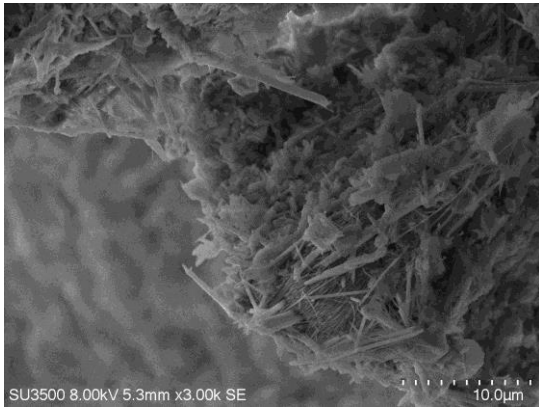
รูปที่ 14 โครงสร้างดินตะกอนประปาศีเมนต์ (WSC-1) ที่อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย  $\times 3,000$  เท่า)



รูปที่ 15 โครงสร้างดินตะกอนประปาศีเมนต์ (WSC-1) ที่อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย  $\times 3,000$  เท่า)

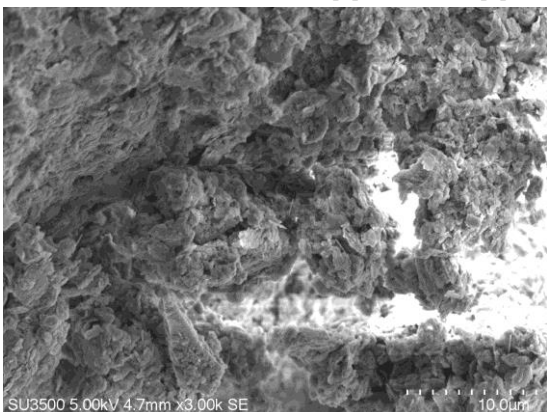


รูปที่ 16 โครงสร้างดินตะกอนประปาศีเมนต์ (WSC-3) ที่อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย  $\times 3,000$  เท่า)

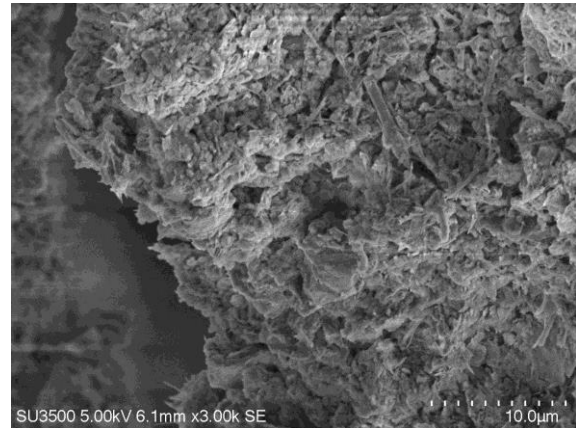


รูปที่ 17 โครงสร้างดินตะกอนประปาซีเมนต์ (WSC-3)  
ที่อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 3,000 เท่า)

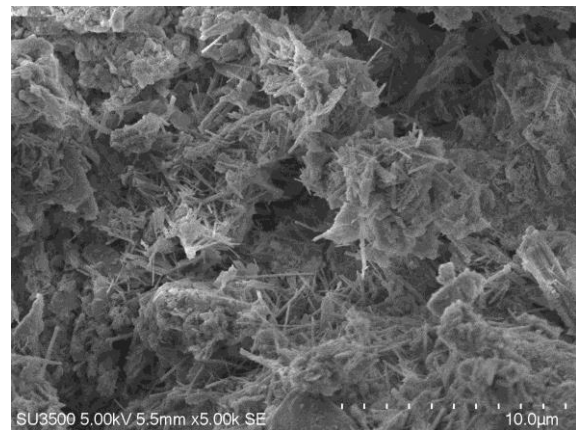
ในทางตรงกันข้ามจากสังเกตภาพถ่าย SEM Micrograph ของดินตะกอนประปาที่มีการทำ pre-treatment โดยการปรับลดปริมาณน้ำลง ทำให้ w/c ratio อยู่ในช่วงที่เหมาะสมพบว่าโครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณา SEM Micrograph ในรูปที่ 18 - รูปที่ 21 พบว่าเนื้อดินมีการจับตัวกันเป็นก้อนและโครงสร้างภายในมีความแน่นมากขึ้น นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าในดินตะกอนประปาซีเมนต์ไม่ปรากฏพบผลึกของปูนซีเมนต์ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงเกิดเป็นสารผลึกภัณฑ์หลักของ CSH ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นเกล็ดเล็ก ๆ และ Ettringite ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวยึดเกาะกับอนุภาคดินปกคลุมทั่วบริเวณพื้นผิวมากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันร่วมกับผลการทดสอบ XRD ส่งผลให้ดิน WSC-4 และ WSC-6 ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและยังสอดคล้องกับผลการศึกษการปรับปรุงดินตะกอนทะเลซึ่งศึกษาโดยประกิต [5] และ ธเนศ [6]



