

การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้า  
ลอยในห้วงปฏิบัติการ



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มีนาคม 2564  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยใน  
ห้องปฏิบัติการ



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มีนาคม 2564  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

LABORATORY INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF SOFT BANGKOK CLAY  
STABILIZED BY CEMENT AND FLY ASH



A Thesis Submitted to University of Phayao  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering  
March 2021

Copyright 2020 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยใน  
ห้องปฏิบัติการ

ของ อนุพงศ์ คำปลอด

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

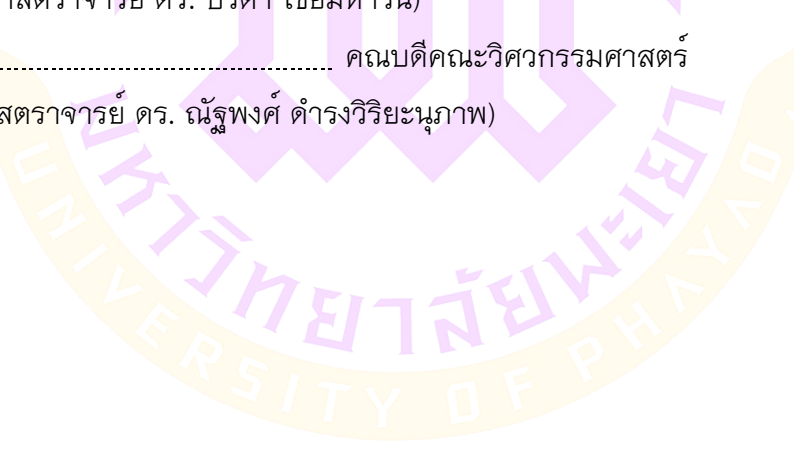
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)



<b>เรื่อง:</b>	การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการ
<b>ผู้วิจัย:</b>	อนุพงศ์ คำปลอด, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2563
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา:</b>	รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์
<b>คำสำคัญ</b>	ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ, ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย, กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว, ความคงทน, การหดตัวโดยวิธีภาพถ่าย

### บทคัดย่อ

การก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ ในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลมักประสบปัญหาเกี่ยวกับชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากชั้นดินเหนียวอ่อนมีปริมาณความชื้นในมวลดินสูงจึงส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนต่ำ ดินเหนียวนี้ที่มีชื่อว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ปูนซีเมนต์มาผสมกับดินเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้น เช่น การใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับดินเพื่อก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับใช้ในการรองรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มาก เพื่อเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์จึงมีการส่งเสริมให้นำเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอชโซลานใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยสัดส่วนผสมที่ใช้ประกอบไปด้วย ดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.0 1.3 และ 1.6 อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์วัสดุประสานต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $B/w_c$ ) เท่ากับ 0.2 0.3 และ 0.4 โดยวัสดุประสานคือ ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย และสุดท้ายเถ้าลอย (FA) ที่ใช้ถูกนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ปริมาณ 0 15 30 45 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างดินที่ปรับปรุงคุณสมบัติจะถูกนำมาทดสอบทางวิศวกรรมดังนี้ การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว การทดสอบความคงทนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง และการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายในสภาวะแห้งและสภาวะเปียกสลับแห้ง จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว สรุปได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวลดลงเมื่อเพิ่มเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ทุกส่วนผสม ส่วนผลการทดสอบความคงทน พบว่า เมื่อเพิ่มรอบเปียกสลับแห้งทำให้กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวลดลงทุกส่วนผสม สำหรับผลการทดสอบการหดตัวในสภาวะปกติ พบว่า การเพิ่มเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ส่งผลให้การหดตัวลดลงทุกส่วนผสม และผลการทดสอบการหดตัวในสภาวะเปียกสลับแห้งพบว่า เมื่อเพิ่มรอบเปียกสลับแห้งให้การหดตัวในช่วงแรกเพิ่มขึ้นอย่างมาก (รอบที่ 1 ถึง 3) หลังจากรอบที่ 3 ตัวอย่างจะเกิดการพัง จึงสรุปได้ว่าตัวอย่างสามารถทนสภาวะเปียกสลับแห้งได้ 3 รอบ จากผลการทดสอบทั้งหมดสรุปได้ว่า สัดส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยมีกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 738.53 kPa ซึ่งผ่านเกณฑ์การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ที่กำหนดให้มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวไม่ต่ำกว่า 600 kPa สำหรับรองรับน้ำหนักถนนและบนคันคลองและมีการหดตัวน้อยที่สุดเท่ากับ 5.74 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วนผสมนี้สามารถทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งได้ 3 รอบโดยมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวเท่ากับ 601.37 kPa ส่วนการหดตัวในรอบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 7.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอย

**Title:** LABORATORY INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF SOFT BANGKOK CLAY STABILIZED BY CEMENT AND FLY ASH

**Author:** Anupong Khampod, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2020

**Advisor:** Associate Professor Dr. Thanakorn Chompoorat

**Keyword** soft Bangkok clay, cement and fly ash, unconfined compressive strength, durability, shrinkage by image processing

### ABSTRACT

Construction of various buildings in the Bangkok metropolitan region often faces with problems of soft clay layer since the layer has a high water content, resulting in low shear strength. This clay is called soft Bangkok Clay. Engineering properties of the clay, for this reason, need to be improved before its use. At present, cement is used to be mixed with the clay in order to improve its properties, for instance, using cement mixed with the clay in order to construct soil cement columns for supporting weight of buildings. The construction of soil cement columns requires a large amount of cement in order to reduce cement use; thus, fly ash and Pozzolanic materials are promoted to replace cement. Thereby, this research aimed to study mechanical behavior of soft Bangkok Clay stabilized by cement and fly ash. The mix proportion of elements used consisted of a liquidity index (LI) of 1.0, 1.3 and 1.6. The binder to water content ratios ( $B/w_c$ ) were 0.2, 0.3 and 0.4, which binder were cement and fly ash. Finally, the fly ash (FA) used to replace cement at percentages of 0, 15, 30, 45 and 60. The improved soil samples were tested in engineering aspect, featuring tests regarding unconfined compressive strength, durability under wet-dry cycles condition, and shrinkage by using image processing in dry and wet-dry cycles condition. From the results of unconfined compressive test, it was concluded that the value of unconfined compressive strength decreased when adding fly ash instead of cement in all elements. The results of durability test revealed that unconfined compressive strength decreased in all elements when adding wet-dry cycles. The results of shrinkage test in dry condition showed that adding fly ash instead of cement resulted in shrinkage reduced of all elements. For the result of shrinkage in wet-dry cycles condition, it was found that Initial shrinkage significantly increased when adding wet-dry cycles (from 1 to 3 cycles), and examples were collapsed after the 3 cycles. All of the testing results were able to be concluded that element proportion of LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA15 was the most suitable element for making soil cement columns. The value of unconfined compressive strength in curing of 28 days was 738.53 kPa, which is considered as passing a design criteria of soil cement columns determined the value of unconfined compressive strength as not less than 600 kPa for supporting the weight of road and embankment. The value of smallest shrinkage was 5.74 percent. This element proportion was able to withstand wet-dry cycles condition for 3 rounds with such value of unconfined compressive was 601.37 kPa. The value of 3 cycles shrinkage was 7.50 percent, being less than fly ash-free elements.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยทางวิศวกรรมโยธา เรื่อง “การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และถั่วลันเตาในท้องปฏิบัติการ” เล่มนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงได้หากปราศจากบุคคลหลายท่านและหลายหน่วยงาน รศ.ดร. ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบความรู้ด้านงานวิจัย ช่วยแก้ไข และให้โอกาสในการทำงานวิจัย เล่มนี้ในทางที่ดีเสมอมา คณะกรรมการ ศ.ดร. สุเชษฐ สุทธิเชษฐ และ รศ.ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน ที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขให้งานวิจัยเล่มนี้สมบูรณ์แบบ รศ.ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุกาภ คณบดีวิศวกรรมศาสตร์ ที่เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาของมหาวิทยาลัยพะเยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้สนับสนุนทุนการดำเนินงานวิจัยการดำเนินงานของสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้สนับสนุนวัสดุที่จำเป็น อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับดำเนินการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ี่ ๆ น้อย ๆ ทุกคนในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ช่วยเหลือกันมาหลายครั้ง สุดท้ายขอขอบคุณ คุณแม่ พี่ชาย และครอบครัวที่เป็นแรงผลักดันและเป็นกำลังใจที่ดีให้เสมอ ถึงจะมีบางครั้งที่เราอาจจะล้มลง ร้องไห้ เหนื่อย ท้อบางครั้ง แต่เราก็สามารถกลับมาลุกขึ้นมาสู้ได้เสมอ ขอให้เชื่อมั่นในตัวเอง หนักแน่น ชยัน อดทนเข้าไว้ ความสำเร็จจะค่อย ๆ ชัดเจนขึ้นในแบบที่เราภูมิใจกับสิ่งที่ตัดสินใจ และได้ลงมือทำ จนกระทั่งการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อนุพงศ์ คำปลอด



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ .....	3
ขอบเขตงาน .....	4
แนวทางการดำเนินงาน .....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
ดินเหนียวกรุงเทพ.....	9
การปรับปรุงคุณภาพดิน.....	15
วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี.....	15
การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี.....	17
การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์.....	19
สารปอซโซลาน .....	20
การใช้งานถ้ำลอย .....	22
เสาเข็มดินซีเมนต์.....	24

การหดตัวของดินผสมปูนซีเมนต์ .....	34
ความคงทน .....	45
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	45
<b>บทที่ 3 วิธีการทดสอบ .....</b>	<b>66</b>
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ .....	66
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม .....	66
การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม .....	72
การประมวลผลภาพถ่าย .....	86
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย .....</b>	<b>93</b>
ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ .....	93
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว .....	97
ผลการทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย .....	109
ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง .....	124
ผลการทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลับแห้ง .....	134
ความสัมพันธ์ด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย .....	139
การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะเปียกสลับแห้ง .....	152
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>155</b>
สรุปผลงานวิจัย .....	155
ข้อเสนอแนะ .....	161
บรรณานุกรม .....	163
ประวัติผู้วิจัย .....	170

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แผนการดำเนินงาน.....	7
ตาราง 2 คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Kim, 1991).....	11
ตาราง 3 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ (นพรัตน์ พรรณขาม, 2556) .....	12
ตาราง 4 คุณสมบัติของดิน (ว.ส.ท., 2520).....	15
ตาราง 5 วิธีปรับปรุงคุณภาพดินชนิดต่าง ๆ (นพรัตน์ พรรณขาม, 2556) .....	16
ตาราง 6 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Requirement) (ASTM C618-08a) .....	24
ตาราง 7 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ออกแบบตามลักษณะของดิน (Takeda et al., 1998).....	29
ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์รอยแตกและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างดิน หลังจากรอบเปียกสลับแห้งที่รอบต่าง ๆ (Tang et al., 2008) .....	54
ตาราง 9 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ภาพถ่ายที่ตัวอย่างดินที่แตกต่างกัน (Abd El-Halim, 2017) .....	58
ตาราง 10 โปรแกรมคุณสมบัติพื้นฐาน.....	66
ตาราง 11 โปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ .	74
ตาราง 12 โปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย .....	74
ตาราง 13 โปรแกรมการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนผสม ปูนซีเมนต์.....	77
ตาราง 14 โปรแกรมการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนผสม ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย .....	77
ตาราง 15 โปรแกรมการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย .....	83
ตาราง 16 โปรแกรมการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลับแห้งของดิน เหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย.....	87

ตาราง 17	คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ .....	94
ตาราง 18	ปริมาณสารประกอบต่าง ๆ จากการทดสอบ XRF.....	95
ตาราง 19	ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรดิน 1 m <sup>3</sup> ที่ใช้ในงานวิจัย.....	99
ตาราง 20	สรุปค่า $q_u$ เปรียบเทียบกับเกณฑ์การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์.....	100
ตาราง 21	ค่า $q_u$ เปรียบเทียบกับเกณฑ์การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์.....	106
ตาราง 22	สรุปค่า Ca/Si และ Si/Al ของตัวอย่าง .....	109
ตาราง 23	ค่า CDF ของส่วนผสมที่ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน .....	114
ตาราง 24	ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI=1.3 และ LI=1.6 .....	115
ตาราง 25	ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI= 1.3 B/w <sub>c</sub> =0.3.....	120
ตาราง 26	ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI= 1.3 B/w <sub>c</sub> =0.4.....	121
ตาราง 27	ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI= 1.6 B/w <sub>c</sub> =0.3.....	122
ตาราง 28	ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI=1.6 B/w <sub>c</sub> =0.4.....	123
ตาราง 29	ค่า $q_{u(w-D)}$ ที่ผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน.....	134
ตาราง 30	ค่า CDF <sub>w-D</sub> ที่ส่วนผสมผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน.....	139



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 แผนการดำเนินงาน.....	8
ภาพ 2 แผนที่ธรณีวิทยาของแหล่งควอเทอร์นารีในที่ราบภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย.....	10
ภาพ 3 ความดันในชั้นใต้ดินของพื้นที่กรุงเทพฯ .....	10
ภาพ 4 ข้อมูลชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ .....	11
ภาพ 5 แนวทางรถไฟสายตลิ่งชัน-นครปฐม.....	13
ภาพ 6 ลักษณะชั้นดินตามแนวทางรถไฟสายตลิ่งชัน-นครปฐม .....	14
ภาพ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $s_u$ กับ depth ตามแนวทางรถไฟช่วงตลิ่งชัน-นครปฐม.....	14
ภาพ 8 วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่แปรผันตามขนาดของเม็ดดิน .....	16
ภาพ 9 การกระจายตัว ขนาด ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าลอย .....	18
ภาพ 10 โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	21
ภาพ 11 ลักษณะของดินผสมซีเมนต์โดยใช้กล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน .....	22
ภาพ 12 รูปลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของวิธีเครื่องผสมความดันต่ำที่ใช้ในการก่อสร้าง เสาเข็มดินซีเมนต์ .....	27
ภาพ 13 รูปถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องเจาะของวิธีเครื่องผสมความดันต่ำ .....	28
ภาพ 14 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดแพลงก์น้ำปนของวิธีเครื่องผสมความดันต่ำ .....	28
ภาพ 15 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือวิธีการอัดฉีดน้ำปูน.....	31
ภาพ 16 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือวิธีการผสมแห้งแบบโมดิฟายด์ .....	33
ภาพ 17 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือ วิธีเครื่องผสมแรงดันสูง .....	34
ภาพ 18 การแตกตัวของถนน.....	35
ภาพ 19 กลไกของตัวนำที่ลดการหดตัว (ก) แบบไม่มีตัวนำที่ลดการหดตัว (ข) แบบที่มีตัวนำที่ ลดการหดตัว .....	36

ภาพ 20	ภาพถ่ายดินตัวอย่างที่ถูกตัดแต่งขอบ .....	37
ภาพ 21	ค่าจากทดสอบการหดตัว โดยวิธี manual measurement และ digital image technique .....	38
ภาพ 22	อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่าย .....	39
ภาพ 23	โปรแกรม Particles and Cracks Analysis System (PCAS) .....	40
ภาพ 24	ขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายในโปรแกรม PCAS (ก) ภาพถูกแปลงเป็นสีเทา (ข) ภาพถูกแปลงเป็นภาพไบนารี (ค) ภาพถูกแปลงเป็นภาพเส้นโครง .....	40
ภาพ 25	การติดตั้งกล้องถ่ายภาพตัวอย่างดิน .....	41
ภาพ 26	โปรแกรม ImageJ 1.47.....	42
ภาพ 27	ผลลัพธ์การประมวลผลภาพถ่ายของรูปแบบรอยแตก.....	44
ภาพ 28	แช่ตัวอย่างในน้ำ 5 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะเปียก.....	46
ภาพ 29	ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_u$ , $A_w$ และ แก้วล่อยที่อายุการบ่มตัว 28 วัน.....	47
ภาพ 30	ความสัมพันธ์ระหว่าง void ratio (e) กับ axial stress .....	48
ภาพ 31	ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_u/q_{28}$ กับอายุการบ่มตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมแก้วล่อย เทียบกับสมการของ Horpibulsuk et al. (2009) และ (2003) .....	48
ภาพ 32	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพลาสติคกับแก้วล่อย (Fly ash).....	49
ภาพ 33	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวแกน (axial strain) กับ N ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน .....	49
ภาพ 34	ค่ากำลังของตัวอย่างอายุ 28 วัน.....	50
ภาพ 35	ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_u$ กับ $F_w$ ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) ปริมาณน้ำ 130% (ข) ปริมาณน้ำ 200% .....	51
ภาพ 36	ผลกระทบของแก้วล่อยต่อการหดตัวในการบ่ม 28 วัน .....	52
ภาพ 37	ค่า UCS และ $E_{50}$ ของ Fly ash #1 และ Fly ash #2 .....	53

ภาพ 38 รูปแบบพื้นผิวรอยแตกจากการหดตัวทั่วไปหลังจากรอบเปียกสลับแห้งแต่ละรอบ (ก) หลังจากรอบเปียกสลับแห้งรอบแรก (ข) หลังจากรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 2 และ (ค) หลังจากรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 3 .....	54
ภาพ 39 รูปแบบรอยแตกสุดท้ายทั่วไปของตัวอย่างดินที่ไม่ได้เสริมเส้นใย .....	55
ภาพ 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $R_{sc}$ กับปริมาณน้ำ ของตัวอย่างดินเหนียวที่เสริมด้วยเส้นใย กับตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้เสริมด้วยเส้นใย .....	56
ภาพ 41 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวม (P) กับปริมาณชานอ้อย .....	57
ภาพ 42 รูปแบบรอยแตกของดินเหนียวผสมชานอ้อย 0 1 2 3 4 และ 5% ตามลำดับ .....	58
ภาพ 43 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง CIF กับปริมาณปูนซีเมนต์ อิฐเผา และเส้นใย .....	60
ภาพ 44 ผลเปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียของสัดส่วนผสม C5F10 และ C10F10 .....	61
ภาพ 45 การเปรียบเทียบค่าร้อยละการสูญเสียกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว .....	61
ภาพ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $q_{u(w-d)}$ กับ $q_{u(unsaturated)}$ (a) อายุการบ่ม 7 วัน (b) อายุการบ่ม 28 วัน (c) อายุการบ่ม 60 วัน .....	63
ภาพ 47 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดต่อรอบที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง .....	64
ภาพ 48 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดต่อรอบที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง .....	64
ภาพ 49 การพัฒนาความแข็งแรงของตัวอย่างที่มีความเสถียรสำหรับ W – D รอบที่ 1, 3 และ 6 สำหรับระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน (ภาพ 49(ก), 49(ข) และ 49(ค) ตามลำดับ) .....	65
ภาพ 50 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และ (ค) ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ .....	67
ภาพ 51 บริเวณถนนสายกาญจนาภิเษก-พุทธมณฑล สาย 2 และพื้นที่ใกล้เคียง .....	68
ภาพ 52 สถานภาพของมวลดิน .....	69
ภาพ 53 เครื่องมือการทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรส .....	70
ภาพ 54 เครื่องมือการทดสอบโดยกล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด .....	71
ภาพ 55 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว .....	72

ภาพ 56 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (ก) เตรียมส่วนผสมตามสัดส่วน (ข) ทำการผสมด้วยเครื่องผสม (ค) ขึ้นรูปในโมลท้อ PVC (ง) บ่มตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด (จ) วัดขนาดและชั่งน้ำหนัก (ฉ) ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว.....	73
ภาพ 57 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (ก) ขึ้นรูปตัวอย่างในแบบท้อ PVC (ข) บ่มตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด (ค) นำตัวอย่างไปแช่น้ำ 5 ซม. (ง) นำตัวอย่างไปอบแห้ง 71° นาน 42 ชม. (จ) วัดขนาดและชั่งน้ำหนัก (ฉ) ตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว .....	76
ภาพ 58 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง .....	78
ภาพ 59 สถิติโอถ้ายรูปของตัวอย่างดิน .....	80
ภาพ 60 รายละเอียดภายใน soil studio .....	80
ภาพ 61 รายละเอียดภายนอก soil studio.....	81
ภาพ 62 การตั้งค่ากล้อง DSLR .....	81
ภาพ 63 ขั้นตอนการทดสอบการหดตัวในสภาวะปกติ (ก) เตรียมส่วนผสมตามสัดส่วน (ข) ทำการผสมด้วยเครื่องผสม (ค) ขึ้นรูปตัวอย่างในแบบฟางกลม (ง) บ่มตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด (จ) นำตัวอย่างไปอบแห้ง 110±5° (ฉ) นำตัวอย่างไปถ่ายรูปกับ soil studio.....	82
ภาพ 64 การทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลับแห้ง .....	85
ภาพ 65 ขั้นตอนการทดสอบการหดตัวในสภาวะเปียกสลับแห้ง (ก) เติมน้ำในตัวอย่างจนเต็ม น้ำ (ข) บ่มตัวอย่างนาน 48 ชม. (ค) นำตัวอย่างไปอบแห้ง 110±5 นาน 24 ชม. (ง) นำตัวอย่างไปถ่ายรูปกับ soil studio.....	86
ภาพ 66 หน้าต่างโปรแกรม ImageJ.....	87
ภาพ 67 การตั้งค่าสเกลการวัดเป็นหน่วย เซนติเมตร ในโปรแกรม ImageJ.....	90
ภาพ 68 การวัดพื้นที่ตัวอย่างดินเริ่มแรก .....	90
ภาพ 69 การวัดพื้นที่ตัวอย่างดินที่ลดลง ( $A_r$ ) และพื้นที่รอยแตกรวมกับพื้นที่ตัวอย่างดินที่ลดลง ( $A_r^*$ ).....	91
ภาพ 70 การวัดความยาวรอยแตก ( $L_c$ ).....	92

ภาพ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงมาตรฐานกับขนาดเม็ดดินของดินเหนียว  
อ่อนกรุงเทพฯ.....94

ภาพ 72 รูปถ่าย SEM (ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ x500 (ข) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ x3000 (ค)  
ถ้ำลอย x500 (ง) ถ้ำลอย x3000..... 96

ภาพ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับดัชนีเหลวของดินเหนียวอ่อน  
กรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์..... 99

ภาพ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับดัชนีเหลว  
ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์..... 100

ภาพ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มตัว..... 103

ภาพ 76 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยัง 50 % ของน้ำหนักสูงสุดกับอายุการบ่มตัว (ก)  
ส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 (ข) ส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.4..... 105

ภาพ 77 ผลการทดสอบ EDS ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และถ้ำลอยที่  
อายุการบ่มตัว 28 วัน (ก) LI1.6 (ข) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 (ค) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 (ง)  
LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30 ..... 108

ภาพ 78 รูปถ่าย SEM (ก)LI1.6 28 วัน x5000 (ข) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 28 วัน x5000..... 109

ภาพ 79 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่ายกับการหดตัวที่ใช้การวัดด้วยปรอท..... 110

ภาพ 80 ความสัมพันธ์ค่า CDF หรือเปอร์เซ็นต์การหดตัวกับอายุการบ่มตัว ..... 113

ภาพ 81 ลักษณะรอยแตก (ก) ดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ (ข) ดินที่ปรับปรุงคุณภาพ..... 124

ภาพ 82 การพัฒนารอยแตกของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ (ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน (ข) ที่อายุ  
การบ่มตัว 28 วัน (ค) ที่อายุการบ่มตัว 60 วัน (ง) ที่อายุการบ่มตัว 90 วัน..... 124

ภาพ 83 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะเปียกสลับแห้งแต่ละ  
รอบกับค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะปกติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์ (ก)  
อายุการบ่มตัว 7 วัน และ (ข) อายุการบ่มตัว 28 วัน..... 129

ภาพ 84 ความสัมพันธ์ค่า  $q_{u(w-D)}$  กับเปอร์เซ็นต์ถ้ำลอย (ก) B/w<sub>c</sub>=0.3 ที่ 7 วัน (ข) B/w<sub>c</sub>=0.4  
ที่ 7 วัน (ค) B/w<sub>c</sub>=0.3 ที่ 28 วัน (ง) B/w<sub>c</sub>=0.4 ที่ 28 วัน (จ) B/w<sub>c</sub>=0.3 ที่ 60 วัน (ฉ) B/w<sub>c</sub>=0.4  
ที่ 60 วัน ..... 133

ภาพ 85 ความสัมพันธ์ค่า CDF หรือเปอร์เซ็นต์การหดตัวกับรอบเป็ยกสลับแห้ง .....	138
ภาพ 86 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัวใด ๆ กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัว 28 วัน .....	140
ภาพ 87 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัวใด ๆ ต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัว 28 วันเทียบกับเวลาการบ่มตัว .....	141
ภาพ 88 ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว .....	142
ภาพ 89 ความสัมพันธ์ค่าความเครียดที่จุดวิกฤติกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว .....	143
ภาพ 90 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับค่าอัตราช่องว่างหลังการบ่มตัวอย่าง	144
ภาพ 91 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะเป็ยกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติ (ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน (ข) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน.....	147
ภาพ 92 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะเป็ยกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติ (ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน (ข) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน และ (ค) ที่อายุการบ่มตัว 60 วัน .....	150
ภาพ 93 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนที่สภาวะเป็ยกสลับแห้งต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติกับจำนวนรอบเป็ยกสลับแห้ง .....	151
ภาพ 94 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนที่สภาวะเป็ยกสลับแห้งต่อกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติกับจำนวนรอบเป็ยกสลับแห้ง .....	152
ภาพ 95 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะเป็ยกสลับแห้ง (ก) กราฟค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเป็ยกสลับแห้งกับรอบเป็ยกสลับแห้ง (ข) กราฟค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวในสภาวะเป็ยกสลับแห้งกับรอบเป็ยกสลับแห้ง .....	153
ภาพ 96 LI1.6B/w <sub>c</sub> 0.3FA0 .....	154
ภาพ 97 LI1.6B/w <sub>c</sub> 0.3FA15 .....	154

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารและสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ ภายในเขตกรุงเทพมหานคร และบริเวณทลประสบปัญหาในการรับน้ำหนักของดิน เนื่องจากชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อน (soft clay) ดินเหนียวดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (soft Bangkok clay) เป็นดินที่ถูกพัดพา ลู่อทะเลและน้ำทะเลก็หนุนกลับเข้ามาตกตะกอนเป็นชั้น ๆ มีความลึกโดยประมาณ 15–25 เมตร (ชยานนท์ ศรีเจริญ และคณะ, 2557) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีปริมาณความชื้นในมวลดินสูง จึงส่งผลให้กำลังต้านทานแรงเฉือน (shear strength) และการรับน้ำหนักของดินต่ำ ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนก่อนนำใช้ในงานก่อสร้าง ฐานราก

การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนในปัจจุบันนิยมใช้ วิธีการผสมลึก (deep mixing methods) โดยวิธีนี้ใช้สารเคมี คือ ปูนซีเมนต์ (cement) ผสมเข้ากับดินเหนียว วิธีการผสมลึก สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ (soil cement column) โดยการทำให้ เสาเข็มดินซีเมนต์จะใช้น้ำปูน (cement slurry) เข้าไปผสมกับดินแล้วหล่อเป็นเสาเข็ม สำหรับใช้ ในการรองรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างต่างๆ ณ บริเวณที่ลุ่มเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหาย เนื่องจากการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน เช่น การก่อสร้างคอสะพาน และการก่อสร้างถนน บริเวณดินเหนียวอ่อน เป็นต้น โดยทั่วไปเสาเข็มดินซีเมนต์มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 50–60 เซนติเมตร และความลึกประมาณ 2–15 เมตร (ปิยะ รัตนสุวรรณ และวรรณสิริ พันธุ์อุไร, 2555) การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์มีการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก จึงทำให้เปลือง ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้าง จากการศึกษางานวิจัยของ ชยานนท์ ศรีเจริญ และคณะ (2557) ได้ ทำการศึกษาการพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในชั้น ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยเถ้าลอย (fly ash) ที่ใช้เกิดจากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิต กระแสไฟฟ้าจะถูกนำมาผสมและแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ ในงานทำการก่อสร้าง เสาเข็มดินซีเมนต์จริงในสนาม จากนั้นเจาะเก็บตัวอย่างดินแล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตามอายุการบ่มตัวในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษานี้สรุปว่าเถาลอยสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้เทียบเท่ากับกำลังรับแรงอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ทั่วไป โดยใช้อัตราส่วนผสมของเถาลอยที่เหมาะสม และเถาลอยสามารถลดค่าใช้จ่ายปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างได้อยู่ที่ 12.75%

ต่อมาปัญหาสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นหลังจากการผสมดินเหนียวกับปูนซีเมนต์ คือ การเกิดการหดตัว (shrinkage) เพราะน้ำในมวลดินจะค่อย ๆ ระเหยออกไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ซึ่งผลดังกล่าวการเกิดรอยแตก (crack) ซึ่งน้ำในมวลดินและรอยแตกดังกล่าว อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณีในภายหลังได้ จากการศึกษาของ Chompoorat and Likitlersuang (2016) ได้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถาลอย โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์และเถาลอยโดยใช้วิธีภาพถ่าย (image processing method) แบบ 2 มิติ ในห้องปฏิบัติการ การศึกษานี้พบว่า การผสมเถาลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์สามารถลดการหดตัวในมวลดินได้โดยปริมาณเถาลอยที่เหมาะสมเท่ากับ 15% นอกจากนี้ Tang et al. (2008) ได้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียว ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงเปียกสลับแห้งโดยใช้วิธีภาพถ่ายแบบ 2 มิติ การวิเคราะห์การหดตัวและรอยแตกที่เกิดขึ้นในมวลดินใช้โปรแกรม particles and cracks analysis system (PCAS) ที่สามารถวิเคราะห์รอยแตกจากการหดตัวของตัวอย่างดินอย่างละเอียด ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวแสดงผลลัพธ์ของค่าจำนวนรอยแตก ความยาว ความกว้าง พื้นที่ และค่าความเข้มรอยแตก (crack intensity factor, CIF) ในหน่วย พิกเซล ต่อมา Abd El-Halim (2017) ได้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวผสมซังอ้อย ซึ่งเขาได้ทำการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Tang et al. (2008) แต่การวิเคราะห์การหดตัวและรอยแตกที่เกิดขึ้นใช้โปรแกรม ImageJ และผลลัพธ์ของโปรแกรมนี้ที่ได้คือ ความยาว ความกว้าง พื้นที่ ค่าอัตราส่วนพื้นผิวรอยแตก (surface crack ratio) หรือค่าความหนาแน่นรอยแตก (crack density factor, CDF) และค่าความเข้มรอยแตกในหน่วย พิกเซล และในหน่วยเซนติเมตร

นอกจากนี้เสาเข็มดินซีเมนต์มีความเป็นไปได้ที่จะได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นใต้ดิน ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความคงทน (durability) ของวัสดุผสมในสภาวะเปียกสลับ

แห้ง (wetting and drying) ที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุผสมและทำให้เกิดรอยแตกหลุดตัวจากการเปลี่ยนแปลงแบบเฉียบพลันของอุณหภูมิอากาศ และความชื้น จากงานวิจัยของ ลัญญิตติ เจริญศิลป์ และคณะ (2561) ได้ทำการศึกษาการใช้ตะกอนดินขุดปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุทาง งานวิจัยนี้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดพร้อมกับการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง ด้วยวิธีการทดสอบความคงทนแบบวนซ้ำเป็นวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ทั้งหมด 6 รอบ แล้วนำตัวอย่างดินรอบที่ 1 3 และ 6 ไปทดสอบกำลังรับแรงอัด จากผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างดินเมื่อผ่านสภาวะเปียกมีการสัมผัส น้ำ และน้ำจะเข้าไปยังช่องว่างภายในตัวอย่างดิน เมื่อผ่านสภาวะแห้งจะเกิดการหดตัวของดินเหนียวเพราะเกิดการสูญเสียน้ำ ทำให้เกิดการรอยแตกขึ้นมาใหม่ และเกิดแรงดึงภายในตัวอย่าง ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินจะลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง จากการศึกษาของงานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมา พบว่างานวิจัยมุ่งเน้นศึกษาไปที่เรื่องใดเรื่องหนึ่ง แต่ยังไม่เคยมีการทดสอบด้านกำลัง ด้านการหดตัว ด้านความคงทน แบบรวมกันกับดินเหนียวอ่อนชนิดเดียว หรืองานวิจัยบางเรื่องยังไม่เคยมีการทดสอบแบบรวมกันในสภาวะปกติ และสภาวะเปียกสลับแห้ง กับตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพของประเทศไทย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการพัฒนาทางด้านกำลัง ความคงทน และพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยการทดสอบการหดตัวจะใช้เทคโนโลยีการถ่ายภาพ (Image Processing) มาวิเคราะห์การหดตัวอย่างละเอียด ที่สภาวะปกติ และสภาวะเปียกสลับแห้ง

### วัตถุประสงค์

การศึกษากิจกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวิศวกรรม
2. ศึกษาความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวิศวกรรม
3. ศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ด้วยวิธีการถ่ายภาพ ภายใต้สภาวะปกติ และสภาวะเปียกสลับแห้ง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวิศวกรรม

## ขอบเขตงาน

การศึกษาพฤติกรรมการแข็งกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยขอบเขตงานดังต่อไปนี้

1. ดินเหนียวอ่อนที่ใช้คือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ บริเวณพื้นที่เขตตลิ่งชัน
2. เถ้าลอยที่ใช้คือ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง (fly ash, FA)
3. ปูนซีเมนต์ที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (cement, C)
4. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพประกอบไปด้วย การทดสอบขีดแอดเตอร์เบอร์ก (Atterberg's limit and indices test) มาตรฐาน ASTM D 4318 และ ASTM D 427 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (specific gravity test) มาตรฐาน ASTM D 854 และ การหาขนาดคละเม็ดดิน (grain size analysis test) มาตรฐาน ASTM D 422-63
5. อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษามีดังนี้
  - 5.1 การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์ประกอบด้วย
    - 5.1.1 อัตราส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาณน้ำในมวลดิน ( $C/w_c$ ) เท่ากับ 0.2 0.3 และ 0.4
    - 5.1.2 ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.0 1.3 และ 1.6
  - 5.2 การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยประกอบด้วย
    - 5.2.1 อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำ ( $B/w_c$ ) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 โดย B คือ วัสดุผสม (binder) เป็นผลรวมของปูนซีเมนต์ (C) และเถ้าลอย (FA)
    - 5.2.2 ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.6
    - 5.2.3 ปริมาณเถ้าลอย (FA) เท่ากับ 0 15 30 45 และ 60%
  - 5.3 การศึกษาคุณสมบัติด้านการหดตัวที่สภาวะปกติ และสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยประกอบด้วย
    - 5.3.1 อัตราส่วนปริมาณวัสดุผสมต่อปริมาณน้ำ ( $B/w_c$ ) เท่ากับ 0.3 และ 0.4
    - 5.3.2 ดัชนีความเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6
    - 5.3.3 ปริมาณเถ้าลอย (FA) เท่ากับ 0 15 30 45 และ 60%
6. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

6.1 การทดสอบแรงกดทางเดียว (unconfined compression test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ตามอัตราส่วนผสม ที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน

6.2 การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability) ตามมาตรฐาน ASTM D559 ที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน เงื่อนไขรอบวงจรเปียกสลับแห้งทั้งหมด 6 รอบ แล้วนำไปทดสอบแรงกดทางเดียว ณ รอบที่ 1 3 และ 6

7. การทดสอบการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

7.1 ทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย (image processing method) แบบ 2 มิติในสภาวะปกติ ที่อายุบ่ม 7 28 60 และ 90 วัน

7.2 ทดสอบการหดตัวในสภาวะเปียกสลับแห้ง ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน เงื่อนไขรอบวงจรเปียกสลับแห้งทั้งหมด 6 รอบ แล้วนำไปถ่ายภาพ ณ รอบที่ 1 3 และ 6

8. การวิเคราะห์การหดตัวใช้โปรแกรม ImageJ พัฒนาโดย Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA

9. การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุใช้การทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรส (X-ray fluorescence, XRF) เทคนิคสเปกโตรเมตรีแบบกระจายพลังงาน (energy dispersive spectrometry, EDS) และการทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

### แนวทางการดำเนินงาน

ขั้นตอนหลักของแนวทางดำเนินการดังแสดงในตาราง 1 และแผนแนวทางดำเนินการดังแสดงในภาพ 1 ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ค้นคว้า และศึกษางานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
2. ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพคุณสมบัติทางวิศวกรรมและในคุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย
3. ออกแบบอัตราส่วนผสมสำหรับการทดสอบ เตรียมตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสม ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย แล้วขึ้นรูปตัวอย่าง
4. ทดสอบแรงกดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยตามสัดส่วนผสม ที่สภาวะปกติ และสภาวะเปียกสลับแห้ง ณ รอบที่ 1 3 และ 6 ตามระยะการบ่มตัวของตัวอย่าง

5. ทดสอบการหัตถ์ด้วยวิธีการถ่ายภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยตามสัดส่วนผสม ที่สภาวะปกติ และสภาวะเปียกสลับแห้ง ตามระยะการบ่มตัวของตัวอย่าง

6. นำค่าที่ได้จากการทดสอบนำมาวิเคราะห์และประเมินผล รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลทางเคมี เพื่อยืนยันผลการทดสอบด้านกำลัง และความแข็งแรงประกอบไปด้วย XRF EDS และ SEM

7. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

8. สรุปผลการทดสอบและจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในห้องปฏิบัติการมีประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับดังต่อไปนี้

1. ได้ทราบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

2. ได้ทราบการสูญเสียด้านกำลังรับแรงอัด และพฤติกรรมรอยแตกจากการหัตถ์ โดยทดสอบความคงทนที่สภาวะเปียกสลับแห้ง ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

3. ได้ทราบพฤติกรรมการหัตถ์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยวิธีภาพถ่าย

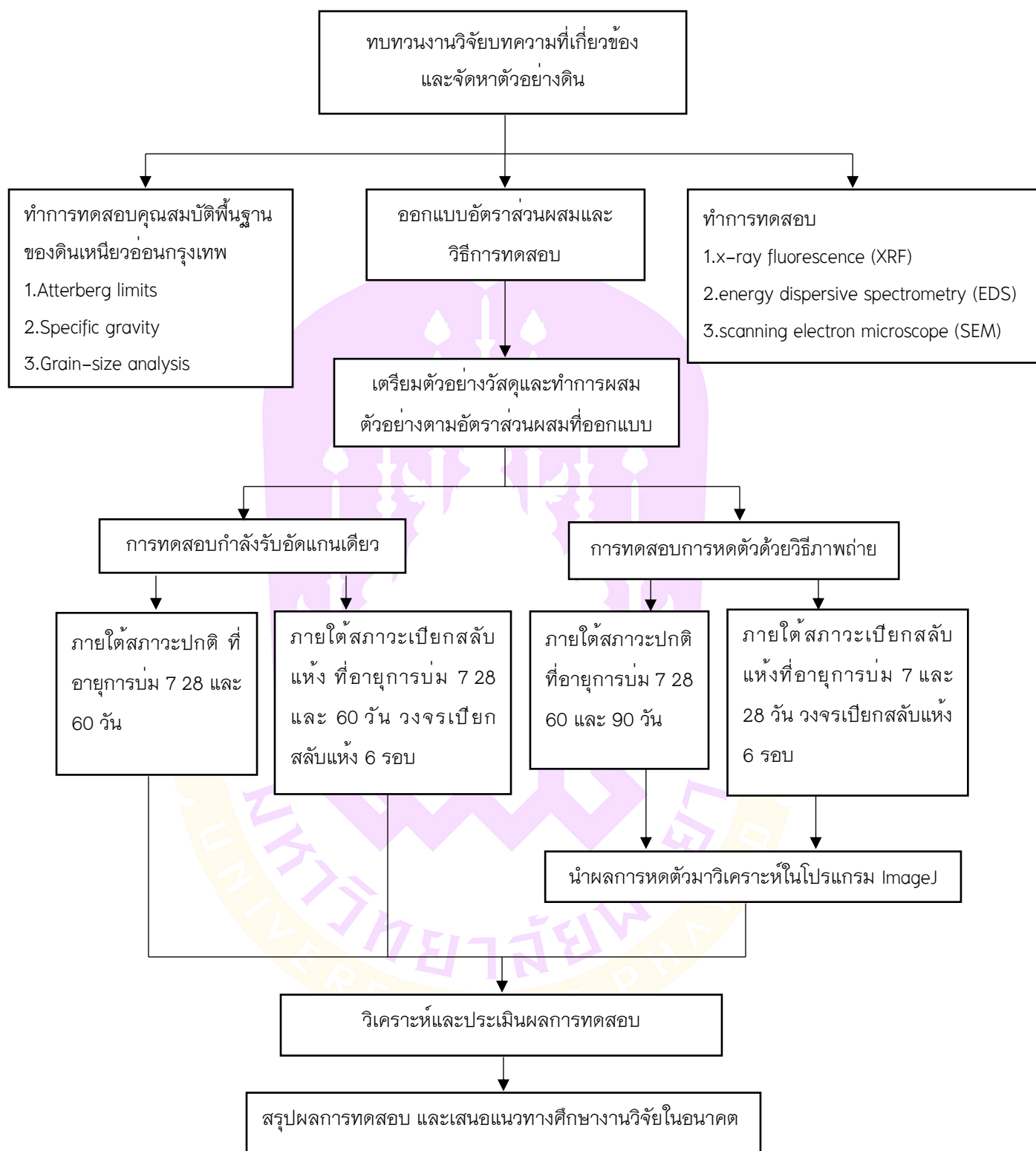
4. สัดส่วนที่เหมาะสมสามารถนำมาแก้ปัญหการหัตถ์ เพิ่มกำลังในการรับน้ำหนัก และเพิ่มความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯได้

5. ส่งเสริมให้มีการนำเถ้าลอยมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อลดค่าใช้จ่ายของโครงการในอนาคตได้

ตาราง 1 แผนการดำเนินงาน

ที่	รายละเอียดการดำเนินงาน	ปี พ.ศ. 2562					ปี พ.ศ. 2563						
		ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.			
1.	ค้นหาและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมด้านกำลังและการหดตัวของดินผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย												
2.	ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย												
3.	ออกแบบอัตราส่วนผสม และวิธีการทดสอบ												
4.	เตรียมตัวอย่างวัสดุและทำการขึ้นรูปตัวอย่างตามอัตราส่วนผสม												
5.	ทำการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง ความคงทนและ การหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย												
6.	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ												
7.	จัดทำรูปแบบรายงานงานวิจัย												

\*\*\* ระยะเวลาการดำเนินการอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม



