# บทที่ 3

# วิธีการศึกษาวิจัย

## ทั่วไป

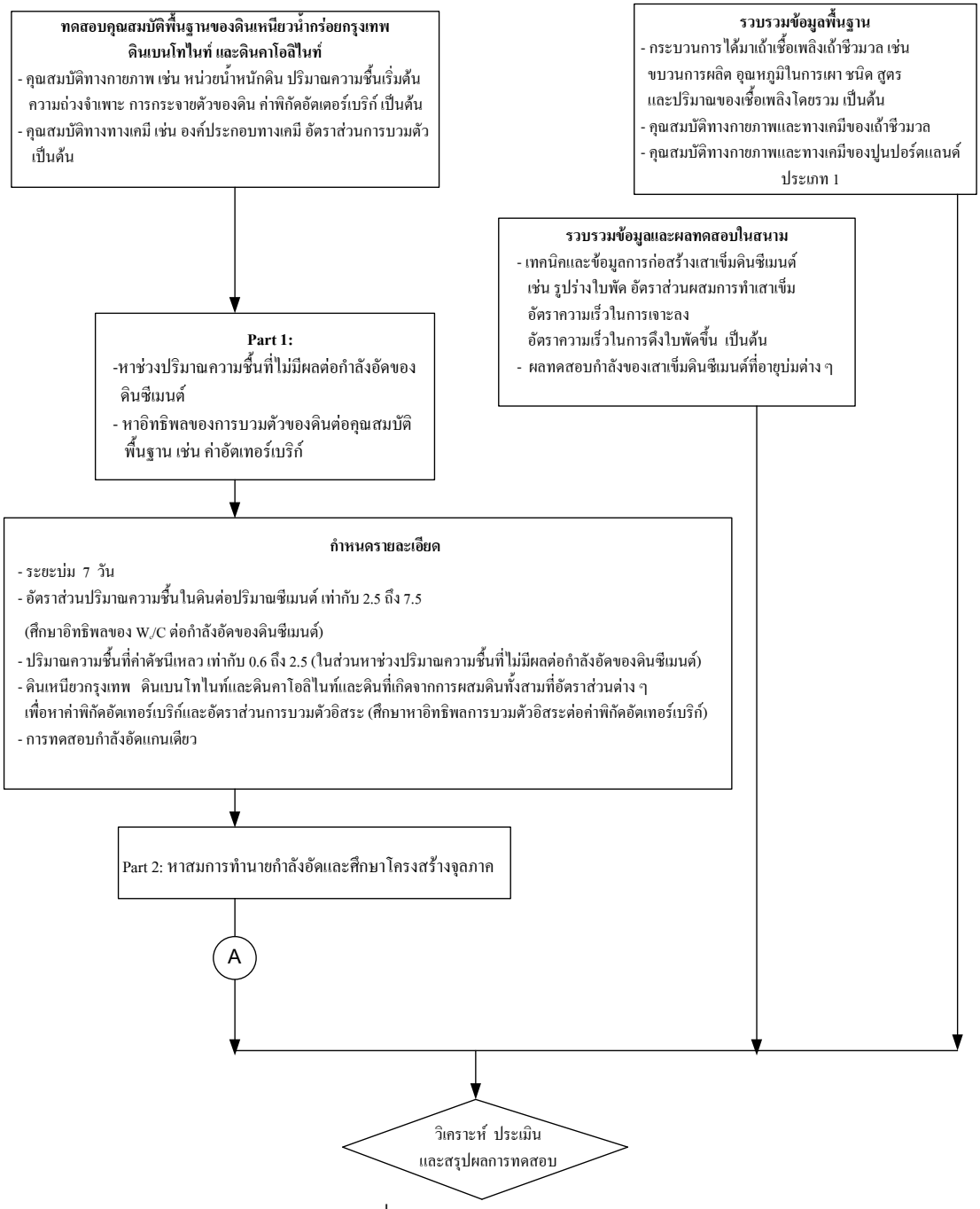
งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดแกนเดียว และลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวน้ำกร่อยกรุงเทพฯ ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวล โดยแปรผันตัวแปรควบคุม ได้แก่ อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณวัสดุเชื่อมประสานในช่วงที่ตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวแปรควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ อายุบ่ม อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ (เถ้าชีวมวล) และอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ที่เก็บจากแหล่งดินน้ำกร่อย (Intertidal Bangkok Clay) เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทยเพาเวอร์โอเปอร์เลต จำกัด (TPO) ที่ ม.3 ต.เขาหินซ้อน อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา วิธีการศึกษาวิจัยจะประกอบด้วยการศึกษาใน 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1: การเก็บและรวบรวมข้อมูลกำลังอัดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนามจริง และ

