



## การปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาด้วยปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในวัสดุงานทาง

ธเนศ ทองเดชศรี<sup>1</sup> ศุภกิจ นนทนาณันท์<sup>2\*</sup> สิทธินันท์ น้อยภาณี<sup>3</sup> ศรัณย์ เรืองฉาย<sup>4</sup> และ อภินิธิ ใจติงกาศ<sup>5</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาโดยใช้ซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานและทำการทดลองหาอัตราส่วนของซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ดินซีเมนต์ที่สามารถใช้เป็นวัสดุงานทางได้ตามต้องการ ศึกษาคุณสมบัติทางวิเคราะห์ของดินตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วัน ตลอดจนศึกษากลไกของปฏิกิริยาเคมีโดยทำการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮดรีชันและสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนประปาซีเมนต์โดยใช้เครื่อง X - Ray Diffraction (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ตามลำดับ จากผลการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าดินตะกอนประปาตากแห้งที่ลานตากตะกอนมีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 120 - 130 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาทดลองผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วน 150, 200, และ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่ามีการพัฒนากำลังอัดค่อนข้างต่ำลงแม้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม จากการศึกษาพบว่ากำลังของดินตะกอนประปามีซีเมนต์สามารถปรับปรุงได้โดยใช้เทคนิคการปรับลดปริมาณความชื้นเริ่มต้นก่อนผสมทำให้ได้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระยะสั้น อัตราส่วนปริมาณความชื้นของดินตะกอนประปาต่อปริมาณซีเมนต์ (w/c ratio) ในช่วง 3.07 - 1.84 ทำให้ดินตะกอนประปามีความชื้นที่ต่ำกว่าดินซีเมนต์เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 5.06 - 16.43 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ในงานถนน ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเคมีกายภาพจากการวิเคราะห์โดย X - Ray Diffraction (XRD) พบว่าสารผลิตภัณฑ์หลัก Calcium Silicate Hydrate (CSH) มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนผสมและอายุการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่าสารผลิตภัณฑ์ Calcium Sulfoaluminate Hydrate (Ettringite) ที่เกิดขึ้นในช่วงต้นของปฏิกิริยาไม่ส่วนสำคัญที่ช่วยทำให้ดินซีเมนต์มีโครงสร้างที่แน่นขึ้นจากการสังเกตภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่าสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite สามารถตัวปะคลุมทั่วบริเวณพื้นผิวและเชื่อมโยงอนุภาคดินตะกอนซีเมนต์โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีการพัฒนากำลังที่สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ 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> ผู้ทายนักวิจัยอิสระ

<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 ทำให้ความต้องการในการผลิตน้ำประปาอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกปี โดยการผลิตน้ำประปาของจังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑลซึ่งใช้แหล่งน้ำดิบที่สำคัญ 2 แหล่ง คือแม่น้ำเจ้าพระยาในจังหวัดปทุมธานีและแม่น้ำท่าจีน ในจังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นแหล่งน้ำธรรมชาติในการผลิตซึ่งโดยปกติจะมีสารแขวนลอยปนเปื้อนในแหล่งน้ำเป็นจำนวนมาก จากข้อมูลของการประปาครอง โรงงานผลิตน้ำบางเขน มีปริมาณการสูบน้ำดิบจำนวน 4,110,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อนำไปผ่านกระบวนการในการผลิตน้ำประปา โดยมีขั้นตอนการผลิตที่สำคัญดังนี้ คือ 1) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ 2) การเติมสารเคมี 3) การตกตะกอน 4) การกรอง 5) การฆ่าเชื้อโรค 6) การปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา 7) การสูบจ่ายน้ำประปา และ 8) การควบคุมคุณภาพน้ำ โดยสามารถจ่ายน้ำประปาให้กับประชาชนจำนวน 3,900,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน [1] ตามขั้นตอนการตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา เมื่อแหล่งน้ำดิบมีการปนเปื้อนของสารแขวนลอยมาก ทำให้มีค่าความชุ่มมาก ส่งผลให้เกิดปริมาณตะกอนน้ำประปาเป็นจำนวนมากขึ้นทุกปี จากสถิติของโรงงาน ผลิตน้ำบางเขนพบว่ามีปริมาณตะกอนแห้ง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 ถึงปี พ.ศ. 2563 เหลือสูงถึง 54,000 ตันต่อปี กระบวนการกำจัดตะกอนประปามี 2 วิธีหลัก ๆ คือ วิธีตามธรรมชาติโดยการนำดินตะกอนประปากลางว่าง ๆ ใช้เวลาในการตกแห้งประมาณ 3 - 5 เดือนบนพื้นที่ประมาณ 750 ไร่ และระบบเบร็ตตะกอนเป็นตะกอนแผ่น (Sludge cake) โดยใช้เครื่องอัดรีดดิน (Filter press) ในทางปฏิบัติ การประปาครองใช้วิธีการกำจัดโดยการจ้างหนันดินไปทิ้งหรือนำไปปนที่ดินที่โดยเสียค่าจ้างเหมาเป็นรายปีปัลส์ไม่น้อยกว่า 21 ล้านบาท [2] นอกจากนี้ในปัจุบันยังมีการนำไปผลิตอิฐบล็อกประปาน แผ่นพื้นทางเท้าวัสดุตกแต่งสวนรวมทั้งการนำไปใช้ในภาคการเกษตรเพื่อเพิ่มมูลค่า

กระบวนการผลิตน้ำประปามีภาระต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก กระบวนการจัดการดินตะกอนน้ำประปานั้นเป็นกระบวนการที่จำเป็นต้องใช้พื้นที่จำนวนมากเพื่อรับการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอน ปัญหาด้านค่าใช้จ่ายในการ