ภาพ 1 แผนการดำเนินงาน

## บทที่ 2

### เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

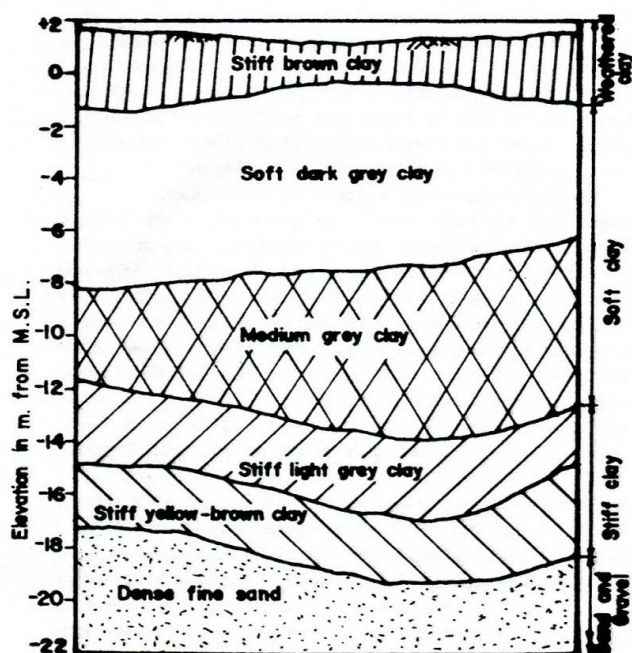
#### ดินเหนียวกรุงเทพ

กรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนที่ราบลุ่มแม่น้ำ และสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งไหลผ่านกลางตอนล่างที่ราบในประเทศไทย ดังภาพ 2 ตะกอนควอเทอร์นารี (quaternary) ของภาคกลางตอนล่างนำเสนอลำดับที่ซับซ้อนของตะกอนดิน ลุ่มน้ำ และตะกอนสามเหลี่ยม ชั้นดินควอเทอร์นารีประกอบด้วยแปดชั้นน้ำ: ชั้นน้ำกรุงเทพฯ (BK) พระประแดง (PD) นครหลวง (NL) นนทบุรี (NB) สามโคก (SK) พญาไท (PT) ธนบุรี (TB) และปากน้ำ (PN) ตะกอนเหล่านี้ถูกแยกออกจากกันด้วยชั้นดินเหนียวหรือดินทราย ระดับความลึกของพื้นดินยังไม่ทราบแน่ชัด แต่ระดับความลึกของพื้นที่ในกรุงเทพฯ นั้นมีความลึกตั้งแต่ 400 เมตร ถึง 1,800 เมตร การสูบน้ำบาดาลจากชั้นน้ำลึก ๆ ในช่วงห้าสิบปีที่ผ่านมา หรือก่อให้เกิดความดันใต้ดินอย่างมากลดลงในชั้นดินเหนียวอ่อนและอัดตัวได้สูง ดังภาพ 3 การวิเคราะห์รายละเอียดเกี่ยวกับผลกระทบของการทรุดตัวของดินแดนกรุงเทพฯ ซึ่งเกิดจากการสูบน้ำลึกลงไปใอันตรายทางภูมิศาสตร์ (ฐานราก) และโครงการปรับปรุงสภาพพื้นดินรายงานโดย Shibuya et al. (2003) และ Balasubramaniam et al. (2005)

ดินเหนียวเป็นดินที่แสดงพฤติกรรมแบบมีความเชื่อมแน่น (cohesion) และสภาพพลาสติก (plasticity) ขนาดของดินเหนียวจะนิยามขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) แร่ดินเหนียวเป็นสารโครงสร้างผลึก (crystalline) ที่มีโครงสร้างเฉพาะแบบแผ่น (sheet) โดยประกอบด้วยอนุภาคชนิดเพลต (plate) (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, 2551)

ลักษณะเฉพาะของดินเหนียวกรุงเทพ (characteristic of Bangkok Clay) จากงานวิจัยและการศึกษาในอดีตหลายพื้นที่ ทำให้ทราบว่าดินเหนียวกรุงเทพมีคุณสมบัติทั่วไปที่ใกล้เคียงกัน เช่นการศึกษาชั้นดินบริเวณแม่น้ำเจ้าพระยาของ ชัย มุกตพันธุ์ ในปี พ.ศ.2510 (นพรัตน์ พรรณขาม, 2556) ได้แสดงข้อมูลของชั้นดิน ดังภาพ 4





ภาพ 4 ข้อมูลชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ

ที่มา: นพรัตน์ พรรณงาม (2556)

จากงานวิจัยของ Kim (1991) แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ดังตาราง 2

ตาราง 2 คุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Kim, 1991)

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
ความชื้นในมวลดินตามธรรมชาติ	81	%
ขีดจำกัดเหลว, LL (%)	98	%
ขีดจำกัดพลาสติก, PL (%)	37	%
ดัชนีพลาสติก, PI (%)	61	%
ดัชนีเหลว, LI (%)	0.73	-
ค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนัก	14.8	kN/m <sup>3</sup>
ความถ่วงจำเพาะ	2.69	-
ปริมาณดินเหนียว	70	%
ปริมาณตะกอน	24	%
ปริมาณทราย	6	%

ข้อมูลจากงานวิจัยของ สมชายในปี พ.ศ.2513 (นพรัตน์ พรรณขาม, 2556) แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ ในชั้นดินทับถม (Weathered layer) และชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ดังตาราง 3

ตาราง 3 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวกรุงเทพฯ (นพรัตน์ พรรณขาม, 2556)

คุณสมบัติ		ช่วงทั่วไป	
		* ดินเหนียวตากลม	** ดินเหนียวอ่อน
การกระจายขนาดอนุภาค			
ทราย	2.0 – 0.06 มม. (%)	1-2	1-3
ตะกอน	0.06 – 0.002 มม. (%)	43 – 47	38-43
ดินเหนียว	< 0.002 มม. (%)	52-56	54-61
ความชื้นในมวลดินตามธรรมชาติ, w (%)		71-85	77-91
ขีดจำกัดเหลว, LL (%)		81-88	82-94
ขีดจำกัดพลาสติก, PL (%)		33-36	35-39
ดัชนีพลาสติก, PI (%)		45-52	45-58
ดัชนีเหลว, LI (%)		0.72-0.96	0.80-1.00
การทำงาน		0.87-0.92	0.77-1.01
ความถ่วงจำเพาะ		2.67-2.69	2.66-2.69
หน่วยน้ำหนักรวม (t/m <sup>2</sup> )		1.56-1.9	1.50-1.52
ความไวตัว	-การทดสอบแรงเฉือนในสนาม	3-4	3-8
	-การทดสอบแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการ	4-8	3-6
	-การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว	4-12	4-14
สี		เทาเข้ม	
ความเหนียวแน่น		อ่อน	

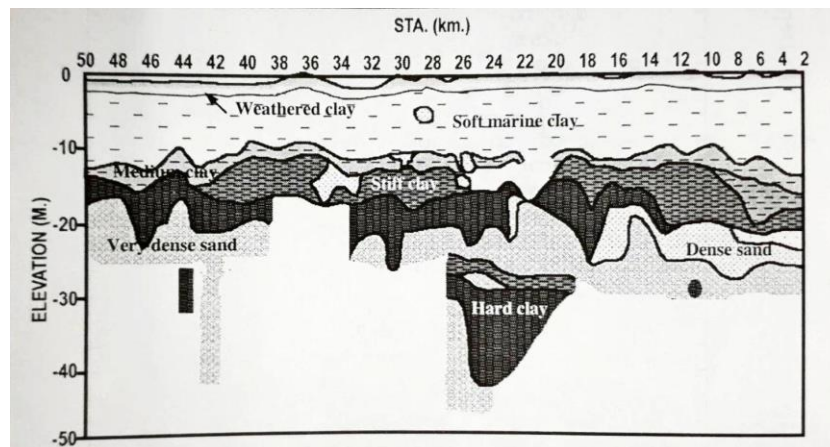
\* ความลึก 2.50-4.50 ม. จากพื้นผิวดินเดิม \*\* ความลึก 4.50-7.50 ม. จากพื้นดินเดิม

ชั้นดินตามแนวทางรถไฟช่วงตลิ่งชัน-นครปฐม ดังแสดงในภาพ 5 เป็นชั้นดินในพื้นที่ซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในแผ่นดิน ประมาณตอนเหนือของกรุงเทพฯ โดยวางอยู่ทางซีกตะวันตก ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนประเภทดินเหนียวทะเล (marine clay) หนาประมาณ 10-12 เมตร ใต้ชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นชั้นดินเหนียวปานกลางที่ผิวบนเป็นร่อง-แอ่ง วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนแข็ง และ/หรือ แข็งมาก ชั้นดินเหนียวสองส่วนหลังนี้มีความหนาแปรเปลี่ยนมาก มีร่องรอยการกัดเซาะของผิวหน้าดินมาก รวมความหนาของทั้งสองชั้นได้ประมาณ 3-10 กว่าเมตร ถัดลงไปจึงเป็นชั้นทรายที่แน่นมาก ผิวบนของชั้นทรายนี้มีร่อง-แอ่งสูงต่ำตลอดสายทาง ชั้นทรายนี้มีความหนาไม่มากนักและไม่สม่ำเสมอ ใต้ชั้นทรายยังพบร่องรอยของชั้นดินเหนียวแข็ง-แข็งมากแทรกอยู่ ดังแสดงในภาพ 6 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength,  $s_u$ ) กับ ระดับความลึก (depth) พื้นที่ตลิ่งชัน-นครปฐม ดังแสดงในภาพ 7 ซึ่งดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น ถนอสายกาญจนภิเษก-พุทธมนทนสาย 2 ซึ่งเป็นพื้นที่ใกล้เคียงกับแนวทางรถไฟสายตลิ่งชัน-นครปฐม คุณสมบัติของดินช่วงนี้ ดังแสดงในตาราง 4



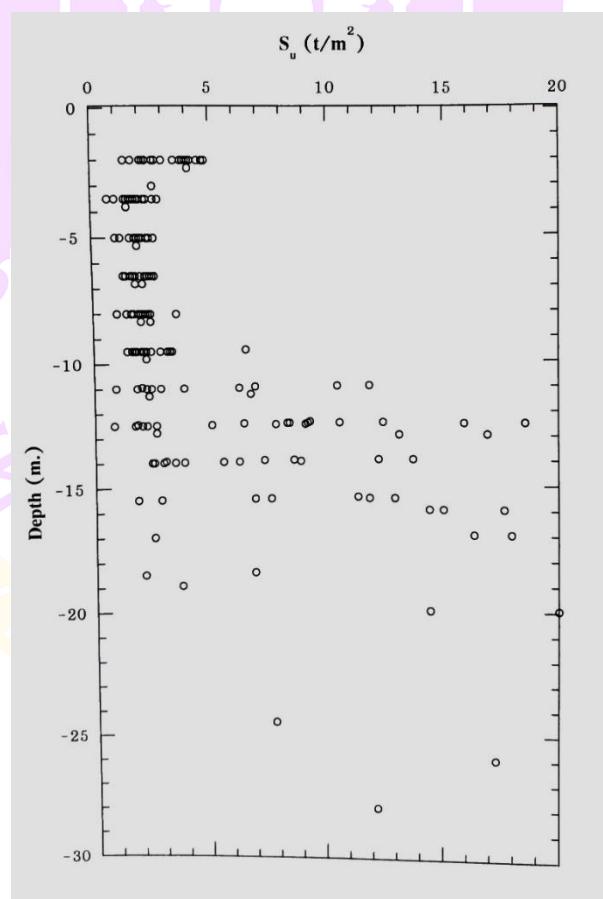
ภาพ 5 แนวทางรถไฟสายตลิ่งชัน-นครปฐม

ที่มา: ว.ส.ท. (2520)



ภาพ 6 ลักษณะชั้นดินตามแนวทางรถไฟสายตลิ่งชัน-นครปฐม

ที่มา: ว.ส.ท. (2520)



ภาพ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $s_u$  กับ depth ตามแนวทางรถไฟช่วงตลิ่งชัน-นครปฐม

ที่มา: ว.ส.ท. (2520)

ตาราง 4 คุณสมบัติของดิน (ว.ส.ท., 2520)

ชั้นดิน	ความลึก (ม.)	ปริมาณน้ำ ในมวลดิน (%)	ขีดจำกัด เหลว (%)	ขีดจำกัด พลาสติก (%)	ดัชนีเหลว
โซนเปลือกโลก (crustal zone)	0-4.5	20-60	45-70	20-30	0.2-1
โซนตะกอน ทะเล(marine sediment zone)	10-15	45-75	50-80	20-30	0.5-1.3

### การปรับปรุงคุณภาพดิน

ในการปรับปรุงคุณภาพดินสามารถแบ่งเทคนิคออกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ การปรับปรุงเชิงกล (Mechanical modification) การปรับปรุงทางไฮดรอลิก (hydraulic modification) (มักทำในสนาม) การปรับปรุงโดยการผสมสารเคมี (chemical modification) และการปรับปรุงโดยการเสริมกำลัง (modification by inclusions and confinement) โดยรายงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นถึงการปรับปรุงดินด้วยการใช้การผสมสารเคมีเท่านั้น

United State Airforce ในปี ค.ศ. 1966 (นพพันธ์ พรธนขาม, 2556) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยแบ่งตามขนาดและค่าดัชนีพลาสติก (plastic index) ดังแสดงในตาราง 5 และ Metcalf ในปี ค.ศ.1977 (นพพันธ์ พรธนขาม, 2556) ได้เสนอการเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพดิน ดังภาพ 8 ซึ่งวิธีการจะต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละชนิดของดิน โดยคำนึงถึงอิทธิพลของขนาดของเม็ดดินเป็นหลัก

### วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

การปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นการทำให้ดินตามธรรมชาติมีความสามารถในการรับแรงแบกทาน (bearing capacity) ได้ดีขึ้นและทนทานต่อการสึกหรอ วิธีการปรับปรุงดินอาจเป็นการบดอัดให้แน่นหรือการใช้สารผสมเพิ่ม เช่น ปูนซีเมนต์ โดย Circeo et al. (1962) กล่าวว่า การใส่ปูนซีเมนต์ลงในดินเป็นการเปลี่ยนสมบัติและโครงสร้างของดิน โดยดิน

ตาราง 5 วิธีปรับปรุงคุณภาพดินชนิดต่าง ๆ (นพรัตน์ พรรณขาม, 2556)

ชนิดดิน	วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด
ดินเม็ดหยาบ (coarse granular)	ผสมแอสฟัลท์ (asphalt) ผสมปูนซีเมนต์ (cement) ผสมปูนขาวและเถ้าลอย (lime and fly ash)
ดินเม็ดละเอียด (fine granular)	ผสมแอสฟัลท์ ผสมปูนซีเมนต์ ผสมปูนขาวและเถ้าลอย ผสมคลอไรด์ (chloride)
ดินเหนียวปั้นต่ำ (clay, low plasticity)	ผสมปูนซีเมนต์ ผสมปูนขาว
(ดินเหนียวปั้นสูง) (clay, high plasticity)	ผสมปูนขาว

Designation	Fine clays	Coarse clays	Fine silts	Coarse silts	Fine sands	Coarse sands
Soil Particle size (mm.)	<.0006	.0006-.002	.002-.01	.01-.06	.06-.4	.4-2.0
Soil Volume Stability	Very poor	Fair	Fair	Good	Very good	Very good
Type of Stabilisation Application						
LIME	[Dark grey bar from Fine clays to Coarse silts]					
CEMENT	[Dark grey bar from Fine clays to Coarse sands]					
BITUMENS	[Dark grey bar from Fine silts to Coarse sands]					
POLYMERIC-ORGANIC	[Dark grey bar from Coarse clays to Coarse sands]					
MECHANICAL	[Dark grey bar from Coarse clays to Coarse sands]					
THERMAL	[Dark grey bar from Fine clays to Coarse silts]					

Range of maximum efficiency
 Effective, but quality control may be difficult

\* i.e. improvement of soil grading by mixing-in gravels, sands or clays as appropriate

ภาพ 8 วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่แปรผันตามขนาดของเม็ดดิน

ที่มา: นพรัตน์ พรรณขาม (2556)

เกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณภาพได้ แต่จะให้ผลที่แตกต่างกันถึงแม้ว่าดินจะมีสมบัติทางด้านฟิสิกส์ (physics) ที่เหมือนกันและใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มาผสมเท่ากัน ทั้งนี้เพราะดินมีสมบัติทางเคมี (chemical property) ไม่เหมือนกัน ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีผลต่อกำลังของดิน

Mitchell ในปี ค.ศ.1982 (นพรัตน์ พรรณงาม, 2556) กล่าวว่าไว้ว่า วัตถุประสงค์ในการผสมสารเคมีลงในดินก็เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน เช่น ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาณเป็นต้น โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของดิน ได้แก่ การบวมตัว หรือการหดตัวของดินเมื่อความชื้นในดินมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาพภูมิอากาศ ทำให้มีผลต่อกำลังแบกทานของดิน การควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาณของดินสามารถทำได้โดยการผสมสารเคมีที่มีไฮเดรชันแคตไอออน (hydration cation) ต่ำ ๆ เช่น แคลเซียม (calcium) แมกนีเซียม (magnesium) และอลูมิเนียม (aluminum) เข้าไปแทนที่ดินที่มีสารประกอบประเภทโซเดียม (sodium) หรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดการประสานเม็ดดิน (cementation) เกิดขึ้น การที่จะทำให้ดินสามารถรับแรงแบกทานได้มากขึ้นหรือมีกำลังมากขึ้นนั้นทำได้โดยการลดช่องว่างของเม็ดดิน การทำให้เม็ดดินเชื่อมติดกัน หรือการทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน (flocculation) รวมไปถึงการป้องกันไม่ให้เกิดการบวมตัวของดิน

### การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

สารผสมเพิ่มที่นำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับวัสดุทางมืออยู่หลายชนิด ดังนั้นการเลือกใช้สารผสมเพิ่มจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงสมบัติตามธรรมชาติของดินที่จะนำมาปรับปรุงของงานวิจัย Gordon ในปี ค.ศ.1984 (นพรัตน์ พรรณงาม, 2556) สำหรับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง ๆ นั้นนิยมใช้ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย หรือปูนขาวผสมเถ้าลอย เป็นต้น

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการใช้สารเคมีเป็นการปรับปรุงดินที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในงานทางด้านวิศวกรรม ซึ่งมีสารเคมีที่นำมาใช้ผสมนั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นกล่าวถึงแค่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นหลัก

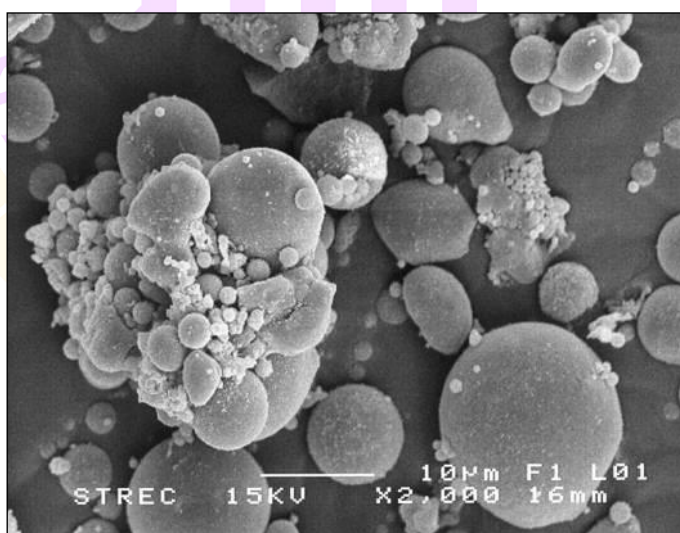
#### 1. ปูนซีเมนต์ (cement)

ปฏิกิริยาประสานที่สำคัญของปูนซีเมนต์ คือ ปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน (cement hydration) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่เรียกว่า ซีเมนต์เจล (cement gel) ซึ่งจะจับตัวแข็งเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นและปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะประกอบด้วยสารแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate) ชนิดต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีความแตกต่างในด้านสมบัติการแข็งตัว

## 2. เถ้าลอย (fly Ash)

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้อย่างหนึ่งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน สิ่งที่ปนในถ่านหิน เช่น ดินเหนียว (clay) ควอตซ์ (quartz) และ เฟลด์สปาร์ (feldspar) เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (pozzolan) ซึ่งแร่ธาตุประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกา (silica) และอลูมินา (alumina) เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและเป็นผงฝุ่นจะไม่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค ทั่วไป เถ้าลอยจะมีลักษณะเป็นผงสีเทาคล้ายกับปูนซีเมนต์ ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลม หรืออาจพบรูปร่างที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนเผา และชนิดของถ่านหิน โดยแสดงลักษณะของอนุภาคของเถ้าลอยดังภาพ 9

งานวิจัยของ วิจิต และคณะ ในปี พ.ศ.2536 (นพรัตน์ พรรณขาม, 2556) กล่าวว่า เถ้าบางชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) เนื่องจากเถ้าลอยมีส่วนผสมของซิลิกาและอลูมินาสูง ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับปูนขาว แล้วเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) ซึ่งทำให้เม็ดของเถ้าเกิดการเกาะรวมกัน ซึ่งปฏิกิริยานี้คล้ายคลึงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ดังนั้นจึงมีการนำเอาเถ้าลอยมาใช้แทนปูนซีเมนต์เพื่อลดค่าใช้จ่าย เพราะเถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาของถ่านหิน



ภาพ 9 การกระจายตัว ขนาด ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าลอย

ที่มา: นพรัตน์ พรรณขาม (2556)

## การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์

งานวิจัย Lambe et al. ในปี ค.ศ.1959 และ Moh ในปี ค.ศ.1962 (นพพันธ์ พรหมขาม, 2556) ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดสารประกอบหลัก 4 ประเภท คือ  $C_3S$   $C_2S$   $C_3A$  และ  $C_4AF$  ซึ่งจะเป็นตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ทำให้เกิดสารประกอบ CSH CAH และการแพร่กระจายปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนขาว (released hydrate lime) กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH โดยสารทั้งสองจะมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะ ซึ่งสามารถยึดเกาะเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้เป็นเม็ดขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง สำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนขาว (hydrated lime) ที่เกิดขึ้นจะแตกตัวเป็น  $Ca^{2+}$  และจะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินา ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง ซึ่งอนุภาคดินจะฝังอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา (reaction product) จะมีลักษณะเป็นซีเมนต์เพลส (cement paste) และจะแข็งตัวตามเวลาและเปลี่ยนโครงสร้างดินให้แข็งตัวด้วย โดย Moh ในปี ค.ศ.1965 (นพพันธ์ พรหมขาม, 2556) ได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมีดังนี้



### 1. โครงสร้างของดินซีเมนต์

Mitchell และ Jack ในปี ค.ศ.1966 (นพพันธ์ พรหมขาม, 2556) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินภายหลังจากผสมปูนซีเมนต์ โดยการเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สถานะ ดังนี้

1.1 สถานะขณะบดอัดอนุภาค ชั้นตอนนี้เป็นช่วงเวลาที่ยานซีเมนต์จะเข้าไปผสมกับอนุภาคของเม็ดดิน ซึ่งสถานะนี้ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ดังภาพ 10(ก)

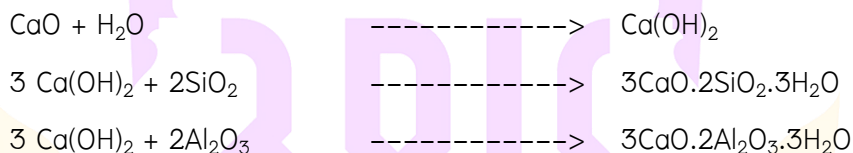
1.2 สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นซีเมนต์เจล เข้าแทรกซึมตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดินและจะปล่อยปูนขาว โดยทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินา ในดิน หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดิน ดังภาพ 10(ข)

1.3 สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ทำให้ซีเมนต์เจลกระจายและแทรกซึมไปทั่วดินซีเมนต์ ซึ่งทำให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มสูงขึ้น ดังภาพ 10(ค)

ลักษณะของดินกับซีเมนต์ หรือซีเมนต์เพสต์ที่เริ่มแข็งตัวเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope) มีลักษณะดังแสดงในภาพ 11

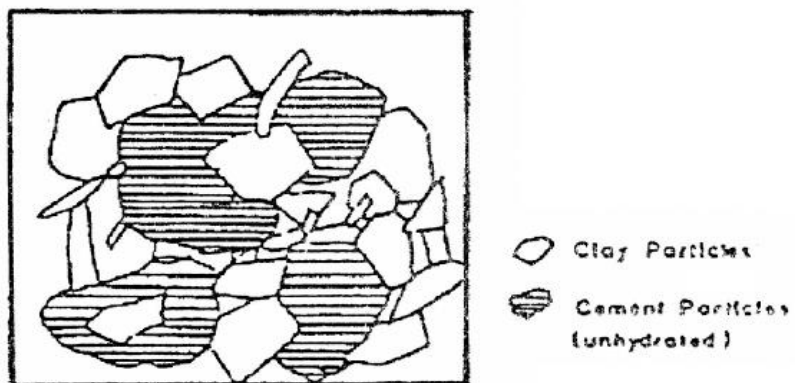
### สารปอซโซลาน

ตามมาตรฐาน ASTM ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า ปอซโซลาน (Pozzolana) ไว้ว่า สารปอซโซลาน คือ วัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกา และอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ซัลฟูรี และไครอูรี ในปี พ.ศ.2549 (นพรัตน์ พรรณงาม, 2556) กล่าวว่า ทั่วไปแล้วสารปอซโซลานมีสมบัติเป็นวัสดุประสานน้อยมาก แต่เนื่องจากสารปอซโซลานมีความละเอียดค่อนข้างสูงและมีปริมาณความชื้นเพียงพอที่จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่อุณหภูมิห้องได้ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

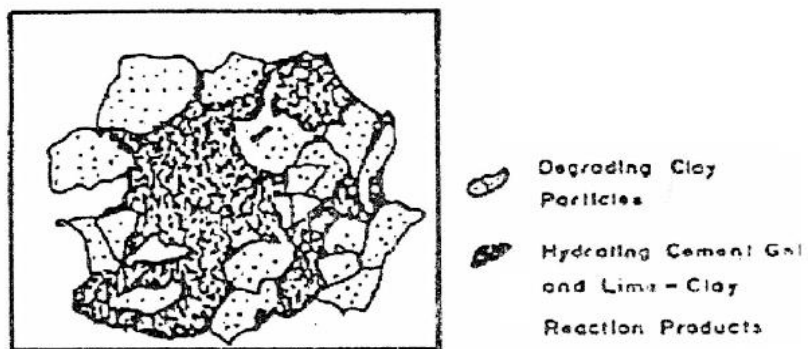


สารปอซโซลานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการนำมาใช้งาน ดังนี้

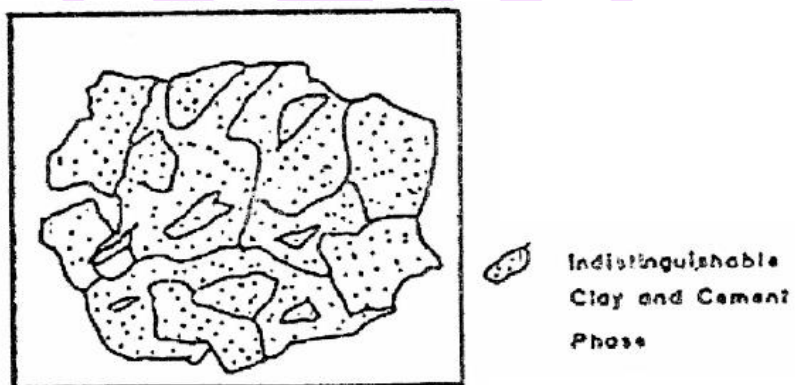
1. สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (natural pozzlanas) โดยทั่วไปคือ วัสดุที่เกิดจากการระเบิดภูเขาไฟ เช่น หินเถ้าภูเขาไฟ (volcanic tuff) และหินพูน (pumicite) เป็นต้น
2. สารปอซโซลานสังเคราะห์ (artificial pozzlanas) ส่วนใหญ่ คือ วัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ ดินเหนียว หินดินดาน (shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ และเถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการทำเกษตรกรรม



(ก) สถานะขณะบดอัดอนุภาค



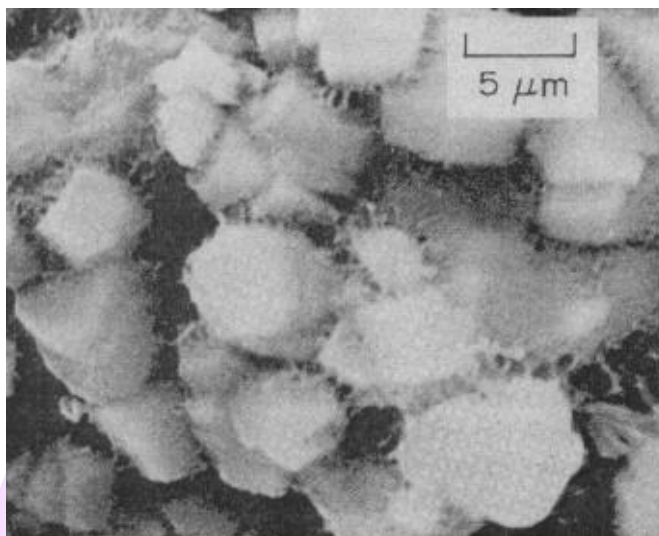
(ข) สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น



(ค) สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว

ภาพ 10 โครงสร้างของดินซีเมนต์

ที่มา: นพรัตน์ พรรณงาม, 2556



ภาพ 11 ลักษณะของดินผสมซีเมนต์โดยใช้กลองจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ที่มา: นพินทร์ พรรณขาม (2556)

สำหรับประเทศไทยได้มีการนำเอาเถ้าลอยลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้ โดยเถ้าลอยดังกล่าวเมื่อนำมาผสมกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะแล้วบ่มทิ้งไว้จะเริ่มแข็งตัวภายใน 1 วัน ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะส่วนใหญ่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) ปนอยู่ในปริมาณที่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็น  $\text{Ca(OH)}_2$  และทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก กับซิลิกาและอลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของ Non-crystalline glass จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวขึ้นได้ คือ CSH และ CAH การใช้เถ้าลอยแม่เมาะไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานดินสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ เถ้าลอยผสมน้ำและเถ้าลอยบดอัด ในปี พ.ศ. 2530 ได้มีการใช้เถ้าลอยลิกไนต์มาก่อสร้างชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางของถนนภายในโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเหมืองลิกไนต์ จากนั้นในปี พ.ศ.2535 ได้เริ่มนำเถ้าลอยผสมน้ำไปใช้ในการซ่อมแซมการทรุดตัวของระบบระบายน้ำรอบสถานีไฟฟ้าแรงสูง ในงานวิจัย สมชัย ปี พ.ศ. 2536 (นพินทร์ พรรณขาม, 2556)

### การใช้งานเถ้าลอย

ประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินและถ่านหินผสมเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่หลายแห่ง ซึ่งการนำเถ้าลอยแต่ละแหล่งมาใช้ในการปรับปรุงดินเพื่อจุดประสงค์การปรับปรุงและเพิ่มคุณภาพดิน หรือเพื่อการลดต้นทุน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงการใช้งานเถ้าลอยคือ คุณภาพทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยแหล่งนั้น ๆ สำหรับการใช้อเถ้าลอยจะพิจารณาคัดเลือกตาม

คุณสมบัติที่เข้าเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 หรือมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2135-2545 ของประเทศไทย ดังนั้นการใช้งานเถ้าลอยจำเป็นต้องอ้างอิงตามมาตรฐานและข้อกำหนดอย่างเคร่งครัด ปัจจุบันเถ้าลอยจากแหล่งโรงไฟฟ้าแม่เมาะถือได้ว่ามีคุณภาพสูงและเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้งานมากที่สุดในประเทศไทย

อย่างไรก็ตามยังมีเถ้าลอยจากแหล่งอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและราคาถูกแต่ยังไม่เคยนำมาใช้งานหรือเคยมีการนำมาใช้งานแล้วเกิดผลเสียหายตามมา ทั้งนี้เพราะวิศวกรมักนิยมนำเอาเถ้าลอยจากแหล่งอื่น ๆ มาใช้งานโดยการทดแทนตามสัดส่วนการออกแบบส่วนผสมที่แทนที่เถ้าลอยจากแม่เมาะ ซึ่งคุณสมบัติเถ้าลอยจากแหล่งอื่น ๆ นอกเหนือจากเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะไม่เหมือนกัน ดังนั้นการใช้งานเถ้าลอยในการทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนหรือเพื่อการเพิ่มคุณสมบัติของดินควรได้รับการออกแบบตามคุณสมบัติของเถ้าลอยในแต่ละแหล่งที่เรานำมาใช้งาน เมื่อเรามีความเข้าใจการใช้งานเถ้าลอยอย่างถูกต้องจะช่วยให้เราสามารถปรับปรุงคุณภาพดินที่มีต้นทุนต่ำและคุณภาพสูงได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง อีกทั้งเป็นการช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและลดการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการขนเถ้าลอยจากแหล่งระยะทางไกล ๆ อีกด้วย

เถ้าลอยลิกไนต์โดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปเป็นรูปทรงกลมมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.15 มิลลิเมตร) ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ, สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C 618 "Specification for Fly ash and Raw or Calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete" ได้จัดแยกประเภทของเถ้าลอยไว้ 2 ชนิด คือ Class F และ Class C โดย Class F มีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก และ Class C มีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ระหว่าง 50-70% โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติย่อมมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ การที่เถ้าลอยจากแหล่งเดียวกันพบว่าเป็น Class C และ Class F เป็นเรื่องที่เป็นปกติ แม้ว่าจะเป็น Class C หรือ Class F ต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ทั้งสิ้น โดยปริมาณองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM แบ่ง Class ดังตาราง 6

ตาราง 6 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Requirement) (ASTM C618-08a)

	class		
	N	F	C
ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, $\text{SiO}_2$ ) บวก			
อะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide, $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) บวกไอเออร์	70.0	70.0	50.0
นอออกไซด์ (iron oxide, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), น้อยที่สุด, %			
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (sulfur trioxide, $\text{SO}_3$ ), มากที่สุด, %	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น (moisture content), มากที่สุด, %	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเมื่ออุณหภูมิที่สูง (Loss on Ignition), มากที่สุด, %	10.0	6.0 <sup>A</sup>	6.0

### เสาเข็มดินซีเมนต์

เสาเข็มดินซีเมนต์ (soil cement column) เป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินฐานรากให้มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ลดการทรุดตัวในชั้นดินอ่อน ขั้นตอนในการผสมเริ่มจากการผสมน้ำปูน (cement milk) กับดินเหนียวอ่อน หรือ ดินทรายหลวมเป็นการผสมแบบเปียก โดยใช้น้ำแรงดันสูง หรือ ใ้พัดทำลายโครงสร้างดินเดิม แล้วอัดฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันสูง (jet grouting) หรือ อัดฉีดน้ำปูนแรงดันต่ำแล้วใช้ใ้พัดตีผสม (mechanical mixing low pressure grout) เมื่อน้ำปูนผสมเข้ากับดิน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างดินกับน้ำปูนส่งผลให้ดินแข็งแรงกว่าเดิม ไม่น้อยกว่า 10 เท่า ปัจจุบันเสาเข็มดินซีเมนต์ ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานฐานราก ถนนบนดินอ่อน หรือดินหลวม งานป้องกันการพังของลาดตลิ่ง งานป้องกันการพังของงานขุดลึก งานคั่นกันน้ำ การทำให้อัดดินเล็กลงและมีเสถียรภาพ งานฐานรากอาคารขนาดเล็ก งานฐานรากไซโลและแทงก์ขนาดใหญ่ งานป้องกันแรงสั่นสะเทือน รวมถึงงานป้องกันการรั่วซึมของคั่นกันน้ำและอ่างเก็บน้ำ

#### 1. วิวัฒนาการของเสาเข็มดินซีเมนต์

การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์/ปูนขาว (cement/lime column) ในการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน สำหรับรับคั่นถนน หรือในงานดินขุด เริ่มต้นในประเทศแถบสแกนดิเนเวีย เช่น สวีเดน ฟินแลนด์ นอร์เวย์ ดั้งนั้นองค์ความรู้ ทฤษฎีการออกแบบ จึงพัฒนามาจากประเทศในแถบนี้ เป็นส่วนใหญ่ ในประเทศญี่ปุ่นก็มีการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ที่เรียกว่าวิธีการผสมลึก (deep mixing method, DMM) อย่างแพร่หลาย แต่ใช้ในลักษณะของการเพิ่มเสถียรภาพของคั่นดินเป็นส่วนใหญ่

วิวัฒนาการของการใช้ DMM ตั้งแต่ปี ค.ศ.1954-ปัจจุบัน ซึ่งเกิดขึ้นครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นและสวีเดน โดยการพัฒนาเทคโนโลยีของการก่อสร้างทางด้านเสาเข็มดินซีเมนต์ แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

การพัฒนาในช่วงแรก ๆ ช่วงปี ค.ศ.1923 การก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนนั้น ได้ใช้ท่อนไม้รองเพื่อเสริมแรงให้กับฐานรากเป็นที่นิยมกันมาก (Flodin and Broms, 1981) รวมไปถึงการใช้ซานทางหรือการใช้วัสดุน้ำหนักเบาเข้ามาเพิ่มเสถียรภาพของคันทางถนนเช่นกัน ต่อมาในประเทศสวีเดนได้มีการใช้เสาเข็มเพื่อรองรับน้ำหนักคันทาง และถ่ายน้ำหนักลงชั้นดินที่ดีกว่า รวมไปถึงการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางถนนด้วย

ช่วงปี ค.ศ.1948 ถึง 1970 มีการพัฒนาของเสาเข็มมากขึ้นเรื่อย ๆ ที่ยังคงไม่ชัดเจนมากนัก โดยมีการใช้เสาเข็มปูนขาว (lime column method) ในช่วงปี ค.ศ.1960 แต่การพัฒนาของเสาเข็มช่วงที่สำคัญจะเกี่ยวข้องกับการใช้วิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) ซึ่งใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเสาเข็มในแนวระนาบภายใต้เชิงลาดคันทาง ซึ่งได้ใช้สภาพความเครียดระนาบ (plane strain) มาวิเคราะห์พฤติกรรมของดินภายใต้คันทาง

ช่วงปี ค.ศ.1970 ถึง ปัจจุบัน ซึ่งในช่วงต้นปี ค.ศ.1970 ได้มีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ เสาเข็มปูนขาว-ปูนซีเมนต์ (lime/cement column) โดยได้ทำการศึกษาค้นคว้ากันอย่างแพร่หลายในประเทศสวีเดน และประเทศญี่ปุ่น แล้วจึงนำเทคนิคเสาเข็มปูนขาว-ปูนซีเมนต์มาใช้ในงานก่อสร้างฐานรากบนดินเหนียวอ่อน เช่น งานคันทาง งานขุดดิน เป็นต้น ในช่วงปลายปี ค.ศ.1970 ประเทศญี่ปุ่นได้มีการพัฒนาวิธีปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้การผสมลึกในที่ (deep mixing of in-situ) โดยผู้เริ่มพัฒนา ได้แก่ Terashi et al. ในปี ค.ศ.1979 Kawasaki et al. ในปี ค.ศ.1981 และ Suzuki ในปี ค.ศ.1982 (วารสาร ไม้เรียง และสมพงษ์ โรจน์กั้งสตาล, 2553) ซึ่งการก่อสร้างเริ่มต้นของวิธีผสมลึกในที่ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างอุ้งจอดรถ และโครงสร้างต่าง ๆ บริเวณอ่าวริมทะเล ต่อมาในช่วงปี ค.ศ.1975 ได้เริ่มทำการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบเปียกมาใช้ในการก่อสร้าง ในช่วงปี ค.ศ.1980 ได้มีการพัฒนาเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบแห้งมาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างอีกมากมายจนกระทั่งในปัจจุบันการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างของฐานรากต่าง ๆ เช่น งานคันทางถนน งานตึกอาคาร และงานฐานรากของถังเก็บน้ำ โดยในประเทศไทยนิยมใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบเปียกในการก่อสร้างถนนบนดินอ่อน

## 2. ประโยชน์ของการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์

การทำเสาเข็มดินซีเมนต์ในการรองรับคันทางถนน สามารถลดการทรุดตัวและป้องกันการเกิดปัญหาด้านเสถียรภาพของคันทางบริเวณเชิงลาดด้านข้างที่เกิดจากการเลื่อน

ตัวของดิน ซึ่งการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์จะทำให้ดินที่ฐานรากแข็งตัวและมีกำลังสูงขึ้น โดยการก่อสร้างคันทางและผิวถนนสามารถทำได้ทันทีหลังจากก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์แล้วเสร็จ จึงไม่ต้องรอเวลาทำการพรีโหลด (preload) ให้ดินเกิดการทรุดตัวเหมือนการก่อสร้างแบบเดิม หรือการใช้เทคนิคการลดระยะเวลาการระบายน้ำออกจากดินโดยเร็ว (prefabricated vertical drain, PVD) ซึ่งช่วยเร่งการทรุดตัวของดินได้ นอกจากนี้เสาเข็มดินซีเมนต์ยังลดปัญหาการทรุดตัวต่อเนื่องในระยะเวลานานหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จ เนื่องจากความหนาของชั้นดินที่เกิดการทรุดตัวลดลง

ในปัจจุบัน DMM ได้นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดินหลายลักษณะ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

2.1 ลดการทรุดตัวของคันทางดิน (embankment) ฐานรากอาคาร และโครงสร้างอื่น ๆ

2.2 ป้องกันการเกิดการวิบัติทางลาด (slope failure)

2.3 เพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคันทางดิน และทำหน้าที่เปรียบเสมือนฐานรากได้อย่างดี

2.4 เพิ่มความต้านทานแนวราบ (horizontal resistance) ของโครงสร้าง

2.5 ป้องกันการเกิดการเคลื่อนตัวของดิน (heaving) และลดความยาวของซีทไพล์ (sheet pile) ในการขุดลึก

2.6 ป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการก่อสร้างบริเวณข้างเคียง และบริเวณที่เชื่อมต่อกัน