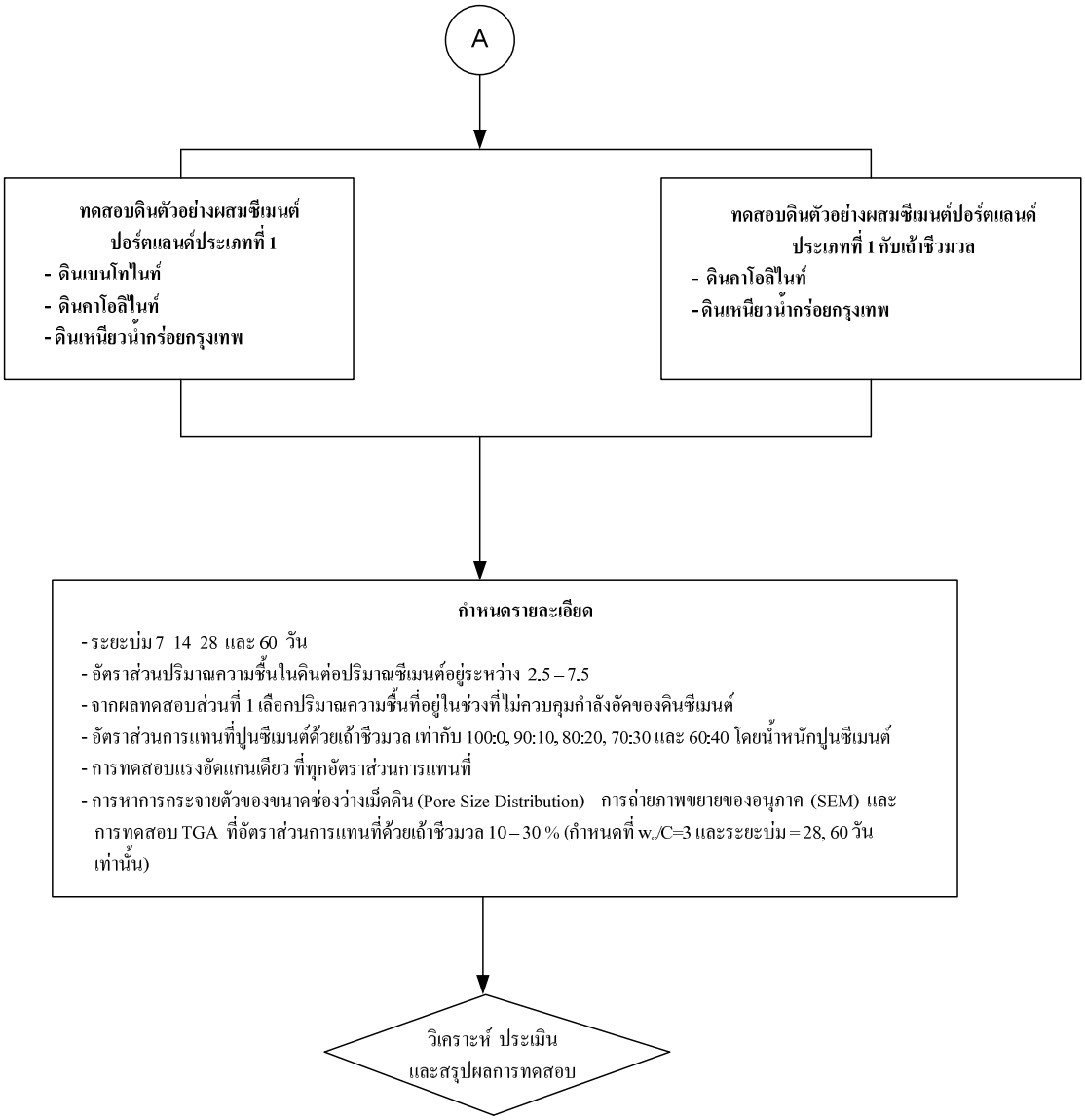
ส่วนที่ 2: การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินทดสอบ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การทดสอบการกระจายขนาดช่องว่าง (Mercury intrusion porosimeter) การถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยการส่องกวาด (Scanning Electron Microscope) และการทดสอบการวัดความร้อนภายใต้ศูนย์ถ่วง (Thermalgravimetry Analysis) ที่ทุกตัวแปรควบคุม ในส่วนการทดสอบนี้แบ่งทำการศึกษาเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ

- ศึกษาหาอิทธิพลของการบวมตัวอิสระของดินต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล
- สร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์และดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย
- ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์เถ้าลอยในช่วงปริมาณความชื้นสูง

รายละเอียดของการศึกษาทั้งหมดอธิบายพอสังเขปดังภาพที่ 3.1




ภาพที่ 3.1 วิธีการศึกษาพอสังเขป




ภาพที่ 3.1(ต่อ) วิธีการศึกษาพอสังเขป

## ขั้นตอนการทำงาน

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) รวบรวมผลทดสอบด้านกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม และ 2) ทำการทดสอบดินตัวอย่างในห้องปฏิบัติการโดยมีขั้นตอนการทำงานแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ 2.1) การหาปัจจัยควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์โดยครอบคลุมดินที่ไม่มีการบวมตัวถึงดินที่มีการบวมตัวสูงพร้อมทั้งนำเสนอสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดิน

เหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ 2.2) การหาสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลและ 2.3) การศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้