เปลี่ยนสถานะจากตะกอนเหลวเป็นตะกอนแห้งเพื่อให้สามารถต่อการขนส่ง ปัญหาด้านการขนย้ายตะกอนที่ต้องใช้ระยะเวลา รวมถึงค่าใช้จ่ายในการขนส่ง งานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งหวังที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยนำเสนอทางเลือกในการกำจัดตะกอนประปามีที่จากการกระบวนการผลิตน้ำประปายโดยการศึกษาศักยภาพในเบื้องต้นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง(Subbase) สำหรับงานก่อสร้างถนน

## 2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดในการปรับปรุงคุณภาพตะกอนประปามีปริมาณความชื้นสูง โดยเลือกเทคนิคการเขีอมประสานและการอัดแน่น (Cementation and Densification) ในการพัฒนากำลังของดินให้สูงขึ้นซึ่งแนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการทำงานวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม (Geo - Environmental Engineering) ในประเด็นการใช้ประโยชน์ของกากอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้าง [3] ทั้งนี้ต้องการประปามีที่ใช้ศึกษามีคุณสมบัติเบื้องต้นสอดคล้องกับหลักเกณฑ์ NICE Criteria ที่เสนอโดย Nontananandh et al. [4] เนื่องจากเป็นดินตะกอนที่ปราศจากการปนเปื้อนและมีงานวิจัยในอดีตที่สนับสนุนการพัฒนากำลังของดินตะกอนต่าง ๆ เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์หรือจีโอลิเมอร์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม [5], [6], [7]

ผล [8] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนพบร่วมกับการเลือกใช้สารเขีอมประสานที่เหมาะสมกับชนิดของดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ดินมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามที่ต้องการ เช่น คุณสมบัติด้านกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติด้านวิศวกรรม ทั้งนี้เป็นผลจากปฏิกิริยาเคมีเกิดสารผลิตภัณฑ์ เช่น Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ส่งผลกระทบการพัฒนากำลังซึ่งสามารถยืนยันได้จากการวิจัยที่เสนอโดย Kamom and Nontananandh [9] ซึ่งประยุกต์ใช้เครื่อง X - ray Diffractometer (XRD) ในการจำแนกสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดในดินถ้าว่าเป็นโครงสร้างของ CSH และ Ettringite เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ช่วยพัฒนากำลังดินอ่อนที่มีความไวต่อและปริมาณความชื้นสูง



Nontananandh et al. [10] พบว่าในดินเหนียวอ่อน ผสมปูนซีเมนต์ที่มีกำลังสูง โครงสร้างระดับจุลภาคในดินซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นจากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ทั้งนี้จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปรับปรุงคุณภาพดินบรวมด้วยใช้ปูนซีเมนต์ Pathivada [11] พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (water - cement ratio) มีผลต่อการเพิ่มขึ้นด้านกำลังของดินซีเมนต์และความเค้นหดตัว (shrinkage strain) เมื่อ W/c ratio เพิ่มขึ้น กำลังของดินซีเมนต์มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณความเค้นหดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

### 3. วิธีการดำเนินการวิจัย

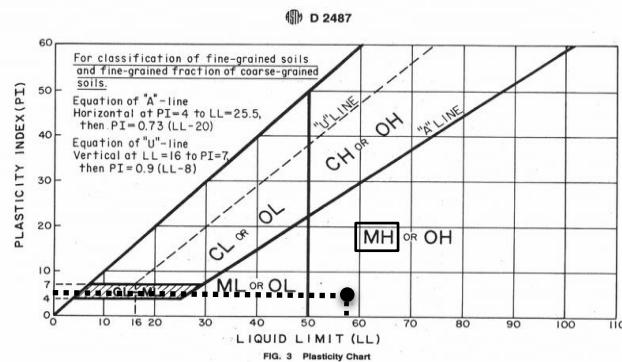
การวิจัยการนำดินตะกอนประปาไปใช้ประโยชน์ เริ่มจากการเก็บตัวอย่างดินจากสถานที่ต่างๆ ของโครงการผลิตน้ำบางเขน กรุงเทพมหานคร โดยการศึกษานี้ เก็บตัวอย่างในช่วงระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2564 ได้ดินตะกอนประปาที่มีความชื้นธรรมชาติเริ่มต้นก่อนผสมซีเมนต์อยู่ในช่วง 120% - 130% จากนั้นนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งในเบื้องต้นพบว่าดินตะกอนประปาไม่ลักษณะเป็นดินเนื้อละเอียดที่มีค่าความชื้นเฉลี่ยในสภาพตากแห้ง ( $w_{air-dry}$ ) เท่ากับ 128.5% และมีคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ค่อนข้างใกล้เคียงกับการศึกษาโดยสุทธิida และคณะ [12] ยกเว้นค่าดัชนีความเหนียว ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อจำแนกดินทางวิศวกรรมจัดอยู่ในกลุ่ม MH (ดินตะกอนทรายที่มีความเหนียวสูง) เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification ดังแสดงในรูปที่ 1 และจัดอยู่ในกลุ่ม A-7-5 (20) เป็นดินตะกอนทรายที่มีดินเหนียวปนเมื่อจำแนกโดยระบบ AASHTO

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้น ของดินตะกอนประปา

รายการทดสอบ	ผลงานวิจัย ในอดีต [12]	ผลงาน วิจัยนี้
1. ความถ่วงจำเพาะ, $G_s$	2.65	2.58
2. ค่าปีดจำกัดเหลว, LL (%)	77.96	58.70
3. ค่าปีดจำกัดพลาสติก, 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		