2.7 ป้องกันหลุมขุดขนาดใหญ่ สำหรับฐานรากระดับลึก

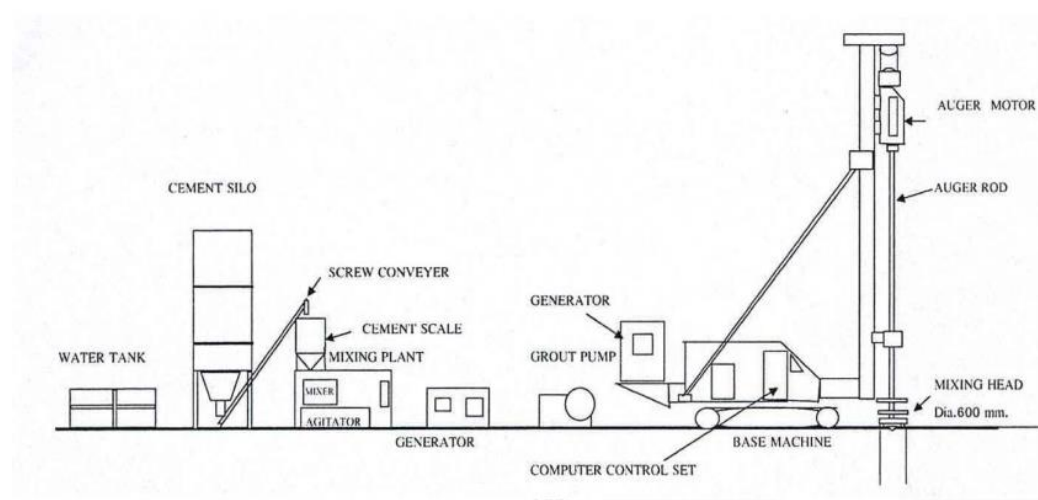
3. ชนิดและอุปกรณ์ของเสาเข็มดิน-ซีเมนต์โดยทั่วไป

3.1 วิธีเครื่องผสมความดันต่ำ (low pressure mechanical mixing)

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์วิธีนี้ จะฉีดสารเคมีซึ่งเป็นน้ำปูนซีเมนต์ลงไปผสมกับดินและทำการตีกวนผสมเพื่อให้ดินและปูนซีเมนต์เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ใบบิตที่ใช้จะมีลักษณะเฉพาะและขนาดของฉีดน้ำปูนที่เหมาะสม จะผสมตีกวนอยู่กับที่หลุมเจาะจึงไม่มีปัญหาการพังทลายหรือเสาเข็มดินซีเมนต์มีรูปร่างผิดปกติขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์จะเท่ากับความกว้างของใบบิตตีกวน การผสมซีเมนต์กับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้ความเข้มข้นเหมาะสมกับการทำงาน หากเข้มข้นเกินไปจะเกิดปัญหาอุดตันง่ายหรือเหลวเกินไปทำให้ได้กำลังต่ำสำหรับอุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ รายละเอียดลักษณะการจัดวางอุปกรณ์และเครื่องจักรต่าง ๆ แสดงดังในภาพ 12 ซึ่งอุปกรณ์และเครื่องจักรต่าง ๆ

แสดงดังในภาพ 13 และภาพ 14 โดยวิธีเครื่องผสมความดันต่ำมีรายละเอียดอุปกรณ์และเครื่องจักรต่าง ๆ ดังนี้

1. เครื่องเจาะ (base machine) ประกอบด้วย รถเจาะ (rig) หัวเจาะ (mixing head)
2. ชุดคอมพิวเตอร์ควบคุม (computer control set) ประกอบด้วย หน้าจอแสดงผล (monitor) เครื่องวัดความลึก (encoder)
3. แพล้นผสมน้ำปูน (mixing plant) ประกอบด้วย ถังผสม (mixing tank) ท่อส่งซีเมนต์ (screw conveyor) ถังเก็บปูนซีเมนต์ (cement silo)



ภาพ 12 รูปลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของวิธีเครื่องผสมความดันต่ำที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์

ที่มา: วรากร ไ้ม่เรียง และสมพงษ์ โรจน์กั้งสตาล (2553)

### 3.2 วิธีการฉีดน้ำปูน (Jet Grouting)

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์วิธีนี้จะใช้สารผสมในรูปแบบน้ำปูน (slurry) พ่นด้วยแรงดันสูงประมาณ 200 ถึง 400 บาร์ ผ่านรูเล็ก ๆ ที่ปลายหัวเจาะพร้อมกับหมุนก้านเจาะ เพื่อให้การผสมในรูปแบบน้ำปูนผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อสารผสมที่เป็นน้ำปูนทำปฏิกิริยากับดินโดยรอบแล้วจะกลายเป็นแท่งเสาเข็มดินซีเมนต์



ตัวรถ



หัวเจาะ



หน้าจอแสดงผล



เครื่องพิมพ์ข้อมูล

ภาพ 13 รูปถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องเจาะของวิธีเครื่องผสมความดันต่ำ

ที่มา: วรากร ไม้เรียง และสมพงศ์ โรจน์กังสดาล (2553)



ถังเก็บปูนซีเมนต์



ถังผสม



ท่อส่งซีเมนต์

ภาพ 14 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดแผ่นผสมน้ำปูนของวิธีเครื่องผสมความดันต่ำ

ที่มา: วรากร ไม้เรียง และสมพงศ์ โรจน์กังสดาล (2553)

Takeda et al. (1998) อธิบายว่า การกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยวิธีการฉีดน้ำปูนจะขึ้นกับความชื้นและความเหนียวในมวลดินตามธรรมชาติ ณ ที่นั้น ดังนั้นการออกแบบเส้นผ่าศูนย์กลางอาจคาดการณ์ได้จากการทดลองที่ผ่านมามีดังสรุปได้ดังตาราง 7

ตาราง 7 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ออกแบบตามลักษณะของดิน (Takeda et al., 1998)

ชนิดของดิน	ลักษณะของดิน	เส้นผ่าศูนย์กลางมาตรฐาน, (m)	เวลายาตรฐานสำหรับการปรับปรุงคุณภาพ, (min/m)
ดินทราย	$N < 5$	0.6-1.5	3.0
	$5 \leq N \leq 10$	0.6-1.5	3.0
ดินเหนียวเชื่อมแน่น $W=60-150\%$	$C \leq 1 \text{ t/m}^2$ ( $W > 100\%$ )	0.6-1.5	3.0
	$C \leq 3 \text{ t/m}^2$	0.6-1.5	3.0
ดินออร์แกนิก $W=150-1000\%$	$C \leq 1 \text{ t/m}^2$ ( $W > 500\%$ )	0.6-1.5	8.0
	$C \leq 3 \text{ t/m}^2$	0.6-1.5	5.0

หมายเหตุ N คือ จำนวนการตอก STP, W คือ ปริมาณน้ำในมวลดิน, C คือ ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างดิน

เกษม เพชรเกตู (2541) สรุปว่า การกระจายของแรงดันน้ำในโพรง โดยวิธีการฉีดน้ำปูนที่ระดับความลึกเดียวกันจะลดลงตามระยะเวลา ที่ระดับความลึก 3 เมตร จะลดลงเร็วกว่าที่ระดับความลึก 6 เมตรและ 8 เมตร ตามลำดับ และแรงดันน้ำส่วนเกินที่ระดับความลึก 3 เมตร จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป 66 วัน

สำหรับอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน แบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ กล่าวคือ ส่วนเครื่องจักรหลัก (base machine) และส่วนโรงงานตัวแทน (agent plant) เครื่องจักรหลักจะดำเนินการเกี่ยวกับกระบวนการอัดฉีด และผสมน้ำปูนภายในดิน ในขณะที่ส่วนโรงงานตัวแทนจะมีหน้าที่ป้อนส่วนผสมน้ำปูนที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินให้กับเครื่องจักรหลักอย่างต่อเนื่องและเพียงพอ ทั้งในด้านปริมาณและความดัน โดยเครื่องจักร และเครื่องมือหลัก ๆ ดังภาพ 15 ประกอบด้วย

1. เครื่องเจาะและอัดฉีด เป็นศูนย์กลางการควบคุมบังคับการทำงานทั้งหมด ใช้ระบบการบังคับการเคลื่อนที่คล้ายกับรถแบคโฮล์ สามารถเคลื่อนที่ได้รอบตัวทุกทิศทางเพื่อความรวดเร็วในการทำงาน เป็นรถเจาะดินตะขาบ เนื่องจากเครื่องจักรมีน้ำหนักมาก และต้องการความนิ่งมากที่สุดขณะทำการเจาะเพื่อให้เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่หนีศูนย์

2. ถังเก็บปูนผง และถังเก็บน้ำ (cement silo and water tank) ใช้ในการเก็บสำรองปูนซีเมนต์ผงและน้ำ ที่จะนำมาใช้ผสมเป็นน้ำปูน

3. ถังผสม (mixer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ผสมปูนซีเมนต์ผงกับน้ำ ให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะทำการอัดฉีดเข้าไปในชั้นดินที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพ

4. ถังกวน (agitator) เป็นภาชนะที่บรรจุน้ำปูนสำรองไว้เพื่อรอการอัดฉีด ทำให้การผสมในถังผสมต่อเนื่อง

5. ปั๊มอัดฉีดความดันสูง (high pressure pump) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งถ่าน้ำปูนที่ผสมแล้วไปตามระบบท่อด้วยความดัน 200 ถึง 400 บาร์

6. เครื่องเจาะและอัดฉีด (jet grout drilling rig) ชุดเครื่องเจาะทั้งหมดจะติดตั้งอยู่บนรถตีนตะขาบ บริเวณส่วนหน้าของตัวรถจะมีหัวเจาะส่วนโรตารีไฮดรอลิก (hydraulic rotary drill head) ติดตั้งอยู่และสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งได้

### 3.3 วิธีการผสมแห้งแบบโมดิฟายด์ (modified dry mixing, MDM)

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์วิธีนี้ จะมีการเพิ่มน้ำเข้าไปในมวลดินเพื่อปรับเปลี่ยนความชื้นที่มีอยู่ในมวลดิน การเจาะผ่านชั้นดินแข็งทำได้ง่าย และทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีเนื้อเดียวกันโดยใช้ผงซีเมนต์และน้ำลงไปผสมกับชั้นดินที่ต้องการปรับปรุง ฉีดพ่นด้วยความดันประมาณ 5 ถึง 6 บาร์ ซึ่งรูที่ปล่อยผงซีเมนต์และน้ำจะแยกออกจากกันเป็นการป้องกันการอุดตัน และผสมดีกวนให้เข้ากัน

Gunther et al. (2004) อธิบายว่า วิธี MDM เป็นการพัฒนามาจากวิธีการผสมแห้ง (dry mixing) โดยที่เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้วิธี MDM สามารถก่อสร้างได้ในชั้นดินแข็ง และชั้นทราย ซึ่งสามารถก่อสร้างได้รวดเร็วและลดค่าใช้จ่ายของโครงการ

สำหรับเครื่องจักรและอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน สามารถแยกส่วนประกอบที่สำคัญคือส่วนที่ทำหน้าที่เจาะผสม กับส่วนที่เป่าปูนซีเมนต์ผง (carrier) ดังภาพ 16 ประกอบด้วย



เครื่องเจาะและอัดฉีด

ถังกวน

ภาพ 15 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือวิธีการอัดฉีดน้ำปูน

ที่มา: วรากร ไ้มรัมย์ และสมพงศ์ โรจน์กั้งสตาล (2553)

1. เครื่องจักรสำหรับเจาะ (installer) เป็นเครื่องจักรที่ผลิตขึ้นสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์โดยเฉพาะ ลักษณะของเครื่องจักรสามารถขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลบนล้อสายพานดินตะขาบ มีแกนเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 127 มิลลิเมตร ยาว 17.50 เมตร มีใบกวนผสมติดตั้งอยู่ที่ปลายด้านล่างของแกนเจาะ ทำหน้าที่ในการกวนผสมปูนซีเมนต์ผงกับดินเดิม

2. เครื่องจักรสำหรับเป่าปูนซีเมนต์ผง ใช้สำหรับเป่าปูนซีเมนต์ผงส่งไปยังเครื่องจักรสำหรับเจาะ เครื่องจักรสามารถขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลบนล้อสายพานดินตะขาบบนตัวเครื่องจักรจะมีถังไซโลปูนสำหรับบรรจุปูนซีเมนต์ผงติดตั้งอยู่ จำนวน 2 ถังสามารถบรรจุปูนซีเมนต์ ผงได้ครั้งละประมาณ 25,000-26,000 กิโลกรัม

### 3.4 วิธีการเครื่องผสมแรงดันสูง (high pressure mechanical mixing)

การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์วิธีนี้เป็น การนำเทคนิคการเจาะและการอัดฉีดน้ำปูนมาประยุกต์ใช้ โดยจะฉีดน้ำปูนซีเมนต์ลงไปผสมกับดินด้วยแรงดันตั้งแต่ 50 ถึง 400 บาร์ ตลอดเวลาและทำการตีกวนผสมเพื่อให้ดินและปูนซีเมนต์เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ซึ่งขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์จะเท่ากับควมกว้างของใบมีดตีกวนสำหรับเครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ที่นำมาใช้แสดงดังภาพ 17 ประกอบด้วย

1. เครื่องจักรสำหรับการเจาะ สามารถขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลบนล้อสายพานดินตะขาบ มีหัวเจาะแบบโรตารี (rotary) ซึ่งหมุนไปพร้อม ๆ กับก้านเจาะ หัวเจาะจะมีรูหัวฉีด (nozzles) น้ำปูนด้วยแรงดันตลอดเวลา ในขณะที่เดียวกันที่หัวเจาะและก้านเจาะ หมุนกวนผสมดินกับซีเมนต์เข้าด้วยกันตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ตัวอย่างในสนาม

2. ชุดอุปกรณ์ผสมน้ำปูน จะต้องมีส่วนผสมที่จะผสมและเก็บน้ำปูนปริมาณเพียงพอที่จะส่งให้เครื่องเจาะ มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติตั้งแต่การผสม กักเก็บน้ำปูน และอัดฉีด

3. ปัมแรงดันสูงสำหรับอัดฉีดน้ำปูน มีสมรรถนะในการอัดฉีดน้ำปูนด้วยแรงดันตั้งแต่ 50 ถึง 400 บาร์ อัตราการฉีดสูงสุด 236 ลิตร/นาที

#### 4. ข้อกำหนดการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์

1. ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของคลองระบายน้ำและถนน ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 1.30 สำหรับช่วงเวลาระหว่างการก่อสร้าง และไม่ต่ำกว่า 1.50 สำหรับช่วงเวลาหลังจากการก่อสร้างตามการใช้งานในสภาพปกติ

2. น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนดินเดิมบริเวณคันคลอง ประกอบด้วยน้ำหนักดินถมคันถนนและน้ำหนักยกยานที่วิ่งบนถนนโดยพิจารณาว่าน้ำหนักบรรทุกจากยกยานสัญจรบนผิวถนนในสภาพใช้งานหลังก่อสร้างแล้วเสร็จมีค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 1,000 กิโลกรัม/ตารางเมตร และสำหรับกรณีระหว่างก่อสร้างน้ำหนักจรเฉลี่ยจากเครื่องจักรให้คิดไม่น้อยกว่า 2,000 กิโลกรัม/ตารางเมตร ในพื้นที่บริเวณที่เครื่องจักรทำงาน

3. ในการออกแบบ ให้ความสำคัญการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาว (20 ปี) ไม่เกิน 0.30 ม. และตัวเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ (soil cement column) สามารถรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งได้โดยมีอัตราส่วนความปลอดภัยไม่ต่ำกว่า 1.50

4. ในการทดสอบภาคสนามเพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรของดินที่เหมาะสมที่จะใช้ทำเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งจะต้องไม่ต่ำกว่า 220 กก./ลบ.ม. จะต้องทำแปลงทดลองก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ในบริเวณสถานที่ก่อสร้างจริง ทั้งนี้อาจใช้ผลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมาเป็นจุดเริ่มต้นในการทดลองก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ในสนาม วิธีการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เหมาะสมกับสภาพในสนามนี้ขึ้นมาโดยเฉพาะ รวมทั้งต้องทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงของพื้นผิวคอนกรีต (pull out test) เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอ





เครื่องจักรสำหรับเจาะ



ไซโลปูนซีเมนต์



ปั๊มแรงดันสูง



อุปกรณ์ผสมน้ำปูน

ภาพ 17 ภาพถ่ายแสดงรายละเอียดเครื่องจักรและเครื่องมือ วิธีเครื่องผสมแรงดันสูง

ที่มา: วรากร ไม้เรียง และสมพงศ์ โรจน์กั้งสตาล (2553)

### การหดตัวของดินผสมปูนซีเมนต์

จากการศึกษาในอดีตของ Puppala et al. (2006) พบว่า การหดตัวเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง การรับน้ำหนักที่ผิว และการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม สภาวะการหดตัว

ของดินเหนียวอ่อนจะทำให้เกิดการแตกร้าวในแนวขวางกับโครงสร้างถนน (transverse crack) ซึ่งเริ่มเกิดจากไหล่ทางก่อนแล้วนำไปสู่การแตกร้าวในแนวขนานกับโครงสร้างถนน (longitudinal crack) ในเวลาต่อมา ดังนั้นอิทธิพลของการหดตัวของวัสดุนั้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึง ในด้านวิศวกรรมธรณีแทบจะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวไปไม่ได้ เพราะการแตกร้าวยังส่งผลกระทบต่อการใช้งานของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ รวมไปถึงค่ากำลังรับแรงเฉือน ค่ากำลังรับแรงอัด และเสถียรภาพของดิน ทั้งนี้ในปัจจุบันเชื่อกันว่าการลดการหดตัวนั้นต้องป้องกันการระเหยออกของน้ำอย่างมิดชิด หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของดินนั้นเสียก่อน

การแตกร้าวจากการหดตัว เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในมวลดิน เมื่อปริมาณน้ำในช่องว่างลดลงจะทำให้เกิดความเค้นดึงระหว่างอนุภาคของดินเหนียว และก่อให้เกิดแรงภายในที่สูงขึ้น จนกระทั่งสูงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคของดินเหนียวแยกตัวออกจากกันจนเกิดการแตกร้าว จากนั้นอนุภาคของดินจะปรับสภาพเข้าสู่ปกติโดยการเปลี่ยนแปลงช่องว่างระหว่างอนุภาค และเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคยังสามารถต้านทานแรงดึงจากการหดตัวได้ การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้เกิดจากสภาวะที่ภายนอกที่มากกระทำซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยการเกิดนั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอนุภาค อุณหภูมิ และช่องว่างของของเหลวที่อยู่ระหว่างอนุภาค โดยการแตกร้าวของถนนที่เกิดจากการหดตัวของโครงสร้างชั้นดินทาง (subgrade soil) แสดงดังภาพ 18

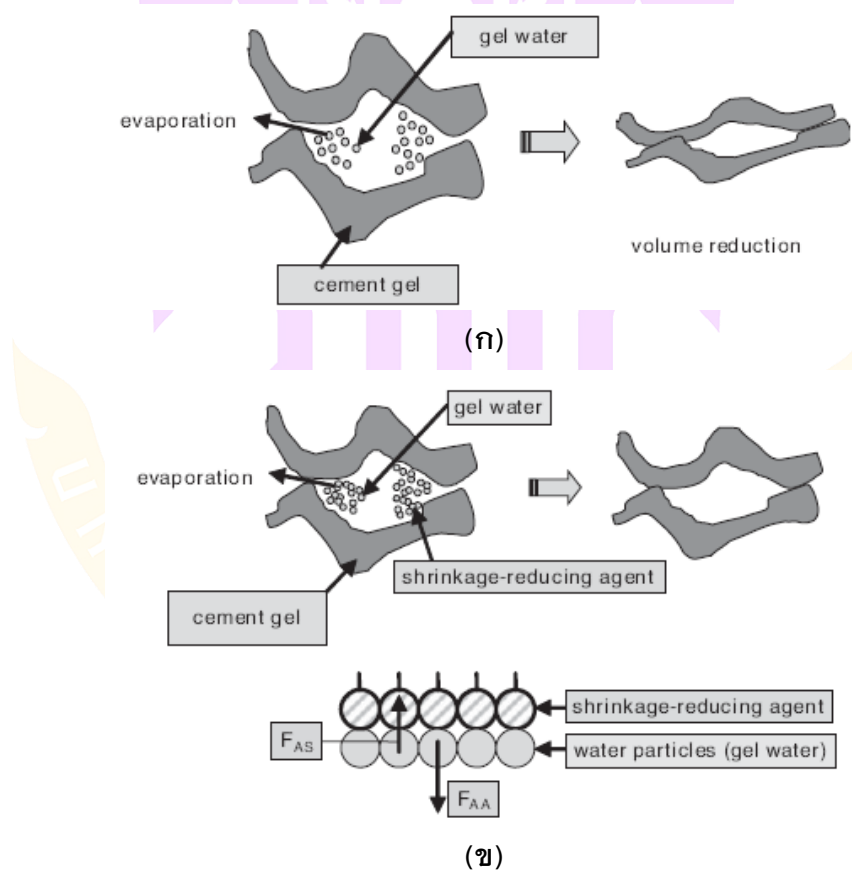


ภาพ 18 การแตกร้าวของถนน

ที่มา: Puppala et al. (2006)

### 1. กลไกการลดการหดตัวของดินผสมปูนซีเมนต์

Cho et al. (2006) ได้อธิบายเกี่ยวกับกลไกการทำงานของตัวนำที่ลดการหดตัว (shrinkage-reducing agent) ซึ่งเป็นตัวออกฤทธิ์แบบพื้นผิวไม่มีประจุ (nonionic surface) สามารถลดแรงดึงผิวของน้ำในโพรงแคพิลลารี (capillary pores) ซึ่งโพรงแคพิลลารีเกิดขึ้นระหว่างชั้นของซีเมนต์เจล (cement gel) กับน้ำส่วนเกิน เมื่อตัวนำดังกล่าวถูกเพิ่มลงในซีเมนต์เจล ทำให้เกิดการดูดอนุภาคความชื้นตามพื้นผิวของอนุภาคน้ำเจล (gel water) และสร้างแรง  $F_{AS}$  เพื่อดึงดูดอนุภาคพื้นผิวของน้ำไปยังตัวนำที่ลดการหดตัว แรง  $F_{AA}$  ที่เป็นแรงดึงน้ำออกจากโพรงแคพิลลารีจะลดลง ส่งผลโดยรวมทำให้แรงดึงผิวลดลงเมื่อการระเหยของน้ำส่วนเกินสิ้นสุดจึงทำให้การหดตัวลดลง ดังแสดงในภาพ 19 โดยในงานวิจัยนี้ตัวนำที่ลดการหดตัวคือ ถั่วลอย



ภาพ 19 กลไกของตัวนำที่ลดการหดตัว (ก) แบบไม่มีตัวนำที่ลดการหดตัว (ข) แบบที่มีตัวนำที่ลดการหดตัว

ที่มา: Cho et al. (2006)

## 2. การประมาณการหัตถ์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพดิจิทัล

Katha et al (2002) จาก The University of Texas at Arlington ได้ทำการตรวจวัดการหัตถ์ของกลุ่มตัวอย่างดินโดยทำการถ่ายภาพตัวอย่างซึ่งอยู่ในแบบหล่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กแล้วทำการตัดภาพให้เหลือเพียงแค่ขนาดแบบหล่อที่เป็นขนาดเริ่มต้นของตัวอย่างดังแสดงในภาพ 20 โดยรูปตัวอย่างจะถูกดำเนินการโดยโปรแกรม scion image software แล้วทำการหาค่าพิกเซลเริ่มต้นของภาพที่ถูกตัดแต่งขอบเรียบร้อยแล้ว จากนั้นก็ทำการหาค่าพิกเซลของรอยแตกและรอยการหัตถ์ต่างๆของตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการหาค่าการหัตถ์ได้โดยการหาค่าอัตราระหว่างพิกเซลรอยแตกและรอยการหัตถ์ต่างๆ และพิกเซลเริ่มต้น

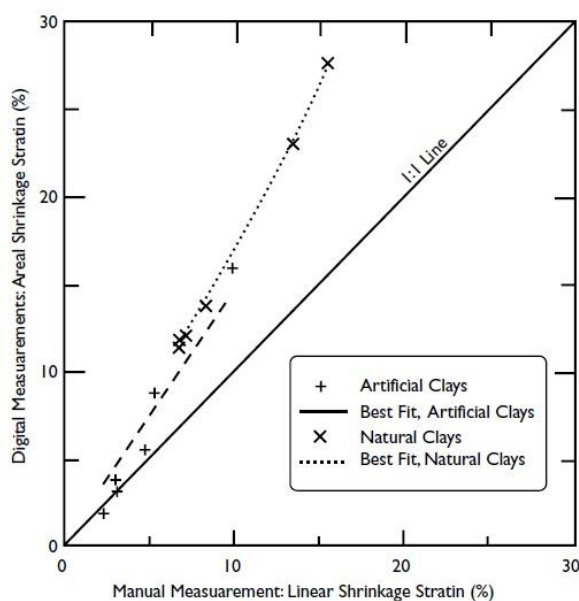


ภาพ 20 ภาพถ่ายดินตัวอย่างที่ถูกตัดแต่งขอบ

ที่มา: Katha et al. (2002)

โดย Katha ได้ทำการทดสอบดินทั้งหมด 4 ชนิด โดย 2 ชนิดแรก เป็นดินเหนียวที่ถูกสร้างขึ้นมา (Artificial soil) และอีก 2 ชนิดที่เหลือ เป็นดินเหนียวธรรมชาติ (natural soil) และได้ทำการทดสอบเทียบกันระหว่างการใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (vernier calipers) เป็นการวัดแบบแมนนวล (manual measurement) และเทคนิคภาพดิจิทัล (digital image technique) เปรียบเทียบกัน โดยผลการสอบเทียบแสดงในภาพ 21

จากผลดังกล่าวพบว่าเกิดความแตกต่างระหว่างการวัดโดยวิธีการวัดแบบแมนนวล (manual measurement) ที่เป็นการวัดแบบ 1 มิติ และเทคนิคภาพดิจิทัล (digital image technique) ที่เป็นการวัดแบบ 2 มิติ โดยมีความแตกต่างกันประมาณ 3 ถึง 12% และให้เหตุผลถึงข้อแตกต่างว่า ค่าความต่างนี้อาจเกิดจากความผิดพลาดในการวัดและชนิดของการทดสอบ (เป็นการวัด 1 มิติ กับ 2 มิติ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการทดสอบที่มีชนิดต่างกัน)



ภาพ 21 ค่าจากทดสอบการหดตัว โดยวิธี manual measurement และ digital image technique

ที่มา: Katha et al. (2002)

Tang et al. (2008) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางเรขาคณิตของรอยแตกที่หดตัวบนพื้นผิวของดินเหนียว โดยการทดสอบการหดตัวใช้วิธีภาพถ่าย (image processing) โปรแกรม Pore and Crack Analysis System (PCAS) ในการวิเคราะห์ลักษณะรอยแตก งานวิจัยนี้ทำการทดสอบการหดตัวที่สภาวะเปียกสลับแห้ง โดยการเตรียมตัวอย่างนำตัวอย่างที่ผสมเสร็จหล่อใส่ในแผ่นแก้วที่มีขนาด 16 x 16 cm มีความหนาของตัวอย่างอยู่ 3 อย่าง คือ 5, 8 และ 11 mm แล้วนำไปอบแห้งที่ 3 อุณหภูมิคือ 30, 40 และ 50 °C สำหรับการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่าย ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งด้วยการทำให้เปียก และนำไปอบแห้งซึ่งจะทำซ้ำวนเป็นรอบ เริ่มจากการเตรียมตัวอย่าง 3 ตัวอย่างมาผสมกับน้ำจนอิ่มตัว (ปริมาณน้ำ 90%) และจากนั้นนำไปอบแห้ง นี่คือการทำให้เปียกสลับแห้งรอบแรก จากนั้นการทำให้เปียกที่รอบสองเริ่มต้นโดยการเติมน้ำที่ลงในแผ่นแก้ว โดยให้ดินและน้ำปรับสมดุล 48 ชั่วโมง ในกระบวนการนี้ จะมีปริมาณน้ำที่เพียงพอเพื่อให้ดินเกิดความอิ่มตัวด้วยน้ำเต็มที่ แผ่นกระจกถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของความชื้น เมื่อการทำให้เปียกเสร็จสมบูรณ์

จะนำตัวอย่างดินไปอบแห้งอีกครั้ง โดยสภาวะการทำให้เปียกและการอบแห้งรอบที่สามทำ คล้ายกับรอบที่สอง

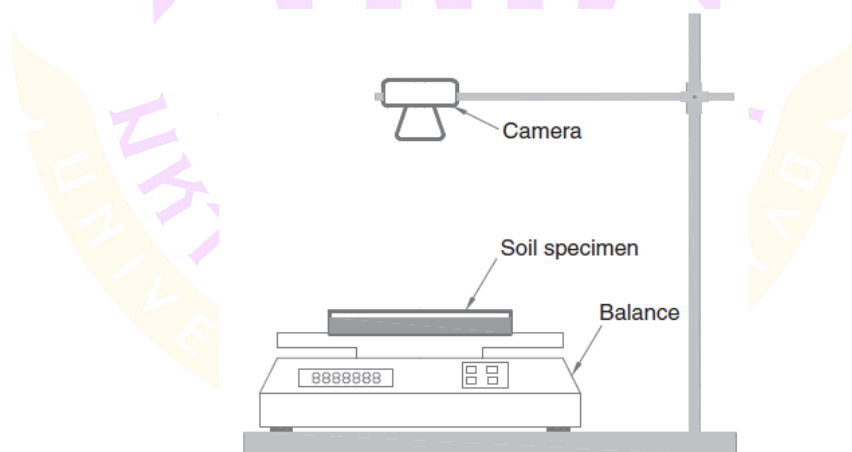
Tang et al. (2012) ได้ทำการศึกษาลักษณะการแตกร้าวแบบผิ่งแห่งของดินเหนียวผสมเส้นใยโพรพิลีน โดยการทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย (image processing) ซึ่งการเตรียมตัวอย่างของดินเหนียวผสมเส้นใย เริ่มจากนำตัวอย่างที่ผสมเสร็จหล่อใส่ในแผ่นแก้วที่มีขนาด 16 x 16 cm มีความหนาของตัวอย่าง 8 mm แล้วนำไปอบแห้งจากนั้นนำตัวอย่างไปถ่ายภาพกับกล้องที่ถูกติดตั้งอุปกรณ์ไวด้งภาพ 22 แล้วนำภาพถ่ายนำไปเข้าโปรแกรม PCAS ที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ซึ่งสามารถวิเคราะห์รอยแตกจากการหดตัวโดยเฉพาะ ดังภาพ 23

โดยการประมวลผลภาพถ่ายด้วยโปรแกรม PCAS ถูกใช้ในเชิงปริมาณ การอธิบายลักษณะรูปแบบรอยแตก มีขั้นตอนดังนี้

1. ภาพถ่ายสีที่ถูกแปลงเป็นภาพระดับสีเทา (ภาพ 24ก)
2. ภาพระดับสีเทาถูกแปลงเป็นไบนารีดำ (binary black) และภาพสีขาว (ภาพ 24ข)

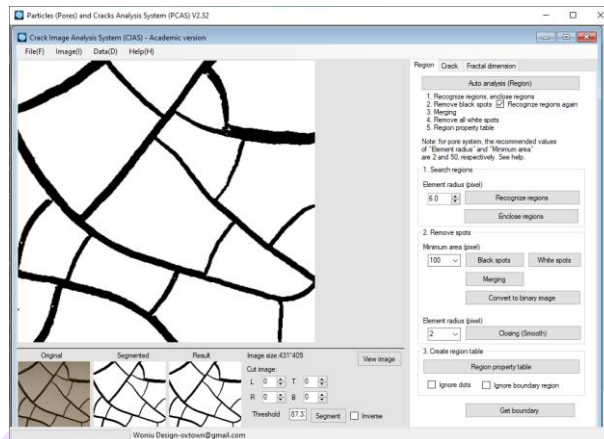
โดยใช้ binarisation ในรูปที่ ภาพ 24ข พื้นที่สีดำแสดงถึงเส้นรอยแตก และพื้นที่สีขาวแสดงถึงก้อนดิน

3. ภาพไบนารีถูกแปลงเป็นภาพที่มีแค่เส้นโครง (skeleton) (ภาพ 24ค) โดย Skeletonization

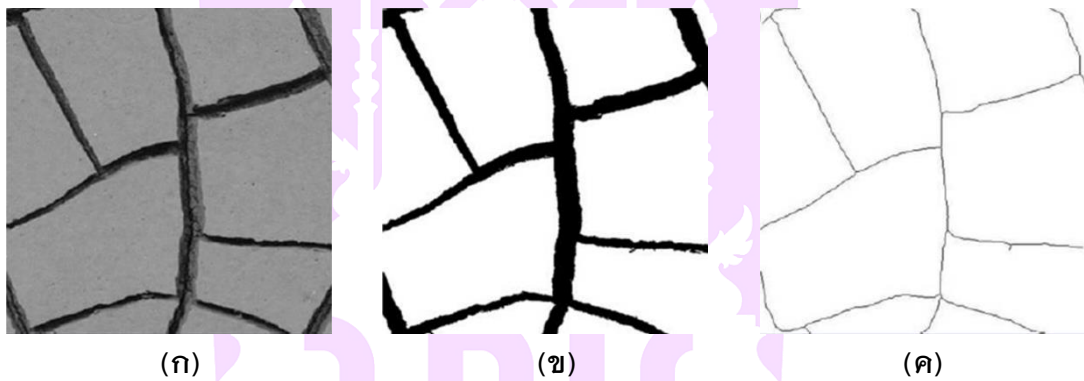


ภาพ 22 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่าย

ที่มา: Tang et al. (2012)



ภาพ 23 โปรแกรม Particles and Cracks Analysis System (PCAS)



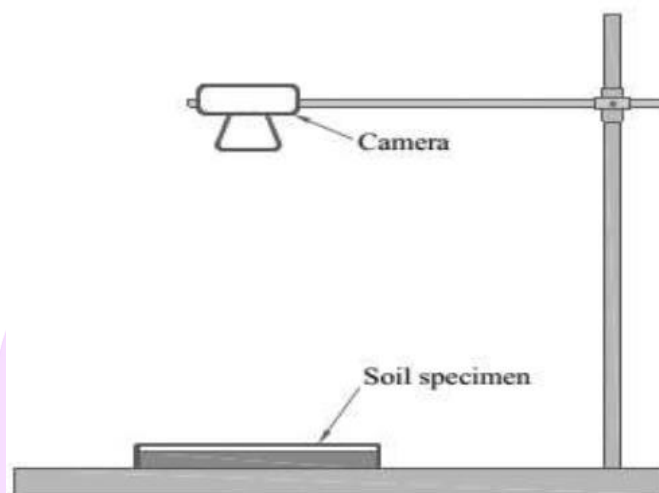
ภาพ 24 ขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายในโปรแกรม PCAS (ก) ภาพถูกแปลงเป็นสีเทา (ข) ภาพถูกแปลงเป็นภาพไบนารี (ค) ภาพถูกแปลงเป็นภาพเส้นโครง

ที่มา: Tang et al. (2012)

ผลลัพธ์จากโปรแกรม PCAS จะได้อัตราในเชิงสถิติประกอบไปด้วยจำนวนรอยแตก ความยาวรอยแตก ความกว้างรอยแตก และพื้นที่รอยแตก โดยนำค่าเหล่านี้มาคำนวณหาความยาวรอยแตกเฉลี่ย ความกว้างรอยแตกเฉลี่ย พื้นที่รอยแตกเฉลี่ย ค่าความเข้มรอยแตก (CIF) หรือ อัตราส่วนพื้นผิวรอยแตก ( $R_{sc}$ ) และ ฟังก์ชันความหนาแน่นที่น่าจะเป็น (PDF)

Abd El-Halim (2017) ได้ศึกษาคัดแยกภาพของซันอ้อยเพื่อลดรอยแตกของดินเหนียว โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่าย งานวิจัยนี้นำตัวอย่างดินเหนียวมาผสมซันอ้อยที่ถูกปั่นแล้วเทในถาดพลาสติกขนาด  $100 \times 100$  mm มีความหนา 20 mm จากนั้นวางตัวอย่างในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิ  $28 \pm 2^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 25 วัน เพื่อให้กระบวนการคายน้ำเสร็จสมบูรณ์

แล้วนำตัวอย่างมาทำการถ่ายภาพ โดยใช้กล้องดิจิตอลที่ถูกติดตั้งไว้ ดังภาพ 25 เพื่อทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่าย โดยใช้โปรแกรมการประมวลผลภาพคือ Image J 1.47 ดังภาพ 26

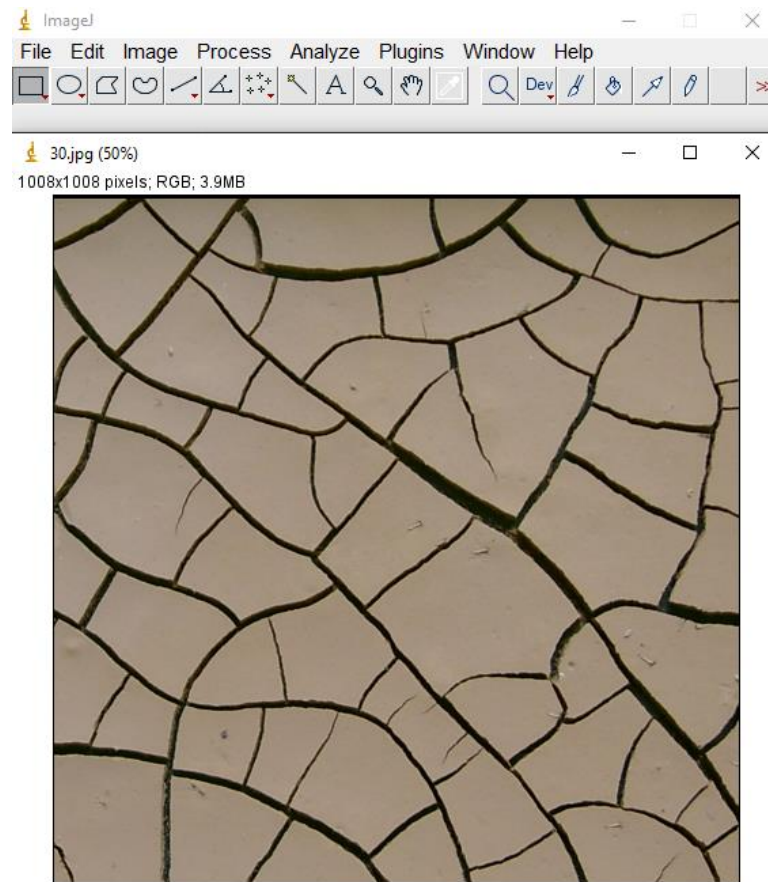


ภาพ 25 การติดตั้งกล้องถ่ายภาพตัวอย่างดิน

ที่มา: Abd El-Halim (2017)

การประมวลผลภาพและการแยกลักษณะการแตกร้าวเพื่อให้ได้ลักษณะรอยแตกหลังจากการทำให้แห้ง โดยกล้องดิจิตอลถูกติดตั้งบนตัวอย่างคงที่ ซึ่งเลนส์ของกล้องดิจิตอลหันลงในแนวตั้ง และสูงกว่าตัวอย่าง 1 เมตร ส่วนชั้นวางตัวอย่างมีพื้นที่ขนาด 100x100 mm โดยเลนส์กล้องอยู่ตรงกลางของตัวอย่าง ตัวอย่างดินที่มีรอยแตกของแต่ละตัวอย่างที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพจะถูกนำมาถ่ายภาพเพื่อให้ได้ภาพถ่ายดิจิตอลที่จะนำไปแยกแยะลักษณะทางเรขาคณิตของรูปแบบรอยแตกโดยเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิตอลถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้มาจากการอธิบายโดย Ren et al. (2015) ขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพถ่ายในโปรแกรม Image J 1.47 มีดังนี้

1. ภาพถ่ายสีของแต่ละตัวอย่างจะได้รับปรับภาพเป็นรูปทรงเรขาคณิตโดยใช้วิธีพหุนาม ซึ่งใช้เครื่องมือหลัก "Analysis" จากนั้นคำสั่ง "Set Scale" แล้วทำการครอบตัดภาพถ่ายเลือกใช้ภาพที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วเครื่องมือหลัก "Image" ตามด้วยคำสั่ง "Crop" (ภาพ 27(ก))



ภาพ 26 โปรแกรม ImageJ 1.47

2. ภาพถ่ายสีของของแต่ละตัวอย่างที่มีรอยแตกจะถูกเปลี่ยนเป็นภาพระดับสีเทา โดยใช้เครื่องมือหลัก “Image” จากนั้นใช้คำสั่ง “Type” ตามด้วยคำสั่งย่อย “8-bit” (ภาพ 27(ข))

3. ภาพโทนสีเทาจะนำไปใช้แบ่งเกณฑ์เป็นสองระดับสีคือ สีดำและสีขาว (black and white threshold) โดยใช้เครื่องมือหลัก “Image” จากนั้นใช้คำสั่ง “Adjust” ตามด้วยคำสั่งย่อย “threshold” (ภาพ 27(ค)) จากนั้นใช้คำสั่ง inversed โดยไปที่เครื่องมือหลัก “Edit” จากนั้นใช้คำสั่ง “Invert” (ภาพ 27(ง)) ซึ่งรูปแบบการแตกร้าวของแต่ละตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็นมวลรวม (พื้นที่สีดำ) และพื้นที่รอยแตก (พื้นที่สีขาว)

4. ทำการกำหนดเกณฑ์ไว้ที่ 50 พิกเซล เพื่อลดจุดขาวเล็ก ๆ โดยใช้เครื่องมือหลัก “Process” จากนั้นใช้คำสั่ง “Noise” ตามด้วยคำสั่งย่อย “Remove Outliers” จะลดจุดที่ถูกพิจารณาว่าเป็นรอยแตกในภาพไบนารีให้ลดลง (ภาพ 27(จ))