**1.การหาปัจจัยควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์**

การหาปัจจัยควบคุมกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์โดยครอบคลุมดินที่ไม่มีการบวมตัวถึงดินที่มีการบวมตัวสูงพร้อมทั้งนำเสนอสมการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ โดยมีเป้าหมายคือ

ก) เพื่อศึกษาหาช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์

ข) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (Prakash and Sridharan, 2004) ต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์โดยทำการทดสอบดินเบนโทไนท์ ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวอ่อนกรุงเทพตามส่วนผสมที่กำหนดและหาสมการทำนายกำลังอัดของดินซีเมนต์

มีรายละเอียดย่อยของการศึกษาดังนี้

1. ดินตัวอย่างที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ครอบคลุมดินเหนียวไม่บวมตัวถึงดินบวมตัว ซึ่งประกอบด้วยดินดินคาโอลิไนท์ (ดินเหนียวไม่บวมตัว) ดินเหนียวกรุงเทพ (ดินเหนียวบวมตัวต่ำ) ซึ่งถูกเก็บที่บริเวณสถานที่ก่อสร้างถนนทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน 3) ตอนอำเภอลำลูกกา – อำเภอธัญบุรี ที่ความลึก 3 ถึง 4 เมตรจากผิวดินและดินเบนโทไนท์ (ดินเหนียวบวมตัวสูง) จากนั้นทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมพื้นฐาน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน การกระจายตัวของตัวอย่าง ปริมาณความชื้น พิกัดอัตเตอร์เบอร์กและอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (Free Swelling Ratio, FSR) เป็นต้น

2. ในส่วนการศึกษาหาช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่มีผลต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์ ให้ทำการผสมดินตัวอย่าง (ดินเบนโทไนท์ ดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวน้ำกร่อยกรุงเทพ ฯ) กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อปริมาณซีเมนต์ เท่ากับ 2.5 ถึง 7.5 โดยน้ำหนักดินแห้ง กำหนดปริมาณความชื้นเท่ากับ 0.6 ถึง 2.5 เท่าของค่าดัชนีเหลวเพื่อจำลองปริมาณน้ำที่สูงเนื่องจากการเทคนิคการผสมลึก จากนั้นผสมกับดินที่ได้จากการเตรียมตามสัดส่วนต่าง ๆ ทำการกวนส่วนผสมทั้งหมด (ดินทดสอบ น้ำและปูนซีเมนต์ ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้) ในเครื่องผสมประมาณ 10 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากัน จากนั้นทำการใส่ส่วนผสมที่ได้สำหรับการทดสอบ Unconfined Compression Test ในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 เซนติเมตร และความสูงเท่ากับ 10 เซนติเมตร ทั้งนี้ทำการควบคุมหน่วยน้ำหนักของดินในแต่ละก้อนให้เท่ากันโดยทำการอัดตัวอย่างทดสอบอย่างน้อย 3 ก้อนตัวอย่างสำหรับแต่ละส่วนผสมและทำการบ่มตัวอย่างทั้งหมดในห้องบ่ม เป็นเวลา 7 วันสำหรับการหาช่วง

ที่ปริมาณความชื้นไม่เป็นตัวแปรควบคุมกำลังอัด และ 7, 14, 28 และ 60 วัน สำหรับการหาสมการทำนายกำลังอัด

3. ในส่วนการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการบวมตัวอิสระนั้น ทำการทดสอบหาค่าอัตเทอร์เบร์กของดินเหนียวกรุงเทพ ดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์และดินที่เกิดจากการผสมกันตามอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ดินมีค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระที่แตกต่างกัน และทำการผสมดินดังกล่าวด้วยปริมาณอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อซีเมนต์ที่เท่ากัน ในที่นี้เลือกเท่ากับ 3.5 กำหนดปริมาณความชื้นเท่ากับ 0.6 ถึง 2.5 เท่าของค่าดัชนีเหลว โดยทำการทดสอบที่อายุบ่ม 7 วัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) รวมตัวอย่างในการทดสอบสำหรับการทดสอบ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1

จำนวนตัวอย่างดินทดสอบผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

| การทดสอบ | ปริมาณความชื้น, % | อัตราส่วน , $w_c/C$ | ระยะบ่ม (วัน) | จำนวนตัวอย่าง (ก้อน) |
|---|---|---|---|---|
| 1. กำลังอัดแกนเดียว [A] | ปริมาณความชื้นที่ดัชนีเหลว, LI เท่ากับ | | | |
| ก.ดินเบนโทไนท์ | 0.6 0.8 1 1.5 และ 2 | 2.5 – 7.5 | 7 | 45 |
| ข.ดินคาโอลิไนท์ | 1 1.5 2 และ 2.5 | ( 3 สัดส่วน) | 7 | 36 |
| ค.ดินเหนียวกรุงเทพ | 1 1.5 2 และ 2.5 | | 7 | 36 |
| 2. กำลังอัดแกนเดียว [B] | ปริมาณความชื้นที่ดัชนีเหลว, | | | |
| ก.ดินเบนโทไนท์ | LI เท่ากับ | 3.5 | 7 | 18 |
| ข.ดินคาโอลิไนท์ | 0.6 0.8 1 1.5 2 และ 2.5 | | | 18 |
| ค.ดินเหนียวกรุงเทพ | | | | 18 |
| ง. ดินผสม 1 | | | | 18 |
| จ. ดินผสม 2 | | | | 18 |
| 3. กำลังอัดแกนเดียว [C] | | | | |
| ก.ดินเบนโทไนท์ | เลือกปริมาณความชื้น 1 จุด | 2.5 – 7.5 | | 60 |
| ข.ดินคาโอลิไนท์ | โดยได้จากผลทดสอบในส่วน | ( 5 สัดส่วน) | 7,14,28, | 60 |
| ค.ดินเหนียวกรุงเทพ | ที่ 1 | | 60 | 60 |
| | | | รวมทั้งหมด | 387 |