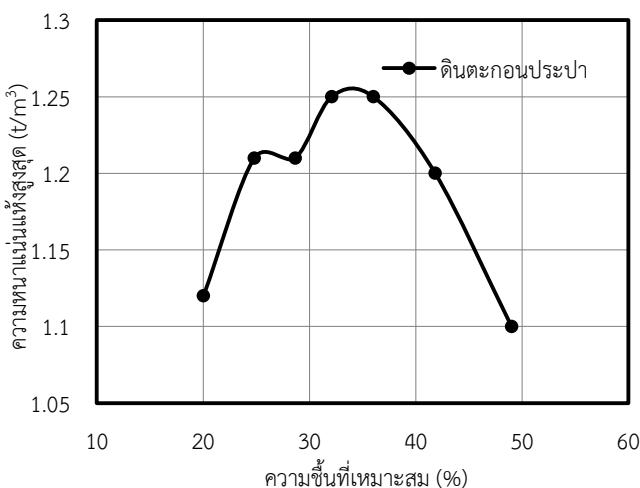
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้น ของดินตะกอนประปา (ต่อ)

รายการทดสอบ	ผลงานวิจัย ในอดีต [12]	ผลงาน วิจัยนี้
- 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) พบว่าดินตะกอนประปามีลักษณะโคลงเคลืองมาก แสดงค่า PI ที่สูง (~4.9%) และ LL ที่ต่ำ (~58.7%) แต่เมื่อบดอัดแบบ 2 ยอด (Double peak type) แสดงลักษณะของดินที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Lee and Suedkamp, 1972) [13] จากการวิเคราะห์โคลงเคลืองแสดงในรูปที่ 2 พบว่ามีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ  $1.255 \text{ t/m}^3$  และมีค่าความชื้นเหมาะสมเท่ากับ 33.91% ผลการทดสอบ กำลังรับแรงดึงด้วยแรงตึงดึงตัวที่  $0.07 \text{ kg/cm}^2$  จัดได้ว่าเป็นดินเหนียวอ่อนที่มีกำลังรับแรงดึงด้วยแรงตึงดึงตัวต่ำ



รูปที่ 2 เส้นทางการดัดดินตะกอนประปา

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในตารางที่ 2 พบร่วมดินตะกอนประปาในแต่ละช่วงมีปริมาณออกไซด์หลักเหมือนกับองค์ประกอบในดินเหนียว 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 ปริมาณออกไซด์อาจมีค่าแปรผันตัวอยู่ในช่วงแคบ ๆ ขึ้นอยู่กับสภาพของน้ำดิบ อย่างไรก็ตาม ผลการตรวจเคราะห์ทางเคมีไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนักจึงสามารถยืนยันการนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างปลอดภัย [1], [12], [14], [15] แนวคิดในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาในเบื้องต้นเป็นการทดลองหาสัดส่วนผสมของซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาがらงรับแรงอัดให้สูงขึ้นเป็นไปตามเกณฑ์ของการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) โดยในเบื้องต้นได้ทำการทดลองผสมตะกอนประปากับผสมปูนซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 128.5% และปรับลดความชื้นเริ่มต้นเป็น 46.0% เพื่อเพิ่มがらงในดินซีเมนต์โดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อดินตะกอนประปาเท่ากับ 150, 200 และ  $250 \text{ kg/m}^3$  ตามคำแนะนำของกรมทางหลวง [16] ทั้งนี้การปรับลดค่าความชื้นมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มがらงของดินซีเมนต์โดยเป็นการปรับปรุงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของส่วนผสม อัตราส่วนผสมต่าง ๆ และ w/c ratio ของการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา

องค์ประกอบออกไซด์	ดวงกลวงและคงที่ (2547) [14]	เสริมศักดิ์และคงที่ (2559) [15]	สุทธิและคงที่ (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 ผสมดินตะกอนประปา กับซีเมนต์เข้าด้วยกัน จากนั้นบรรจุในถุงดินตะกอนประปา ผสมซีเมนต์ลงในแบบหล่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร โดยมีการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างดินและใช้แผ่นพลาสติกปิดผิวด้านบนของแบบหล่อตัวอย่างเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น โดยตั้งสมมติฐานว่าปริมาณความชื้นที่ลดลงเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบในซีเมนต์และอนุภาคดินตะกอนเท่านั้น จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มที่ห้องบ่มตัวอย่าง และรอนานไปทดสอบがらงรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM D2166 ที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วัน ตามลำดับ จำนวน 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละอัตราส่วนผสม หลังการทดสอบがらงรับแรงอัดแกนเดียวทำการเก็บตัวอย่างดินบริเวณร่องที่เกิดการพังทลายไปวิเคราะห์หาสารประกอบ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer รุ่น X'Pert PRO MPD Model PW 3040/60 โดยใช้สภาวะ 40 KV และ 30 mA ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มุ่ง 2 $\theta$  ในช่วง 10 - 80 องศา เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ดินเหนียวและปริมาณสารผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากปฏิกิริยา



ไฮเดรชันได้แก่ CSH และ Ettringite ที่มุ่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $29.54, 29.64, 29.74$  องศา และ  $22.89$  องศาตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่ซ้อนทับกับสารประกอบอื่น

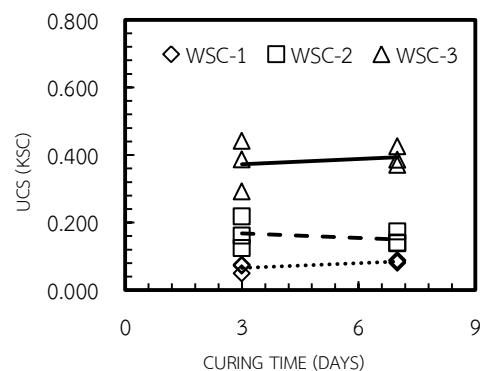
**ตารางที่ 3** สัดส่วนผสมต่าง ๆ ในการปรับปรุงคุณภาพ