5. วิธีการรวมรอยแตกถูกเสนอเพื่อซ่อมแซมรอยแตก ซึ่งถูกนำไปใช้กับภาพไบนารี เพื่อกำจัดพื้นที่รอยแตกแคบซึ่งมีขนาดน้อยกว่า 20 พิกเซลระหว่างรอยแตก โดยใช้เครื่องมือหลัก “Process” จากนั้นใช้คำสั่ง “Noise” ตามด้วยคำสั่งย่อย “Remove Outliers” (ภาพ 27(ฉ)) หลังจากนั้นใช้คำสั่ง “thresholding” ส่วนที่รอยแตกทั้งหมดจะแสดงเป็นพิกเซลสีขาว และดินเป็นพิกเซลสีดำ (ภาพ 27(ฉ)) พื้นที่ผิวของรอยแตก (surface area,  $A_s$ ) ถูกวัดโดยใช้เครื่องมือหลัก “Analysis” จากนั้นใช้คำสั่ง “Measure” ต่อจากนั้น อัตราส่วนพื้นที่ผิวรอยแตก (surface crack ratio,  $R_{sc}$  %) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพื้นที่รอยแตก ( $A_s$ ) ต่อพื้นที่ผิวทั้งหมด (total surface area,  $A_t$ ) ของตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณเส้นโครงรอยแตกที่เปอร์เซ็นต์ชานอ้อยที่เปลี่ยนแปลง และคำนวณโดยสมการที่ 1

$$R_{sc} = \left( \frac{A_s}{A_t} \right) \times 100\% \quad (1)$$

6. หลังจากนั้นอัลกอริทึม Skeletonization ถูกนำมาใช้ โดยใช้เครื่องมือหลัก “Process” จากนั้นใช้คำสั่ง “Binary” ตามด้วยคำสั่งย่อย “Skeletonize” จะพบเป็นเส้นโครงมีความกว้างหนึ่งพิกเซลของรอยแตก และใช้เครื่องมือ “Process” หลัก จากนั้นใช้คำสั่ง “Binary” ตามด้วยคำสั่งย่อย “Dilate” (ภาพ 27(ช))

7. กำหนดเกณฑ์อีก 30 พิกเซล เพื่อลบเส้นเล็ก ๆ ที่มีความยาวน้อยกว่า 30 พิกเซล ซึ่งถือเป็นรอยแตกที่สร้างขึ้นในระหว่าง Skeletonization โดยใช้เครื่องมือหลัก “Process” จากนั้นใช้คำสั่ง “Noise” จะตามมาด้วยคำสั่งย่อย “Remove Outliers” (ภาพ 27(ช))

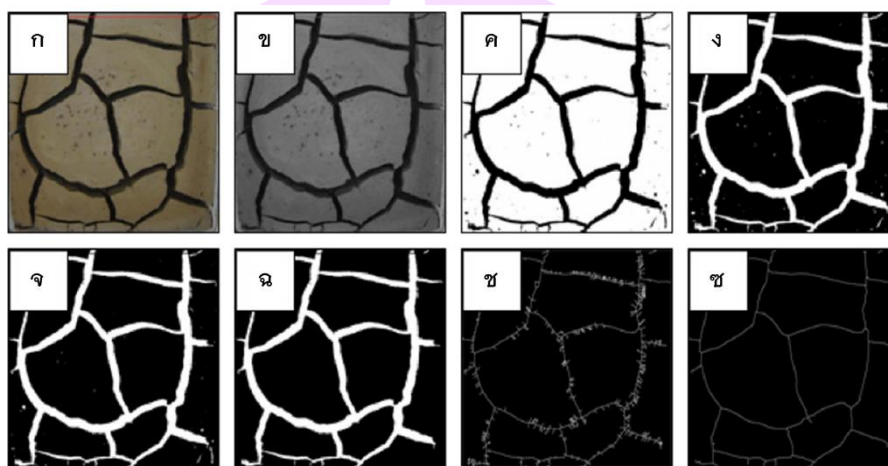
ความยาวรอยแตก (crack length, CL) หาจากการนับพิกเซลตามเส้นโครงของรูปแบบรอยแตกที่เป็นภาพไบนารี (ภาพ 27(ช)) มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกเส้นที่เป็นลวดลายแต่ละรอยแตก โดยการหลีกเลี่ยงเส้นอื่น ๆ ระวังกันโดยใช้การเลือกด้วยมือเปล่า

2. ทำการวัดความยาวของเส้นที่เลือกโดยใช้เครื่องมือหลัก “Edit” จากนั้นใช้คำสั่ง “Selection” และคำสั่งย่อย “Area to Line” ตามด้วยคำสั่ง “Measure” จากแถบเครื่องมือหลัก “Analysis”

3. สุดท้าย ความยาวทั้งหมดของรอยแตก คือผลรวมของความยาวของเส้นรอยแตกทั้งหมดที่ถูกเลือก โดยความกว้างของรอยแตก (crack width, CW) หาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ผิวพื้นที่รอยแตก ( $A_s$ ) และความยาวรอยแตก (CL) ถูกคำนวณโดยตามสมการที่ 2

$$CW (mm) = \left[ \frac{A_s (cm^2)}{CL (cm)} \right] \times 10 \quad (2)$$



ภาพ 27 ผลลัพธ์การประมวลผลภาพถ่ายของรูปแบบรอยแตก

ที่มา: Abd El-Halim (2017)

Mukherjee and Mishra (2019) ได้ศึกษาผลกระทบของการรวมเส้นใยแก้วกับพฤติกรรมเชิงกลของน้ำผสมทราย-เบนโทไนท์ (sand-bentonite, SB) การหาการแตกร้าวแบบผึ่งแห้ง (desiccation cracking) ของส่วนผสมทราย-เบนโทไนท์กับเส้นใยแก้ว เริ่มจากรอยแตกบนพื้นผิวและการหดตัวของตัวอย่างที่ถูกถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลจากความสูงคงที่ 30 ซม. จากตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ภาพถ่ายในโปรแกรม ImageJ 1.51j8 (Java 1.8.0-112, 64 bit) โดย Wilhelm Burger and Mark J. Burge (2016) กล่าวว่า โปรแกรม ImageJ เป็นโปรแกรมสำหรับการศึกษาคูณสมบัติการแตกร้าวของวัสดุเพื่อกำหนดลักษณะการแตกร้าวบนพื้นผิวของรอยแตก จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่ถูกบดอัดที่มีรอยแตกบนพื้นผิวของตัวอย่างจะถูกพิจารณาก่อน แล้วนำไปวิเคราะห์ในโปรแกรม ImageJ ซึ่งภาพถ่ายจะถูกปรับภาพ และแบ่งออกเป็นตารางกริด ซึ่ง 1 กริดเล็ก ๆ เท่ากับ 1 พิกเซล (pixel) จากนั้นภาพถ่ายจะถูกแปลงเป็นภาพไบนารี จนพบรอยแตกของตัวอย่าง โดยการคำนวณพื้นที่ตัวอย่างเริ่มต้น (initial specimen area,  $I_0$ ) พื้นที่ตัวอย่างที่ลดลง (reduced specimen area,  $R_s$ ) พื้นที่รอยแตก

(cracked area,  $A_c$ ) พื้นที่การหดตัว (shrinkage area,  $S_0$ ) และพื้นที่รอยแตกรวม ( $C_{ca} = A_c + S_0$ ) ถูกคำนวณเพื่อให้ได้ปัจจัยความเข้มรอยแตก (cracked intensity factor, CIF) และปัจจัยความหนาแน่นรอยแตก (cracked density factor, CDF) สำหรับการวิเคราะห์การแตกร้าวแบบฝั่งแห้งที่เปลี่ยนแปลงในตัวอย่าง โดยค่า CIF และ CDF สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

$$CIF = \frac{A_c}{R_s} \times 100\% \quad (3)$$

$$CDF = \frac{C_{ca}}{I_a} \times 100\% \quad (4)$$

#### ความคงทน

สัญญาติ เจริญศิลป์ และคณะ (2561) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (wetting and drying) ของดินตะกอนชุดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ด้วยอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ในขั้นตอนของการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D559 โดยการนำตัวอย่างดินที่ครบอายุการบ่มตัว 7 28 และ 60 วัน ไปแช่น้ำ 5 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะเปียก ดังภาพ 28 ต่อมานำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส 42 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะแห้ง จากที่กล่าวมานี้คือ 1 รอบการทดสอบเปียกสลับแห้ง ซึ่งทำการทดสอบทั้งหมด 6 รอบ แล้วนำตัวอย่างเฉพาะรอบที่ 1 3 และ 6 มาทดสอบการสูญเสียกำลังอัดด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดำนกำลังของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

สาธิต ดีเดชา (2548) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และความสามารถในการอัดตัวของน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และเถ้าลอยที่ปริมาณความชื้นสูง จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย (fly ash) และอายุการบ่มตัว แต่ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะลดลงกับปริมาณน้ำในมวลดิน



ภาพ 28 แซ่ตัวอย่างในน้ำ 5 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะเปียก

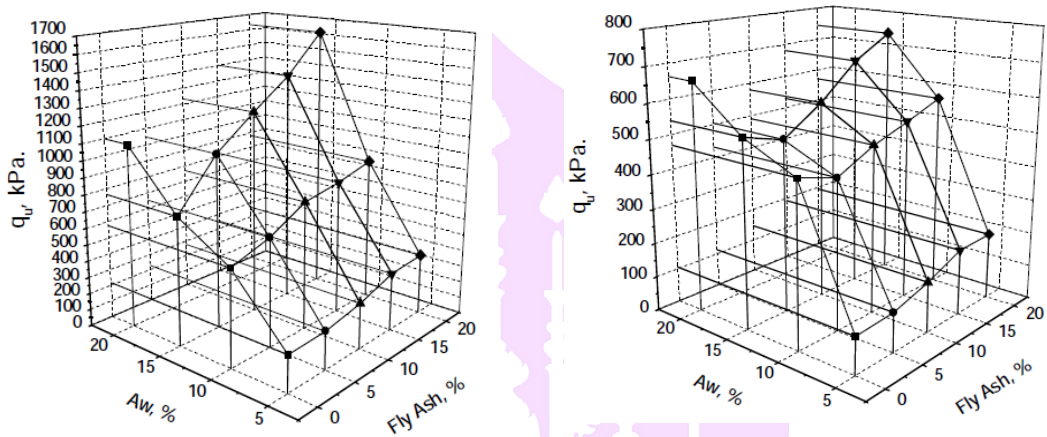
ที่มา: พีรพงษ์ ลิมารัตน์ และคณะ (2561)

ดังภาพ 29 นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณแกลลวยทำให้อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio,  $e$ ) ลดลงอย่างมาก และค่าหน่วยแรงแนวแกน (axial stress) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดินเหนียวกรุงเทพฯที่ผสมปูนซีเมนต์อย่างเดี่ยว และเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมากทำให้อัตราส่วนช่องว่างเพิ่มขึ้นและค่าหน่วยแรงที่จุดครากมีค่าลดลง ดังภาพ 30

ชยานนท์ ศรีเจริญ และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมแกลลวยในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ บริเวณพื้นที่เขตหนองจอก ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวในสนาม ( $q_{u,field}$ ) ของเสาเข็มดินซีเมนต์ ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อแกลลวย (C/FA) เท่ากับ 85/15 อัตราส่วนน้ำในมวลดินต่อวัสดุผสม ( $w_c/B$ ) เท่ากับ 1 และ 4 มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $q_{u,field}$  ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ไม่มีแกลลวย C/FA เท่ากับ 100/0 ซึ่งมี  $w_c/B$  เท่ากับ 1 และ 4 ซึ่งการใช้แกลลวยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 15 สามารถลดค่าใช้จ่ายปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 12.75 นอกจากนี้ได้ทำนายกำลังของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และแกลลวย ดังสมการที่ 5

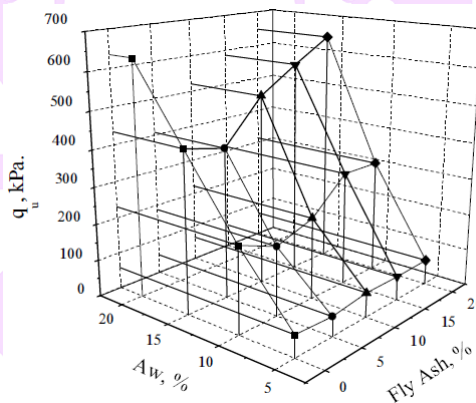
$$\frac{q_D}{q_{28}} = 0.354 \ln D - 0.232 \quad (5)$$

เมื่อ  $q_D$  คือกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม D วัน  $q_{28}$  คือกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วัน และ D คืออายุการบ่ม ที่มีค่าใกล้เคียงกันกับสมการความสัมพันธ์ที่นำเสนอโดย Horpibulsuk et al. (2009) และ Horpibulsuk et al. (2003) ดังภาพ 31



(ก) ปริมาณน้ำ 130 เปอร์เซ็นต์

(ข) ปริมาณน้ำ 130 เปอร์เซ็นต์

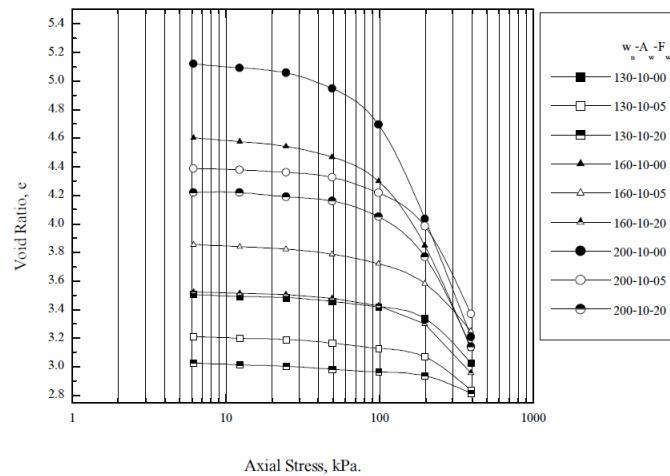


(ค) ปริมาณน้ำ 200 เปอร์เซ็นต์

ภาพ 29 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_u$   $A_w$  และเถ้าลอยที่อายุการบ่มตัว 28 วัน

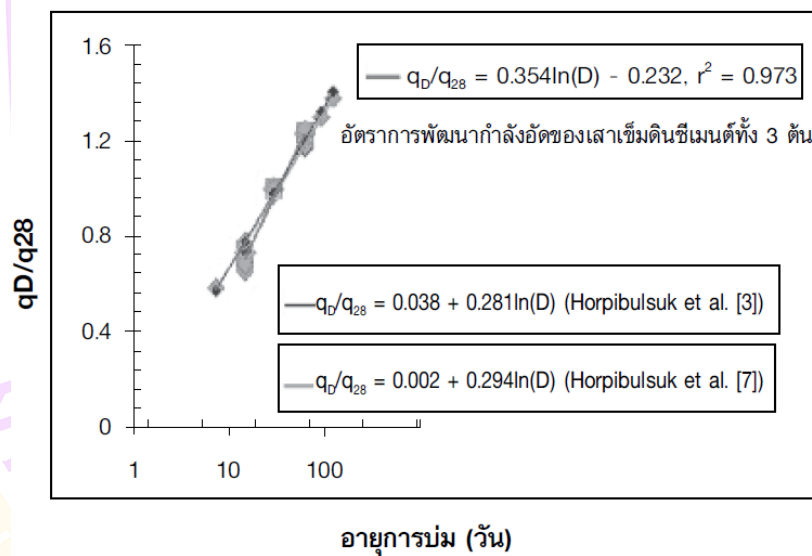
ที่มา: สาทิต ดีเดชา (2548)

Srichan (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยทำการทดสอบแบบสถิตและแบบแรงกระทำซ้ำ เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมด้านกำลัง จากผลการทดสอบพบว่า ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นทำให้ค่าดัชนีพลาสติก (PI) ของดินเหนียวลดลง เพราะคุณลักษณะการแข็งตัวของเถ้าลอย ดังภาพ



ภาพ 30 ความสัมพันธ์ระหว่าง void ratio (e) กับ axial stress

ที่มา: สาทิต ดีเดชา (2548)

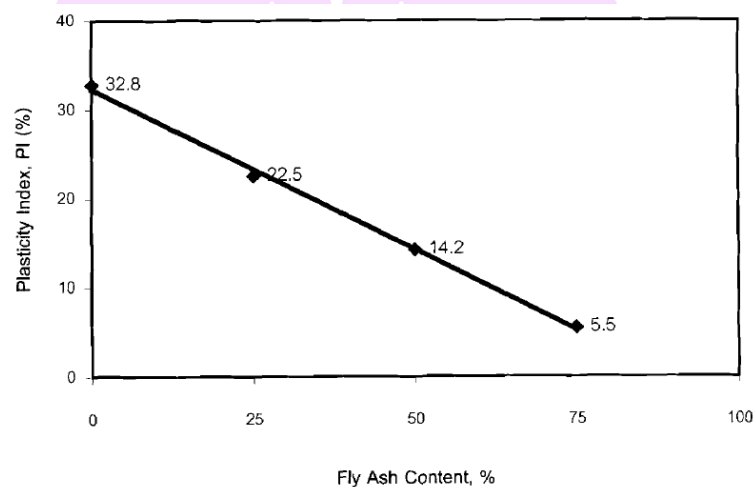


ภาพ 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_D/q_{28}$  กับอายุการบ่มตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมถั่วลอ่ย เทียบกับสมการของ Horpibulsuk et al. (2009) และ (2003)

ที่มา: ชยานนท์ ศรีเจริญ (2557)

นอกจากนี้ผลการทดสอบการให้แรงกระทำซ้ำพบว่า ความเครียดแนวแกน (axial strain) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดของแรงกระทำซ้ำ และจำนวนรอบที่กระทำซ้ำ (number of cycle, N) ดังภาพ 33 รวมไปถึงการเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ส่วนค่าการยุบตัวลดลง

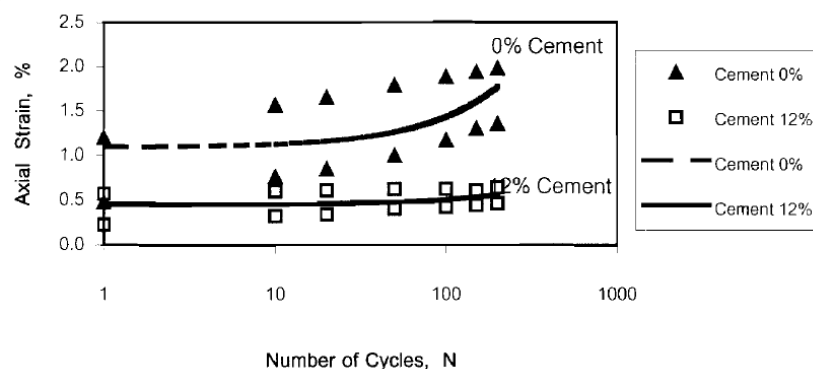
นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังมีการนำเถ้าลอยมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ โดย Horphibulsuk et al. (2011) ได้ทำการทดสอบดินที่ผสมซีเมนต์ และเถ้าลอย และทดสอบค่ากำลัง ค่ากำลังของตัวอย่างอายุ 28 วัน ที่ได้แสดงดังภาพ 34 หลังจากนั้น Horphibulsuk et al. ได้ทำการสร้างสมการภายใต้ความสัมพันธ์ของกำลังรวมกันทั่วไป (generalized interrelationship strength) ระยะเวลาการบ่ม และอัตราส่วนน้ำในมวลดินต่อซีเมนต์ (clay to water cement ratio,  $w_c/C$ ) สำหรับทำนายกำลังของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และเถ้าลอย ในห้องปฏิบัติการไว้อีกด้วย (Horphibulsuk et al., 2011) แสดงดังต่อไปนี้



ภาพ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพลาสติกกับเถ้าลอย (Fly ash)

ที่มา: Srirachan (2001)

Clay 75% + Fly Ash 25%



ภาพ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวแกน (axial strain) กับ N ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน

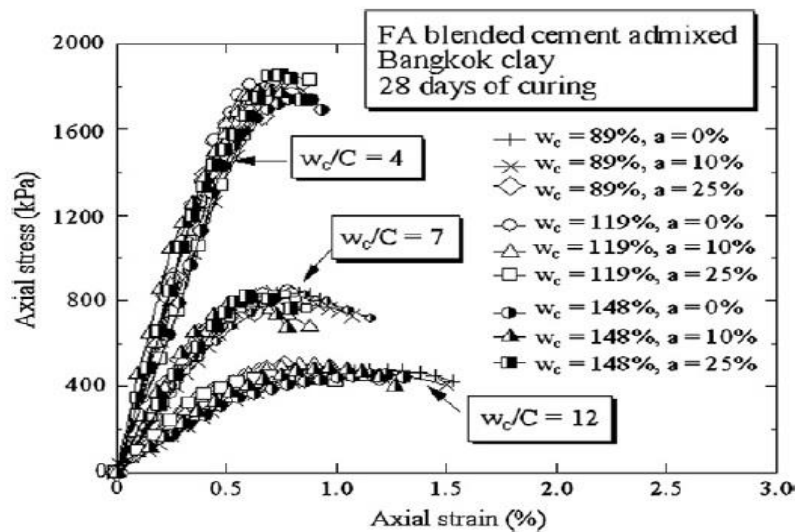
ที่มา: Srirachan (2001)

$$\frac{q_{(w_c/C)_t}}{q_{(w_c/C)_{28}}} = \left[ \frac{(w_c/C)_{28}}{(w_c/C)_t} \right]^{1.27} (0.039 + 0.283 \ln t) \quad (6)$$

เมื่อ

$$C = C_i (1 + 0.75a) \quad (7)$$

โดยที่  $q_{(w_c/C)_t}$  คือ กำลังรับแรงอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ที่ประมาณจาก  $w_c/C$  ณ การบ่มวันที่  $t$   $q_{(w_c/C)_{28}}$  คือ กำลังรับแรงอัดของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์ที่ประมาณจาก  $w_c/C$  ณ การบ่ม 28 วัน  $C_i$  คือ เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์  $a$  คือ เปอร์เซ็นต์เถ้าลอย จากการทดสอบยังพบอีกว่าที่ปริมาณเถ้าลอย 25 เปอร์เซ็นต์จะมีความเหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดอย่างไรก็ตามถ้าจะนำสมการทั้งหมดข้างต้นนี้มาใช้ทำนายพฤติกรรมหรือใช้ในการออกแบบด้านกำลังของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างทางนั้นอาจไม่เพียงพอ ทั้งนี้เพราะดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยยังมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกด้านหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง นั่นก็คือการหดตัว

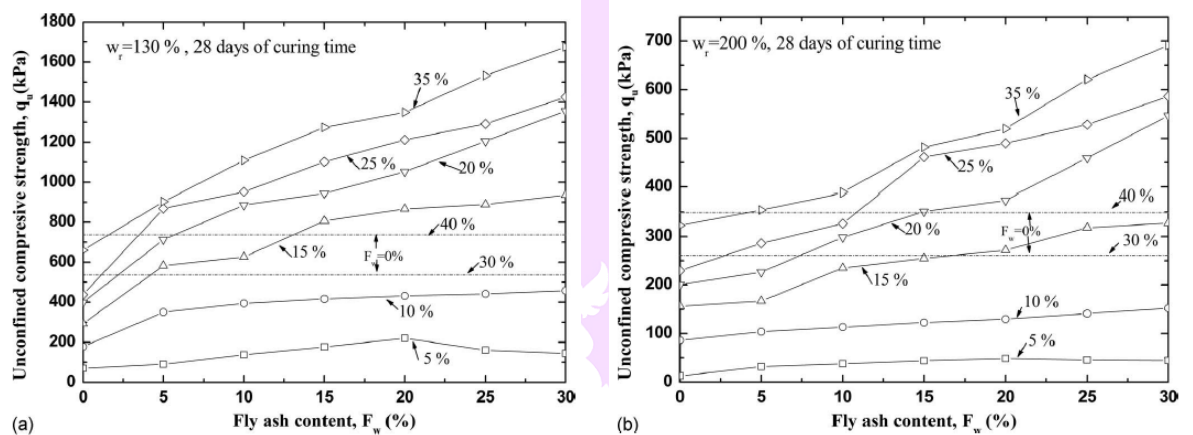


ภาพ 34 ค่ากำลังของตัวอย่างอายุ 28 วัน

ที่มา: Horpibulsuk et al. (2011)

Jongpradist (2011) ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยที่เหลือใช้เพื่อเพิ่มหรือแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการปรับปรุงดินเหนียวกรุงเทพฯโดยใช้เทคนิคของเสาเข็มดินซีเมนต์ จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว ( $q_u$ ) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอย ( $F_w$ ) เพิ่มขึ้น ส่วนปูนซีเมนต์มีมากกว่าหรือเท่ากับ 10% ดังแสดงในภาพ 35

Chompoorat and Likitlersuang (2016) ได้ศึกษาพฤติกรรมการหดตัว และกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของปูนซีเมนต์ และ/หรือเถ้าลอย 2 แหล่งคือ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (fly ash #1) กับเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ SCG (fly ash #2) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวกรุงเทพฯ ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยอยู่ที่ 15% จากโรงแม่เมาะสามารถลดการหดตัวได้มากที่สุดในช่วง 28 วัน ดังภาพ 36



(ก)

(ข)

ภาพ 35 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_u$  กับ  $F_w$  ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) ปริมาณน้ำ 130% (ข) ปริมาณน้ำ 200%

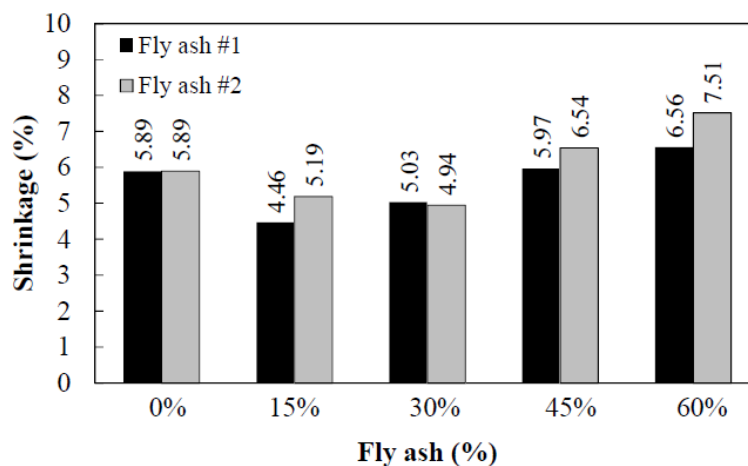
ที่มา: Jongpradist (2011)

นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (UCS) และโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $E_{50}$ ) ค่อย ๆ ลดลงตามการเพิ่มปริมาณของเถ้าลอย เมื่อเปรียบเทียบค่า UCS และ  $E_{50}$  ของ Fly ash #1 กับ Fly ash #2 พบว่า Fly ash #1 ให้ค่า UCS และ  $E_{50}$  ที่สูงกว่า Fly ash #2 เล็กน้อย ดังภาพ 37

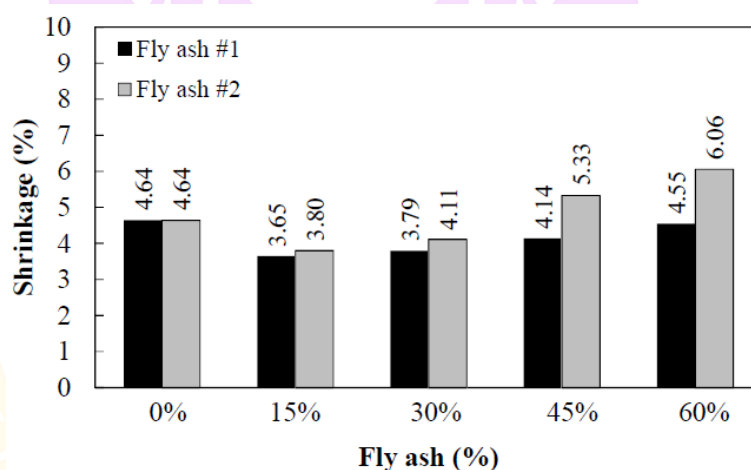
## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของดินเหนียว

Tang et al. (2008) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางเรขาคณิตของรอยแตกหดตัวในดินเหนียว โดยทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่าย แล้วใช้โปรแกรม PCAS ที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เพื่อวิเคราะห์รอยแตกจากการหดตัวโดยเฉพาะ ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งผลการทดสอบความคงทนที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งด้วยการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายพบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นดินอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ

สภาวะความเค้นระหว่างการฝั่งให้แห้งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำและการกระจายพลังงานความร้อน ด้วยการเพิ่มขึ้นในความหนาของชั้นดิน ความยาวรอยแตกเฉลี่ย ความกว้าง พื้นที่มวลรวม



(ก)  $C/w_c = 0.3$

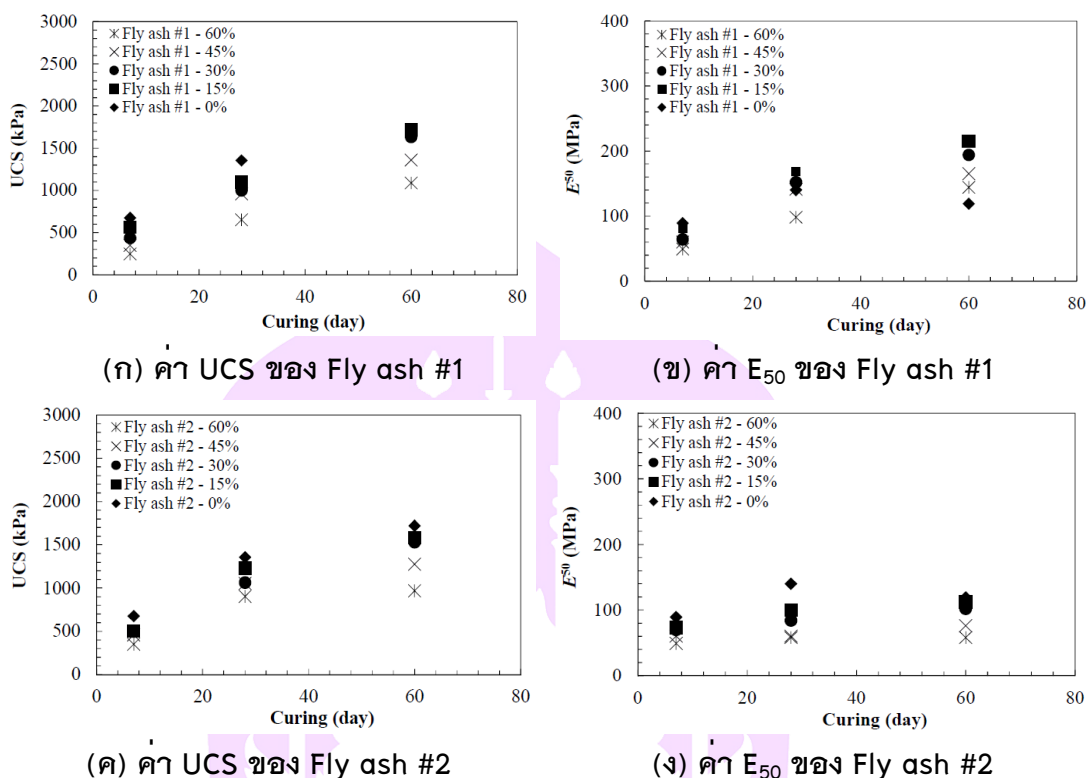


(ข)  $C/w_c = 0.4$

ภาพ 36 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อการหดตัวในการบ่ม 28 วัน

ที่มา: Chompoorat and Likitlersuang (2016)

และ ค่าความชุ่มชื้นรอยแตก (CIF) เมื่อดินถูกทำให้เปียกและการอบแห้งหลายรอบ พื้นผิวของดินจะแตกมากขึ้น รอยแตกกลายเป็นรูขรุขระมากขึ้นและหยาบ ส่วนของรอยแตกสั้นมีความกว้างแคบอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่าความชุ่มชื้นรอยแตก (CIF) ลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของรอบเปียกสลับแห้ง โดยการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่แสดงในตาราง 8



ภาพ 37 ค่า UCS และ  $E_{50}$  ของ Fly ash #1 และ Fly ash #2

ที่มา: Chompoorat and Likitlersuang (2016)

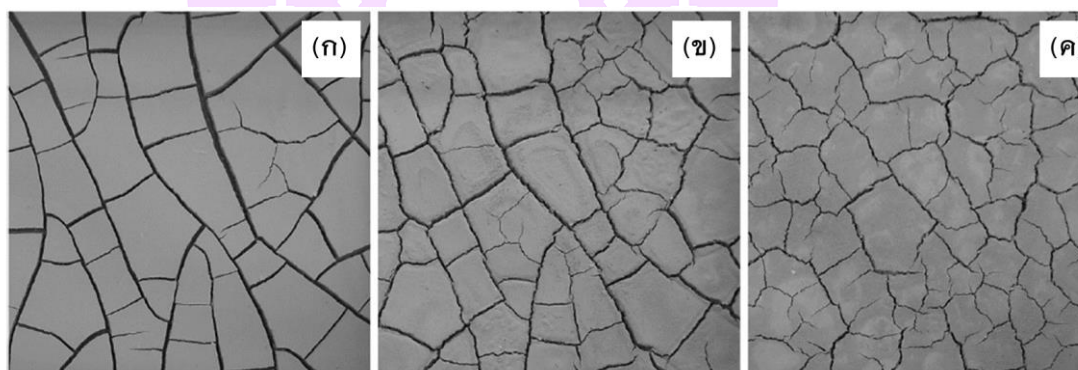
รูปแบบพื้นผิวย่อยแตกหลังจากรอบเปียกสลับแห้งแต่ละรอบ ดังแสดงในภาพ 38 พบว่า รอยแตกที่ตำแหน่งเดียวกันในช่วงเวลาการอบแห้งรอบแรก รอบสอง และรอบสาม ส่วนใหญ่เป็นเพราะพันธะของอนุภาคดินถูกทำลายในช่วงรอบการอบแห้งรอบแรก เมื่อการทำให้เปียก พันธะที่แตกหักอาจตั้งตัวขึ้น และกลายเป็นโซนอ่อนแอพิเศษของดิน การอบแห้งที่ตามมาจะทำให้เกิดการหดตัวอีกครั้ง

การแตกร้าวจะเกิดขึ้นในบริเวณที่อ่อนแอที่สุดของโครงสร้างดินเมื่อเชื่อมโยงกับรอยแตกก่อนหน้า สามารถสังเกตได้จากภาพ 38(ก) รอยแตกกลายเป็นขรุขระมากขึ้นและหายหลังจากผ่านรอบที่สองและสามของรอบเปียกสลับแห้ง รูปแบบรอยแตกในภาพ 38(ข) คล้ายกับที่อยู่ในภาพ 38(ค) นี้ อาจจะทำให้เกิดจากรอบเปียกสลับแห้งหลายรอบมีผลในการลดขอบเขตของความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง

ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์รอยแตกและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างดินหลังจากรอบเปียกสลับแห้งที่รอบต่าง ๆ (Tang et al., 2008)

ลำดับที่	รอบเปียกสลับแห้ง	จำนวนจุดตัด ( $I_n$ )	SD ของ $I_n$	จำนวนของการแบ่งรอยแตก ( $S_n$ )	SD ของ $S_n$	ความยาวของรอยแตกเฉลี่ย ( $l_{ov}$ )	SD ของ $l_{ov}$	ความกว้างของรอยแตกเฉลี่ย ( $w_{ov}$ )	SD ของ $w_{ov}$	พื้นที่ของรอยแตกเฉลี่ย ( $a_{ov}$ )	SD ของ $a_{ov}$	CIF (%)	SD ของ CIF
6	1	90	11.58	152	15.51	91.53	1.20	8.70	0.47	14920	528.77	11.92	0.18
6	2	120	10.28	209	4.73	84.51	1.86	6.41	0.59	13050	244.80	11.15	0.17
6	3	145	3.74	259	3.87	73.60	1.56	5.09	0.17	12787	187.48	9.55	0.13

\*\*\*SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน standard deviation

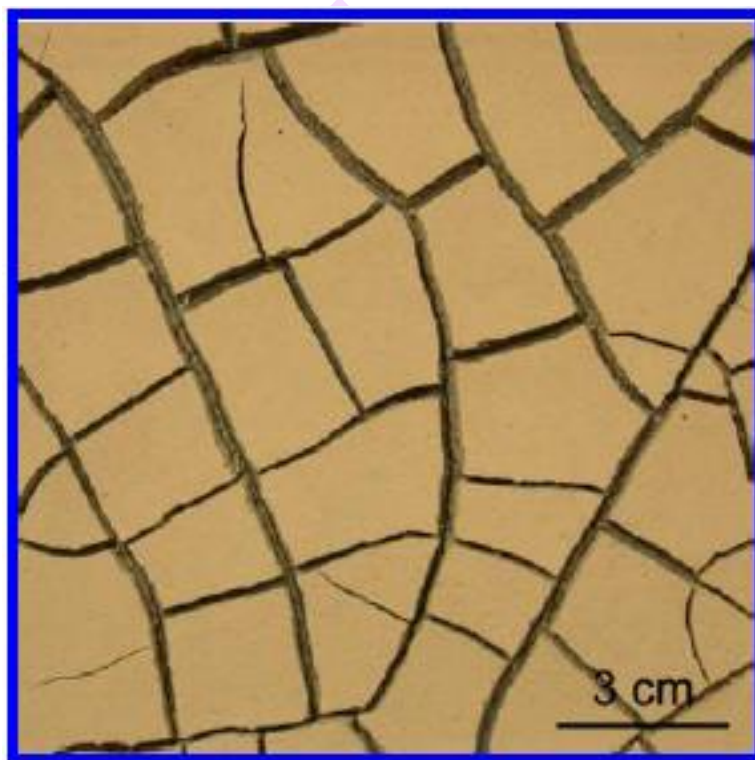


ภาพ 38 รูปแบบพื้นผิวย่อยแตกจากการหดตัวทั่วไปหลังจากรอบเปียกสลับแห้งแต่ละรอบ (ก) หลังจากรอบเปียกสลับแห้งรอบแรก (ข) หลังจากรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 2 และ (ค) หลังจากรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 3

ที่มา: Tang et al. (2008)

Tang et al. (2008) ได้ทำการศึกษาลักษณะการแตกร้าวแบบผิวดินเหนียวผสมเส้นใยโพลีโพรพิลีน (polypropylene fiber) ซึ่งการทดสอบการหดตัวใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่าย ผลการทดสอบพบว่า รูปแบบรอยแตกสุดท้ายของตัวอย่างที่ไม่มีเส้นใยจะมีรอยแตกออกหลาย ๆ ส่วน โดยส่วนรอยแตกที่เกิดขึ้นค่อนข้างตรง เรียบ เป็นเส้นยาวต่อเนื่องกัน รูปร่างของส่วนรอยแตกค่อนข้างเป็นส่วน ๆ และส่วนใหญ่จะเป็นก้อน

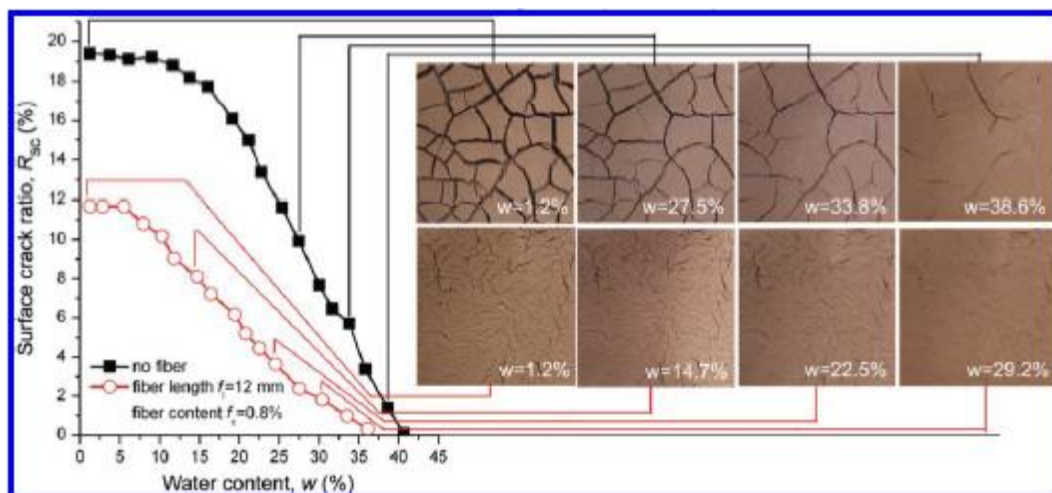
สี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่วนรอยแตกโดยทั่วไปจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน รูปแบบเป็นรูปตัว “T” และ “+” รูปร่างที่ตัดขวาง เส้นโครงรอยแตกพบว่ามีเชื่อมต่อรอยแตกที่ดีมากและสามารถสังเกตเห็นรอยแตกที่ปลายปิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังภาพ 39



ภาพ 39 รูปแบบรอยแตกสุดท้ายทั่วไปของตัวอย่างดินที่ไม่ได้เสริมเส้นใย

ที่มา: Tang et al. (2012)

ส่วนตัวอย่างดินเหนียวที่เสริมด้วยเส้นใย แสดงดังภาพ 40 ผลการวิจัยพบว่า  $R_{sc}$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการแตกร้าว อย่างไรก็ตาม อัตราการการอบแห้งเพิ่มขึ้น  $R_{sc}$  เริ่มลดลงและ  $R_{sc}$  การค่อย ๆ รักษาเสถียรภาพที่ปริมาณน้ำเดียวกัน ค่า  $R_{sc}$  ของตัวอย่างดินธรรมชาติจะสูงกว่าตัวอย่างดินเสริมเส้นใยแสดงให้เห็นว่าการรวมเส้นใยนั้นช่วยเพิ่มความต้านทานการแตกร้าวของดินอย่างมีนัยสำคัญ ข้อสรุปนี้สามารถยืนยันได้โดยรูปแบบรอยแตก เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินธรรมชาติ ตัวอย่างที่เสริมด้วยเส้นใยปรากฏขึ้นได้ละเอียดมากกว่าและรอยแตกที่สั้นกว่า แม้ว่าจะมีรอยแตกจำนวนมากเมื่อแห้ง มีเพียงไม่กี่อันที่ตัดกัน แต่ละอันของรูปแบบก่อนดินที่ใกล้ชิดกัน