หมายเหตุ: - [A] หมายถึงการทดสอบในการหาช่วงปริมาณความชื้นที่ไม่ควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์
- [B] หมายถึงการทดสอบในการหาอิทธิพลของการบวมตัวอิสระต่อกำลังอัดของดินซีเมนต์
- [C] หมายถึงการทดสอบในการหาสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์

## 2. การหาสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล

เป้าหมายเพื่อหาสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลในห้องปฏิบัติการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ดินตัวอย่างที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ครอบคลุมดินเหนียวไม่บวมตัวถึงดินบวมตัวต่ำ ซึ่งประกอบด้วยดินคาโอลิไนท์ (ดินเหนียวไม่บวมตัว) และดินเหนียวกรุงเทพ (ดินเหนียวบวมตัวต่ำ) ดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบวิจัยนี้เป็นดินเหนียวน้ำกร่อยกรุงเทพ (Intertidal Bangkok Clay) บริเวณสถานที่ก่อสร้างถนนทางหลวงพิเศษหมายเลข 9 ตอนวงแหวนรอบนอกตะวันออก (ตอน 3) ตอนอำเภอลำลูกกา – อำเภอธัญบุรี เป็นดินเหนียวแบบปั้นใหม่ซึ่ง ตัวอย่างดินถูกเก็บที่ความลึก 3 ถึง 4 เมตร จากผิวดิน จากนั้นทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมพื้นฐาน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ไฮโดรมิเตอร์ ปริมาณความชื้นและพิกัดอัตเตอร์เบอร์ก เป็นต้น และอัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (Free Swelling Ratio, FSR)

2. ปรับปริมาณความชื้นของดินให้อยู่ระหว่างช่วงความชื้นที่ไม่เป็นตัวแปรควบคุมกำลังอัดของดินซีเมนต์ (ผลทดสอบจากส่วนที่ 3.2.1) และเตรียมตัวอย่างเถ้าลอยโดยนำเถ้าชีวมวลมาบดด้วยเครื่องบดเซรามิก และทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (เรียกเถ้าชนิดนี้ว่า เถ้าละเอียด) ทั้งนี้เพื่อควบคุมขนาดของเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการผสม

3. ผสมดินตัวอย่างเข้ากับซีเมนต์และเถ้าชีวมวลละเอียด ในอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณสารเชื่อมประสานในช่วงระหว่าง 2.5 ถึง 7.5 โดยน้ำหนักดินแห้ง เมื่อปริมาณความชื้น เลือกสองจุดจากผลทดสอบในส่วนแรก กำหนดแปรผันอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลตั้งแต่ 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

4. เทส่วนผสมระหว่างดิน-ปูนซีเมนต์-เถ้าชีวมวล-น้ำ ในเครื่องผสมและทำการตีกวนส่วนผสมทั้งหมดในเวลาประมาณ 10 นาทีเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการใส่ส่วนผสมที่ได้ในแบบหล่อทรงกระบอกขนาด 5x10 เซนติเมตร ห่อด้วยพลาสติก และบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เป็นเวลา 7, 14, 28 และ 60 วัน แต่ละชุดตัวอย่างควรมีอย่างน้อย 3 ก้อนตัวอย่างเพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของการทดสอบ

5. ทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าชีวมวลที่อายุบ่มต่างๆ

6. ทำการวิเคราะห์ผลทดสอบและสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดียว โดยอาศัยทฤษฎีที่นำเสนอในงานศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พร้อมทั้งหาศักยภาพของเถ้าชีวมวลในค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถเทียบเท่าปูนซีเมนต์

7. รวมตัวอย่างในการทดสอบสำหรับการทดสอบ ดังตารางที่ 3.2

8. สำหรับงานในภาคสนามทำการเก็บข้อมูลผลทดสอบกำลังของดินซีเมนต์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ อัตราส่วนการผสม ปริมาณความชื้น อัตราการจมลงของใบพัด อัตราการดึงขึ้นของใบพัด ชนิดและลักษณะของใบพัด เป็นต้น จากโครงการก่อสร้างจริงซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย ที่โครงการก่อสร้างถนนบริเวณวงแหวนรอบนอกตะวันออก เส้นบางพลี - ธัญบุรี