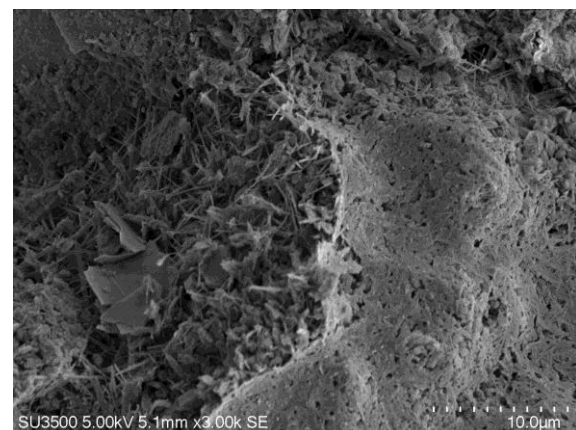
รูปที่ 18 โครงสร้างดินตะกอนประปาซีเมนต์ (WSC-4)  
ที่อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 3,000 เท่า)



รูปที่ 19 โครงสร้างดินตะกอนประปาซีเมนต์ (WSC-4)  
ที่อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 3,000 เท่า)



รูปที่ 20 โครงสร้างดินตะกอนประปาซีเมนต์ (WSC-6)  
ที่อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย x 3,000 เท่า)



รูปที่ 21 โครงสร้างดินตะกอนประปาซีเมนต์ (WSC-6)  
ที่อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5,000 เท่า)

## 5. สรุปผล

จากการศึกษาวิจัยการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาโดยใช้ซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานได้ข้อสรุปดังนี้

5.1 ดินตะกอนประปามีคุณสมบัติเบื้องต้นสอดคล้องกับเกณฑ์การคัดเลือกกากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ (NICE Criteria) มีกำลังเพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์โดยการพัฒนากำลังรับแรงอัดขึ้นอยู่กับการบ่มส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ใช้ อายุการบ่ม และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของกากตะกอนก่อนปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้การลดปริมาณความชื้นเป็นเทคนิคที่สำคัญและเหมาะสมในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของดินตะกอนประปาซีเมนต์

5.2 อัตราส่วนน้ำของดินตะกอนประปาต่อปริมาณซีเมนต์ (w/c ratio) เริ่มต้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนประปา โดย w/c ratio ที่อยู่ในช่วง 3.07 - 1.84 จะทำให้ดินซีเมนต์ตะกอนประปามีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 5.06 - 16.43 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถใช้ประเมินคุณสมบัติในการเลือกอัตราส่วนผสมของดินตะกอนประปาซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานทางค่า w/c ratio ของดินตะกอนประปาซีเมนต์ ควรมีค่าน้อยกว่า 3 จะทำให้เกิดการพัฒนากำลังโดยกำลังที่อายุการบ่ม 7 วัน มากกว่า 7 kg/cm<sup>2</sup>

5.3 จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพด้วยการวิเคราะห์ X - ray Diffraction (XRD) พบว่าการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์หลัก Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Sulfoaluminate Hydrate (Ettringite) จากปฏิกิริยา Hydration มีผลต่อการพัฒนากำลังของดินตะกอนซีเมนต์เมื่ออัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และอายุการบ่มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของ CSH และ Ettringite ที่เกิดขึ้นแล้ว การยึดโยงของสารผลิตภัณฑ์ (Reaction products) กับอนุภาคดินเกิดเป็นโครงสร้างที่มีความหนาแน่นแข็งแรงนับเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้ดินตะกอนประปาเกิดการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่า

5.4 จากการวิเคราะห์โครงสร้างดินโดยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) Observation สามารถใช้ยืนยันร่วมกับผลการทดสอบจาก XRD โดยการสังเกต