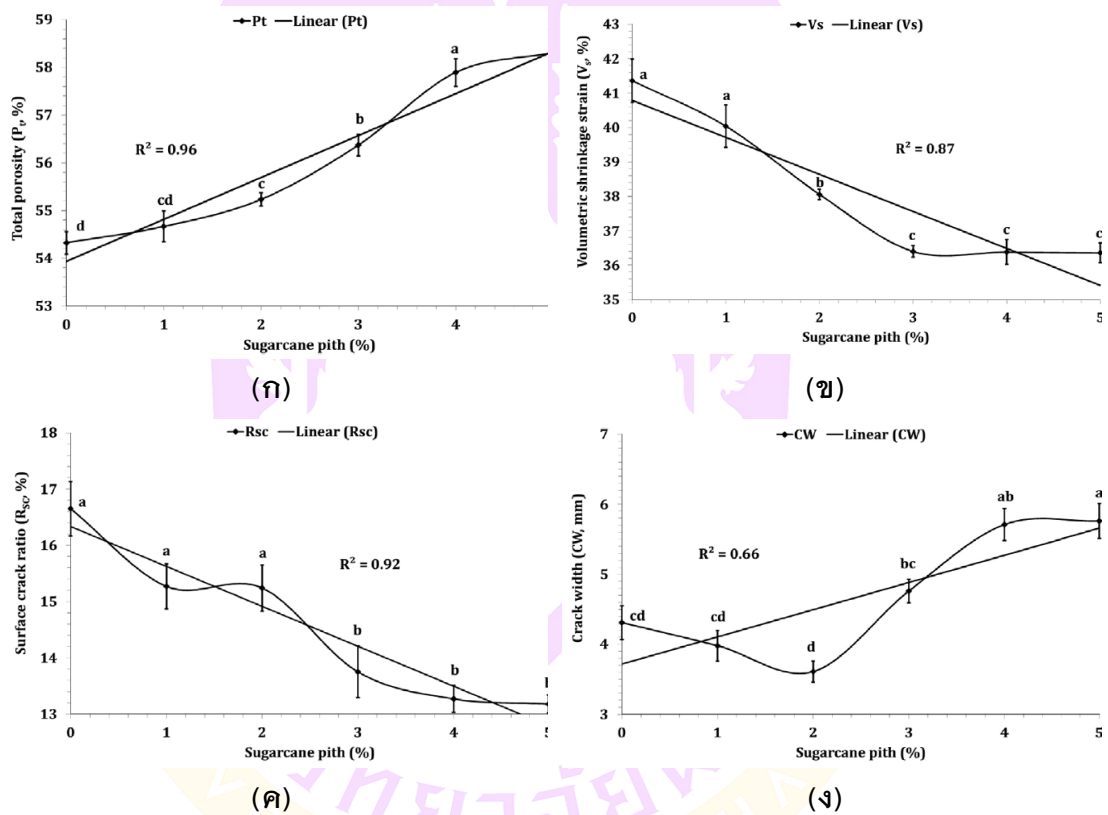
ภาพ 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_{sc}$  กับปริมาณน้ำ ของตัวอย่างดินเหนียวที่เสริมด้วยเส้นใย กับตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้เสริมด้วยเส้นใย

ที่มา: Tang et al (2012)

Abd El-Halim (2017) ได้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดรอยแตกแบบผิวดินเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงโดยซากชานอ้อย (sugarcane pith) ซึ่งใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่าย (Image processing) ในการวิเคราะห์ลักษณะรอยแตก จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณชานอ้อยเพียงเล็กน้อยสามารถเพิ่มความพรุนรวม (total porosity,  $P_t$ ) และปริมาณน้ำกักเก็บที่ความจุในสนาม (water retained at field capacity, FC) ดังภาพ 41(ก) ในขณะที่ความเครียดการหดตัวเชิงปริมาตร (volumetric shrinkage strain,  $V_s$ ) ลดลง ดังภาพ 41(ข) และช่วยลดการเกิดรอยแตกแบบผิวดินจากการเพิ่มปริมาณชานอ้อย 2 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป นอกจากนี้อัตราส่วนพื้นผิวย่อยแตก (surface crack ratio,  $R_{sc}$ ) ลดลงเมื่อปริมาณชานอ้อยมากขึ้น ทำให้การหดตัวในมวลดินลดลงเช่นกัน ดังภาพ 41(ค) ซึ่งตรงกันข้ามกับค่าความกว้างรอยแตก (crack width, CW) ที่เพิ่มขึ้น ดังภาพ 41(ง) ส่วนรูปแบบพื้นผิวของดินที่แตกออกจากกัน ซึ่งสังเกตในภาพ 42 ตัวอย่างดินที่มีปริมาณชานอ้อยเท่ากับ 3 4 และ 5% มีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น และมีรอยแตกมีขรุขระมากกว่าตัวอย่างดินที่มีปริมาณชานอ้อยเท่ากับ 0 1 และ 2% ซึ่งสังเกตเห็นในภาพ 42 ซึ่งรูปแบบรอยแตกสอดคล้องกับผลของค่า  $R_{sc}$  และ CW

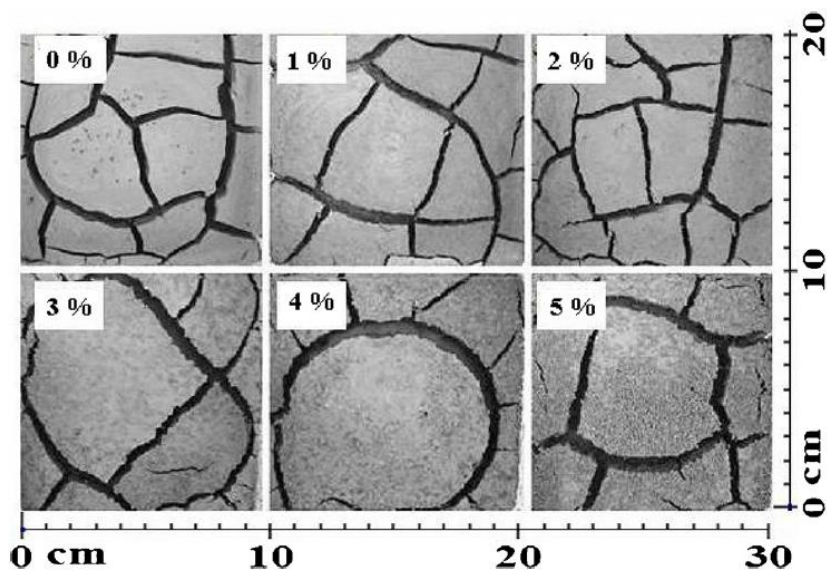
Singh et al. (2018) ได้ศึกษาวิธีการหาจำนวนรอยแตกบนพื้นผิวและการหดตัวที่ปรากฏขึ้นในดินหลังการฝังแห้งภายใต้สภาพอากาศปกติ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ความเป็นพลาสติกของดิน ความหนาของตัวอย่าง และความชื้น

เริ่มต้น จากการศึกษาค้นพบว่าทั้งค่า CDF และ CIF เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มดัชนีพลาสติกของดิน และ ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มความหนาตัวอย่างทำให้ค่า CDF ลดลง เล็กน้อยในขณะที่ CIF เพิ่มขึ้น ผลของเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังตาราง 9 ส่วนความกว้างเฉลี่ย ของรอยแตก (AW) และความยาวรอยแตก (CL) เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความชื้นและความหนาของ ตัวอย่าง ส่วนการอบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอจะสังเกตได้ในตัวอย่างที่ความชื้นเริ่มต้นที่สูงขึ้นหรือ ความหนามาก เนื่องจาก การอบแห้งที่ไม่สม่ำเสมอแม้ว่าจำนวนรอยแตกบนพื้นผิวจะลดลง ความยาวของรอยแตกรวมถึงความกว้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มของรอยแตกเพิ่มขึ้น



- ภาพ 41 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวม ( $P_t$ ) กับปริมาณชานอ้อย  
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดหดตัวเชิงปริมาตร ( $V_s$ ) กับปริมาณชานอ้อย  
 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นผิวรอยแตก ( $R_{sc}$ ) กับปริมาณชานอ้อย  
 (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างรอยแตก (CW) กับปริมาณชานอ้อย

ที่มา: Abd El-Halim (2017)



ภาพ 42 รูปแบบรอยแตกของดินเหนียวผสมชานอ้อย 0 1 2 3 4 และ 5% ตามลำดับ

ที่มา: Abd El-Halim (2017)

ตาราง 9 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ภาพถ่ายที่ตัวอย่างดินที่แตกต่างกัน (Abd El-Halim, 2017)

ตัวอย่างดิน	สถานะ	ความหนาตัวอย่าง 15 ม.ม.				ความหนาตัวอย่าง 50 ม.ม.			
		CDF	CIF	CL (ม.ม.)	AW (ม.ม.)	CDF	CIF	CL (ม.ม.)	AW (ม.ม.)
ดิน 2	LL	63.976	3.833	213.06	0.895	62.861	11.993	440.6	1.525
	PL	25.075	0.541	170.97	0.317	23.697	3.925	383.43	1.079
	OMC	19.026	0	0	0	15.717	0.165	108.03	0.171
ดิน 3	LL	50.476	3.419	137.59	1.691	49.649	6.168	412.72	1.064
	PL	21.045	0	0	0	19.444	0	0	0
	OMC	10.774	0	0	0	7.991	0	0	0
ดิน 4	LL	27.569	0.289	104.46	0.269	27.027	0	0	0
	PL	8.932	0	0	0	8.074	0	0	0
	OMC	2.875	0	0	0	1.790	0	0	0
ดิน 5	LL	8.434	0	0	0	6.949	0	0	0
	PL	0.872	0	0	0	0.368	0	0	0
	OMC	0.308	0	0	0	0.101	0	0	0

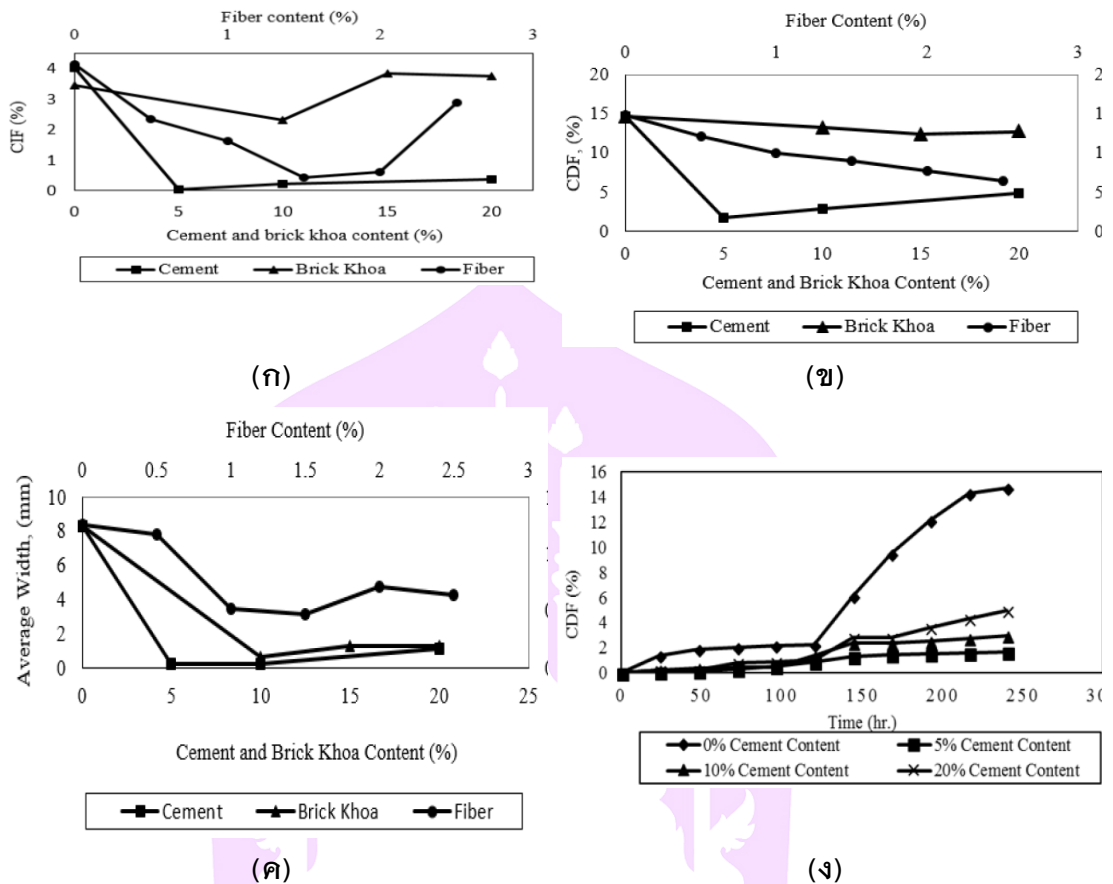
หมายเหตุ LL คือ ชีตจำกัดเหลว, PL คือ ชีตจำกัดพลาสติก และ OMC คือ ปริมาณน้ำในดินที่เหมาะสม

Rafizul and Datta (2018) ได้ศึกษาลักษณะที่ผิดปกติของดินเหนียวเช่น การหดตัว การบวมตัว รอยแตกแบบผิงแห้ง ฯลฯ ซึ่งเป็นปัญหาหลักสำหรับการก่อสร้างแผ่นดินเหนียวประกอบ (composite clay liner, CCL) ในพื้นที่ฝังกลบขยะ โดยนำดินเหนียวมาผสมกับสารเติมแต่งต่าง ๆ เช่น อิฐเคา (Khod) ปูนซีเมนต์ และเส้นใย เพื่อศึกษาลักษณะรอยแตกแบบผิงแห้ง โดยในการประมวลผลภาพถ่าย จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนการแตกร้าวของพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นด้วยการลดปริมาณน้ำในตัวอย่างทำให้การขยายรอยแตกเสถียรที่สุด สำหรับการเตรียม CCL ด้วยดินเหนียวจากสถานที่ฝังกลบที่เลือก ปริมาณสารเติมแต่งที่เหมาะสมคือ 5.5 และ 1.5% สำหรับ อิฐเคา ปูนซีเมนต์และเส้นใยโพลีเมอร์ ตามลำดับ

นอกจากนี้ ช่วงแรกจะพบว่าค่า CIF ลดลงเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของสารเติมแต่งในดินเหนียวสำหรับ ปูนซีเมนต์ อิฐเคา และเส้นใย ในช่วงที่ 2 ดังภาพ 43(ก) ต่อมาค่า CDF เริ่มลดลงเมื่อมีการเติมสารในดินอย่างต่อเนื่อง พฤติกรรมแบบนับพลันของตัวอย่างนี้สามารถอธิบายได้จากผลกระทบรวมของรอยแตกและพื้นที่ที่หดตัว โดยดินเหนียวมีแนวโน้มที่จะหดตัวมากซึ่งค่า CDF ส่วนใหญ่มากขึ้นจากพื้นที่การหดตัว และหลังจากปริมาณเส้นใย 1% พื้นที่รอยแตกเพิ่มขึ้น ดังภาพ 43(ข) ต่อมาการเกิดรอยแตกมีความสม่ำเสมอในอัตราที่ต่ำในช่วง 120 ชั่วโมงแรก แต่หลังจากนั้นอัตราการการก่อตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นจะเร็วกว่าอัตราเริ่มต้น สาเหตุที่เป็นไปได้ใน 120 ชั่วโมงแรกเกิดจากฝน ความชื้นที่อาจเกิดขึ้นแตกต่างกันระหว่างตัวอย่าง พื้นผิวของตัวอย่างมีการพัฒนาที่ช้ามากและมีรอยแตกเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ปรากฏขึ้นที่ผิวดิน พบ CDF สูงสุด 14.7% สำหรับชิ้นงานควบคุมในขณะที่ต่ำสุดพบ 1.69% สำหรับปูนซีเมนต์ 5% ดังภาพ 43(ค) สุดท้ายความกว้างรอยแตกเฉลี่ยลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งในดิน ในสารเติมแต่งเส้นใยพบการเปลี่ยนแปลงอย่างมากที่ปริมาณเส้นใย 1% ในดิน ดังภาพ 43(ง)

### 3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความคงทนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง

ธัชชัย ไหมขันท์ (2560) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของดินตะกอนกวนพะเยาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และถ่านลอย จากผลการทดสอบความคงทนที่สภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่า ปริมาณของปูนซีเมนต์ส่งผลโดยตรงต่อค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของตัวอย่างทดสอบ โดยในตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียจะลดน้อยลง ส่วนปัจจัยของถ่านลอยที่ใส่เข้าไป พบว่าจะมีลักษณะพฤติกรรม คล้ายกับปูนซีเมนต์ โดยเมื่อมีปริมาณ

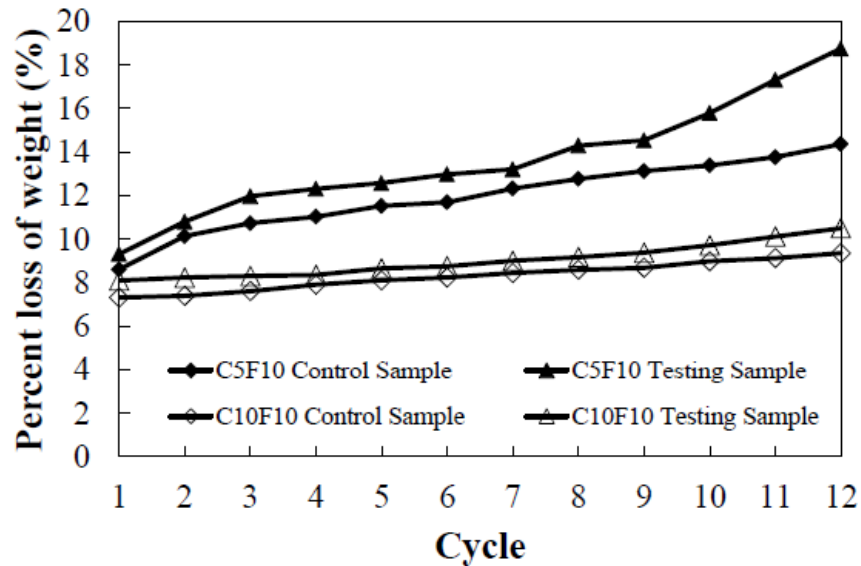


ภาพ 43 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง CIF กับปริมาณปูนซีเมนต์ อิฐเผา และเส้นใย  
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CDF กับปริมาณปูนซีเมนต์ อิฐเผา และเส้นใย  
 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างรอยแตกเฉลี่ยกับปริมาณปูนซีเมนต์ อิฐเผา และเส้นใย (ง) ความสัมพันธ์ระหว่าง CDF กับเวลา ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน

ที่มา: Rafizul and Datta (2018)

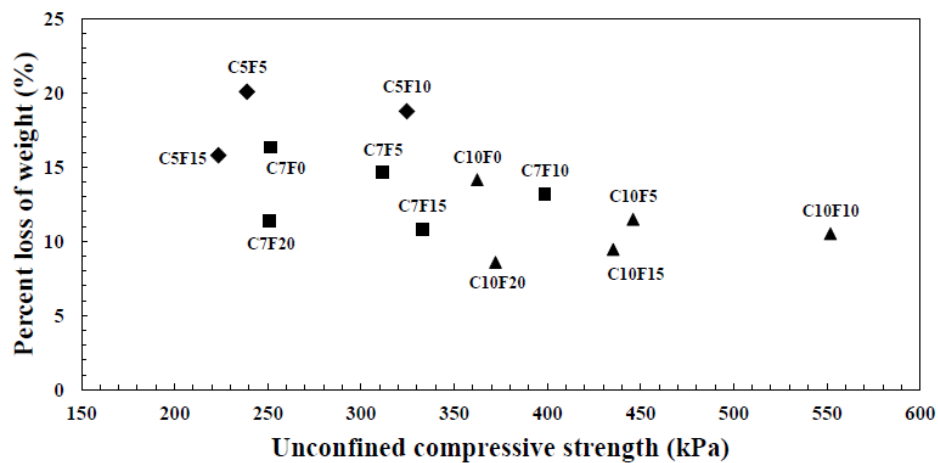
ถ้าล้อยมากขึ้นค่าอัตราเปอร์เซ็นต์การสูญเสียก็จะลดน้อยลงเช่นกัน ส่วนข้อแตกต่างระหว่างตัวอย่างทดสอบแบบควบคุมกับแบบขัดสี พบว่า ตัวอย่างแบบขัดสีจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียที่มากกว่าตัวอย่างแบบควบคุมของส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ 5% และถ้าล้อย 10% (C5F10) และส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ 10% และถ้าล้อย 10% (C10F10) ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมต่อความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง ดังภาพ 44 และในขณะที่ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สูงขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียก็จะมีค่าน้อยลง และสอดคล้องกันกับปริมาณของปูนซีเมนต์ที่มีการเติมใส่เข้าไป ปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของเสถียรภาพในดินตะกอนกวนพวย่านั้นคือสารผสมเพิ่มอย่างปูนซีเมนต์และ ถ้าล้อย โดยเฉพาะปูนซีเมนต์

ที่ว่า แม้จะส่งผลให้มีความกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้นแล้ว นอกจากนั้นยังส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียที่น้อยลงด้วย ดังภาพ 45



ภาพ 44 ผลเปรียบเทียบบรยละเอียดการสูญเสียของสัดส่วนผสม C5F10 และ C10F10

ที่มา: ธัชชัย ไหมชนันท์ (2560)



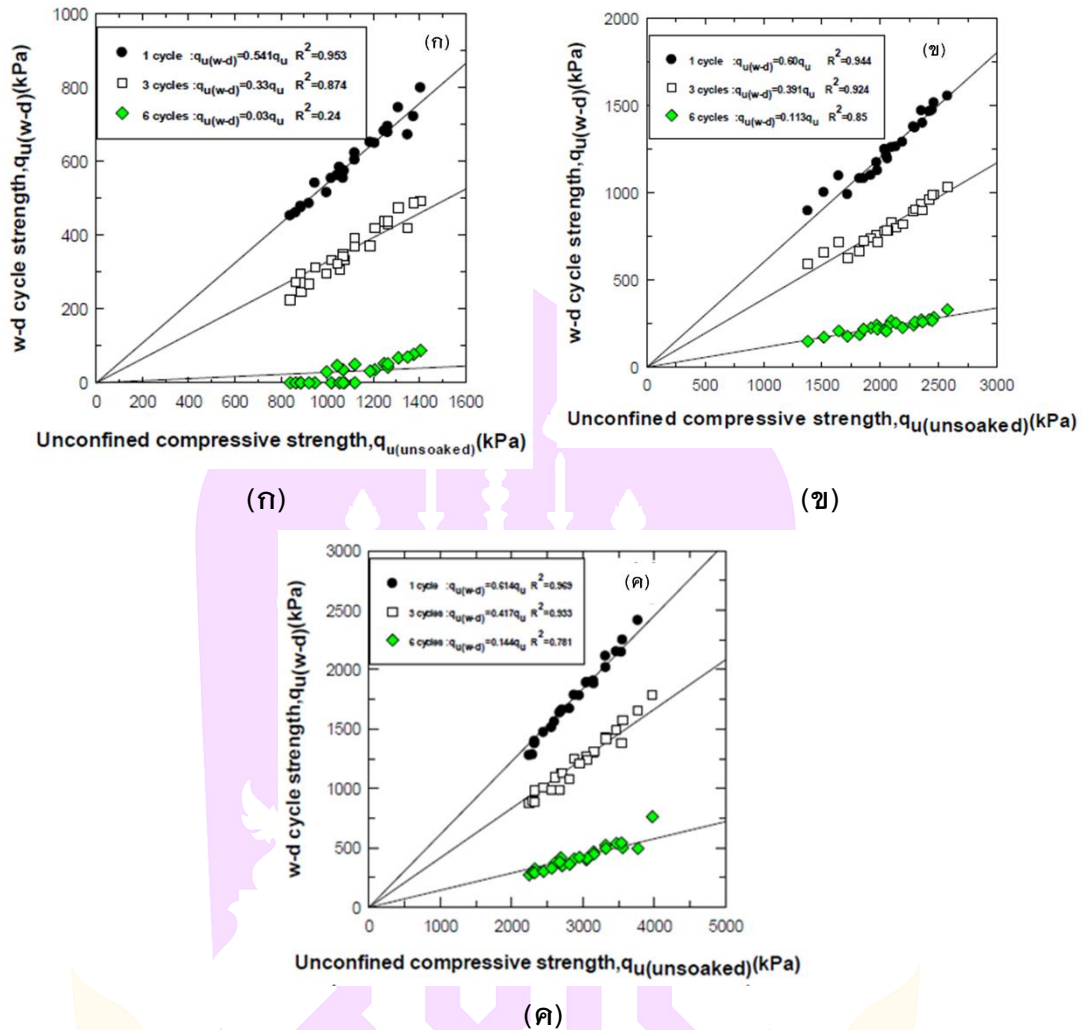
ภาพ 45 การเปรียบเทียบค่าร้อยละการสูญเสียกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ที่มา: ธัชชัย ไหมชนันท์ (2560)

สัญญาธิติ เจริญศิลป์ และคณะ (2561) ได้ทำการศึกษาการกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (wetting and drying) ของดินตะกอนขุดที่ปรับปรุง

คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยตัวอย่างทดสอบจะถูกเตรียมภายใต้เงื่อนไขการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ด้วยอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จากผลการทดสอบความคงทนที่สภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่าเมื่อผ่านรอบสภาวะเปียกสลับแห้งที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงที่ 40%–50% 40%–45% และ 35%–40% ของ ระยะเวลาการบ่ม 7 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่า ระยะเวลาการบ่มมีอิทธิพลต่อความต้านทานการทดสอบจะทดสอบเป็นจำนวน 6 รอบที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง และในตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 วัน บางส่วนผสมทำการทดสอบไม่ถึง 6 รอบ เนื่องจากตัวอย่างเกิดการพังในระหว่างการ ทดสอบ ซึ่งให้เห็นว่าส่วนผสมและระยะเวลาการบ่มที่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงอัดก็จะส่งผลต่อความต้านทานของสภาวะเปียกสลับแห้งเช่นกัน สำหรับการบ่มอายุการ 28 และ 60 วัน พบว่า การทดสอบสามารถทำได้ถึง 6 รอบดังภาพ 46 และ ในภาพ 47 ค่ากำลังรับแรงอัดในแต่ละรอบสภาวะเปียกสลับแห้ง ทุกส่วนผสมของระยะเวลาการบ่ม 7 28 และ 60 วันจะแสดงความสัมพันธ์โดยตรงกับค่ากำลังรับแรงอัด โดยไม่มีการคำนึงถึงปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ผสมเพิ่มเข้าไป และการทดสอบจะแสดงให้เห็นชัดเจนว่าค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งจะลดลงเมื่อมีจำนวนรอบทดสอบที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถพัฒนาการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัด เทียบกับจำนวนรอบได้

พีรพงษ์ ลิมารัตน์ และคณะ (2562) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของดินตะกอนขุดที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ในกรณีศึกษาเขื่อนแม่สาบ จากผลการทดสอบความคงทนที่สภาวะเปียกสลับแห้งพบว่าสภาวะเปียกสลับแห้งนั้น ส่งผลอย่างมากต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดน้อยลงมากขึ้น เนื่องจากในสภาวะเปียกจะเกิดการบวมตัวภายในอนุภาคของดินเหนียวเนื่องจากการขยายตัว นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์หรือเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ช่วยในการเพิ่มความคงทนของตะกอนดินปรับปรุงคุณภาพภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่เดียวกันอายุการบ่ม

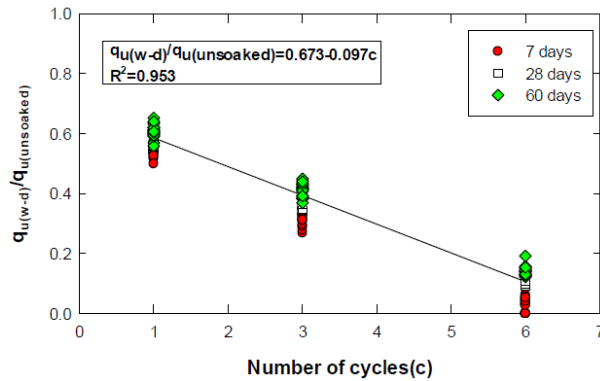


ภาพ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_u(w-d)$  กับ  $q_u(unsaturated)$  (a) อายุการบ่ม 7 วัน (b) อายุการบ่ม 28 วัน (c) อายุการบ่ม 60 วัน

ที่มา: สัจฉริณี เจริญศิลป์ และคณะ (2561)

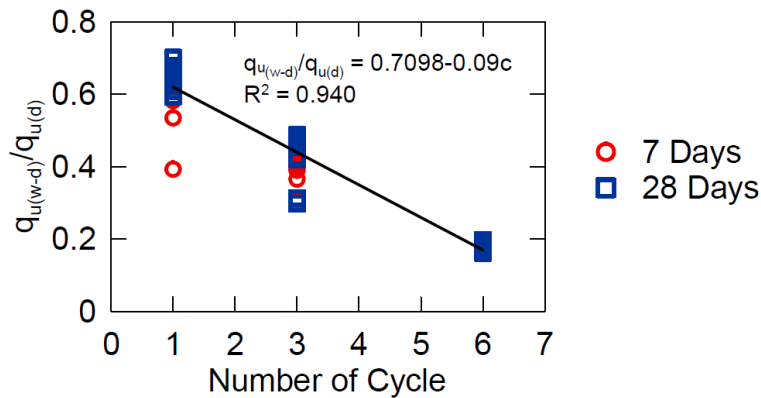
ที่เพิ่มมากขึ้นก็มีส่วนในการเพิ่มความคงทนของตะกอนดินเพิ่มเพียงเล็กน้อยเช่นกัน โดยตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 วัน เมื่อผ่านรอบเปียกสลับแห้ง 1 รอบ กำลังรับแรงอัดจะลดลงประมาณ 40 % ของกำลังรับแรงอัดในสภาวะปกติ และเมื่อผ่านรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 6 กำลังจะลดลงถึง ประมาณ 80% ของกำลังรับแรงอัดในสภาวะปกติ ดังภาพ 48

Yooanpot et al. (2020) ได้ศึกษาคุณสมบัติ และลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary portland cement, OPC) ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย (FA) รวมไปถึงการทดสอบความคงทนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง (W-D cycle) จากผล



ภาพ 47 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดต่อรอบที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง

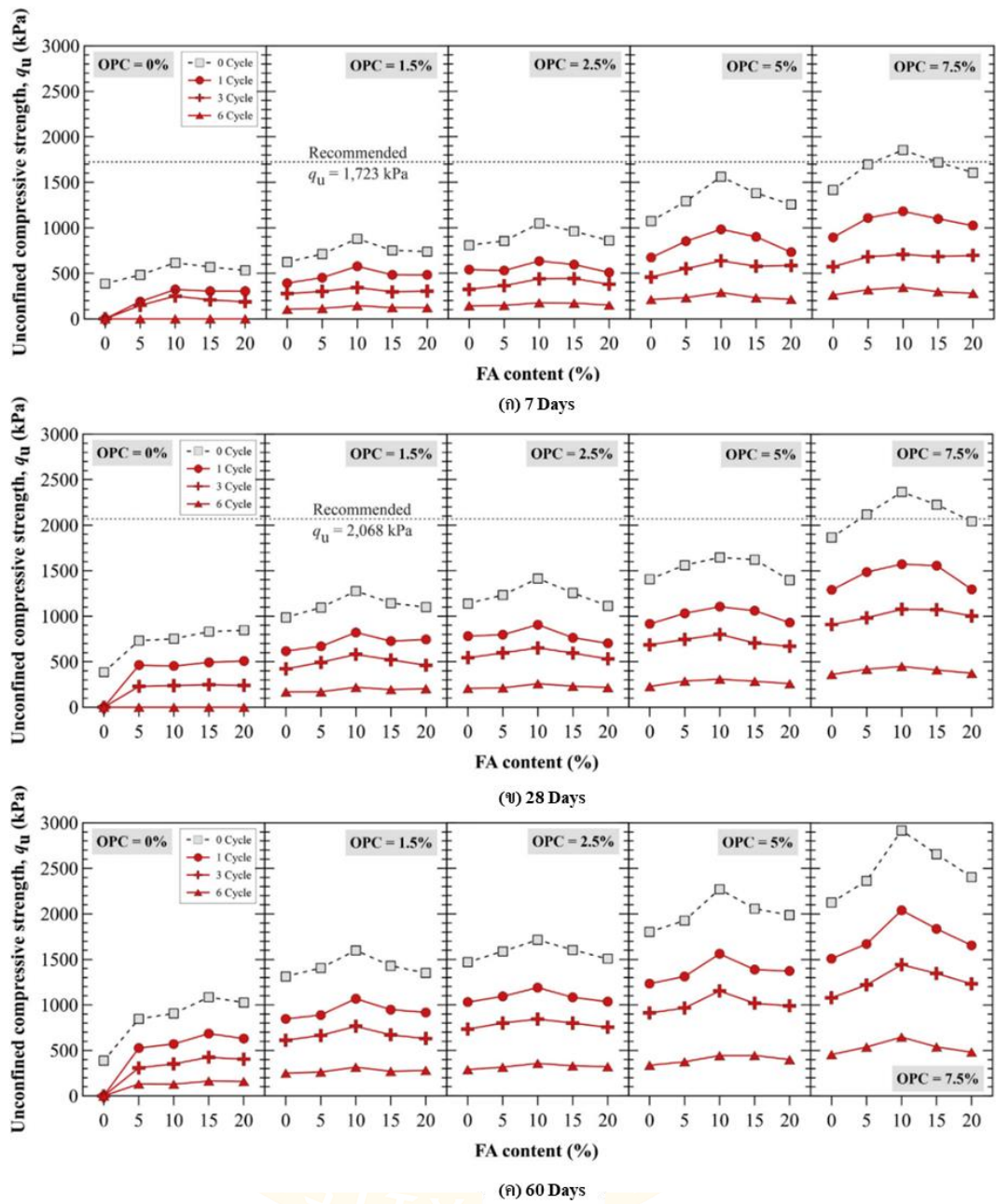
ที่มา: สัจฉริณี เจริญศิลป์ และคณะ (2561)



ภาพ 48 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดต่อรอบที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง

ที่มา: พิรพงษ์ ลิมารัตน์ และคณะ (2562)

การทดสอบความคงทนภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่า สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมด ทำให้ค่า  $q_u$  มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและเวลาในการบ่มตัวอย่างที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ที่ไม่ได้ทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง ข้อได้เปรียบของแฉ่ลอยคือค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้ง ( $q_{u(w-d)}$ ) เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มของแฉ่ลอย เมื่อเทียบกับค่า  $q_u$  ที่ไม่ได้ทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง รูปแบบการพัฒนากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งจะมีแนวโน้มคล้าย ๆ กัน ค่า  $q_u$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณแฉ่ลอยเกิน 10% ผลลัพธ์นี้แสดงว่า  $q_{u(w-d)}$  ขึ้นอยู่กับ  $q_u$  อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดทั้งสองลดลงด้วยจำนวนรอบ (C) เพิ่มขึ้นที่อายุการบ่ม 7 วัน หลังจากสภาวะเปียกสลับแห้งในรอบแรก เหมือนกับตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ดังภาพ 49



ภาพ 49 การพัฒนาความแข็งแรงของตัวอย่างที่มีความเสถียรสำหรับ W - D รอบที่ 1, 3 และ 6 สำหรับระยะเวลาการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน (ภาพ 49(ก), 49(ข) และ 49(ค) ตามลำดับ)

ที่มา: Yoobanpot et al. (2020)

### บทที่ 3

#### วิธีการทดสอบ

##### วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย ดินเหนียวอ่อน ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ดังภาพ 50 โดยตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ระดับความลึกประมาณ 3 ถึง 14 เมตร บริเวณถนนสายกาญจนาภิเษก-พุทธมณฑล สาย 2 และพื้นที่ใกล้เคียงที่มีการก่อสร้างต่าง ๆ ดังแสดงในภาพ 51 สำหรับปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยคือ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

##### การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมและคุณสมบัติทางเคมีของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพ ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ดังแสดงในตาราง 10

##### ตาราง 10 โปรแกรมคุณสมบัติพื้นฐาน

วัสดุ	การทดสอบ	มาตรฐาน
ดินเหนียว	ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน	ASTM D 854
	ขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก	ASTM D 4318 และ D 427
	ขนาดของเม็ดดิน และการวัดโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์	ASTM D 422
	การทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	-
	การทดสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	-
เถ้าลอย	การทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	-
	การทดสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	-

หมายเหตุ ปูนซีเมนต์และใช้ค่าคุณสมบัติต่างๆจากผู้ผลิต



(ก)

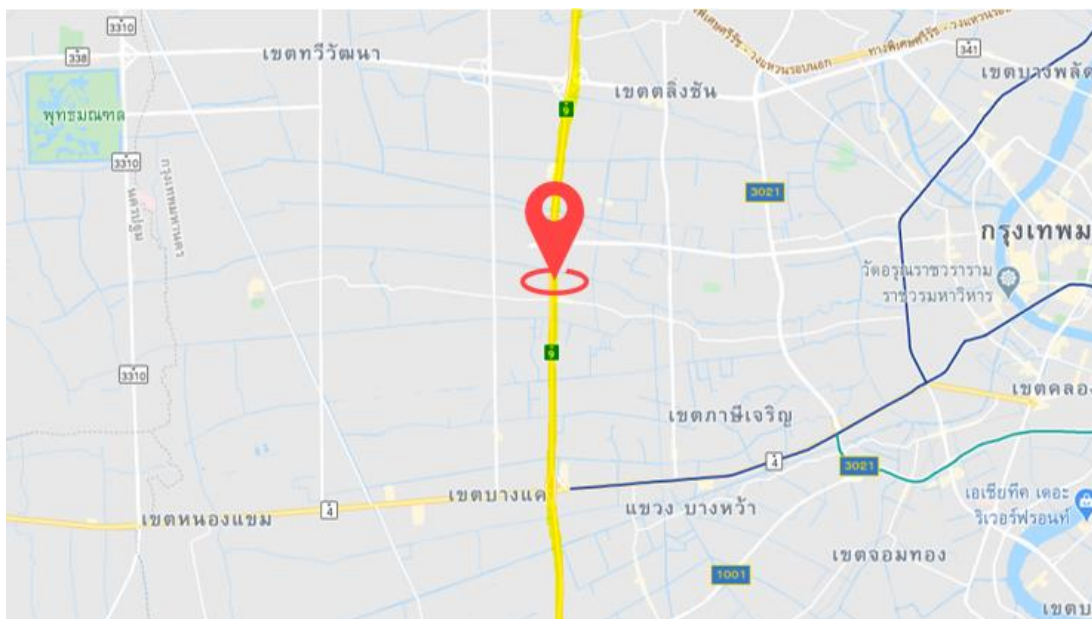


(ข)



(ค)

ภาพ 50 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ (ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
ประเภท 1 และ (ค) ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ



ภาพ 51 บริเวณถนนสายกาญจนาภิเษก-พุทธมณฑล สาย 2 และพื้นที่ใกล้เคียง

ที่มา: Google Maps

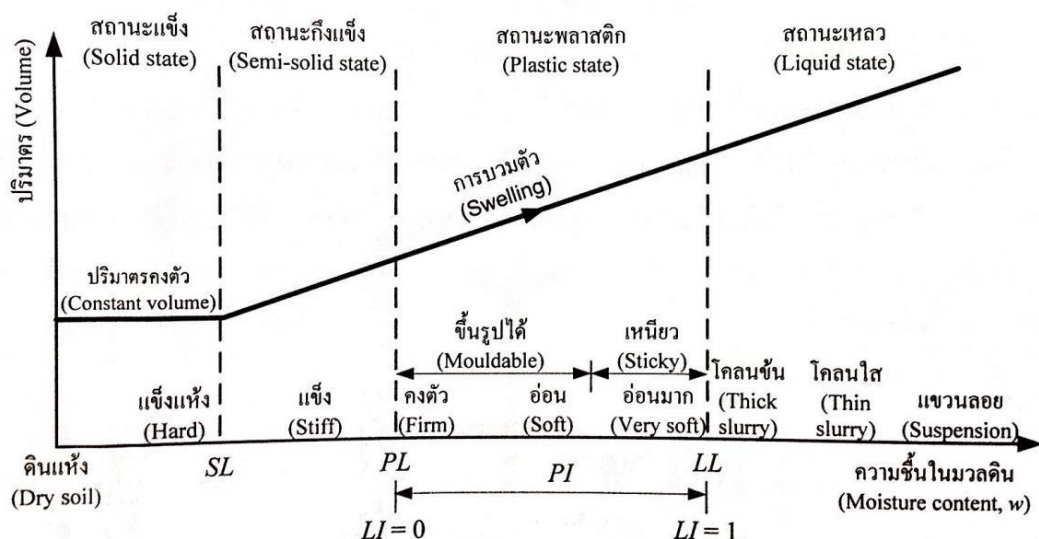
#### 1. การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ

การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 854 เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของมวลดิน และความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}$  ที่มีปริมาตรเท่ากับมวลดิน สำหรับมวลดินที่มีแร่ธาตุหลายชนิดประกอบกัน ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะ คือ ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุในมวลดินนั้น ความถ่วงจำเพาะเป็นค่าดัชนีที่บอกชนิดของดินในการแยกประเภท และใช้ในการคำนวณความพรุน (Porosity) อัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ความอิ่มตัว (Degree of saturation) และอื่น ๆ โดยการทดสอบนำดินอบแห้งผสมน้ำกลั่นให้เข้ากัน เทลงในขวดหาความถ่วงจำเพาะ แล้วต้มเพื่อไล่ฟองอากาศจนหมด แล้วปล่อยให้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำในขวด เทลงใส่ถาดแล้วนำไปอบเพื่อหาน้ำหนักแห้งของดิน ทำการทดสอบซ้ำอีกครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะของดินเหนียว

#### 2. การทดสอบขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก

การทดสอบขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก (Atterberg's limit and indices test) ตามมาตรฐาน ASTM D 4318 (2017) และ D 427 (2017) เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำ (Water content) ที่ใช้บอกถึงสภาพภาพของมวลดินดังภาพ 52 ที่เรียกว่า ขีดจำกัด (Limit) ซึ่งเป็น

คุณสมบัติของมวลดินนั้น ๆ ทางวิศวกรรมได้หลายอย่าง เช่น คุณสมบัติทางด้านกำลัง การทรุดตัวและแรงดันด้านข้าง และอื่น ๆ โดยการทดสอบแบ่งเป็น 3 ชุดการทดสอบ 1.การทดสอบขีดจำกัดเหลว เพื่อหาขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) คือปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นพลาสติก 2.การทดสอบขีดจำกัดพลาสติก เพื่อหาขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) คือปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานะจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง และ 3.การทดสอบทดสอบขีดจำกัดหดตัว เพื่อหาขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage limit, SL) คือปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานะจากกึ่งของแข็งเป็นของแข็ง



ภาพ 52 สถานภาพของมวลดิน

ที่มา: นพรัตน์ พรรณงาม (2556)

### 3. การทดสอบหาขนาดเม็ดดิน

การทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (grain size analysis test) ตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 เป็นการทดสอบเพื่อหาขนาดของเม็ดดิน และกระจายของเม็ดดิน ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพ หรือด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะความชื้นน้ำ และอัตราการทรุดตัว การหาขนาดของเม็ดดิน มีความสำคัญมากในการแยกชนิดของดิน และลักษณะของเม็ดดิน เช่น ดินทราย คือเม็ดดินที่มีขนาดตั้งแต่ 0.074 mm ถึง 4.63 mm และดินเหนียว คือเม็ดดินที่มี

ขนาดเล็กกว่า 0.074 mm โดยการทดสอบแบ่งเป็น 2 ชุดการทดสอบ 1.หาขนาดเม็ดดินโดยการร่อนตะแกรง (sieve analysis) สำหรับดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.074 mm และ 2.หาขนาดเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) สำหรับดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.074 mm