ตารางที่ 3.2

จำนวนตัวอย่างดินคาโอลิไนท์และดินเหนียวกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเถ้าชีวมวลในส่วนที่ 2

| การทดสอบ | ปริมาณความชื้น, % | อัตราส่วน , $w_c/B$ | ระยะบ่ม (วัน) | อัตราส่วนเถ้าชีวมวล** % | จำนวนตัวอย่าง (ก้อน) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.กำลังอัดแกนเดียว<br>- ดินเหนียวกรุงเทพ | 2 จุดซึ่งอยู่ในช่วงของผลทดสอบจากส่วนที่ 3.2.1 | 2.5 – 7.5 ( 5 สัดส่วน) | 7,14, 28, 60 | 10 ถึง 40 (4 สัดส่วน) | 480 |
| - ดินคาโอลิไนท์ | | | | 10 ถึง 30 (4 สัดส่วน) | 480 |
| | | | รวมทั้งหมด | | 960 |

หมายเหตุ:

- ** หมายถึงอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อเถ้าชีวมวล (C:BioF) เท่ากับ (90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40) โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

**3.การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค**

ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้านกำลังอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวลโดยมีเป้าหมาย เพื่อทราบพฤติกรรมด้านกำลังที่ได้จากการทดสอบทางจุลภาค

**3.1การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย**

- ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย โดยใช้ขวดทดลอง Le Chatelier ตามมาตราฐาน ASTM C 188

- วิเคราะห์การกระจายของอนุภาค (Particle Size distribution) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer) ดังภาพที่ 3.2

- ถ่ายภาพขยายกำลังสูงสุดของเถ้าลอย โดยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ดังภาพที่ 3.3

- หาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย โดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS – 932 ดังภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer)

ภาพที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ภาพที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS – 932

### 3.2 การอัดตัวอย่างดินเหนียวซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล

นำดินตัวอย่างผสมสารเชื่อมประสานด้วยอัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสมเท่ากับ 3 ด้วยปริมาณซีเมนต์คิดเทียบต่อน้ำหนักดินแห้งและใช้อัตราส่วนแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลในปริมาณ 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์และเติมน้ำซึ่งปริมาณน้ำจะแปรผันโดยกำหนดให้ใช้ปริมาณความชื้นในช่วงควบคุม ซึ่งได้ผลจากการทดสอบในส่วนแรกมาแล้วนั้น ผสมดินและวัสดุเชื่อมประสานให้เข้ากันในเครื่องผสมจนวัสดุที่ผสมมีสีกลมกลืนเป็นสีเดียวกัน ทำการกวนผสมให้เนื้อดินมีลักษณะสม่ำเสมอประมาณ 5 ถึง 10 นาที จากนั้นทำการใส่ดินผสมในแบบตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยจะทำดินตัวอย่างละ 3 ชุด เมื่อดันตัวอย่างออกจากแบบจะนำตัวอย่างห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร บ่มในอุณหภูมิห้อง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ 60 วัน เมื่อครบอายุการบ่มนำตัวอย่างออกจากฟิล์มถนอมอาหาร และนำไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและการทดสอบทางจุลภาคทันที

### 3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การศึกษาด้านโครงสร้างจุลภาคของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล ดำเนินการหลังจากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวแล้วเสร็จ เก็บตัวอย่างดินที่วิบัติส่วนกลางไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยการวิเคราะห์ผลของโครงสร้างจุลภาคจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 การทดสอบ ได้แก่ 1) การทดสอบด้วยเครื่อง Mercury intrusion Porosimeter, 2) การทดสอบ Thermalgravimetry Analysis และ 3) การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

#### 3.3.1 การทดสอบด้วยเครื่อง Mercury intrusion porosimeter

ดังภาพที่ 3.5 เป็นหลักการของการวัดค่าการกระจายตัวของขนาดช่องว่างในเม็ดดินโดยใช้ Mercury intrusion technique ซึ่งขนาดช่องว่างในเม็ดดินสามารถคำนวณได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันจากการอัดปรอท ($P$) กับ surface tension ของปรอท ($\sigma$) ดังภาพที่ 3.5 Washburn (1921) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $P$ และขนาดช่องว่าง $d_p$ ภาพที่ 3.6 เป็นเครื่องมือใช้หาค่าการกระจายตัวของขนาดช่องว่างในเม็ดดินปริมาณช่องว่างในเม็ดดิน โดยใช้ Mercury intrusion technique ซึ่งขนาดช่องว่างในเม็ดดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการบ่มของดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวล ดินซีเมนต์ผสมเถ้าชีวมวลที่อายุการบ่มน้อยๆจะมีช่องว่างระหว่างเม็ด ดินขนาดใหญ่ เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นยังเกิด แต่เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปอซโซลานจากเถ้าลอยเกิดเพิ่มขึ้นภายในก้อนดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ทำให้ช่องว่างของมวลดินมีขนาดที่เล็กลง ซึ่งสามารถคำนวณได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันจากการอัดปรอท ($P$) กับ surface tension ของปรอท ($\sigma$) Washburn (1921) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $P$ และขนาดช่องว่าง $d_p$ ดังสมการที่ 3.1