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในระดับจุลภาคที่สอดคล้องกับการพัฒนากำลังในดินที่มีกำลังรับแรงอัดสูงที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH ซึ่งมีรูปร่างเป็นเกล็ดเล็ก ๆ และ Ettringite ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวเชื่อมอนุภาคของดินตะกอนซีเมนต์เกิดเป็นโครงสร้างที่เชื่อมแน่นและแข็งแรงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ w/c ratio ที่เหมาะสมและที่อายุการบ่มเพิ่มขึ้น

5.5 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อพิจารณาศักยภาพใช้ดินตะกอนประปาเป็นวัสดุในงานถนน เช่น ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม หากจะนำไปใช้งานจริงควรทำการวิจัยศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางด้านกายภาพที่สอดคล้องกับเกณฑ์กำหนดและการทดสอบตามมาตรฐานในการก่อสร้าง รวมถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้น เช่น คุณสมบัติในด้านความทนทาน

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การอนุเคราะห์สนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษานี้ ขอขอบพระคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) และขอขอบพระคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์การทดสอบโดยใช้เครื่อง X - ray Diffractometer (XRD) ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงบรรลุตามวัตถุประสงค์

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bangkhen Water Treatment Plant Department, "Report on Production - Supply and Production Costs of Bangkhen Water Treatment Plant," Metropolitan Waterworks Authority, Bangkok, 2020. (in Thai)
- [2] S. Pattanakudee, "Academic and Information Division," Bangkhen Water Treatment Plant, Bangkok, 2017. (in Thai)

- [3] M. Kamon, " Definition of Environmental Geotechnology," in *Proceeding of the 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1989.
- [4] S. Nontananadh, M. Kamon and T. Seishi, "Environmental Geotechnology for Potential Waste Utilization," in *Proceeding of the 9<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1991.
- [5] P. Kaewkaorop, " Stabilization of Seabed Dredged Material for Landfill Liners," Kasetsart University, Bangkok, 2007.
- [6] T. Thongdetsri, "Improvement Mechanism of Seabed Dredged Sludge Stabilized with Cement," Kasetsart University, Bangkok, 2008. (in Thai)
- [7] P. Chanprasert, "A Study on Compressive Strength Behavior of Sludge - Fly Ash Geopolymer," Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 2013. (in Thai)
- [8] N. Yoobanpot, " Guideline for Selection of Stabilizing Agents for Soil Improvement by Chemical Stabilization," *The Journal of KMUTNB*, vol. 23, no. 3, pp. 773 - 782, 2013. (in Thai)
- [9] M. Kamon and S. Nontananadh, "Combination of Industrial Wastes with Lime for Soil Stabilization," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, no. 1, pp. 1 - 17, 1991.
- [10] S. Nontananadh, T. Yoobanpot and S. Boonyong, " Scanning Electron Microscopic Investigation of Cement Stabilized Soil," in *Proceeding of the 8th National Convention on Civil Engineering*, 2005.
- [11] S. P. Pathivada, "Effects of Water - Cement Ratio on Deep Mixing Treated Expansive Clay Characteristics," The University of Texas at Arlington, Arlington, 2005.
- [12] S. Karawek, S. Khonthon, A. Intarapadung and T. Thiamtham, "Development of Mixed Bodies from Water Treatment Sludge for Pottery," *Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)*, vol. 14, no. 1, pp. 117 - 136, 2019. (in Thai)
- [13] P. Y. Lee and R. J. Suedkamp, " Characteristics of Irregularly Shaped Compaction Curves in Soils," *Highway Research Record*, vol. 381, pp. 1 -9, 1972.
- [14] D. Suriyachat, P. Wichitamornphan and W. Ruangsumrej, " Applications on the Utilization of Water Treatment Sludge," *Department of Primary Industries and Mines, Technical Report Issue no. 16*, pp. 1 - 43, 2004. (in Thai)
- [15] S. Tiyasangthong, C. Suksiripattanapong, C. Ngohpok and S. Akkakaiee, " Effect of Temperature on Unit Weight and Strength of Cellular Lightweight Water Treatment Sludge - Fly Ash Geopolymer," in *The 7th Engineering, Science, Technology and Architecture Conference (ESTA - CON 2016)*, 2016. (in Thai)
- [16] Department of Highway of Thailand, "Road Construction Supervision," *Manual for Construction Supervision of Highways*, vol. 2, 2007. (in Thai)
- [17] W. Rattanaroongrot, " Stabilization of Soft Bangkok Clay Using Cement Mixed with Iron Slag Powder and Paper Manufacturing Biomass Ash," Kasetsart University, Bangkok, 2019. (in Thai)