#### 4. การทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

การทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence, XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ ดังภาพ 53 โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยสามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลาย ๆ ด้าน เช่น วัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อม ทางการแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เป็นต้น การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอ็กซ์ ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอ็กซ์เข้าไปในตัวอย่างธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างธาตุจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คายหรือแสงฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) ที่ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้น ๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้นมีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้เครื่องตรวจจับวัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง



ภาพ 53 เครื่องมือการทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

## 5. การทดสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอน (electron) เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษา ลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ดังภาพ 54 ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้วัตถุเล็กสุดประมาณ  $0.2 \mu\text{m}$  และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์-อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่าจนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ ตั้งแต่ 3 ถึง 100 nm อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับโหมดเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีแบบกระจายพลังงาน (energy dispersive spectrometry, EDS) และ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีแบบกระจายความยาวคลื่น (wave length dispersive spectrometry, WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน



ภาพ 54 เครื่องมือการทดสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

### 1. การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression strength,  $q_u$ ) ของวัสดุผสม การทดสอบโดยการแรงกดด้วยเครื่องกดแรงอัด ดังภาพ 55 ให้แรงในแนวตั้งเพียงแกนเดียวเท่านั้น ปรากฏแรงอัดโดยรอบมวลดิน ค่า  $q_u$  จะมีค่าเท่ากับค่าน้ำหนักสูงสุดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จากตัวอย่างทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 3.7 เซนติเมตร (1 นิ้ว) และความสูงเท่ากับ 7.6 เซนติเมตร เตรียมตัวอย่างโดยนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้งแล้วบดเป็นผงนำมาผสมกับ ปูนซีเมนต์ตามด้วยเถ้าลอยคนให้เข้ากัน นำเข้าเครื่องผสมตัวอย่างพร้อมกับเติมน้ำ แล้วทำการหล่อตัวอย่างทรงกระบอกในท่อ PVC หลังจากนั้นนำไปห่อด้วยพลาสติก แล้วนำตัวอย่างไปบ่มในกล่องโฟมเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เมื่อครบอายุการบ่มตัวนำไปตรวจสอบขนาดของตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบในเครื่องกดตัวอย่าง โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบแสดงดังภาพ 56

สำหรับโปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ ดังตาราง 11 และโปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ดังตาราง 12



ภาพ 55 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพ 56 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (ก) เตรียมส่วนผสมตามสัดส่วน (ข) ทำการผสมด้วยเครื่องผสม (ค) ขึ้นรูปในไมลท์ท้อ PVC (ง) บ่มตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด (จ) วัดขนาดและชั่งน้ำหนัก (ฉ) ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

ตาราง 11 โปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์

ลำดับที่	ดัชนีเหลว (LI)	$C/w_c$	การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว		
			บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน	บ่ม 60 วัน
1	1.0 (78)	0.2	✓	✓	✓
2	1.3 (90)		✓	✓	✓
3	1.6 (103)		✓	✓	✓
4	1.0 (78)	0.3	✓	✓	✓
5	1.3 (90)		✓	✓	✓
6	1.6 (103)		✓	✓	✓
7	1.0 (78)	0.4	✓	✓	✓
8	1.3 (90)		✓	✓	✓
9	1.6 (103)		✓	✓	✓

หมายเหตุ  $C/w_c$  คือ เปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน และ ดัชนีเหลว (liquidity index, LI)

ตาราง 12 โปรแกรมการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

ลำดับที่	ดัชนีเหลว (LI)	$B/w_c$	อัตราส่วน เปอร์เซ็นต์ เถ้าลอยต่อ การแทนที่ ปูนซีเมนต์ (FA)	การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว		
				บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน	บ่ม 60 วัน
1	1.6 (103)	0.3	0	✓	✓	✓
2			15	✓	✓	✓
3			30	✓	✓	✓
4			45	✓	✓	✓
5			60	✓	✓	✓
6		0.4	0	✓	✓	✓
7			15	✓	✓	✓
8			30	✓	✓	✓
9			45	✓	✓	✓
10			60	✓	✓	✓

หมายเหตุ  $B/w_c$  คือ เปอร์เซ็นต์วัสดุผสมต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน, B คือผลรวมปริมาณ ปูนซีเมนต์ (C) และเถ้าลอย (FA) และ FA คือ เปอร์เซ็นต์เถ้าลอย

## 2. การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง

การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability test) ตามมาตรฐาน ASTM D559 เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังการสูญเสียของตัวอย่างดินที่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยการทดสอบจะใช้วัสดุ อัตราส่วนผสม และโปรแกรมการทดสอบแบบเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว แสดงชุดการทดสอบดังภาพ 55

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จากตัวอย่างทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 3.7 เซนติเมตร (1 นิ้ว) และความสูงเท่ากับ 7.6 เซนติเมตร เตรียมตัวอย่างโดยนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้งแล้วบดเป็นผงนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ตามด้วยเถ้าลอยคนให้เข้ากัน นำเข้าเครื่องผสมตัวอย่างพร้อมกับเติมน้ำ แล้วทำการหล่อตัวอย่างทรงกระบอกในท่อ PVC หลังจากนั้นนำไปห่อด้วยพลาสติกแล้วนำตัวอย่างไปบ่มในกล่องโฟมเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เมื่อครบอายุการบ่มตัวนำตัวอย่างออกจากท่อ PVC แล้วนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 42 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้คือ 1 รอบสภาวะเปียกสลับแห้ง ทำทั้งหมด 6 รอบ เลือกตัวอย่างเฉพาะรอบที่ 1 3 และ 6 ไปตรวจสอบขนาดของตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดกับเครื่องกดตัวอย่าง โดยแผนขั้นตอนการทดสอบดังภาพ 57 และขั้นตอนการทดสอบแสดงดังภาพ 58 สำหรับโปรแกรมการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของวัสดุมวลรวมดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และ โปรแกรมการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของวัสดุมวลรวมดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ดังแสดงในตาราง 13 และ 14 ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



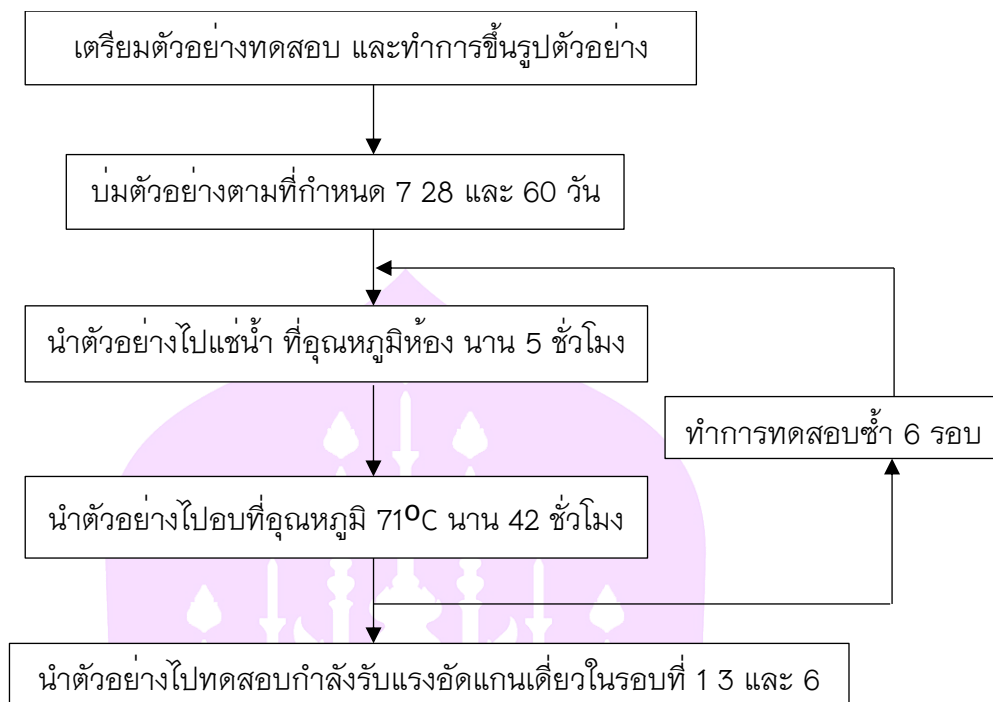
(จ)



(ฉ)

ภาพ 57 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (ก) ขึ้นรูปตัวอย่าง  
 ในแบบท่อ PVC (ข) บ่มตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด (ค) นำตัวอย่างไปแช่น้ำ 5 ซม. (ง)  
 นำตัวอย่างไปอบแห้ง 71° นาน 42 ชม. (จ) วัดขนาดและชั่งน้ำหนัก (ฉ) ตัวอย่างด้วย  
 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว





ภาพ 58 ขั้นตอนการทดสอบความคงทนในสถานะเปียกสลับแห้ง

### 3. การทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย

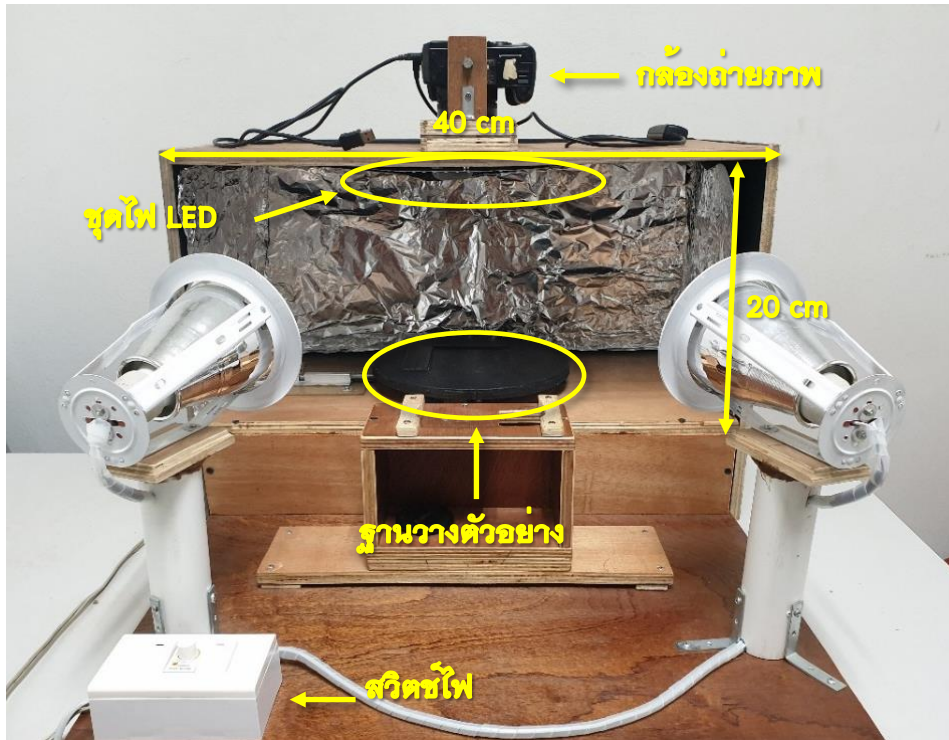
การทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่าย (shrinkage test by Image processing) เป็นการทดสอบเพื่อหาการหดตัวของวัสดุผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวของตัวอย่างในระนาบสองมิติ ซึ่งการหดตัวจะแปรผันตามอายุการบ่มตัว ความชื้นในการบ่ม และอุณหภูมิในการอบตัวอย่าง รวมไปถึงปริมาณน้ำที่มีในตัวอย่าง ดังนั้นจึงได้จัดทำสตูดิโอถ่ายภาพรูปของตัวอย่างดิน (soil studio)

สตูดิโอถ่ายภาพรูปของตัวอย่างดินมาจากแนวคิดของผู้วิจัยที่ต้องการถ่ายภาพตัวอย่างดินในโมลแบบฟารูพวงกลม ซึ่งการถ่ายภาพต้องถ่ายจากด้านบนของตัวอย่าง โดยตัวอย่างดินต้องอยู่ในตำแหน่งเดิมของการถ่ายภาพเสมอ โดยสตูดิโอถ่ายภาพรูปของตัวอย่างดินเริ่มจากการนำแผ่นไม้อัดทำเป็นโครงมีขนาดความสูง 20 เซนติเมตร กว้าง 40 เซนติเมตร แล้วทำการเจาะรูเป็นวงกลม จากนั้นทำการติดตั้งกล้อง DSLR (digital single lens reflex) ที่ด้านบนของแผ่นไม้อัด ต่อมาทำการติดตั้งหลอดไฟ LED (light emitting diode) กับแผ่นไม้อัดด้านบน ดังภาพ 59 จากนั้นได้การทำฐานวางตัวอย่างดินที่มีขอบเป็นมุมสี่เหลี่ยมเพื่อวางแผ่นอะคริลิค โดยได้ทำแผ่นอะคริลิครูปสี่เหลี่ยม ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร ซึ่งแผ่นอะคริลิคดังกล่าวเจาะรูตรงกลาง

ขนาดเท่าโมลแบบฟาวงกลมเพื่อให้สามารถวางตัวอย่างที่เป็นรูปวงกลมได้ ดังภาพ 60(ก) ภายใน soil studio ได้ทำการเปิดไฟระหว่งการถ่ายภาพตัวอย่าง โดยแสงไฟจะตกกระทบกับตัวอย่างดินในแนวตั้งฉาก และมีการนำกระดาษฟรอยด์มาติดไว้ 3 ด้านภายใน soil studio เพื่อให้การสะท้อนแสงไปตกที่ตัวอย่างดินและสามารถช่วยลบเงาได้ ซึ่งตำแหน่งกล้องด้านบนมีระยะไฟกัสนห่างจากตัวอย่างดิน 22 เซนติเมตร ดังภาพ 60(ข) ภายนอก soil studio ได้มีการทำโครงท่อ PVC ที่มีขนาดใหญ่กว่า soil studio แล้วใช้ผ้าสีดำคลุมโครงท่อ PVC เพื่อควบคุมแสงไม่ให้แสงภายนอกเข้าสู่ภายใน ดังภาพ 61 ส่วนการตั้งค่ากล้อง DSLR ทำการปรับโหมดการถ่ายภาพเป็นโหมด M ค่ารับแสงที่ F20 ISO100 ความเร็วชัตเตอร์อยู่ประมาณ 1/13 ตั้งระบบวัดแสงให้เฉลี่ยทั้งภาพ เพื่อให้ภาพคมชัดที่สุด ดังภาพ 62

สำหรับการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายงานในวิจัยนี้จะใช้โมลแบบฟาวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร หนา 0.8 เซนติเมตร โดยในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้งแล้วบดเป็นผงนำมาผสมกับน้ำ ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ดังที่จะกล่าวต่อไป แล้วทำการหล่อตัวอย่างในแบบฟาวงกลม นำตัวอย่างไปถ่ายรูปเริ่มต้นใน soil studio หลังจากนั้นนำไปห่อด้วยพลาสติกแล้วนำไปบ่มตามอายุที่ต้องการนำไปทดสอบ แล้วนำไปถ่ายรูปหลังจากการบ่มตัว แล้วนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปถ่ายรูปสุดท้ายหลังจากการอบ โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบแสดงดังภาพ 63

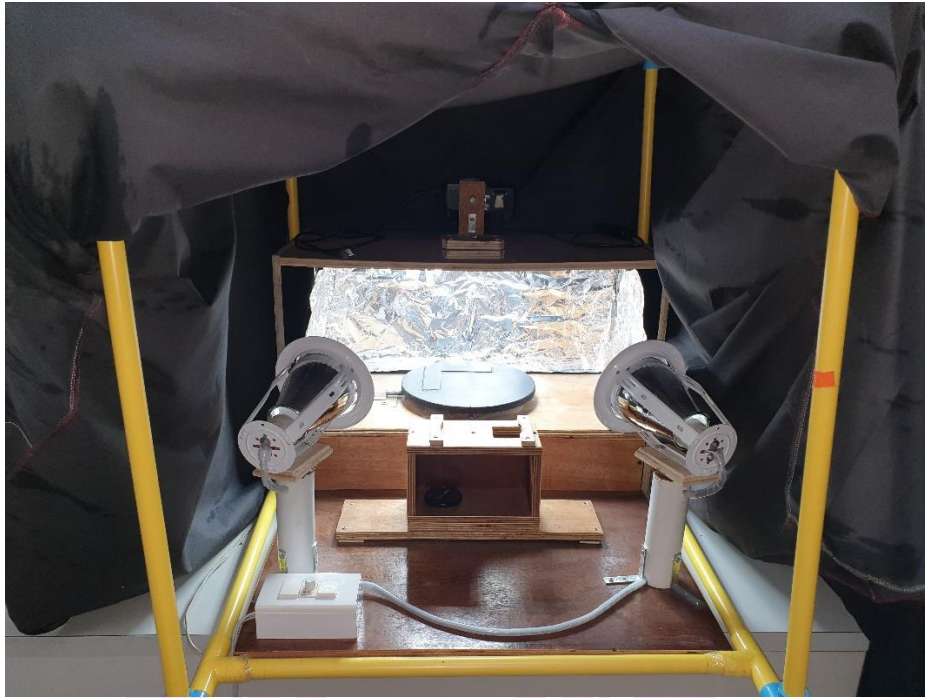
สำหรับโปรแกรมการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย แสดงดังตาราง 15



ภาพ 59 สตูดิโอถ่ายภาพรูปของตัวอย่างดิน



ภาพ 60 รายละเอียดภายใน soil studio



ภาพ 61 รายละเอียดภายนอก soil studio



ภาพ 62 การตั้งค่างกล้อง DSLR



(ก)



(ข)



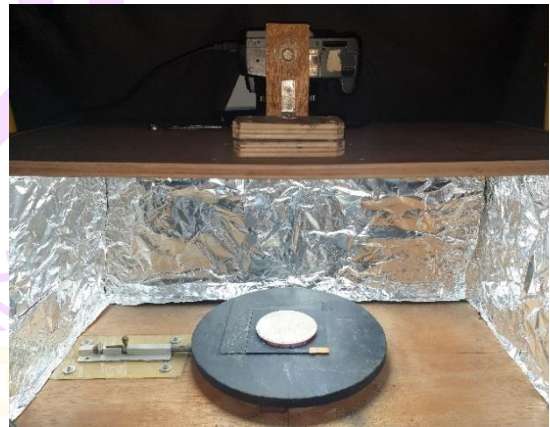
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพ 63 ขั้นตอนการทดสอบการหดตัวในสภาวะปกติ (ก) เตรียมส่วนผสมตามสัดส่วน (ข) ทำการผสมด้วยเครื่องผสม (ค) ขึ้นรูปตัวอย่างในแบบฝาวงกลม (ง) บ่มตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด (จ) นำตัวอย่างไปอบแห้ง  $110 \pm 5^{\circ}$  (ฉ) นำตัวอย่างไปถ่ายภาพกับ soil studio

ตาราง 15 โปรแกรมการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

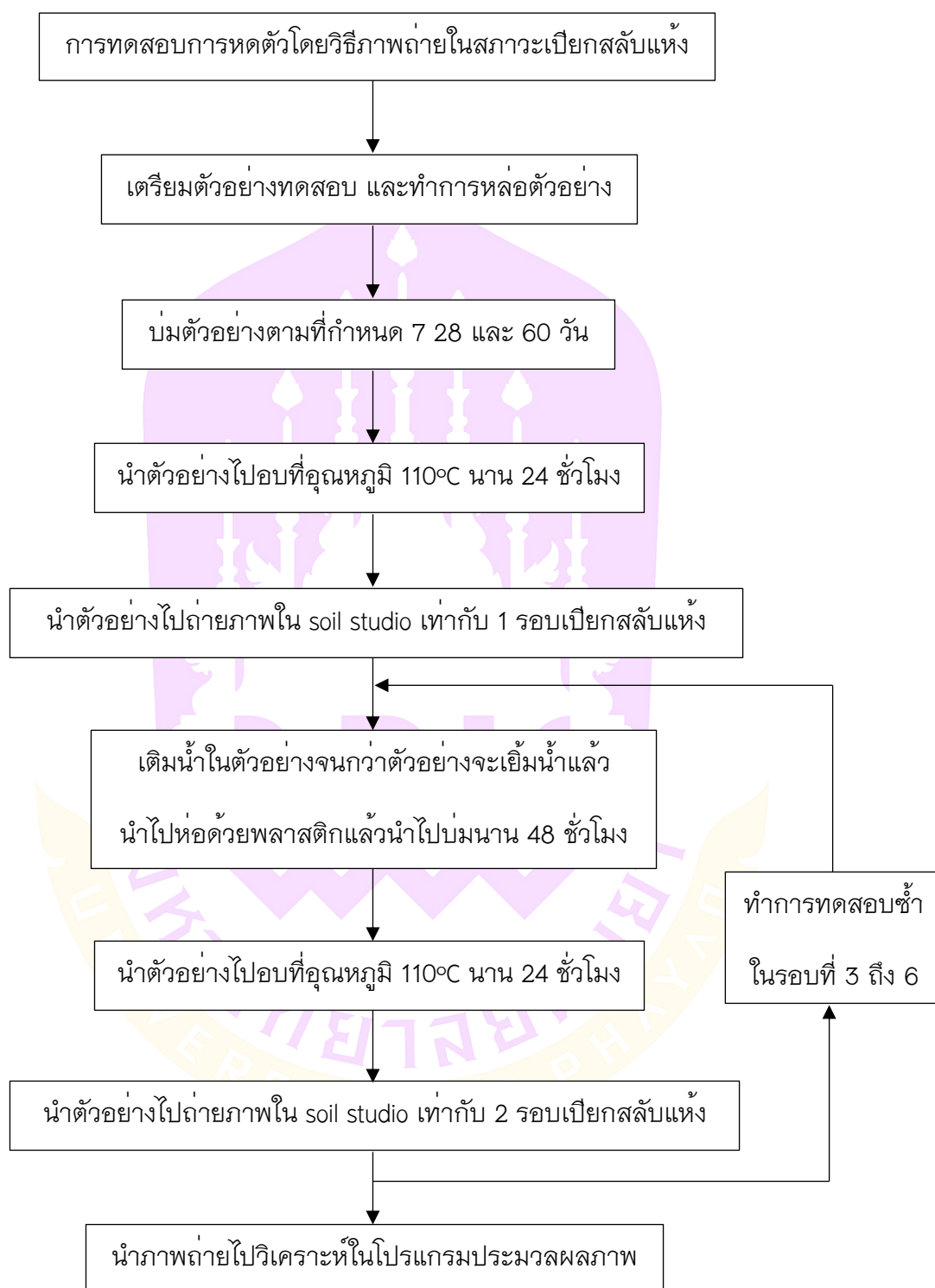
ลำดับ ที่	ดัชนี เหลว (LI)	B/w <sub>c</sub>	อัตราส่วน เปอร์เซ็นต์เถ้า ลอยต่อการ แทนที่ปูนซีเมนต์	การทดสอบการหดตัวโดยวิธี ภาพถ่าย			
				บม 7 วัน	บม 28 วัน	บม 60 วัน	บม 90 วัน
1	1.3 (90)	0.3	0	✓	✓	✓	✓
2			15	✓	✓	✓	✓
3			30	✓	✓	✓	✓
4			45	✓	✓	✓	✓
5			60	✓	✓	✓	✓
6		0.4	0	✓	✓	✓	✓
7			15	✓	✓	✓	✓
8			30	✓	✓	✓	✓
9			45	✓	✓	✓	✓
10			60	✓	✓	✓	✓
11	1.6 (103)	0.3	0	✓	✓	✓	✓
12			15	✓	✓	✓	✓
13			30	✓	✓	✓	✓
14			45	✓	✓	✓	✓
15			60	✓	✓	✓	✓
16		0.4	0	✓	✓	✓	✓
17			15	✓	✓	✓	✓
18			30	✓	✓	✓	✓
19			45	✓	✓	✓	✓
20			60	✓	✓	✓	✓

#### 4. การทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลับแห้ง

การทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลับแห้ง (shrinkage test by Image processing on wetting and drying condition) เป็นการทดสอบเพื่อหาการหดตัวของวัสดุผสมที่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวของตัวอย่างในระนาบสองมิติ ซึ่งการหดตัวจะแปรผันตามอายุการบ่มตัว ความชื้นในการบ่ม และอุณหภูมิในการอบตัวอย่าง รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงสภาวะเปียกสลับแห้งในตัวอย่าง ซึ่งกระบวนการทดสอบอ้างอิงงานวิจัยของ Tang et al. (2008) และ (2011)

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แบบฟาวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร หนา 0.8 เซนติเมตร โดยในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะนำดินเหนียวอ่อนมาอบให้แห้งแล้วบดเป็นผงนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ตามด้วยเกล็ดลอยคนให้เข้ากัน นำเข้าเครื่องผสมตัวอย่างพร้อมกับเติมน้ำ แล้วทำการหล่อตัวอย่างในแบบฟาวงกลม นำตัวอย่างไปถ่ายภาพเริ่มต้นใน soil studio หลังจากนั้นนำไปห่อด้วยพลาสติกและนำไปบ่มตามอายุที่ต้องการนำไปทดสอบ ภายหลังจากครบอายุการบ่มนำตัวอย่างไปถ่ายภาพ แล้วต่อด้วยการนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างไปถ่ายภาพหลังจากการอบ นี้คือรอบที่ 1 ในสภาวะเปียกสลับแห้ง เริ่มรอบที่ 2 โดยการเติมน้ำในตัวอย่างจนกว่าตัวอย่างจะเอี่ยมน้ำ หลังจากนั้นนำไปห่อด้วยพลาสติกและนำไปบ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลานำตัวอย่างออกจากพลาสติกแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปถ่ายภาพหลังจากการอบ แล้วทำรอบที่ 3 เหมือนขั้นตอนในรอบที่ 2 จนทั้งหมดครบ 6 รอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยแผนขั้นตอนการทดสอบแสดงดังภาพ 64 และขั้นตอนการทดสอบแสดงดังภาพ 65

สำหรับโปรแกรมการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลับแห้งของวัสดุผสมรวมดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์ผสมเกล็ดลอย แสดงดังตาราง 16



ภาพ 64 การทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลับแห้ง



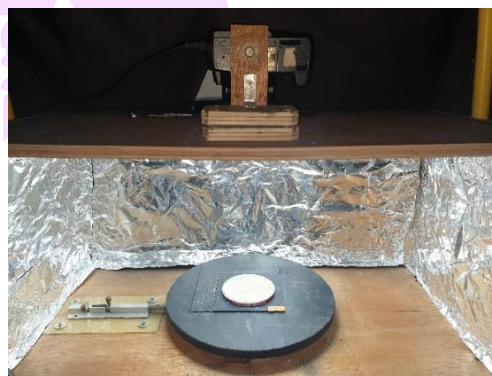
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ 65 ขั้นตอนการทดสอบการหดตัวของดินสถานะเปียกสลับแห้ง (ก) เติมน้ำในตัวอย่างจนเต็มน้ำ (ข) บ่มตัวอย่างนาน 48 ชม. (ค) นำตัวอย่างไปอบแห้ง  $110 \pm 5$  นาน 24 ชม.

(ง) นำตัวอย่างไปถ่ายรูปกับ soil studio

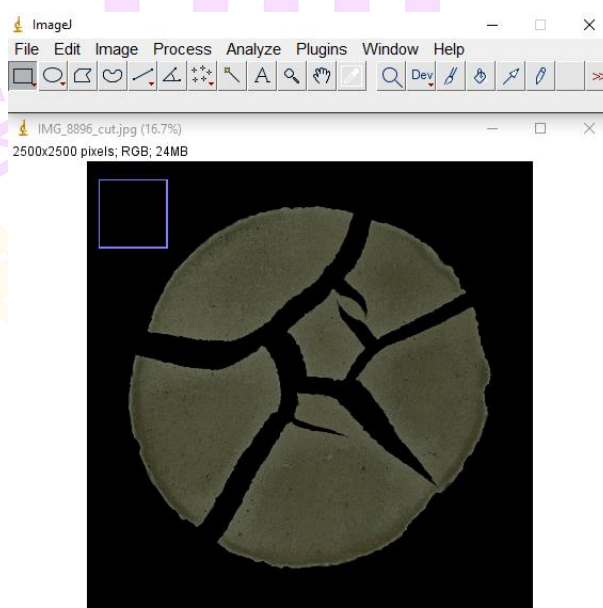
### การประมวลผลภาพถ่าย

การประมวลผลภาพถ่าย (image processing) เริ่มจากหลังจากเก็บภาพเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำภาพถ่ายมาเข้าในโปรแกรม Photoshop CS6 เพื่อทำการตัดรูปเฉพาะส่วนที่เป็นผิวดิน ภาพถ่ายที่ตัดมาแล้วนำไปเข้า โปรแกรม ImageJ ซึ่งมีหน้าต่างโปรแกรมดังภาพ 66

สำหรับโปรแกรม ImageJ ในโปรแกรมจะสามารถตั้งค่าสเกล หรือหน่วยในการวัดการหดตัวเป็นหน่วยเซนติเมตรได้ แต่ต้องถ่ายภาพไม้บรรทัดที่มีสเกลเซนติเมตร ระยะโฟกัสต้องเท่ากับการถ่ายภาพตัวอย่างที่ทดสอบ ซึ่งการวิเคราะห์ในโปรแกรม ImageJ เริ่มจากนำภาพถ่ายไม้บรรทัดเข้าโปรแกรมด้วยการคลิกที่แท็บ File ตรงมุมบนซ้ายของโปรแกรม แล้ว

ตาราง 16 โปรแกรมการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลับแห้ง  
ของดินเหนียวอ่อนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ลำดับที่	ดัชนี เหลว (LI)	B/W <sub>c</sub>	อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ เถ้าลอยต่อการ แทนที่ปูนซีเมนต์	การทดสอบการหดตัวโดยวิธี ภาพถ่าย	
				บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
1	1.6 (103)	0.3	0	✓	✓
2			15	✓	✓
3			30	✓	✓
4			45	✓	✓
5			60	✓	✓
6		0.4	0	✓	✓
7			15	✓	✓
8			30	✓	✓
9			45	✓	✓
10			60	✓	✓



ภาพ 66 หน้าต่างโปรแกรม ImageJ

คลิก Open จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างที่มีชื่อเดียวกับไฟล์ภาพถ่าย จากนั้นเลือกแถบเครื่องมือ ด้านล่างของโปรแกรมที่เป็นรูปเส้นตรงชื่อว่า Straight ทำการลากเส้นสเกล 1 เซนติเมตรใน ภาพถ่ายไม้บรรทัด ดังภาพ 67(ก) จากนั้นไปแถบด้านบนของโปรแกรมคลิก Analyze แล้วเลือก Set Scale ให้กรอกตัวเลข 1 ตรงช่อง Known distance และกรอกตัวหนังสือ cm ตรงช่อง Unit of length กดเครื่องหมายถูกตรงช่อง Global แล้วคลิก OK ดังภาพ 67(ข) ขั้นตอนการวัด การหัดตัวของภาพตัวอย่างดินแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมภาพตัวอย่างดิน เริ่มจากการนำภาพถ่ายเข้าโปรแกรมทำเหมือนขั้นตอน เดียวกับการนำภาพถ่ายไม้บรรทัดเข้าโปรแกรม ดังภาพ 68(ก) จากนั้นคลิกที่แถบ Process เลือก Binary แล้วคลิก Make Binary ภาพถ่ายตัวอย่างจากถูกแปลงเป็นภาพไบนารี (ตัวอย่าง ดินเป็นสีดำ และพื้นหลังเป็นสีขาว) ดังภาพ 68(ข) หากพบจุดสีขาวในพื้นที่ตัวอย่างดินสีดำมัน คือรอยขีด (nosie) ให้ทำการคลิก >> เลือกเครื่องมือรูปดินสอชื่อว่า Pencil ให้ดับเบิลคลิกที่ เครื่องมือรูปดินสอเดิมแล้วคลิกที่ช่อง Color เลือก Black เพื่อเปลี่ยนสีดินสอเป็นสีดำ แล้วลบ จุด Nosie สีขาวออกทั้งหมด ยกเว้นรอยแตกหากภาพถ่ายตัวอย่างดินมีรอยแตก

2. การวัดพื้นที่การหัดตัวมีขั้นตอนดังนี้

- 2.1 การวัดพื้นที่ตัวอย่างดินเริ่มแรก ( $A_i$ ) หลังจากการแปลงภาพไบนารีแล้วลบ nosie แล้วให้เลือกเครื่องมือรูปแท่งไฟชื่อว่า Wand กดที่ภาพถ่ายตัวอย่างดิน สังเกตได้ว่าจะมีเส้น รอบรูปสีเหลืองคลุมรูปตัวอย่างดิน ดังภาพ 68(ค) จากนั้นวัดพื้นที่ที่คลุมดังกล่าวโดยการคลิกที่ แถบ Analyze แล้วกด Measure จะปรากฏหน้าต่างที่มีชื่อว่า Results จะแสดงพื้นที่รูปตัวอย่าง ดินในคอลัมน์ Area มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร ดังภาพ 68(ง)

- 2.2 การวัดพื้นที่ตัวอย่างดินที่ลดลง ( $A_r$ ) เริ่มจากนำภาพถ่ายหลังการลบรอยขีดเข้า โปรแกรม ดังภาพ 69(ก) แล้วทำเหมือนขั้นตอนการวัดพื้นที่ตัวอย่างดินเริ่มแรก ดังภาพ 69(ข) แล้วสามารถนำไปหาพื้นที่การหัดตัว ( $A_{sk}$ ) ได้จาก  $A_{sk} = A_i - A_r$  หากภาพถ่ายตัวอย่างดินมีรอยแตก ให้หาพื้นที่รอยแตก ( $A_c$ ) เพิ่มเติม โดยเริ่มจากการคลิกแถบ Edit เลือก Selection แล้วคลิก Create Selection สังเกตได้ว่าจะมีเส้นสีเหลืองคลุมรอยแตกทั้งหมดรวมถึงรูปตัวอย่างดิน ดัง ภาพ 69(ค) จากนั้นวัดพื้นที่ที่คลุมดังกล่าวคลิกที่แถบ Analyze แล้วกด Measure เหมือนขั้นตอน ก่อนหน้านี้ ดังภาพ 69(ง) พื้นที่ที่เพิ่งวัดล่าสุดนี้จะได้เป็นพื้นที่รอยแตกรวมกับพื้นที่ที่ลดลงของ ตัวอย่างดิน ( $A_r^*$ ) นำไปหาพื้นที่รอยแตก ( $A_c$ ) จาก  $A_c = A_r - A_r^*$  พารามิเตอร์เหล่านี้สามารถ

นำไปคำนวณหาปัจจัยความเข้มรอยแตก (crack intensity factor, CIF) คำนวณจากสมการ 8 และ ปัจจัยความหนาแน่นรอยแตก (crack density factor, CDF) คำนวณจากสมการ 9

$$CIF = \frac{A_c}{A_r} \times 100\% \quad (8)$$

$$CDF = \frac{A_{sk} + A_c}{A_i} \times 100\% \quad (9)$$

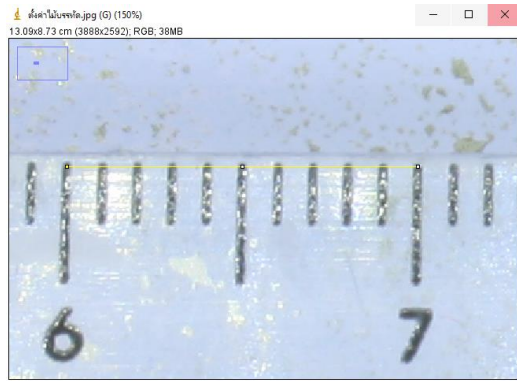
โดยที่  $A_i$  คือ พื้นที่ผิวตัวอย่างดินเริ่มต้น (ตารางเซนติเมตร)  $A_r$  คือ พื้นที่ผิวตัวอย่างดินที่ลดลง (ตารางเซนติเมตร)  $A_c$  คือ พื้นที่รอยแตกของตัวอย่างดิน (ตารางเซนติเมตร) และ  $A_{sk}$  คือ พื้นที่การหดตัวของตัวอย่างดิน (ตารางเซนติเมตร)

ภาพตัวอย่างดินมีรอยแตกจึงต้องวัดความยาวรอยแตก ( $L_c$ ) มีขั้นตอนดังนี้

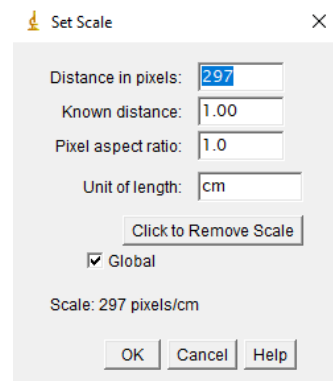
1. เริ่มจากการสลับสีรูปเป็นสีด้านตรงข้ามกันก่อน โดยการคลิกแท็บ Edit เลือก Invert เพื่อให้รอยแตกเป็นสีดำ ดังภาพ 70(ก) จากนั้นคลิกแท็บ Edit เลือก Selection แล้วคลิก Create Selection เหมือนขั้นตอนก่อนหน้านี้ จากนั้นคลิกที่แท็บ Process เลือก Binary แล้วคลิก Skeletonize รอโปรแกรมประมวลผลจนได้รอยแตกเป็นเส้นบางยาว ดังภาพ 70(ข)

2. วัดความยาวรอยแตกจากเส้นบางยาวโดยคลิกเครื่องมือรูปแท่งไฟชื่อว่า Wand แล้วกดที่เส้นบางยาว 1 เส้น ดังภาพ 70(ค) แล้วไปที่แท็บ Edit เลือก Selection แล้วคลิก Area to Line จากนั้นไปคลิกที่แท็บ Analyze แล้วกด Measure จะปรากฏหน้าต่างที่มีชื่อว่า Results จะแสดงความยาวรอยแตกที่เพิ่งกดเลือกมาในคอลัมน์ Length มีหน่วยเป็นเซนติเมตร ดังภาพ 70(ง) ซึ่งการวัดความยาวรอยแตกจากเส้นบางยาวจะสามารถกดเลือกเส้นได้ที่ละเส้นเท่านั้น ความยาวรอยแตกทั้งหมดในภาพตัวอย่างดินมีค่าเท่ากับ  $L_c$  ซึ่งสามารถนำมาหาความกว้างรอยแตกเฉลี่ย ( $W_{c,av}$ ) ได้จากสมการ 10 จะได้ความกว้างรอยแตกเฉลี่ยมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

$$W_{c,av} = \left( \frac{A_c}{L_c} \right) \times 10 \quad (10)$$



(ก)

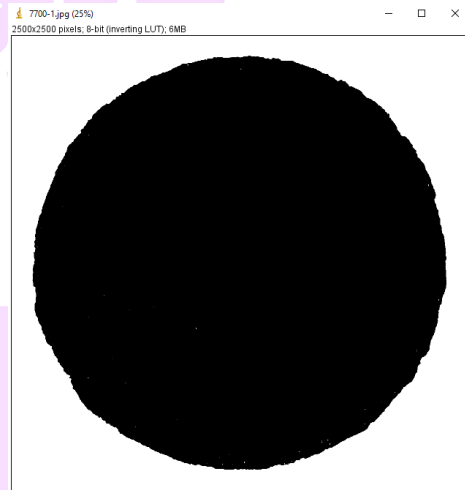


(ข)

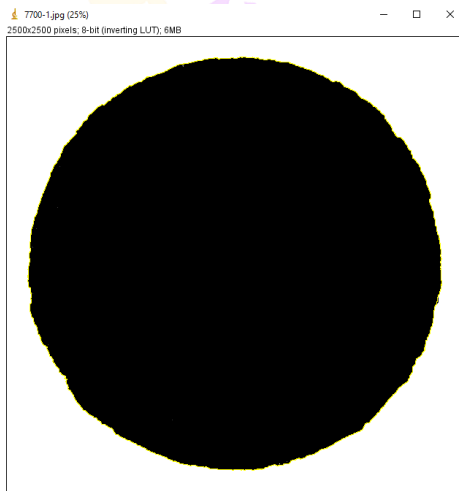
ภาพ 67 การตั้งค่าสเกลการวัดเป็นหน่วย เซนติเมตร ในโปรแกรม ImageJ



(ก)



(ข)

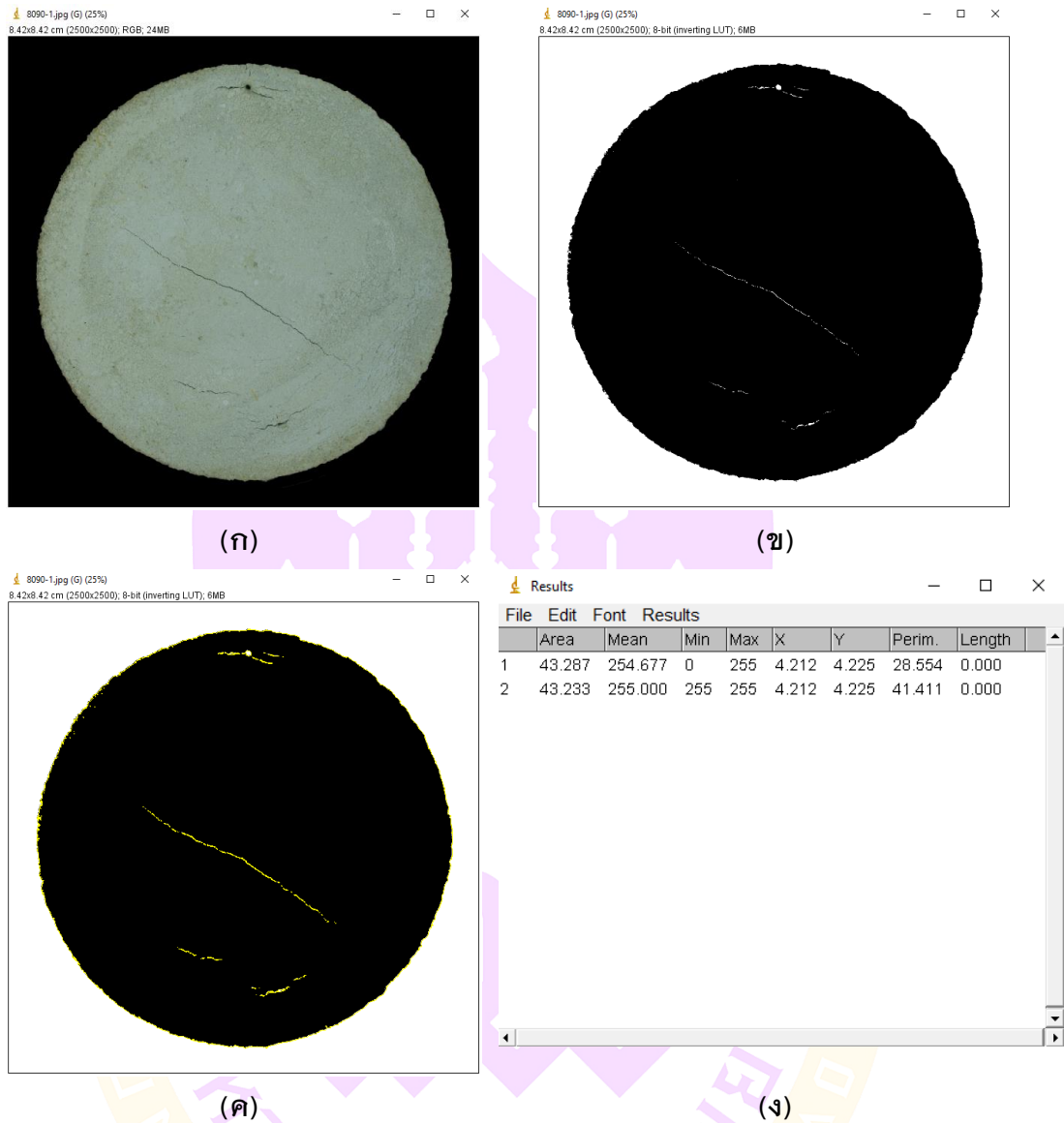


(ค)