Mixture	Cement Content ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	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

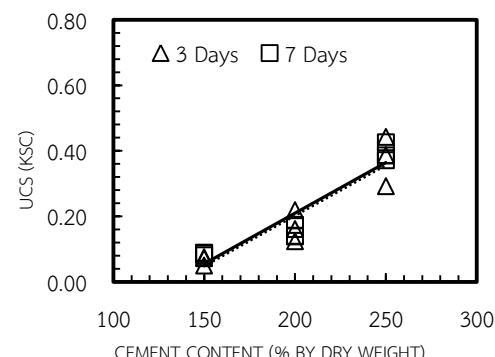
ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค ของดินตะกอนซีเมนต์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น Hitachi SU3500 ที่สภาวะ  $10 \text{ kV}$  และ  $20 \text{ mA}$  เพื่อ พิจารณาสังเกตลักษณะรูปร่างและปริมาณผลลัพธ์ของสาร ผลิตภัณฑ์ตลอดจนการยึดเกาะกับอนุภาคน้ำที่อัตรา ส่วนผสมและอายุการบ่มต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 1,000 ถึง 5,000 เท่า

#### 4. ผลการศึกษาและวิจารณ์

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) ของดินตะกอนประปา ที่ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น  $128.5\%$  ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์พบว่า ดินซีเมนต์ WSC-1, WSC-2 และ WSC-3 มีการพัฒนากำลังตามอายุ การบ่มและอัตราส่วนผสมซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป ที่ 3 และรูปที่ 4 ยกตัวอย่างเช่นกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของ ดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ที่ 7 วัน มีค่าเป็น  $0.393 \text{ kg}/\text{cm}^2$  คิดเป็น  $553.5\%$  เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของ ดินตะกอนประปาก่อนผสมซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ ( $0.071 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ) อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จาก สัดส่วนผสมนี้ยังต่ำกว่าเกณฑ์ที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุ ก่อสร้างงานทาง จึงเป็นเหตุผลในการเลือกใช้เทคนิคลด ความชื้นเพื่อปรับค่า w/c ratio และเพิ่มกำลังรับแรงอัด

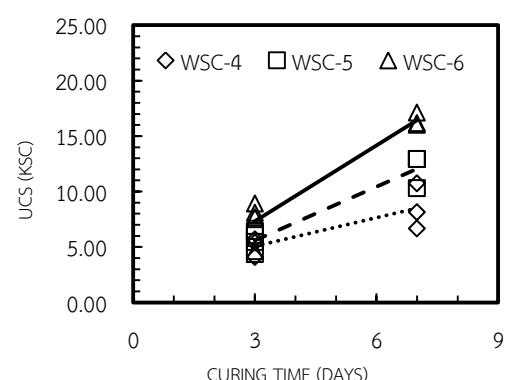


**รูปที่ 3** กำลังอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม ( $w_i=128.5\%$ )

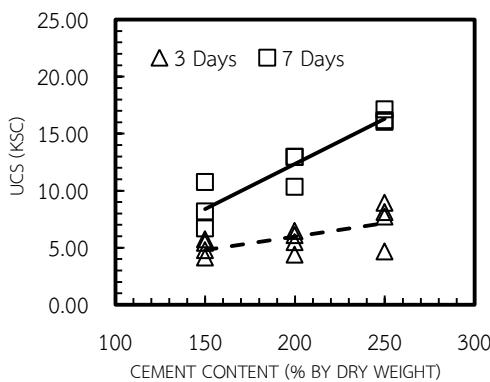


**รูปที่ 4** กำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณซีเมนต์ ( $w_i=128.5\%$ )

ผลการทดสอบการปรับปรุงดินตะกอนประปาที่ ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น  $46.0\%$  ในตัวอย่าง WSC-4, WSC-5 และ WSC-6 พบว่าดินซีเมนต์มีการพัฒนากำลังตาม อายุการบ่มและอัตราส่วนผสมซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอย่าง ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ดินซีเมนต์ WSC-4, WSC-5 และ WSC-6 มีค่ากำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยสูงถึง  $5.064$  และ  $8.531 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ,  $5.295$  และ  $12.056 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ,  $7.080$  และ  $16.428 \text{ kg}/\text{cm}^2$  ที่ 3 และ 7 วัน ตามลำดับ



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



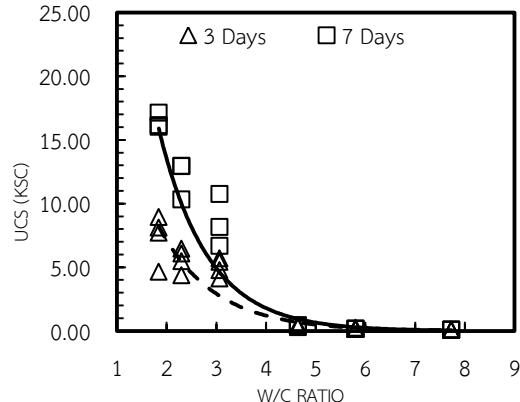
รูปที่ 6 กำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณซีเมนต์ ( $w_i=46.0\%$ )