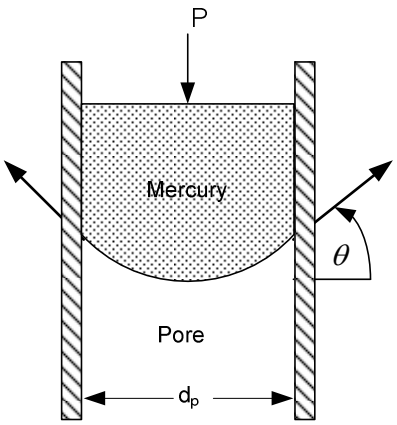
$$P \times d_p = -4\sigma \cos\theta \qquad (3.1)$$

$P$ คือ ความเค้นจากการอัดปรอท (Pa)

$d_p$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่าง

$\sigma$ คือ Surface tension ของปรอท มีค่าประมาณ 0.484 N/m

$\theta$ คือ มุมสัมผัสระหว่างดินกับปรอท มีค่าประมาณ 140



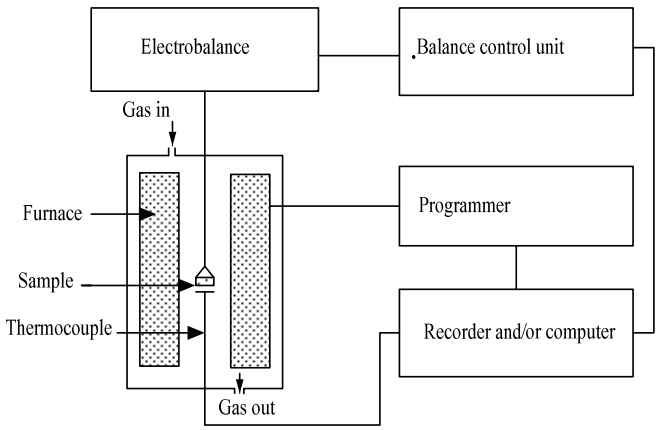

ภาพที่ 3.5 หลักการของการวัดขนาดของช่องว่างในเม็ดดิน

ภาพที่ 3.6 เครื่อง Mercury intrusion porosimeter

3.3.2การทดสอบ Thermalgravimetry Analysis

Thermal analysis (TA) เป็นเทคนิคในการแบ่งกลุ่มของตัวอย่าง ด้วยการใช้เวลาเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป เครื่องรับสัญญาณ หรืออุณหภูมิ ที่เกิดขึ้นกับตัวอย่าง เป็นการระบุรายละเอียดด้วยโปรแกรม ขั้นตอนต่างๆเป็นการให้ความร้อนหรือความเย็นที่อัตราที่แน่นอนของการเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือการให้อุณหภูมิที่คงที่หรือการให้อย่างต่อเนื่อง Thermal มีอยู่หลายวิธี ผลที่ได้รับจากการทดสอบจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ระหว่างการทดสอบตัวอย่าง เหตุผลนี้ขบวนการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานโดยธรรมชาติ สัญญาณที่เกิดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณจะขึ้นอยู่กับขอบเขตและอัตราของการเกิดปฏิกิริยา หรือขอบเขตและอัตราคุณสมบัติที่สม่ำเสมอของวัสดุ การเปลี่ยนแปลงความร้อนโดยการนำ การพา และการแผ่รังสีรอบๆตัวอย่าง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง เพราะฉะนั้นเมื่อไรก็ตามที่ใช้ Thermal พิจารณาผลการทดสอบจะต้องมีความแม่นยำในการเปรียบเทียบตัวอย่าง เมื่อทำการเขียนกราฟภายใต้เงื่อนไข หรือเมื่อมีความแตกต่างของเงื่อนไข

Thermalgravimetry (TG) คือเทคนิคในการพิจารณามวลของตัวอย่าง คือเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปเครื่องรับสัญญาณ หรืออุณหภูมิ ที่เกิดขึ้นกับของตัวอย่าง เป็นการระบุรายละเอียดคือโปรแกรม TGเริ่มต้นจากการบันทึกของ Doval, Keattch andDollimore และ Wendlandt ซึ่งได้แสดงให้เห็นชอบและการช่วยเหลือของ Honda ในปี ค.ศ. 1915 โดยใช้ตาชั่งแบบแขนยื่น กับเตาอิเล็กทรอนิกทำการค้นคว้าออกไซด์ของกำมะถัน เครื่องมือที่ใช้ทดสอบตัวอย่างได้มีการปรับปรุงโดยให้มีการชั่งที่เป็นตามธรรมชาติ และเตาสามารถควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิก ดังภาพที่ 3.7