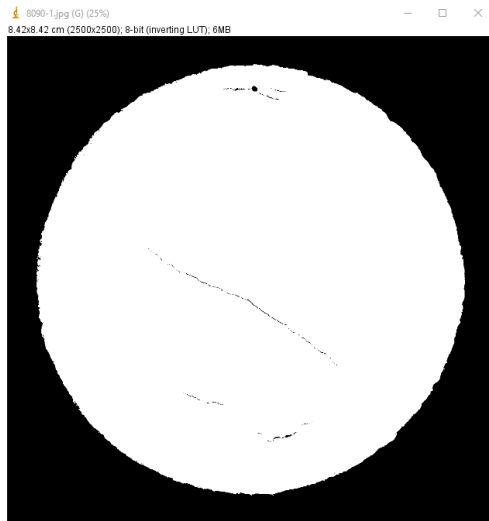
File	Area	Mean	Min	Max	X	Y	Perim.
1	45.645	254.987	0	255	4.208	4.179	26.688

(ง)

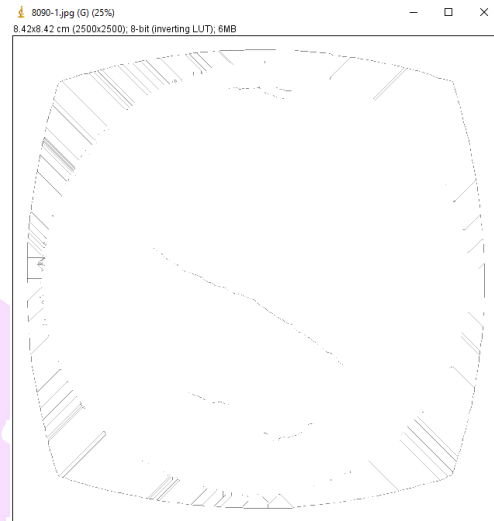
ภาพ 68 การวัดพื้นที่ตัวอย่างดินเริ่มแรก



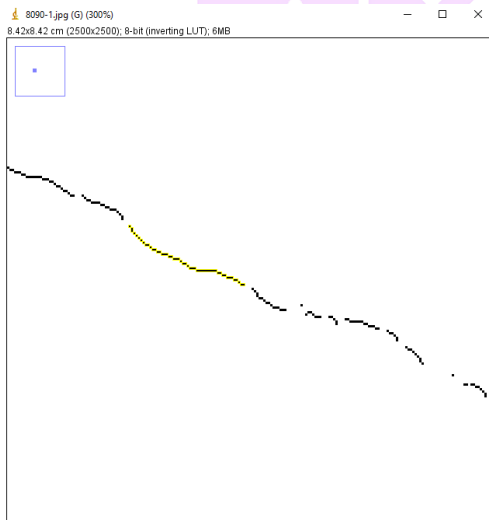
ภาพ 69 การวัดพื้นที่ตัวอย่างดินที่ลดลง ( $A_r$ ) และพื้นที่รอยแตกรวมกับพื้นที่ตัวอย่างดินที่ลดลง ( $A_r^*$ )



(ก)



(ข)



(ค)

File	Area	Mean	Min	Max	X	Y	Perim.	Length
1	0.002	126.656	0	255	0	0	0.394	0.394

(ง)

ภาพ 70 การวัดความยาวรอยแตก ( $L_c$ )

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้

##### 1. ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ

การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ โดยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ มาตรฐาน ASTM D 854 จากการทดสอบพบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีค่าความถ่วงจำเพาะ ( $G_s$ ) เท่ากับ 2.64 ซึ่งได้ค่าที่ใกล้เคียงกับดินเหนียวธรรมชาติในกรุงเทพมหานคร

##### 2. ผลการทดสอบขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก

การทดสอบการทดสอบขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก (Atterberg's limit and indices test) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพได้นำตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างดินในสนามมาทำการทดสอบจากการทดสอบพบว่า ค่าขีดจำกัดเหลว (liquid limit, LL) เท่ากับ 77.80% ขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit, PL) เท่ากับ 35.78% ขีดจำกัดหดตัว (shrinkage Limit, SL) เท่ากับ 16% ค่าดัชนีพลาสติก (plasticity index, PI) เท่ากับ 42.02% และมีค่าดัชนีเหลว (liquidity index) เท่ากับ 0.63

##### 3. ผลการทดสอบหาขนาดเม็ดดิน

การทดสอบหาขนาดเม็ดดิน (grain size analysis test) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ ใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรงแบบล่าง และวิธีตกตะกอนด้วยไฮโดรมิเตอร์ จากการทดสอบพบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีปริมาณดินผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 mm) เท่ากับ 100% เบอร์ 10 (2 mm) เท่ากับ 99.95% เบอร์ 40 (0.425 mm) เท่ากับ 79.27% และเบอร์ 200 (0.075 mm) เท่ากับ 56.90% จากผลการทดสอบขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก และการทดสอบหาขนาดเม็ดดินทำให้จำแนกประเภทดินตามวิธีรวม USCS (unified soil classification system) ได้เป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกซีดีสูง (high plasticity clay, CH) ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ผ่าน



#### 4. ผลการทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

การทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence, XRF) เป็นการทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุทางเคมีที่อยู่ในตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และสามารถระบุชนิดของโครงสร้างผลึกภายในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยความละเอียดของมุมในการทดสอบอยู่ที่ในช่วง 5 ถึง 80 องศา ข้อมูลปริมาณสารประกอบต่าง ๆ จากการทดสอบ XRF ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ดังแสดงในตาราง 18 จากผลการทดสอบพบว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ในงานวิจัยนี้มีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เท่ากับ 48.09% อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 16.29% และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 8.64%

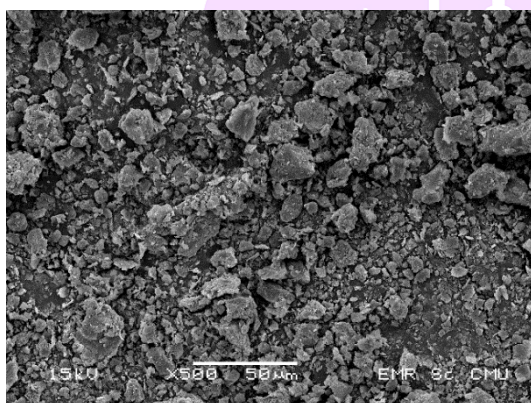
วัสดุประสานในงานวิจัยนี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย โดยผลการทดสอบ XRF ของปูนซีเมนต์พบว่า มีแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เท่ากับ 65.41% และซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เท่ากับ 20.90% ส่วนผลการทดสอบ XRF ของเถ้าลอยพบว่า มีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เท่ากับ 23.56% อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 15.35% และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 14.80% ผลรวมของ  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 53.71% ซึ่งอยู่ในช่วง 50 ถึง 70% ดังนั้นเถ้าลอยในงานวิจัยนี้จัดอยู่ในประเภท Class C ตามเกณฑ์การจำแนกของ ASTM C618 ดังตาราง 6 ในบทที่ 2

ตาราง 18 ปริมาณสารประกอบต่าง ๆ จากการทดสอบ XRF

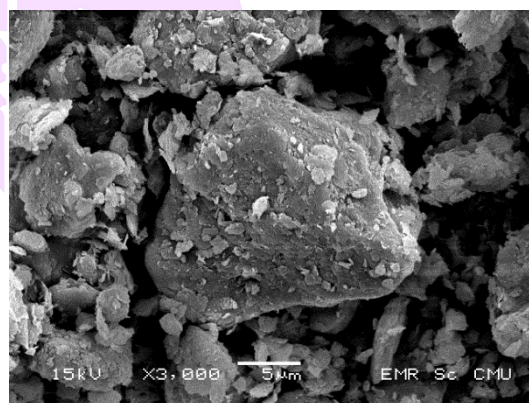
องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยมวล		
	ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย
ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, $\text{SiO}_2$ )	48.09	20.90	23.56
อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide, $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	16.29	4.76	15.35
เฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	8.64	3.41	14.80
แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, $\text{CaO}$ )	0.16	65.41	23.05
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, $\text{MgO}$ )	1.01	1.25	0.41
โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide, $\text{Na}_2\text{O}$ )	0.97	0.24	0.97
โพแทสเซียมออกไซด์ (potassium oxide, $\text{K}_2\text{O}$ )	2.97	0.35	3.42
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, $\text{TiO}_2$ )	0.81	ไม่พบ	0.50

### 5. ผลการทดสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การทดสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาดูโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า และ 3,000 เท่า จากการทดสอบพบว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวอนุภาคขรุขระ โดยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ  $1\ \mu\text{m}$  ดังแสดงภาพ 72(ก) และ 72(ข) ส่วนถ้ำลอยมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมอย่างชัดเจน ผิวอนุภาคค่อนข้างเรียบ โดยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ  $4\ \mu\text{m}$  ดังแสดงภาพ 72(ค) และ 72(ง)



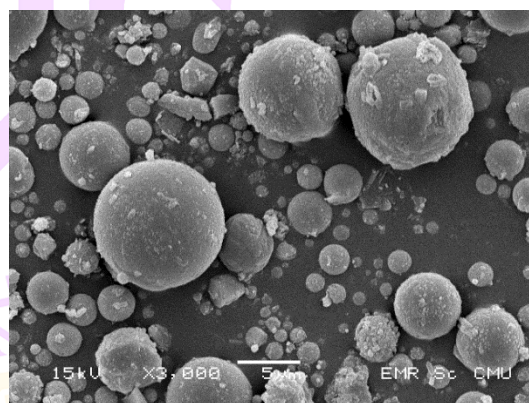
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ 72 รูปถ่าย SEM (ก) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ x500 (ข) ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ x3000 (ค) ถ้ำลอย x500 (ง) ถ้ำลอย x3000

## ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (unconfined compression test) ในงานวิจัยนี้ แบ่งการศึกษาเป็น 2 หัวข้อดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์ การปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครสำหรับใช้ในงานเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลึก (deep mixing) มีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากถึง 150 ถึง 300 kg/m<sup>3</sup> (Lai et al., 2006; Horpibulsuk et al., 2011, 2012; Jamsawang et al., 2011, 2015; Voottipruex et al., 2011) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ให้ครอบคลุมและอยู่ในช่วงดังกล่าว ดังแสดงในตาราง 19

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว จะได้ค่ากำลังรับแรงอัด (unconfined compressive strength,  $q_u$ ) และค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด (Young's modulus at 50% of strength,  $E_{50}$ ) โดยในงานวิจัยนี้มีส่วนผสมประกอบที่ด้วยดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.0 1.3 และ 1.6 อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $C/w_c$ ) เท่ากับ 0.2 0.3 และ 0.4 และทำการทดสอบที่อายุการบ่มตัว 7 และ 28 วัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับดัชนีเหลวดังแสดงในภาพ 73 จากผลการทดสอบพบว่า ที่อายุการบ่มตัว 7 วันมีค่า  $q_u$  มากสุดเท่ากับ 1579.21 kPa เป็นส่วนผสม LI1.0C/ $w_c$ 0.4 และค่า  $q_u$  น้อยสุดเท่ากับ 185.64 kPa ที่ส่วนผสม LI1.6C/ $w_c$ 0.2 จะสังเกตได้ว่า LI เท่ากับ 1.0 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า LI เท่ากับ 1.3 และ 1.6 เพราะ LI เท่ากับ 1.3 และ 1.6 มีปริมาณน้ำในมวลดินมากกว่า LI เท่ากับ 1.0 จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงลดลง นอกจากนี้ ในส่วนผสมที่ LI เท่ากันพบว่า  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 เพราะ  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 เมื่อพิจารณาอายุการบ่มพบว่า ตัวอย่างที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วันพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำ โดยมีค่า  $q_u$  มากสุดเท่ากับ 2572.70 kPa เป็นส่วนผสม LI1.0C/ $w_c$ 0.4 และค่า  $q_u$  น้อยสุดเท่ากับ 350.17 kPa เป็นส่วนผสม LI1.6C/ $w_c$ 0.2 ซึ่งมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัดเหมือนกับช่วงอายุการบ่มตัว 7 วัน

โดยสรุปแล้วเมื่อดัชนีเหลว (LI) มากขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง เพราะดัชนีเหลวมากทำให้มีปริมาณน้ำในมวลดินมากจึงทำให้ค่ากำลังรับแรงลดลงที่อายุการบ่มตัวเดียวกัน ซึ่งในส่วนผสมที่มีค่า LI เท่ากันการเพิ่มอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์

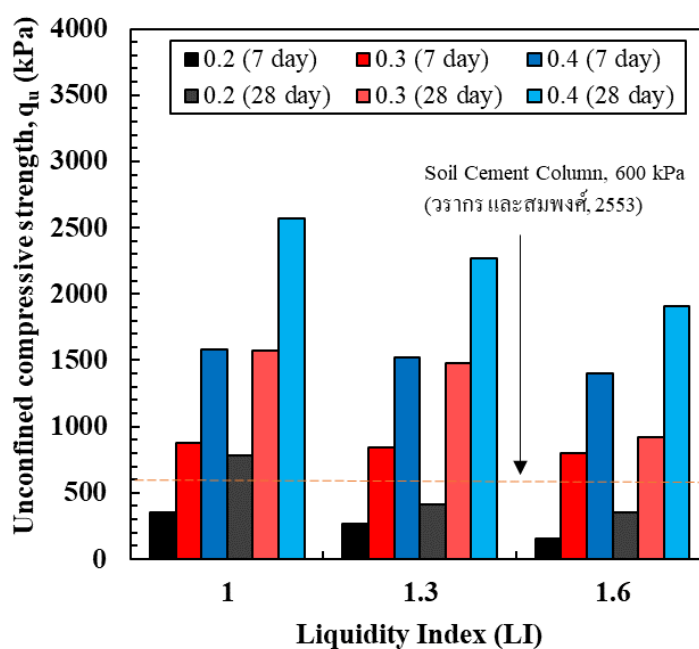
น้ำในมวลดิน ( $C/w_c$ ) ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นทำให้ตัวอย่างดินแข็งขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบตรงกับงานวิจัยของ นพพันธ์ พรรณขาม (2556) เมื่อเพิ่มอายุการบ่มตัวจึงทำให้แต่ละส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นทุกส่วนผสมเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำ ซึ่งมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัดเหมือนกัน เมื่อเพิ่มอายุการบ่มตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับดัชนีเหลวดังแสดงในภาพ 74 จากผลการทดสอบพบว่า ในอายุการบ่มตัว 7 วันมีค่า  $E_{50}$  มากสุดเท่ากับ 207.05 MPa เป็นส่วนผสม LI1.0C/ $w_c$ 0.4 และค่า  $E_{50}$  น้อยสุดเท่ากับ 26.45 MPa เป็นส่วนผสม LI1.6C/ $w_c$ 0.2 จะสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัด เมื่อครบอายุการบ่มตัวที่ 28 วันพบว่า ค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำ โดยมีค่า  $E_{50}$  มากสุดเท่ากับ 481.03 MPa เป็นส่วนผสม LI1.0C/ $w_c$ 0.4 และค่า  $E_{50}$  น้อยสุดเท่ากับ 30.72 MPa เป็นส่วนผสม LI1.6C/ $w_c$ 0.2 ซึ่งมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดเหมือนกับช่วงอายุการบ่มตัว 7 วัน

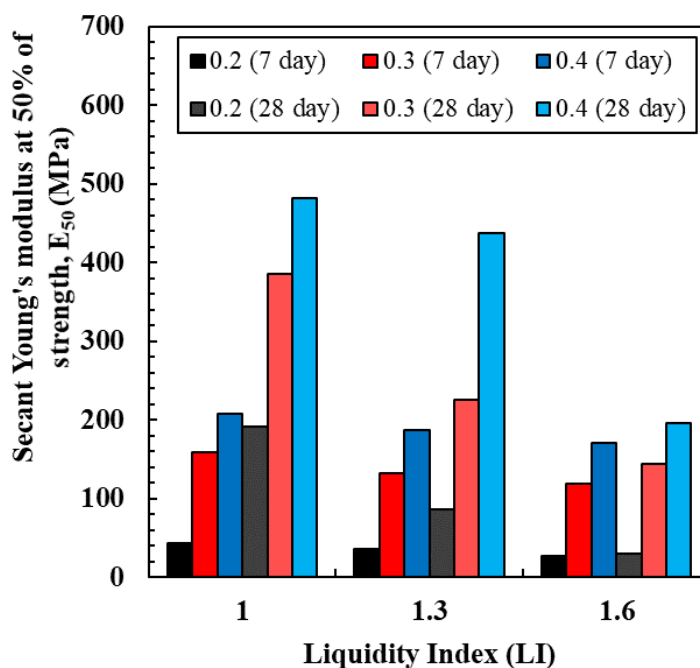
หากนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลึก (deep cement mixing) จะสรุปส่วนผสมและค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ดังแสดงในตาราง 20 โดยข้อกำหนดการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลึก (deep cement mixing) (วรากร ไผ่เรียง และสมพงศ์ โรจน์กั้งสดาล, 2553) ได้กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 28 วันไม่ต่ำกว่า 600 kPa สำหรับการก่อสร้างรองรับบริเวณถนน และบนคันคลอง สำหรับส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $C/w_c$ ) เท่ากับ 0.2 พบว่ามีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ถึงค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานคือ 600 kPa ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $C/w_c$ ) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ไปศึกษาคุณสมบัติต่อในหัวข้อถัดไป เกี่ยวกับการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยปริมาณถ้ำลอย เพื่อศึกษาการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์

ตาราง 19 ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรดิน 1 m<sup>3</sup> ที่ใช้ในงานวิจัย

ส่วนผสม	ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรดิน (kg/m <sup>3</sup> )		
	0.2	0.3	0.4
C/w <sub>c</sub>	0.2	0.3	0.4
LI = 1.0	158	237	316
LI = 1.3	184	275	367
LI = 1.6	209	314	419



ภาพ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับดัชนีเหลวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์



ภาพ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับ  
ดัชนีเหลวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์

ตาราง 20 สรุปค่า  $q_u$  เปรียบเทียบกับเกณฑ์การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์

ส่วนผสม		ค่า $q_u$ (kPa)	เกณฑ์การออกแบบ
ดัชนีเหลว, LI	อัตราส่วน $C/w_c$		
1.0	0.2	778.43	ผ่าน
	0.3	1570.02	ผ่าน
	0.4	2572.70	ผ่าน
1.3	0.2	412.39	ไม่ผ่าน
	0.3	1478.88	ผ่าน
	0.4	2265.16	ผ่าน
1.6	0.2	350.17	ไม่ผ่าน
	0.3	923.18	ผ่าน
	0.4	1904.27	ผ่าน

2. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย การปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ทำให้การเกิดพัฒนากำลังรับแรงอัดเนื่องจากการทำปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยาดังนี้ เริ่มจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ในปูนซีเมนต์ ดังสมการที่ 11 เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำทำให้เกิดการแยกตัวของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งซิลิเกตไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ในปูนซีเมนต์ถูกละลายด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C<sub>3</sub>A) ที่ความเข้มข้นสูง ทำให้เกิดผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เจลของ CSH และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ซึ่งเจล CSH เป็นผลผลิตหลักของปูนซีเมนต์ ในขณะที่ Ca(OH)<sub>2</sub> เป็นผลผลิตรองจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงระยะเวลา 7 ถึง 28 วัน CSH ทำให้กำลังเพิ่มขึ้นอย่างมาก

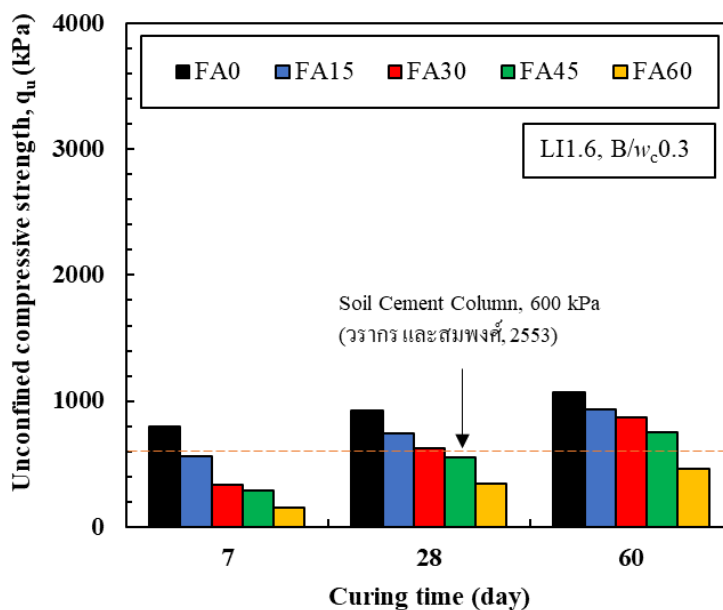
การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic) ในเถ้าลอย ดังแสดงสมการที่ 12 ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกถูกพัฒนาขึ้นเนื่องจาก SiO<sub>2</sub> ซึ่งเป็นสารประกอบของเถ้าลอย เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)<sub>2</sub> ที่เป็นผลผลิตรองจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ค่อย ๆ เกิดการสร้างผลผลิตของปอซโซลานิก คือ เกิดเจล CSH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ในช่วงระยะเวลา 60 ถึง 120 วัน ทำให้กำลังเพิ่มขึ้นจากเดิม (Pitthaya et al., 2020)



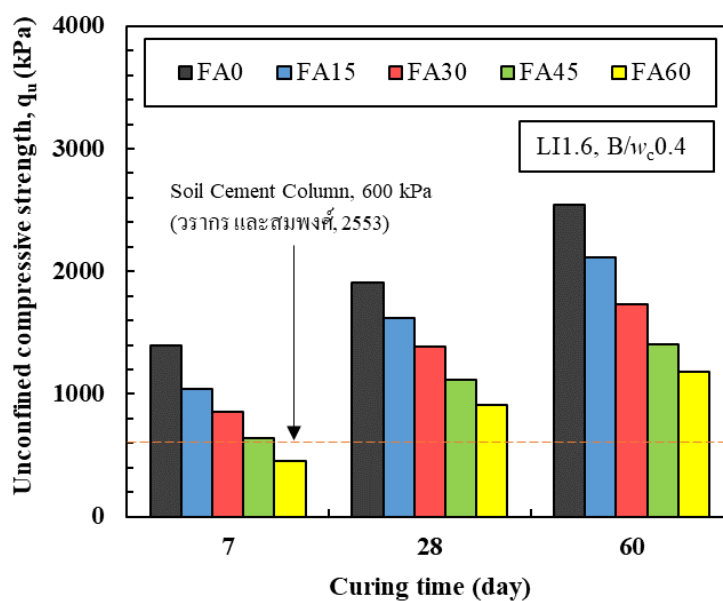
การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่มีส่วนผสมดัชนีเหลว (LI) 1.6 อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์วัสดุผสมต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน (B/w<sub>c</sub>) ระหว่าง 0.3 กับ 0.4 และแปรผันตามเปอร์เซ็นต์เถ้าลอย (FA) แทนที่ปูนซีเมนต์ 0 15 30 45 และ 60% โดยน้ำหนัก สาเหตุที่เลือกใช้ค่าดัชนีเหลว 1.6 เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปริมาณน้ำในมวลดินเป็นตัวกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ หากกำหนดปริมาณน้ำสูงทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์สูงตาม ซึ่ง LI เท่ากับ 1.6 มีปริมาณน้ำสูงที่สุด โดยการทดสอบเริ่มจากนำตัวอย่างที่ครบอายุการบ่มตัวไปทดสอบกับเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว โดยผลการทดสอบแสดงในภาพ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่ม พบว่า

ในส่วนผสมที่มีดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.6 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ดังแสดงในภาพ 75(ก) ที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA0 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 800.16 kPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA60 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุดเท่ากับ 150.13 kPa จะสังเกตได้ว่า FA เท่ากับ 0% มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า FA เท่ากับ 60% เพราะ FA เท่ากับ 60% มีปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่า FA เท่ากับ 0% ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง สำหรับอายุการบ่ม 28 วันพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA0 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 923.08 kPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA60 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุดเท่ากับ 345.36 kPa ซึ่งมีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัด เหมือนกับอายุการบ่มที่ 7 วัน ส่วนอายุการบ่มตัวที่ 60 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ โดยส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA0 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 1070.62 kPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA60 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุดเท่ากับ 460.93 kPa ซึ่งมีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดเหมือนกับอายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน

ส่วนผสมที่มีดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.6 กับ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 ดังแสดงในภาพ 75(ข) ที่อายุการบ่ม 7 วันส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA0 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 1,397.85 kPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA60 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุดเท่ากับ 455.85 kPa จะสังเกตได้ว่า FA เท่ากับ 0% มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า FA เท่ากับ 60% เพราะ FA เท่ากับ 60% มีปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่า FA เท่ากับ 0% ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง สำหรับอายุการบ่ม 28 วันพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA0 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 1,904.72 kPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA60 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุดเท่ากับ 912.50 kPa ซึ่งมีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัด เหมือนกับอายุการบ่มที่ 7 วัน และสุดท้ายที่อายุการบ่มตัวที่ 60 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ โดยส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA0 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 2,540.56 kPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA60 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยสุดเท่ากับ 1,183.63 kPa ซึ่งมีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดเหมือนกับอายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน



(ก)



(ข)

ภาพ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มตัว

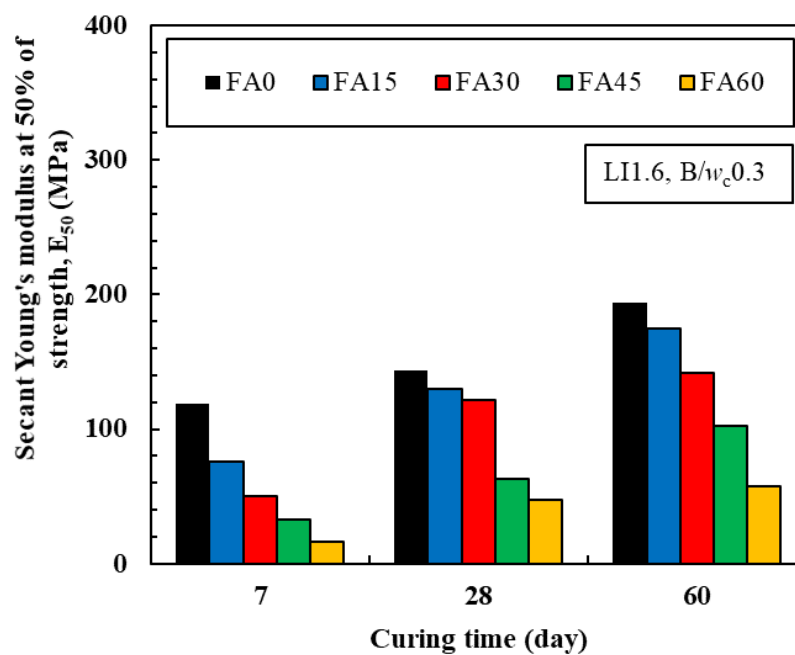
(ก) ส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 (ข) ส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.4

โดยภาพรวมจะสังเกตเห็นได้ว่าส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีกำลังรับแรงอัดมากซึ่งเป็นส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอย และส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีกำลังรับแรงอัดน้อยซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยมากที่สุด โดยได้ผลแบบเดียวกันทุกอายุการบ่มตัว แสดงให้เห็น

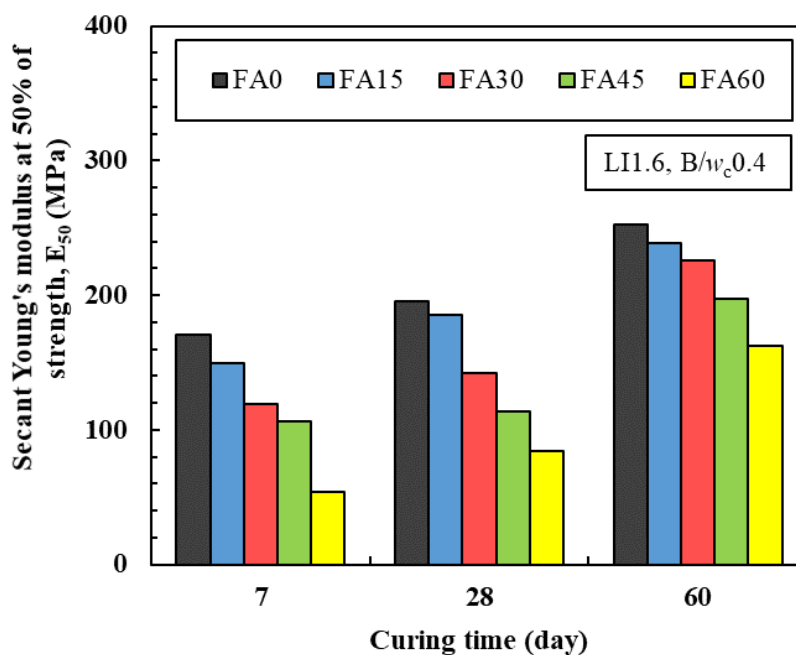
ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้กำลังรับอัดแกนเดียวลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของนพพันธ์ พรรณขาม (2556) ที่กล่าวว่า การเพิ่มเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เข้าไปไม่สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างได้ เพราะสารประกอบที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพียงพออยู่แล้วในดินเหนียว ค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตัวของตัวอย่าง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัด

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยัง 50% ของน้ำหนักสูงสุด ( $E_{50}$ ) กับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอย ดังแสดงในภาพ 76 พบว่า ส่วนผสมที่มีดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.6 กับ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ดังแสดงในภาพ 76(ก) ที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA0 มีค่า  $E_{50}$  มากสุดเท่ากับ 118.74 MPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA60 มีค่า  $E_{50}$  น้อยสุดเท่ากับ 16.59 MPa จะสังเกตได้ว่า FA เท่ากับ 0% มี  $E_{50}$  มากกว่า FA เท่ากับ 60% เพราะ FA เท่ากับ 60% มีปริมาณเถ้าลอยมากกว่า FA เท่ากับ 0% ทำให้ค่า  $E_{50}$  ลดลง สำหรับที่อายุการบ่มที่ 28 วันพบว่า ค่า  $E_{50}$  จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดย ส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA0 มีค่า  $E_{50}$  มากสุดเท่ากับ 143.79 MPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA60 มี  $E_{50}$  น้อยสุดเท่ากับ 47.71 MPa ซึ่งมีแนวโน้มของค่า  $E_{50}$  เหมือนกับอายุการบ่มที่ 7 วัน และสุดท้ายอายุการบ่มตัวที่ 60 วัน พบว่าค่า  $E_{50}$  จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ โดยส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA0 มีค่า  $E_{50}$  มากสุดเท่ากับ 193.92 MPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.3FA60 มีค่า  $E_{50}$  น้อยสุดเท่ากับ 54.94 MPa ซึ่งมีแนวโน้มของค่า  $E_{50}$  เหมือนกับอายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน

ส่วนผสมที่มีดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.6 กับ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 ดังแสดงในภาพ 76(ข) ที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA0 มีค่า  $E_{50}$  มากสุดเท่ากับ 171.03 MPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA60 มีค่า  $E_{50}$  น้อยสุดเท่ากับ 53.95 MPa จะสังเกตได้ว่า FA เท่ากับ 0% มีค่า  $E_{50}$  มากกว่า FA เท่ากับ 60% เพราะ FA เท่ากับ 60% มีปริมาณเถ้าลอยมากกว่า FA เท่ากับ 0% ทำให้ค่า  $E_{50}$  ลดลง สำหรับอายุการบ่ม 28 วันพบว่า ค่า  $E_{50}$  จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดย ส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA0 มีค่า  $E_{50}$  มากสุดเท่ากับ 195.76 MPa และส่วนผสม LI1.6B/ $w_c$ 0.4FA60 มีค่า  $E_{50}$  น้อยสุดเท่ากับ 84.61 MPa ซึ่งมีแนวโน้มของค่า  $E_{50}$  เหมือนกับอายุการบ่มที่ 7 วัน และสุดท้ายที่ อายุการบ่มตัวที่ 60 วัน



(ก)



(ข)

ภาพ 76 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของยัง 50 % ของน้ำหนักสูงสุดกับอายุการบ่มตัว (ก) ส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 (ข) ส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.4

พบว่าค่า  $E_{50}$  จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ โดยส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.4FA0 มีค่า  $E_{50}$  มากสุดเท่ากับ 252.82 MPa และ

ส่วนผสม LI.6B/w<sub>c</sub>0.4FA60 มีค่า E<sub>50</sub> น้อยสุดเท่ากับ 162.66 MPa ซึ่งแนวโน้มของค่า E<sub>50</sub> เหมือนกับอายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน โดยภาพรวม ค่า E<sub>50</sub> มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดีย (q<sub>u</sub>) ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของ นพพันธ์ พรรณงาม (2556)

นอกจากนี้จากผลการทดสอบการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยที่มากกว่า 10% ขึ้นไปยังทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียลดลงซึ่งผลตรงกับงานวิจัยของ Yoobanpot et al. (2020) และเมื่อเทียบส่วนผสมที่มี B/w<sub>c</sub> เท่ากับ 0.4 กับ 0.3 พบว่า ส่วนผสมที่มี B/w<sub>c</sub> เท่ากับ 0.4 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่มากกว่า 0.3 เนื่องจากส่วนผสมที่มี B/w<sub>c</sub> เท่ากับ 0.4 มีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 0.3 ในปริมาณน้ำในมวลที่เท่ากัน ทำให้ตัวอย่างแข็งกว่า B/w<sub>c</sub> เท่ากับ 0.3 เมื่อเพิ่มอายุการบ่มตัวทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า

งานวิจัยนี้ยังได้สรุปส่วนผสมและค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ที่ผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับรองรับบริเวณถนนและบนคันคลองที่อายุ 28 วันไม่ต่ำกว่า 600 kPa ดังแสดงในตาราง 21 ซึ่งส่วนผสม LI.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 LI.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 และ LI.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30 ที่ผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ แต่มีปริมาณของปูนซีเมนต์น้อยกว่าส่วนผสมที่มี B/w<sub>c</sub> เท่ากับ 0.4 จึงได้นำทั้ง 3 ส่วนผสมนี้ไปทดสอบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีแบบกระจายพลังงาน(scanning electron microscope, EDS) และการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (energy dispersive spectrometer, SEM) ต่อไป

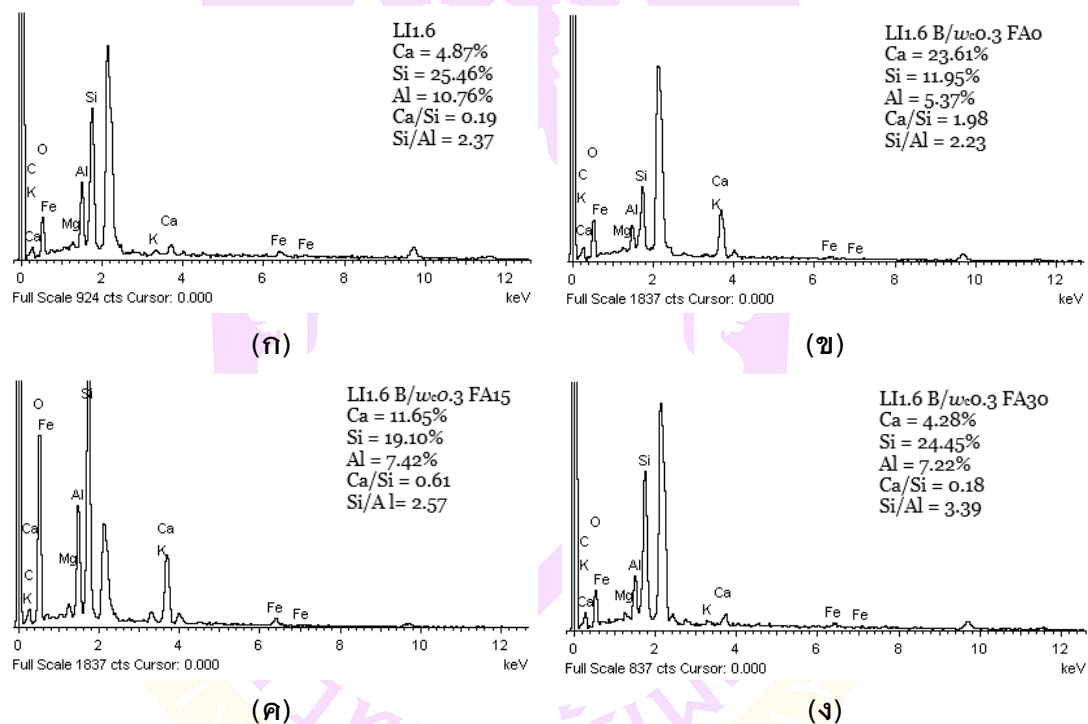
ตาราง 21 ค่า q<sub>u</sub> เปรียบเทียบกับเกณฑ์การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์

ดัชนีเหลว, LI	ส่วนผสม		ค่า q <sub>u</sub> (kPa)	เกณฑ์การออกแบบ
	อัตราส่วน B/w <sub>c</sub>	เถ้าลอย, FA (%)		
1.6	0.3	0	923.18	ผ่าน
		15	738.53	ผ่าน
		30	627.17	ผ่าน
		45	555.85	ไม่ผ่าน
		60	345.36	ไม่ผ่าน
	0.4	0	1904.27	ผ่าน
		15	1620.86	ผ่าน
		30	1388.49	ผ่าน
		45	1114.91	ผ่าน
		60	912.50	ผ่าน

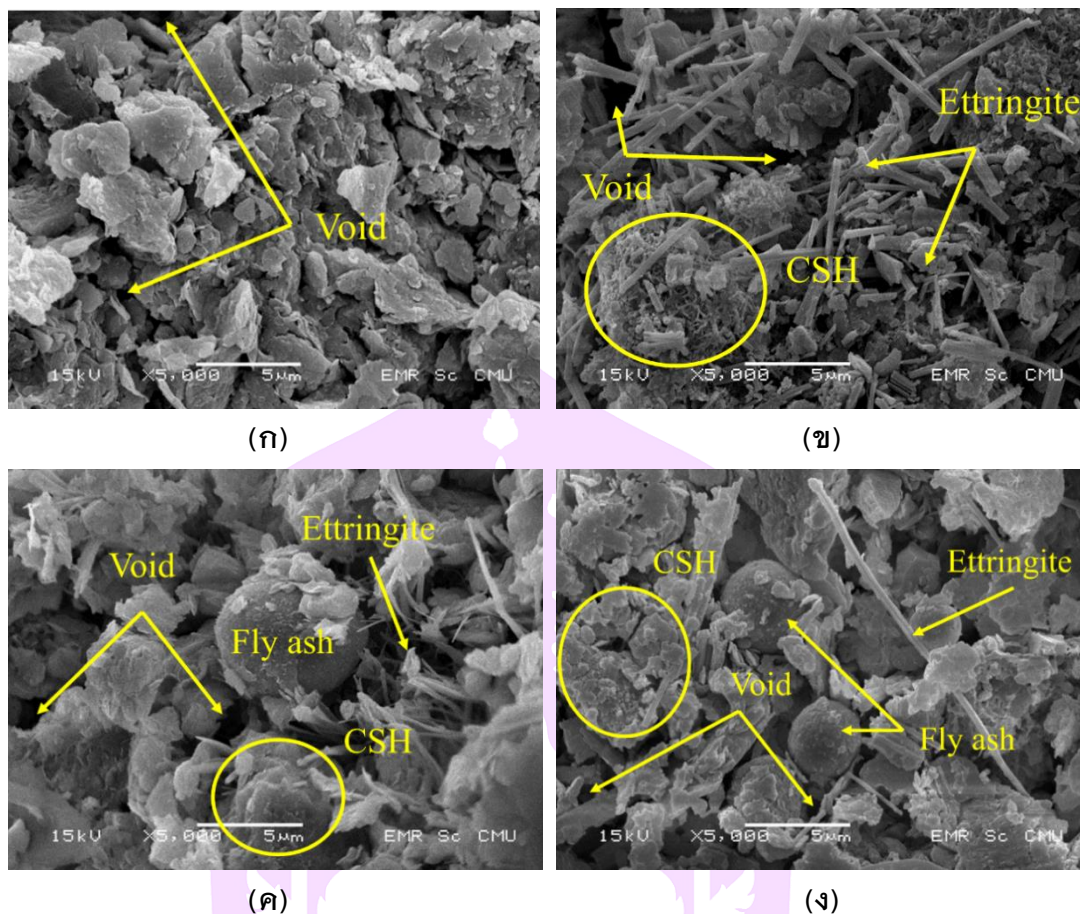
สำหรับผลการทดสอบ EDS และ SEM ได้ทำการทดสอบเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 และ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังแสดงในภาพ 77 และตารางสรุปปริมาณธาตุต่าง ๆ ในส่วนผสมดังกล่าวแสดงดังตาราง 22 จากผลการทดสอบ EDS พบว่า ส่วนผสมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ (LI1.6) มีค่า Ca/Si เท่ากับ 0.19 และค่า Si/Al เท่ากับ 2.37 ดังแสดงในภาพ 77(ก) เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 มีค่า Ca/Si เท่ากับ 1.96 และค่า Si/Al เท่ากับ 2.23 ดังแสดงในภาพ 77 (ข) จะเห็นได้ว่าค่า Ca/Si เพิ่มขึ้นและค่า Si/Al ลดลงเมื่อเทียบกับดินเหนียวที่ยังไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินเพิ่มขึ้นจากการเกิดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อเพิ่มส่วนผสมกับเถ้าลอย 15% แทนที่ปูนซีเมนต์ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 มีค่า Ca/Si เท่ากับ 0.61 และค่า Si/Al เท่ากับ 2.57 ดังแสดงในภาพ 77(ค) จะเห็นได้ว่าค่า Ca/Si ลดลงและค่า Si/Al เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 เพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเนื่องจากการแทนที่เถ้าลอย 15% ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเพิ่มเถ้าลอยเป็น 30% LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30 มีค่า Ca/Si เท่ากับ 0.18 และค่า Si/Al เท่ากับ 3.39 ดังแสดงในภาพ 77(ง) จะเห็นได้ว่าค่า Ca/Si ลดลงและค่า Si/Al เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 เพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเนื่องจากการแทนที่เถ้าลอย 30% ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงซึ่งน้อยกว่า LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบ SEM พบว่า ส่วนผสม LI1.6 ที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ดังที่แสดงในภาพ 78(ก) มีลักษณะของอนุภาคดินไม่เป็นรูปร่าง และมีช่องว่างจำนวนมาก เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 ดังแสดงในภาพ 78(ข) พบว่ามี CSH กระจายตัวอยู่ และ เอททริงไกต์ (Ettringite, Et) ที่มีรูปร่างเป็นแท่งเข็มกระจายอยู่เต็มพื้นผิวของอนุภาคดิน ส่งผลให้อนุภาคดินแน่นขึ้น จำนวนช่องว่างลดลง ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาผสมกับเถ้าลอย 15% แทนที่ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 ดังแสดงในภาพ 78(ค) พบว่ามี CSH เอททริงไกต์ (Et) และเถ้าลอย (Fly ash, FA) กระจายตัวอยู่บนอนุภาคดิน จะสังเกตได้ว่าส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 ได้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 เพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นจาก 15% ทำให้ตัวเอททริงไกต์ (Et) มีจำนวนลดลงส่งผลให้ค่าเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ตัวเอททริงไกต์ (Et) มีจำนวนลดลงเนื่องจากการแทนที่เถ้าลอย