รูปที่ 7 ตัวอย่างหลังการทดสอบที่อายุการบ่ม 7 วัน

รูปที่ 7 แสดงรูปแบบการพังทลายของตัวอย่างดินตะกอนประปาสมชีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน จากการสังเกตพบว่าในดินที่มีกำลังรับแรงอัดสูงรอยแตกจะมีความชื้นที่ใกล้แนวตั้งซึ่งมีลักษณะคล้ายกับรอยแตกของตัวอย่างคอนกรีต (WSC-6) ในขณะที่ WSC-4 ที่กำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามีรูปแบบพังทลายในแนวเฉียงแบบดินธรรมชาติ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (UCS) กับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ ( $w/c$  ratio) ของดินตะกอนประปาสมชีเมนต์ที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย  $46.0\%$  พบว่าเมื่อ  $w/c$  ratio มีค่าเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนประปาสมชีเมนต์มีแนวโน้มลดลง จากระดับฐานกรรมทางหลวงที่กำหนดคุณสมบัติวัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ (Subbase) ของถนน ต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่ม 7 วันไม่น้อยกว่า  $7 \text{ kg/cm}^2$  [16] ดังนั้น จากผลการศึกษานี้พบว่าดินตะกอนประปาสมชีเมนต์ที่มีค่า  $w/c$  ratio ประมาณ 3 หรือน้อยกว่าจะส่งผลให้ดินตะกอนประปาสมชีเมนต์มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ของวัสดุรองพื้นทางดินซีเมนต์ของถนนดังแสดงในรูปที่ 8

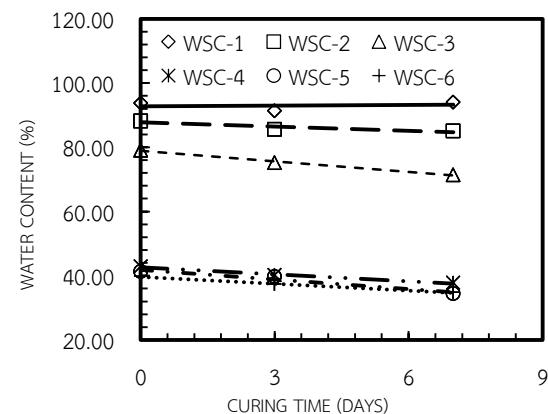


รูปที่ 8 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่  $w/c$  ratio

การทดสอบปริมาณความชื้นของดินซีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ สรุปในตารางที่ 4 เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นกับอายุการบ่มพบว่าในทุกสัดส่วนผสมปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลงตามอายุการบ่ม ในช่วงเริ่มต้นของการทำปฏิกริยาอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นมีค่าค่อนข้างสูง และจะมีแนวโน้มลดลงที่อายุการบ่มมากขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้จากความชื้นของเส้นกราฟแนวโน้มในรูปที่ 9

ตารางที่ 4 ปริมาณความชื้นในดินตะกอนประปาชีเมนต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

Mixture	ปริมาณความชื้นในดินตะกอนประปาชีเมนต์ที่อายุการบ่ม (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

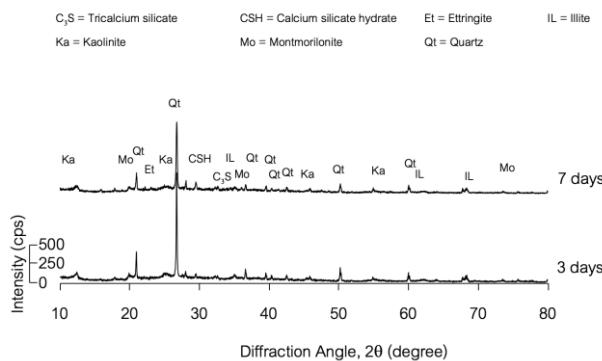


รูปที่ 9 ปริมาณความชื้นในดินตะกอนประปาหลังผสมซีเมนต์กับอายุการบ่ม

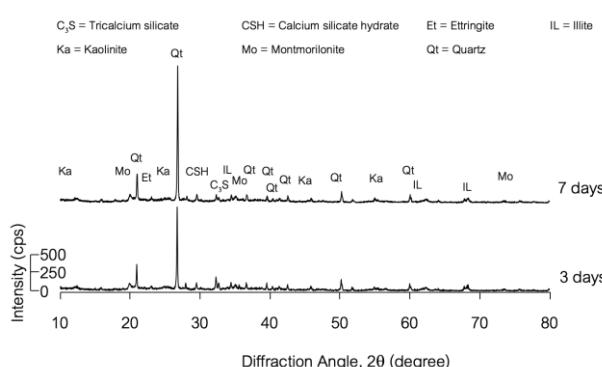
อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นในบางอายุการบ่มมีการแกร่งตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่ำ (ตัวอย่าง WSC-1, WSC-2 และ WSC-3) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการสุมกับตัวอย่างดินซีเมนต์มาตรฐานทดสอบหาปริมาณความชื้นภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ของสัดส่วนผสมดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าข้างสูง ดังนั้นจึงยังคงมีปริมาณน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาค่อนข้างสูง ในโครงสร้างดินซีเมนต์ที่ยังไม่แข็งแรงเนื่องจากติดกับสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเข้ามגעากันแต่ยังขาดความต่อเนื่องซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ในทางตรงกันข้าม ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าและอยู่ในช่วงที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม (ตัวอย่าง WSC-4, WSC-5 และ WSC-6) อัตราการลดลงของปริมาณความชื้นในช่วงอายุการบ่มน้อยจะมีแนวโน้มค่อนข้างสูงกว่าในขณะการแกร่งตัวของผลการทดสอบปริมาณความชื้น จึงมีน้อยกว่า เนื่องจากน้ำส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ปฏิกิริยา ไฮเดรชันเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เข้มและยึดโยงกับอนุภาคดิน เกิดเป็นโครงสร้างดินซีเมนต์ที่แข็งแรงส่งผลให้ดินซีเมนต์มีการพัฒนากำลังอย่างมาก ความสมดุลระหว่างสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ตลอดจนลักษณะโครงสร้างของดินซีเมนต์ในแต่ละช่วงอายุการบ่มที่สัมพันธ์กับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