ภาพที่ 3.7 แผนผังการทำงานของเครื่อง Thermalgravimetry

ประโยชน์ของการวิเคราะห์ด้วย Thermalgravimetry มีอยู่มากมาย ซึ่งสามารถเรียงตามลำดับความสำคัญได้ดังนี้ วิเคราะห์ส่วนประกอบ, ศึกษาการเกิดออกซิเดชั่น, และศึกษาการลดลงของมวล เป็นต้น ปริมาณของ Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) ที่อยู่ในซีเมนต์เพสท์ (Cement Paste) เป็นผลเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของซีเมนต์กับน้ำ และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan reaction) ที่ทำกับเถ้าลอย (Fly Ash) สามารถสังเกตได้จากปริมาณการลดลงของ $Ca(OH)_2$ การทดสอบด้วยเครื่อง Thermalgravimetry analysis (TGA) ดังภาพที่ 3.8 เป็นวิธีที่แม่นยำและเป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง

สำหรับใช้หาปริมาณของผลึก $Ca(OH)_2$ , ปริมาณน้ำที่สูญเสีย ประกอบด้วย CSH, เอททริงไกต์ (Ettringite), ยิบซั่ม (Gypsum) และอื่นๆ ปริมาณของ $Ca(OH)_2$ สามารถหาได้จากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 450 ถึง 580 องศาเซลเซียส ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสีย เมื่อให้ความร้อนกับตัวอย่างที่อุณหภูมิระหว่าง 450 ถึง 580 องศาเซลเซียส (El-Jazairi and Illston, 1977, 1980 และ Wang et al., 2004) ผลึก $Ca(OH)_2$ จะสลายตัวเป็น Calcium Oxide (CaO) กับน้ำ ดังสมการที่ 3.2

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow CaO + H_2O \qquad (3.2)$$

ปริมาณ Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) สามารถวัดได้ด้วยวิธี Thermalgravimetry method (TG) คือ ปริมาณของ $Ca(OH)_2$ จะแสดงให้เห็นช่วงเวลาที่มีปริมาณน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดชั่น (Hydration) และปฏิกิริยาปอซโซลาน ปริมาณของ Calcium Hydroxide นี้เรียกว่า ปริมาณ Calcium Hydroxide ที่สามารถวัดได้ ซึ่งปริมาณของ Calcium Hydroxide เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้ TG method ที่อยู่ในซีเมนต์เพสท์ธรรมดา ปริมาณ Calcium Hydroxide ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา Hydration ของเถ้าลอยกับซีเมนต์เพสท์ สามารถรู้ได้โดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสม อย่างไรก็ตาม ปริมาณของเถ้าลอยที่เข้ามาทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จะทำให้ปริมาณของ Calcium Hydroxide ลดลง การลดลงของปริมาณ Calcium Hydroxide สามารถทราบได้จาก เปอร์เซ็นต์ของการนำ Calcium Hydroxide เข้าทำปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยการเปรียบเทียบ Calcium Hydroxide จากซีเมนต์เพสท์ กับเถ้าลอยผสมซีเมนต์เพสท์ ดังสมการที่ 3.3

$$P = H \times \left(1 - \frac{R}{100}\right) - F \qquad (3.3)$$

เมื่อ $P =$ เปอร์เซ็นต์ Calcuim Hydroxide ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

$R =$ เปอร์เซ็นต์ของซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยน้ำหนัก

$H =$ เปอร์เซ็นต์ Calcuim Hydroxide จากซีเมนต์เพสท์

$F =$ เปอร์เซ็นต์ Calcuim Hydroxide จากเพสท์ของเถ้าลอย

ภาพที่ 3.8 เครื่อง Simultaneous TGA analyzer

กราฟของ TGA จะแสดงค่าการสูญเสียน้ำหนักที่จุดยอดของกราฟเป็นช่วงๆ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของสารก่อนทำการทดสอบ เมื่อมีความร้อนที่เหมาะสม น้ำจะสลายตัวไปทำให้เกิดการลดลงของน้ำหนักทั้งหมด ซึ่งจะหมายความถึง ปริมาณน้ำที่หายไป ดังนั้นจึงสามารถ หาปริมาณ Calcium Hydroxide จากปริมาณน้ำได้ โดยใช้สมการที่ 3.3 การคำนวณจะขึ้นอยู่กับจุดตัดของปริมาณ Calcium Hydroxide ที่สูญเสียโดยอ้างอิงกับปริมาณที่มีค่าคงที่ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารต่างๆ ในซีเมนต์เพสท์ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3
อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่างๆ ในซีเมนต์เพสท์
(Decomposition Reaction)

| ลำดับที่ | อุณหภูมิ $(c^{\circ})$ | ปฏิกิริยา |
|---|---|---|
| 1 | 100 | น้ำในช่องว่างระเหย |
| 2 | 180 | การสลายตัวของ CSH |
| 3 | 350 | การสลายตัวของ CSH |
| 4 | 400 | การสลายตัวของ CSH |
| 5 | 600 | การสลายตัวของ $Ca(OH)_2$ |
| 6 | 700 | การสลายตัวของ $Ca(OH)_3$ |