จากผลการวิเคราะห์ XRD แบบ Semi-quantitative Analysis ของตัวอย่าง WSC-3 และ WSC-6 ดังแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11 พบว่าในตัวอย่างดินตะกอนประปา มีแร่ดินเหนียว เช่น Kaolinite, Illite, Montmorillonite และ Quartz เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมี นอกจากนี้ ยังตรวจสอบสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ในดินตะกอนประปาผสมซีเมนต์ปราฏภูตตามตำแหน่งต่าง ๆ ตารางที่ 5 แสดงปริมาณสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา Hydration ได้แก่ CSH และ Ettringite พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kamon and Nontananandh [9] และวุฒิ [17]



รูปที่ 10 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนประปาซีเมนต์ WSC-3



รูปที่ 11 X-ray Diffraction pattern ของดินตะกอนประปาซีเมนต์ WSC-6

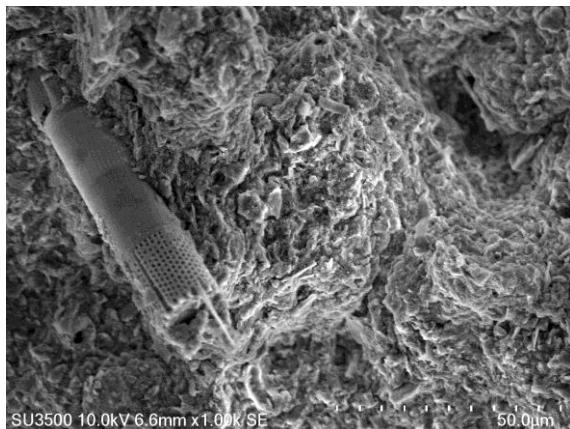
ตารางที่ 5 CSH and Ettringite ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

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

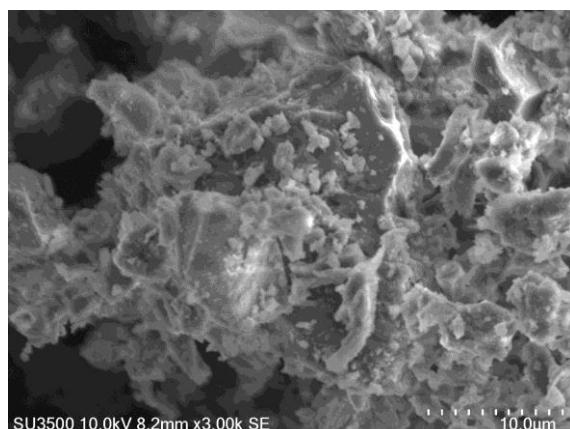
การอธิบายกลไกของการพัฒนากำลังสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ XRD ร่วมกับการสังเกตโครงสร้างดินตะกอนประปาสมซีเมนต์ในระดับจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปตาม w/c ratio และอายุการบ่ม โครงสร้างในดินตะกอนประปาจะมีลักษณะคล้ายแผ่นผ้าแสดงดังรูปที่ 12



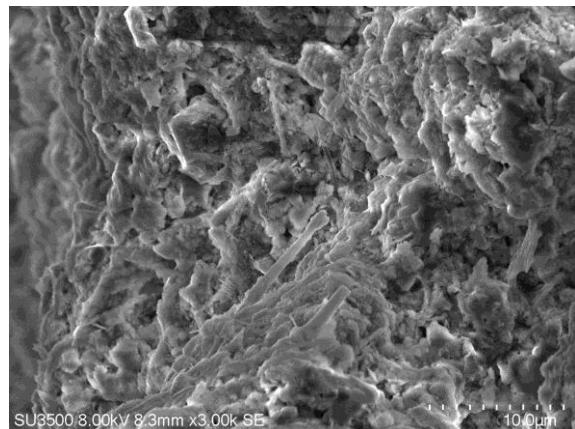
เช่นเดียวกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ก่อนทำปฏิกิริยา (Anhydrous cement) ก็จะมีลักษณะเป็นผลึกที่มีเหลี่ยมคมมีขนาดประมาณ 5 - 20 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 13 ในวันซีเมนต์ที่ไม่มีการพัฒนาがらสั่งอย่างชัดเจน โครงสร้างก็จะมีลักษณะคล้ายกับดินธรรมชาติ ก่อนผสมปูนซีเมนต์ เช่นในโครงสร้างคิน WSC-1 ที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 14 และรูปที่ 15 แม้ว่าโครงสร้างของ WSC-3 จะสังเกตพบว่ามีสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ปกคลุมพื้นผิวมากขึ้น กว่าที่พบใน WSC-1 (ดูรูปที่ 16 และรูปที่ 17) แต่เนื่องจากในโครงสร้างเดิมมีโครงสร้างเคลือมน้ำอยู่มาก เมื่อสารประกอบตั้งต้นหลักในปูนซีเมนต์ เช่น C<sub>3</sub>S (Tricalcium Silicate) และ C<sub>3</sub>A (Tricalcium Aluminate) ใช้น้ำทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ขึ้น จึงเกิดโครงสร้างที่มีความกว้างกระจาดตัวมีผลทำให้ดินตะกอนประปามีการพัฒนาがらสั่งมากขึ้นได้ในระดับหนึ่ง



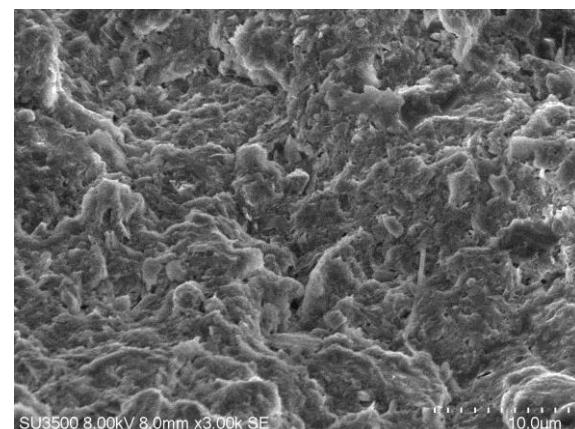
รูปที่ 12 โครงสร้างดินตะกอนประปามาตรตามธรรมชาติ (がらสั่งขยาย x 1,000 เท่า)



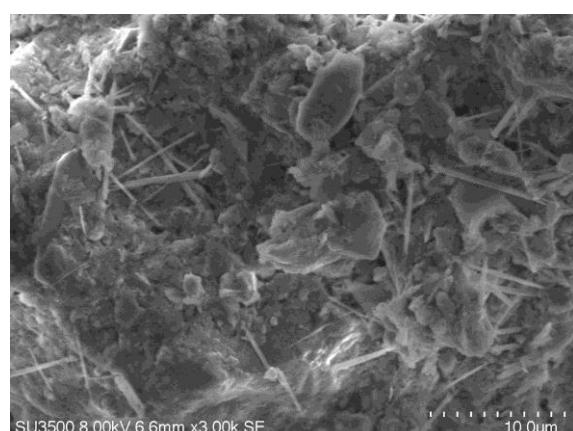
รูปที่ 13 โครงสร้างดินปูนซีเมนต์ (がらสั่งขยาย x 3,000 เท่า)



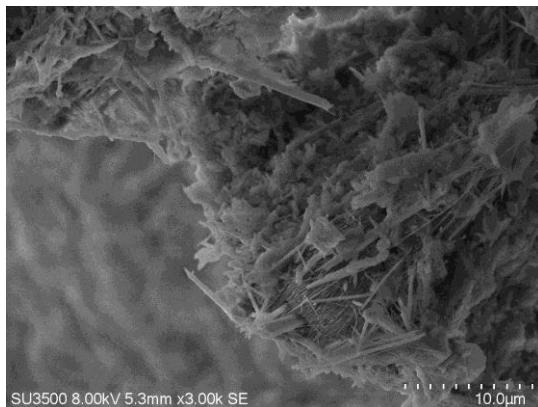
รูปที่ 14 โครงสร้างดินตะกอนประปามาตร (WSC-1)  
ที่อายุการบ่ม 3 วัน (がらสั่งขยาย x 3,000 เท่า)



รูปที่ 15 โครงสร้างดินตะกอนประปามาตร (WSC-1)  
ที่อายุการบ่ม 7 วัน (がらสั่งขยาย x 3,000 เท่า)

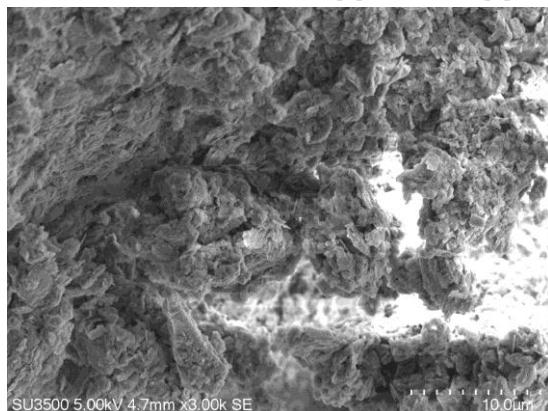


รูปที่ 16 โครงสร้างดินตะกอนประปามาตร (WSC-3)  
ที่อายุการบ่ม 3 วัน (がらสั่งขยาย x 3,000 เท่า)

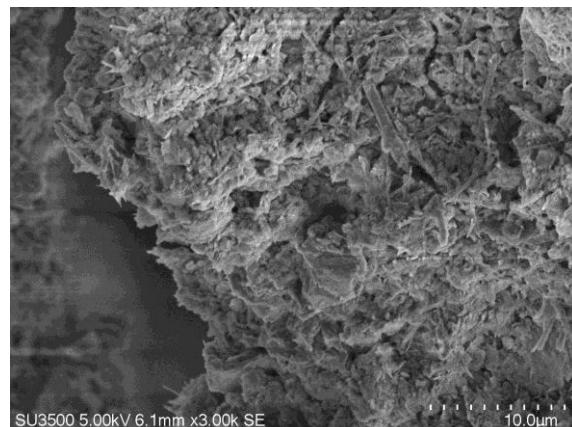


รูปที่ 17 โครงสร้างดินตะกอนประปาซีเมนต์ (WSC-3)  
ที่อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย  $\times 3,000$  เท่า)

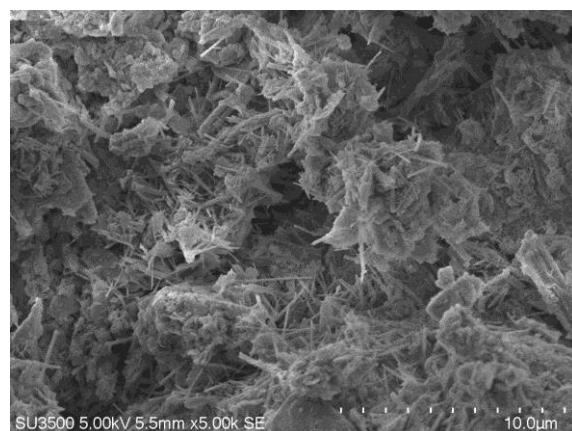
ในทางตรงกันข้ามจากสังเกตภาพถ่าย SEM Micrograph ของดินตะกอนประปาที่มีการทำ pre-treatment โดยการปรับลดปริมาณน้ำลง ทำให้ w/c ratio อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกว่าโครงสร้างของดินตะกอนซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณา SEM Micrograph ในรูปที่ 18 - รูปที่ 21 พบว่าเนื้อดินมีการจับตัวกันเป็นก้อนและโครงสร้างภายในมีความแน่นมากขึ้น นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าในดินตะกอนประปาซีเมนต์ไม่ปรากฏพอลิคลิกของปูนซีเมนต์เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรตชัน จึงเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์หลักของ CSH ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นเกล็ดเล็ก ๆ และ Ettringite ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวยึดเกาะกับอนุภาคดินปุ่กคุ่มทั่วบริเวณพื้นผิวมากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันร่วมกับผลการทดสอบ XRD สำหรับ WSC-4 และ WSC-6 ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและยังแสดงคล้องกับผลการศึกษาการปรับปรุงดินตะกอนที่ละเอียดศึกษาโดยประกิต [5] และ รเนศ [6]