3.3.3 การถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope, (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) เกิดจากการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำแสงอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับต่อไป ผลที่ได้คือ ภาพของวัตถุหรือตัวอย่างมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า (กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาสามารถทำกำลังขยายได้เต็มที่ไม่เกิน 3,000 เท่า) และสามารถแจกแจงรายและเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร (nanometer) ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงส่องสว่างธรรมดามีกำลังแยกขณะใช้ดูวัตถุเล็กสุดเพียง 0.2 ไมครอน เท่านั้น

ในกรณีที่เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุประกอบอยู่ด้วย เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนวิเคราะห์ (Analytical electron microscope) โดยในการวิเคราะห์ธาตุจะเป็นการวิเคราะห์เฉพาะจุด (Spot analysis) หรือพื้นที่เล็กๆ ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นหัววัด เรียกว่า อิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (Electron Probe Microanalysis, EPMA) โดยใช้การวิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic x-ray) ซึ่งมีทั้งแบบเวฟเลงท์ดีสเพอร์สีฟเอกซเรย์สเปกโทรโฟโตเมทรี (Wavelength Dispersive X-ray Spectrophotometry,

WDS) และแบบเอนเนอร์ยีดิสเพอร์สีฟเอกซเรย์สเปกโทรโฟโตเมทรี (Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry, EDS)

ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สัญญาณภาพที่ได้เกิดจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron detector, SE detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้น ดังนั้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบนี้จะสามารถประกอบอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ได้ทั้งแบบ EDS และ WDS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุโดยอาศัยหลักการแยกรังสีตามลำดับพลังงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) ดังภาพที่ 3.9 เป็นการทดสอบในเชิงคุณภาพ ภาพถ่ายจาก SEM แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงภายในก้อนดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่แปรผันตามอายุบ่ม ทำให้ขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดที่เล็กลง ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบ SEM ได้จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของภาพถ่าย รวมตัวอย่างทดสอบทั้งหมดในส่วนนี้แสดงดังตารางที่ 3.4

ภาพที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ตารางที่ 3.4
จำนวนตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพผสมซีเมนต์และเถ้าชีวมวล
สำหรับการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

| ตัวแปร | จำนวน | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพตัวอย่าง | 1 แหล่ง | บริเวณธัญบุรี-ลำลูกกา |
| ปริมาณความชื้น | 1 จุด | ปริมาณความชื้นเท่ากับ 1LI |
| อายุบ่ม | 2 ช่วง | 28 และ 60 วัน |
| อัตราส่วนปริมาณความชื้นในดินต่อส่วนผสม | 1 อัตราส่วน | 3 สำหรับ UCS-test และ สำหรับส่วน Microstructure test |
| อัตราส่วนระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาณเถ้าชีวมวล | 7 สัดส่วน | 1. ซีเมนต์ต่อเถ้า 100 : 0<br>2. ซีเมนต์ต่อเถ้า 90 : 0<br>3. ซีเมนต์ต่อเถ้า 80 : 0<br>4. ซีเมนต์ต่อเถ้า 70 : 0<br>5. ซีเมนต์ต่อเถ้า 90 : 10<br>6. ซีเมนต์ต่อเถ้า 80 : 20<br>7. ซีเมนต์ต่อเถ้า 70 : 30 |
| ความละเอียดของเถ้าชีวมวล | 1 จุด | 1. เถ้าละเอียดที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 |
| จำนวนตัวอย่าง<br>- การทดสอบหา Unconfined compressive strength<br>- การถ่ายภาพจุลภาค<br>- การกระจายตัวของช่องว่าง<br>- Thermalgravimetry method (TG) | <br>3ตัวอย่าง /ชุด<br><br>1 ตัวอย่าง /ชุด<br>1 ตัวอย่าง /ชุด<br>1 ตัวอย่าง /ชุด | <br><br><br>(1LI ที่ $w_c/B$ = 3 ที่ระยะบ่ม = 28, 60 วัน)<br>(1LI ที่ $w_c/B$ = 3 ที่ระยะบ่ม = 28, 60 วัน)<br>(1LI ที่ $w_c/B$ = 3 ที่ระยะบ่ม = 28, 60 วัน) |
| รวมตัวอย่างทดสอบทั้งหมด | 42 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบ Unconfined compression test และ 50 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบ MIP, TGA, SEM, XRF (ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ ปูนซีเมนต์และ เถ้าชีวมวลละเอียด) | |

## 4. การวิเคราะห์และสรุปผลทดสอบ

การวิเคราะห์และสรุปผลทดสอบ ประกอบด้วย

- วิเคราะห์และสรุปผลทดสอบ โดยแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุม

- อธิบายผลการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าลอยโดยอาศัยผลโครงสร้างจุลภาคของดินผสมวัสดุเชื่อมประสาน สร้างสมการทำนายกำลังของดินซีเมนต์เถ้าลอย

- เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้เถ้าชีวมวลแทนที่ในการปรับปรุงดินเหนียว ในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

- เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์