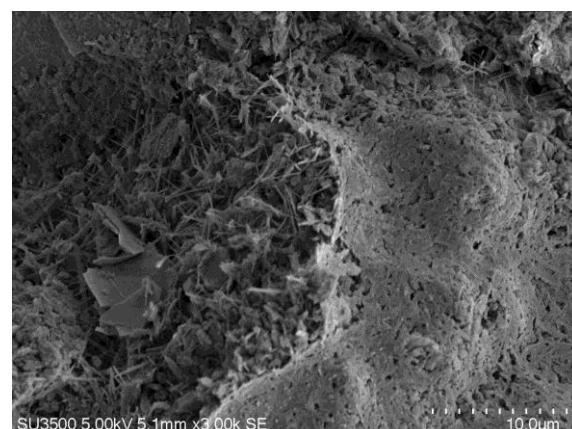
รูปที่ 18 โครงสร้างดินตะกอนประปาซีเมนต์ (WSC-4)  
ที่อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย  $\times 3,000$  เท่า)



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



รูปที่ 20 โครงสร้างดินตะกอนประปาซีเมนต์ (WSC-6)  
ที่อายุการบ่ม 3 วัน (กำลังขยาย  $\times 3,000$  เท่า)



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



## 5. สรุปผล

จากการศึกษาวิจัยการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนประปาโดยใช้ชีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสานได้ข้อสรุปดังนี้

5.1 ดินตะกอนประปามีคุณสมบัติเบื้องต้นสอดคล้องกับเกณฑ์การคัดเลือกการโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ (NICE Criteria) มีกำลังเพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์โดยการพัฒนากำลังรับแรงอัดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ใช้ อายุการบ่ม และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของการตกอนก่อนปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้การลดปริมาณความชื้นเป็นเทคนิคที่สำคัญและเหมาะสมในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของดินตะกอนประปามีชีเมนต์

5.2 อัตราส่วนน้ำของดินตะกอนประปาร่อปริมาณชีเมนต์ (w/c ratio) เริ่มต้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนประปาร้อยละ 3.07 - 1.84 จะทำให้ดินซีเมนต์ตกอนประปามีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 5.06 - 16.43 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถใช้ประเมินคุณสมบัติในการเลือกอัตราส่วนผสมของดินตะกอนประปามีชีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานทางค่าว/c ratio ของดินตะกอนประปามีชีเมนต์ ควรมีค่าน้อยกว่า 3 จะทำให้เกิดการพัฒนากำลังโดยกำลังที่อายุการบ่ม 7 วัน มากกว่า 7 kg/cm<sup>2</sup>

5.3 จากการศึกษาถลกรากและการปรับปรุงคุณภาพด้วยการวิเคราะห์ X - ray Diffraction (XRD) พบว่าการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์หลัก Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Sulfoaluminate Hydrate (Ettringite) จากปฏิกิริยา Hydration มีผลต่อการพัฒนากำลังของดินตะกอนซีเมนต์เมื่ออัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และอายุการบ่มเพิ่มขึ้น นอกจากปริมาณของ CSH และ Ettringite ที่เกิดขึ้นแล้ว การยึดโยงของสารผลิตภัณฑ์ (Reaction products) กับอนุภาคดินเกิดเป็นโครงสร้างที่มีความหนาแน่นแข็งแรงนับเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้ดินตะกอนประปาก่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่า

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

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในระดับจุลภาคที่สอดคล้องกับการพัฒนากำลังในดินที่มีกำลังรับแรงอัดสูงที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮดรอนท์ให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ CSH ซึ่งมีรูปร่างเป็นเกล็ดเล็ก ๆ และ Ettringite ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวเชื่อมอนุภาคของดินตะกอนซีเมนต์เกิดเป็นโครงสร้างที่เข้มแน่นและแข็งแรงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ w/c ratio ที่เหมาะสมและที่อายุการบ่มเพิ่มขึ้น

5.5 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อพิจารณาศักยภาพใช้ดินตะกอนประปาร่อเป็นวัสดุในงานถนน เช่น ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ อายุ่รากึกตาม หากจะนำไปใช้งานจริงควรทำการวิจัยศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางด้านกายภาพที่สอดคล้องกับเกณฑ์กำหนด และการทดสอบตามมาตรฐานในการก่อสร้าง รวมถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้น เช่น คุณสมบัติในด้านความทนทาน

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การอนุเคราะห์สนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษานี้ ขอขอบพระคุณภาควิชาศึกษาศาสตร์ วัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) และขอขอบพระคุณภาควิชาศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์การทดสอบโดยใช้เครื่อง X - ray Diffractometer (XRD) ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงบรรลุตามวัตถุประสงค์

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bangken Water Treatment Plant Department, "Report on Production - Supply and Production Costs of Bangken Water Treatment Plant," Metropolitan Waterworks Authority, Bangkok, 2020. (in Thai)
- [2] S. Pattanakudee, "Academic and Information Division," Bangken 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. Nontananad, 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. Nontananad, "Combination of Industrial Wastes with Lime for Soil Stabilization," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, no. 1, pp. 1 - 17, 1991.
- [10] S. Nontananand, 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. Akkakaisee, "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)