15% แต่จำนวนช่องว่างลดลงทำให้อุณหภูมิดินแน่นพอ ๆ กับ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 เมื่อเพิ่มเถ้าลอยเป็น 30% เป็นส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30 ดังแสดงในภาพ 78(ง) พบว่ามี CSH เอททริงโกด์ (Et) และเถ้าลอย (Fly ash, FA) กระจายตัวอยู่บนอนุภาคดิน จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเทียบกับ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 เพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเนื่องจากการแทนที่เถ้าลอย 30% ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงซึ่งน้อยกว่า LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 แต่จำนวนช่องว่างลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทำให้อุณหภูมิดินแน่นขึ้นกว่าเถ้าลอย 15% ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์สำหรับรองรับบริเวณถนนและบนคันคลองที่อายุ 28 วัน



ภาพ 77 ผลการทดสอบ EDS ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่อายุการบ่มตัว 28 วัน (ก) LI1.6 (ข) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 (ค) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 (ง) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30



ภาพ 78 รูปถ่าย SEM (ก) LI1.6 28 วัน x5000 (ข) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 28 วัน x5000  
(ค) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 28 วัน x5000 (ง) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30 28 วัน x5000

ตาราง 22 สรุปค่า Ca/Si และ Si/Al ของตัวอย่าง

ส่วนผสม	CaO	Si	Al	Ca/Si	Si/Al
LI1.6	4.87	25.46	10.76	0.19	2.37
LI1.6B/w <sub>c</sub> 0.3FA0	23.61	11.95	5.37	1.98	2.23
LI1.6B/w <sub>c</sub> 0.3FA15	11.65	19.10	7.42	0.61	2.57
LI1.6B/w <sub>c</sub> 0.3FA30	4.28	24.45	7.22	0.18	3.39

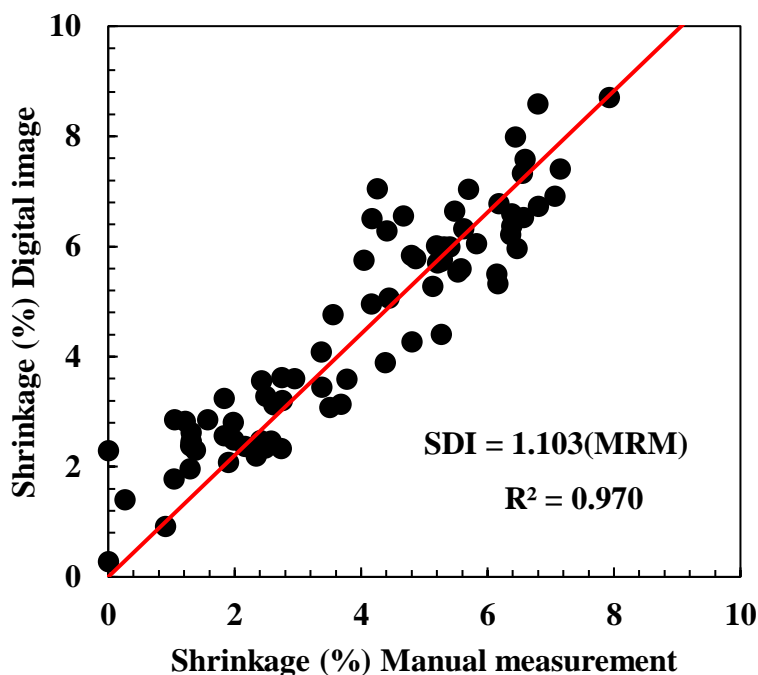
### ผลการทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย

การทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย (shrinkage test by image processing) ของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย มีผลดังนี้

### 1. การสอบเทียบเครื่องถ่ายภาพดิน (calibration soil studio)

การประดิษฐ์เครื่องมือในการทดสอบหดตัวด้วยวิธีภาพถ่ายจำเป็นต้องทำการสอบเทียบเครื่องถ่ายภาพดิน (soil studio) เพื่อเป็นการตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องมืองดงกล่าวที่เป็นวิธีภาพถ่าย (shrinkage digital image, SDI) เทียบการทดสอบการหดตัวแบบเดิมที่ใช้วิธีการวัดด้วยปรอท (mercury replacement method, MRM) ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่ายกับการหดตัวด้วยวิธีวัดมือ ดังแสดงในภาพ 79 ผลการทดสอบพบว่า ค่า SDI มีค่ามากกว่า SMM ประมาณ 10% ซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.97 และได้สมการเส้นตรง ดังสมการที่ 13

$$SDI = 1.103(MRM) \quad (13)$$



ภาพ 79 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่ายกับการหดตัวที่ใช้การวัดด้วยปรอท

### 2. ปัจจัยความหนาแน่นรอยแตก

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความหนาแน่นรอยแตก (crack density factor, CDF) หรือเปอร์เซ็นต์การหดตัวในส่วนผสมที่มีดัชนีเหลว (LI) 1.3 กับ 1.6 อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์วัสดุผสมต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน (B/w<sub>c</sub>) ระหว่าง 0.3 กับ 0.4 และแปรผันตาม

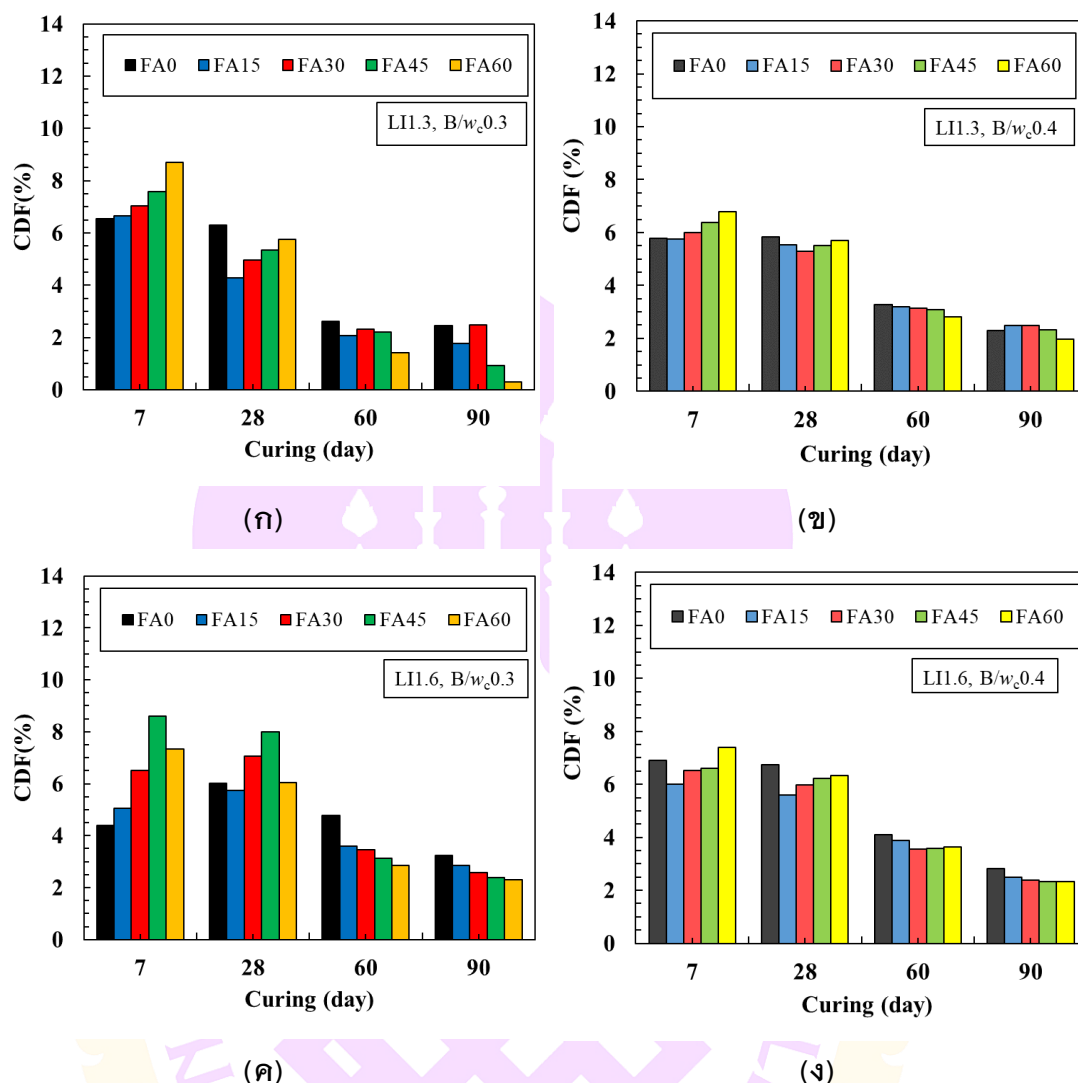
เถ้าลอย (FA) ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ 0 15 30 45 และ 60% สาเหตุที่พิจารณา LI เท่ากับ 1.3 และ 1.6 เพราะในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณน้ำในมวลดินเป็นตัวกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งในงานเสาะเข็มดินซีเมนต์มีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูงจึงต้องใช้ LI สูงด้วย ซึ่งอาจทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้นเช่นกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการเปรียบเทียบค่า LI เท่ากับ 1.3 และ 1.6 เพื่อศึกษาการหดตัวในตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำสูง จากผลการทดสอบในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ดังแสดงในภาพ 80(ก) พบว่า ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วัน ส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีค่า CDF สูง ซึ่งมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 8.71% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 6.56% สำหรับที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วันพบว่า ค่า CDF จะลดลงประมาณ 2% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 6.28% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 15% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 4.27% ส่วนที่อายุการบ่มตัว 60 วันพบว่า ค่า CDF ลดลงอย่างเห็นได้ชัดประมาณ 3% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 2.62% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 1.40% จนครบอายุการบ่มตัวที่ 90 วัน พบว่า ค่า CDF ลดลงเล็กน้อยและ/หรือคงที่ ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 2.44% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 0.29% ซึ่งอาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอดโซลานิกของเถ้าลอย โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60% มีค่าการหดตัวตัวต่ำสุด

ส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 ดังแสดงในภาพ 80(ข) พบว่า มีแนวโน้มการหดตัวที่ลดลงเหมือนกับส่วนผสม LI เท่ากับ 1.3 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 โดยที่อายุการบ่มตัว 7 วันพบว่า ส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 6.78% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 15% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 5.76% ซึ่งต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ประมาณ 1 ถึง 2% สำหรับที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วันพบว่า ค่า CDF จะลดลงประมาณ 0.4% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 5.84% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 30% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 5.28% ส่วนที่อายุการบ่มตัวที่ 60 วันพบว่า ค่า CDF ลดลงอย่างเห็นได้ชัดประมาณ 2% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 3.28% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 2.81% จนครบอายุการบ่มตัวที่ 90 วัน ค่า CDF ลดลง 1% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 15% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 2.49% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 1.96% โดยได้ค่า CDF พอ ๆ กับส่วนผสมที่มี LI

เท่ากับ 1.3 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 รวมถึงส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60% มีการหัดตัวตัวต่ำสุด ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยสามารถช่วยลดการหัดตัวได้

ส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ดังแสดงในภาพ 80(ค) พบว่า ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วัน ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 45% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 8.59% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0 % มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 4.40% ซึ่งต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 สำหรับที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วันพบว่า ค่า CDF จะลดลงประมาณ 0.3% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 45% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 7.99% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 15% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 5.74% ส่วนอายุการบ่มตัว 60 วันพบว่า ค่า CDF ลดลงอย่างเห็นได้ชัดประมาณ 3% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 4.77% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 2.86% จนครบอายุการบ่มตัวที่ 90 วันพบว่า ค่า CDF ลดลงเล็กน้อยและ/หรือคงที่ ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 3.24% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 2.29% ซึ่งอาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอดโซลานิกของเถ้าลอย โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60% มีค่าการหัดตัวตัวต่ำสุด ซึ่งมีการหัดตัวที่สูงกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 ประมาณ 1%

สุดท้ายในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 ดังแสดงในภาพ 80(ง) พบว่า ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วัน ส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 7.40% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 15% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 6.00% ซึ่งต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ประมาณ 1% สำหรับที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วันพบว่าค่า CDF จะลดลงเล็กน้อยประมาณ 1% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 6.73% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 15% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 5.59% ส่วนที่อายุการบ่มตัว 60 วันพบว่า ค่า CDF ลดลงอย่างเห็นได้ชัดประมาณ 2% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% มีค่า CDF มากที่สุดเท่ากับ 4.09% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 30% มีค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 3.56% จนครบอายุการบ่มตัวที่ 90 วันพบว่าค่า CDF ลดลงประมาณ 1% ซึ่งส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 0% ค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.82% ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มี FA เท่ากับ 60% ค่า CDF น้อยที่สุดเท่ากับ 2.33% โดยที่ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย (FA) 60% มีค่าการหัดตัวตัวต่ำสุด ซึ่งมีการหัดตัวพอ ๆ กับส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3



ภาพ 80 ความสัมพันธ์ค่า CDF หรือเปอร์เซ็นต์การหดตัวกับอายุการบ่มตัว

(ก) LI1.3B/w<sub>c</sub>0.3 (ข) LI1.3B/w<sub>c</sub>0.4 (ค) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 และ (ง) LI1.6B/w<sub>c</sub>0.4

โดยสรุปแล้ว การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยสามารถช่วยลดการหดตัวได้ในอายุการบ่มตัวที่เพิ่มขึ้นได้ ดังหัวข้อกลไกการลดการหดตัว ในบทที่ 2 ที่กล่าวว่ากลไกการทำงานของตัวนำที่ลดการหดตัว (shrinkage-reducing agent) สามารถลดแรงดึงผิวของน้ำในโพรงแคพิลลารี (capillary pores) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างชั้นของซีเมนต์เจล (cement gel) กับน้ำส่วนเกิน เมื่อตัวนำการลดการหดตัวถูกเพิ่มลงในซีเมนต์เจล ทำให้เกิดการดูดอนุภาคความชื้นตามพื้นผิวของอนุภาคน้ำเจล (gel water) เกิดการสร้างแรงเพื่อดึงดูดอนุภาคพื้นผิวของน้ำไปยังตัวนำการลดการหดตัว และแรงดึงน้ำออกจากโพรงแคพิลลารีจะลดลง ส่งผลโดยรวมทำให้แรงดึงผิวลดลง

เมื่อการระเหยของน้ำส่วนเกินสิ้นสุดจึงทำให้การหดตัวลดลง (Cho et al., 2006) ซึ่งส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ 60% จะมีค่าการหดตัวที่ต่ำที่สุด เป็นเพราะการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคดินที่เกิดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์โดยเถ้าลอย อนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยช่วยลดขนาดของช่องว่างในมวลดินทำให้ลดอัตราการหดตัวตามขนาดของช่องว่างที่ลดลงไปด้วย (Chompoorat and Likitlersuang, 2016) ส่วน LI เท่ากับ 1.3 มีการหดตัวน้อยกว่า 1.6 อยู่เล็กน้อย ซึ่งผลการทดสอบตรงกับงานวิจัยของ Singh et al. (2018) ที่ว่าค่า CDF ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดินเริ่มต้น ส่วน  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 จะมีการหดตัวน้อยกว่า 0.4 อยู่เล็กน้อย เพราะปริมาณซีเมนต์ที่มากขึ้นทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น ซึ่งการผสมปูนซีเมนต์ในดินเนื้อละเอียดเป็นอัตราการเกิดของรอยแตกหดตัว อย่างไรก็ตาม Chompoorat and Likitlersuang (2016) ได้อธิบายว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ลดการหดตัวลง เพราะการเพิ่มปูนซีเมนต์จะทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงสูงขึ้นส่งผลให้ความเค้นแรงดึงภายในช่องว่างสูงจึงทำให้การหดตัวลดลง โดยค่าการหดตัวที่มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานเสาเข็มในหัวข้อก่อนหน้านี้ดังแสดงในตาราง 23

ตาราง 23 ค่า CDF ของส่วนผสมที่ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน

ดัชนีเหลว, LI	ส่วนผสม		ค่า CDF (%)	ค่า $q_u$ (kPa)	เกณฑ์การ ออกแบบ
	อัตราส่วน $B/w_c$	เถ้าลอย, FA (%)			
1.6	0.3	0	6.012	923.18	ผ่าน
		15	5.736	738.53	ผ่าน
		30	7.055	627.17	ผ่าน
		45	7.993	555.85	ไม่ผ่าน
		60	6.050	345.36	ไม่ผ่าน
	0.4	0	6.729	1904.27	ผ่าน
		15	5.595	1620.86	ผ่าน
		30	5.970	1388.49	ผ่าน
		45	6.214	1114.91	ผ่าน
		60	6.327	912.50	ผ่าน

นอกจากนี้ยังสำหรับผลการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายสำหรับดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 และ 1.6 จะแสดงในตาราง 24 ซึ่งเป็นส่วนผสมของตัวเรียงดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ จะมีการหดตัวที่สูงมาก โดยที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ค่า CDF ประมาณ 34.10% สำหรับ LI เท่ากับ 1.3 และค่า CDF ประมาณ 37.77% สำหรับ LI เท่ากับ 1.6 จากนั้นค่า CDF ลดลงประมาณ 1 ถึง 2% ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน จากนั้นพออายุการบ่มตัว 60 วันค่า CDF เพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1% จนครบอายุการบ่มตัว 90 วันค่า CDF เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนแทบจะคงที่ประมาณ 1% ซึ่งค่า CDF ประมาณ 37.20% สำหรับ LI เท่ากับ 1.3 และค่า CDF ประมาณ 39.94% สำหรับ LI เท่ากับ 1.6 ซึ่งเมื่อเทียบกับดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพมีการหดตัวที่ต่ำมาก ซึ่งมีการหดตัวต่างกันอยู่ประมาณ 25%

สำหรับข้อมูลผลการทดสอบการหดตัวโดยวิธีภาพถ่ายทั้งหมดส่วนผสมที่มีดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 กับเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $B/w_c$ ) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 จะแสดงในตาราง 25 และ 26 ส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 กับ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 และ 0.4 จะแสดงในตาราง 27 และ 28

ตาราง 24 ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI=1.3 และ LI=1.6

ส่วนผสม	การบ่มตัว (วัน)	CDF (%)	CIF (%)	$W_{c,av}$ (cm)
LI = 1.3	7	34.096	17.058	0.135
	28	33.714	16.947	0.121
	60	36.456	13.962	0.137
	90	37.202	19.958	0.142
LI = 1.6	7	37.77	10.336	0.074
	28	35.785	21.313	0.151
	60	36.901	14.162	0.117
	90	39.94	15.606	0.207

### 3. ปัจจัยความเข้มรอยแตก (crack intensity factor, CIF)

สำหรับข้อมูลค่าปัจจัยความเข้มรอยแตก (CIF) ของส่วนผสมที่มีดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 กับเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $B/w_c$ ) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 จะแสดงในตาราง 25 และ 26 ส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 กับ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 และ 0.4 จะแสดงในตาราง 27 และ 28 ซึ่งค่าความเข้มรอยแตก (CIF) จะมีค่าเฉพาะตัวอย่างดินที่มีรอยแตก ซึ่งส่วนผสมประกอบไปด้วยดัชนีเหลว (LI) 1.3 กับ 1.6 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $B/w_c$ ) 0.3 กับ 0.4 และแปรผันตามเปอร์เซ็นต์เถ้าลอย (FA) ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ 0 15 30 45 และ 60% จากผลการทดสอบในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 พบว่า ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันไม่มีค่า CIF หรือไม่มีรอยแตก สำหรับที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน จากนั้นมีเกิดรอยแตกเพียงแค่ 1 ส่วนผสมคือส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 30% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.006% ส่วนอายุการบ่มตัวที่ 60 วันมีรอยแตกเพิ่มขึ้นมาเป็น 3 ส่วนผสมคือส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 0 15 และ 45% โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยที่สุดคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 15% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.032% จนครบอายุการบ่มตัวที่ 90 วัน มีรอยแตกเพิ่มขึ้นมาถึง 4 ส่วนผสมซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอยผสมอยู่ทั้งหมด โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยที่สุดคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 60% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.037% ซึ่งอาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอดโซลานิกของเถ้าลอย

ส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 พบว่า ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันเกิดรอยแตกเพียงแค่ 1 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่ไม่มีปริมาณเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0 มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.003% สำหรับที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน เกิดรอยแตกเพียงแค่ 1 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 60% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.112% ส่วนที่อายุการบ่มตัว 60 วัน มีรอยแตกเพิ่มขึ้นมาเป็น 3 ส่วนผสมคือส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 30 45 และ 60% โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยที่สุดคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 45% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.004% ซึ่งส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 60% เท่ากันมีรอยแตกลดลงประมาณ 0.02% จนครบอายุการบ่มตัวที่ 90 วัน มีรอยแตกลดลงมา 2 ส่วนผสมซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 30 และ 45% โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยที่สุดคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 45% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.025% ซึ่งมีรอยแตกที่ต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.3 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3

ส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 พบว่า ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันเกิดรอยแตกเพียง 2 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 15% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.012% และเถ้าลอย 45% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.008% สำหรับที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน

เกิดรอยแตกเพียงแค่ 1 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 30% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.040% ส่วนที่อายุการบ่มตัว 60 วันมีรอยแตกเพิ่มขึ้นมาเป็น 3 ส่วนผสมคือส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 0 45 และ 60% โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยสุด คือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 60% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.002% จนครบอายุการบ่มตัว 90 วัน มีรอยแตกลดลงมา 2 ส่วนผสมซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 45 และ 60% โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยสุดคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 45% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.042% ซึ่งอาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาปอติโซลานิกของเถ้าลอย

สุดท้ายในส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 พบว่า ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วันเกิดรอยแตก 2 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 30% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.016% และเถ้าลอย 45% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.007% สำหรับที่อายุการบ่มตัว 28 วันเกิดรอยแตก 2 ส่วนผสมคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 30% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.001% และเถ้าลอย 60% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.067% ส่วนที่อายุการบ่มตัว 60 วันมีรอยแตก 2 ส่วนผสมคือส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 45% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.024% และเถ้าลอย 60% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.067% จนครบอายุการบ่มตัวที่ 90 วัน มีรอยแตก 3 ส่วนผสมซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 0 15 และ 30% โดยที่ส่วนผสมที่มีรอยแตกน้อยสุดคือ ส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 15% มีค่า CIF อยู่ประมาณ 0.012% ซึ่งมีรอยแตกที่ต่ำกว่าส่วนผสมที่มี LI เท่ากับ 1.6 และ  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3

โดยสรุปแล้ว การเกิดรอยแตกในส่วนผสมจำนวนน้อยมากและส่วนใหญ่แทบจะไม่มีรอยแตกเลย ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 และ 28 วัน จนอายุการบ่มตัว 60 และ 90 วันพบว่าการเกิดรอยแตกในแต่ละส่วนผสมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ LI เท่ากับ 1.3 จะมีค่า CIF น้อยกว่า 1.6 โดยค่า CIF ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดิน ซึ่งผลการทดสอบตรงกับ Singh et al. (2018) ที่ว่าความชื้นรอยแตกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นในมวลดินเริ่มต้น และส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า CIF น้อยกว่า 0.3 จากผลการทดสอบการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยอาจทำให้เกิดรอยแตกมากขึ้นในแต่ละส่วนผสมเมื่ออายุการบ่มตัวมากขึ้น แต่ในส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 15% จะไม่พบรอยแตก หรือเกิดรอยแตกน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใส่ปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่า ดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ จะเกิดรอยแตกจำนวนมาก โดยที่อายุการบ่มตัว 7 วันมีค่า CIF ประมาณ 17.058% ในส่วนผสม LI เท่ากับ 1.3 ในอายุการบ่มตัว 28 วันมีค่า CIF ลดลงประมาณ 1% ในอายุการบ่มตัว 60 วันพบว่ามีค่า CIF ลดลงประมาณ 4% จนอายุการบ่มตัวครบที่ 90 วันมีค่า CIF เพิ่มขึ้นประมาณ 6% ในส่วนผสม LI เท่ากับ 1.6 ในอายุ

การบ่มตัว 7 วันมีค่า CIF ประมาณ 10.336% จากนั้นค่า CIF จะเพิ่มขึ้นประมาณ 11% ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน จากนั้นอายุการบ่มตัว 60 วันค่า CIF ลดลงประมาณ 7% จนครบอายุการบ่มตัว 90 วันค่า CIF เพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1% อาจเป็นเพราะมีความชื้นในมวลดินสูงทำให้รอยแตกเพิ่มขึ้น โดยรวมของรอยแตกเมื่อเทียบกับดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพพบว่าช่วยลดการเกิดรอยแตกลงประมาณ 14%

#### 4. ความกว้างรอยแตกเฉลี่ย (average crack width, $W_{c,av}$ )

ค่าความกว้างรอยแตกเฉลี่ย ( $W_{c,av}$ ) จะมีค่าเฉพาะตัวอย่างดินที่มีรอยแตกเท่านั้นซึ่งเหมือนกับค่าปัจจัยความเข้มรอยแตก ซึ่งมีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์วัสดุผสมต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $B/w_c$ ) ระหว่าง 0.3 กับ 0.4 ดัชนีเหลว (LI) 1.3 กับ 1.6 และแปรผันตามเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์ 0 15 30 45 และ 60% จากผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับค่า CIF กล่าวคือ เมื่อมีค่า CIF เพิ่มขึ้นจะทำให้มีค่า  $W_{c,av}$  เพิ่มขึ้นเช่นกัน สอดคล้องการงานวิจัยของ Tang et al. 2012 ที่ว่าค่า CIF และ  $W_{c,av}$  มีทิศทางเดียวกัน ซึ่งการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยอาจทำให้เกิดความกว้างรอยแตกในแต่ละส่วนผสมมากขึ้นเมื่ออายุการบ่มตัวมากขึ้น แต่ในส่วนผสมเดียวกันยังช่วยลดความกว้างรอยแตกด้วยเมื่ออายุการบ่มตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $W_{c,av}$  น้อยกว่า 0.3 และ LI เท่ากับ 1.3 จะมีค่า  $W_{c,av}$  น้อยกว่า 1.6 ที่อายุการบ่มตัว 60 วัน โดยค่า  $W_{c,av}$  ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดิน ซึ่งผลการทดสอบตรงกับ Singh et al. (2018) ที่ว่าความกว้างรอยแตกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นในมวลดินเริ่มต้น โดยส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 15% จะไม่พบรอยแตก หรือเกิดความกว้างรอยแตกน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใส่ปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ จะเกิดรอยแตกจำนวนมาก โดยที่อายุการบ่มตัว 7 วันมีค่า  $W_{c,av}$  ประมาณ 0.13 เซนติเมตร สำหรับ LI เท่ากับ 1.3 และค่า  $W_{c,av}$  ประมาณ 0.074 เซนติเมตร สำหรับ LI เท่ากับ 1.6 จากนั้นค่า  $W_{c,av}$  ลดลงหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นอายุการบ่มตัวที่ 90 วันค่า  $W_{c,av}$  ลดลงเล็กน้อยจนแทบจะคงที่ ซึ่งค่า  $W_{c,av}$  ประมาณ 0.142 เซนติเมตร สำหรับ LI เท่ากับ 1.3 และค่า  $W_{c,av}$  ประมาณ 0.207 เซนติเมตร สำหรับ LI เท่ากับ 1.6 ซึ่งเมื่อเทียบกับดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพพบว่าช่วยลดความกว้างรอยแตกประมาณ 0.1 เซนติเมตร นอกจากนี้ LI เท่ากับ 1.6 มีค่า  $W_{c,av}$  น้อยกว่า LI เท่ากับ 1.3

### 5. ลักษณะรอยแตกของตัวอย่างดิน

ลักษณะรอยแตกของดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ดังแสดงในภาพ 81 พบว่าลักษณะรอยแตกของตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยตัวอย่างดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพจะมีรอยแตกเป็นจำนวนมาก ก้อนรอยแตกแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ทำให้มีความยาวรอยแตก และความกว้างรอยแตกมาก โดยลักษณะรอยแตกจะมีลักษณะเป็นรูป “T” และ “Y” ซึ่งลักษณะรอยแตกรูปร่างตัว “T” มักจะมีจุดตัดที่เกิดขึ้นถูกรอบด้วยรูปร่าง “Y” ดังภาพ 81(ก) และเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ปรับปรุงคุณภาพพบว่ามีรอยแตกน้อยกว่าดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ โดยลักษณะรอยแตกจะเป็นรอยแตกตามยาวมีความกว้างของรอยแตกเล็กน้อย ดังภาพ 81(ข) ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ C.-S. Tang et al. (2012) ที่ลักษณะรอยแตกการหดตัวแบบแห้งของดินเหนียวจะมีลักษณะเป็นรูปตัว “T” “Y” และ “+”

การพัฒนาารอยแตกของดินที่ปรับปรุงคุณภาพที่อายุการบ่มตัวที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพ 82 พบว่าเมื่อที่อายุการบ่มตัว 7 วันไม่พบรอยแตกหรือเกิดรอยแตกน้อยมาก ดังภาพ 82(ก) จากนั้นได้เกิดรอยแตกเป็นเส้นตามยาว ซึ่งรอยแตกมีความยาวมากเกือบจะแบ่งพื้นที่ผิวตัวอย่างดินออกเป็นส่วนใหญ่ๆ และความกว้างรอยแตกหนาเล็กน้อยที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังภาพ 82(ข) จากนั้นอายุการบ่มตัว 60 วันเกิดรอยแตกที่มีความยาวลดลงอย่างเห็นได้ชัดและมีความยาวน้อยกว่ารอยแตกที่อายุการบ่มตัว 28 วัน และความกว้างรอยแตกลดลงจนบางมาก อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาปอดโซลานอนิกของเถ้าลอย ดังภาพ 82(ค) จนอายุการบ่มตัวครบ 90 วันพบว่าไม่พบรอยแตกหรือมีรอยแตกที่เล็กมากจนแทบไม่เห็นด้วยสายตาเลย ดังภาพ 82(ง) โดยที่อายุการบ่มตัว 7 วันไม่เกิดรอยแตกหรือมีรอยแตกเล็กน้อยนั้นคล้ายกับผลงานวิจัยของ Rafizul and Datta (2018) เนื่องจากการผสมปูนซีเมนต์ทำให้รอยแตกลดลง หรือเกิดรอยแตกขึ้นเล็กน้อย ในช่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ยังไม่สมบูรณ์

ตาราง 25 ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI= 1.3 B/w<sub>c</sub>=0.3

ส่วนผสม	การบ่มตัว (วัน)	CDF (%)	CIF (%)	W <sub>c,av</sub> (cm)
LI1.3B/Wc0.3FA0	7	6.556	-	-
	28	6.285	-	-
	60	2.620	0.207	0.008
	90	2.443	-	-
LI1.3B/Wc0.3FA15	7	6.641	-	-
	28	4.269	-	-
	60	2.079	0.032	0.002
	90	1.778	0.040	0.005
LI1.3B/Wc0.3FA30	7	7.037	-	-
	28	4.955	0.060	0.005
	60	2.319	-	-
	90	2.472	0.160	0.008
LI1.3B/Wc0.3FA45	7	7.588	-	-
	28	5.330	-	-
	60	2.195	0.061	0.011
	90	0.915	0.048	0.005
LI1.3B/Wc0.3FA60	7	8.706	-	-
	28	5.754	-	-
	60	1.401	-	-
	90	0.285	0.037	0.004

ตาราง 26 ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI= 1.3 B/w<sub>c</sub>=0.4

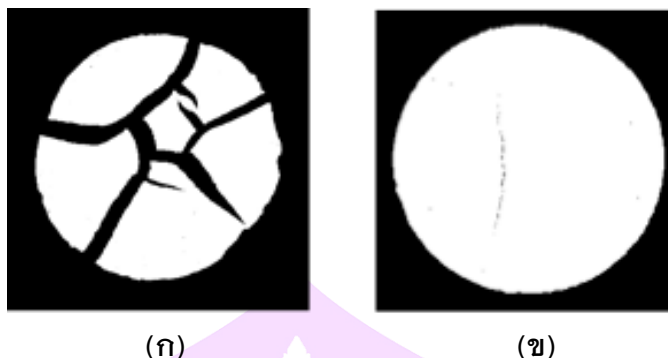
ส่วนผสม	การบ่มตัว (วัน)	CDF (%)	CIF (%)	W <sub>c,av</sub> (cm)
LI1.3B/W <sub>c</sub> 0.4FA0	7	5.783	0.003	0.005
	28	5.842	-	-
	60	3.283	-	-
	90	2.305	0.028	0.002
LI1.3B/W <sub>c</sub> 0.4FA15	7	5.760	-	-
	28	5.543	-	-
	60	3.203	-	-
	90	2.487	-	-
LI1.3B/W <sub>c</sub> 0.4FA30	7	5.998	-	-
	28	5.278	-	-
	60	3.140	0.019	0.003
	90	2.473	0.029	0.004
LI1.3B/W <sub>c</sub> 0.4FA45	7	6.372	-	-
	28	5.506	-	-
	60	3.082	0.004	0.003
	90	2.309	0.025	0.002
LI1.3B/W <sub>c</sub> 0.4FA60	7	6.777	-	-
	28	5.704	0.112	0.006
	60	2.809	0.081	0.005
	90	1.962	-	-

ตาราง 27 ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI= 1.6 B/w<sub>c</sub>=0.3

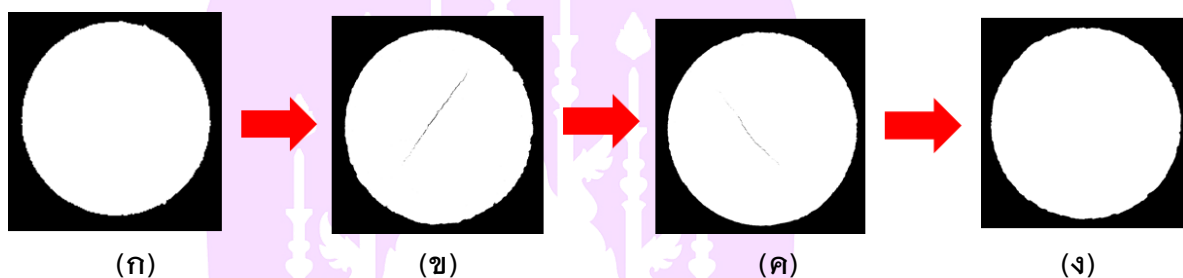
ส่วนผสม	การบ่มตัว (วัน)	CDF (%)	CIF (%)	W <sub>c,av</sub> (cm)
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.3FA0	7	4.404	-	-
	28	6.012	-	-
	60	4.766	0.070	0.009
	90	3.241	0.086	0.004
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.3FA15	7	5.064	0.012	0.002
	28	5.736	-	-
	60	3.599	-	-
	90	2.861	-	-
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.3FA30	7	6.512	-	-
	28	7.055	0.040	0.002
	60	3.450	-	-
	90	2.568	-	-
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.3FA45	7	8.594	0.008	0.003
	28	7.993	-	-
	60	3.125	0.097	0.007
	90	2.384	0.042	0.005
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.3FA60	7	7.336	-	-
	28	6.050	-	-
	60	2.861	0.002	0.001
	90	2.294	0.203	0.007

ตาราง 28 ผลการทดสอบการหดตัวของส่วนผสม LI=1.6 B/w<sub>c</sub>=0.4

ส่วนผสม	การบ่มตัว (วัน)	CDF (%)	CIF (%)	W <sub>c,av</sub> (cm)
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.4FA0	7	6.917	-	-
	28	6.729	-	-
	60	4.086	-	-
	90	2.825	0.338	0.012
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.4FA15	7	5.998	-	-
	28	5.595	-	-
	60	3.889	-	-
	90	2.480	0.012	0.001
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.4FA30	7	6.529	0.016	0.006
	28	5.970	0.001	0.004
	60	3.564	-	-
	90	2.371	0.032	0.003
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.4FA45	7	6.592	0.007	0.007
	28	6.214	-	-
	60	3.595	0.024	0.004
	90	2.341	-	-
LI1.6B/W <sub>c</sub> 0.4FA60	7	7.405	-	-
	28	6.327	0.130	0.007
	60	3.625	0.067	0.005
	90	2.334	-	-



ภาพ 81 ลักษณะรอยแตก (ก) ดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ (ข) ดินที่ปรับปรุงคุณภาพ



ภาพ 82 การพัฒนารอยแตกของดินที่ปรับปรุงคุณภาพ (ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน (ข) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน (ค) ที่อายุการบ่มตัว 60 วัน (ง) ที่อายุการบ่มตัว 90 วัน

### ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง

การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้ง (wetting and drying durability test) ของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ได้แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์

การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์ เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งของส่วนผสมดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.0 1.3 และ 1.6 อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $C/w_c$ ) เท่ากับ 0.2 0.3 และ 0.4 ที่อายุการบ่มตัว 7 และ 28 วัน การทดสอบนำตัวอย่างที่ครบอายุการบ่มไปแช่น้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมงจากนั้นนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 42 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ทำซ้ำกันแบบเดิมทั้งหมด 6 รอบ การทดสอบกำลังรับแรงอัดจะเลือกตัวอย่างมาทดสอบรอบ 1 3 และ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า

กำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะเปือกสลับแห้งแต่ละรอบกับจำนวนรอบเปือกสลับแห้ง ดังแสดงในภาพ 83 พบว่า ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.0 ดังแสดงในภาพ 83(ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,493.66 kPa ตรงกันข้ามกับส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 826.98 kPa เนื่องจากส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 0.2 ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า ในรอบเปือกสลับแห้งรอบที่ 1 เมื่อรอบเปือกสลับแห้งรอบที่ 3 พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}$  ลดลงเนื่องจากการผ่านสภาวะเปือกสลับแห้งทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างของดินบางส่วนส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,260.57 kPa ตรงกันข้ามกับส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 274.84 kPa ซึ่งมีแนวโน้มการลดลงของกำลังเหมือนกับรอบเปือกสลับแห้งรอบที่ 1 เมื่อรอบเปือกสลับแห้งรอบที่ 6 พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}$  ลดลงเนื่องจากการผ่านสภาวะเปือกสลับแห้งมา 6 รอบทำให้โครงสร้างในมวลดินเกิดการพังทลายไปในบางส่วน หรือบางส่วนผสมไม่มีค่ากำลังรับแรงอัดเพราะตัวอย่างพังก่อนนำมาทดสอบ ซึ่งส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,094.89 kPa ตรงกันข้ามกับส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.3 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 565.48 kPa ซึ่งส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 ไม่มี  $q_{u(W-D)}$  เพราะตัวอย่างไม่สามารถทนสภาวะเปือกสลับแห้งถึงรอบที่ 6 จึงเกิดการพังก่อนนำมาทดสอบ โดยมีแนวโน้มการลดลงของกำลังเหมือนกับรอบเปือกสลับแห้งรอบที่ 1 และ 3

ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.0 สำหรับที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังแสดงในภาพ 83(ข) พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}$  เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับที่อายุการบ่มตัว 7 วันเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม  $C/w_c$  เหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน กล่าวคือส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 0.2 เนื่องจากส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 0.2 ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า ส่วนการเพิ่มรอบเปือกสลับแห้งทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจากการผ่านสภาวะเปือกสลับแห้งทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างของดินบางส่วนส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งรอบเปือกสลับแห้งรอบที่ 1 3 และ 6 มีแนวโน้มที่ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน

ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.3 ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ดังแสดงในภาพ 83(ก) ส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,425.36 kPa ตรงกันข้ามกับส่วนผสม  $C/w_c$

เท่ากับ 0.2 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 222.38 kPa เนื่องจากส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 0.2 ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า ในรอบเป็ยกสลั้บแห่งรอบที่ 1 เมื่อรอบเป็ยกสลั้บแห่งรอบที่ 3 พบว่า ค่า  $q_{u(W-D)}$  ลดลงเนื่องจากการผ่านสภาวะเป็ยกสลั้บแห่งทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างของดินบางส่วนส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,202.56 kPa ตรงกันข้ามกับส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 197.39 kPa ซึ่งมีแนวโน้มการลดลงของกำลังเหมือนกับรอบเป็ยกสลั้บแห่งรอบที่ 1 เมื่อรอบเป็ยกสลั้บแห่งรอบที่ 6 พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}$  ลดลงเนื่องจากการผ่านสภาวะเป็ยกสลั้บแห่งมา 6 รอบทำให้โครงสร้างในมวลดินเกิดการพังทลายไปบางส่วน หรือบางส่วนผสมไม่มีค่ากำลังรับแรงอัดเพราะตัวอย่างพังก่อนนำมาทดสอบ ซึ่งส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,015.22 kPa ตรงกันข้ามกับส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.3 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 562.69 kPa ซึ่งส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 ไม่มี  $q_{u(W-D)}$  เพราะตัวอย่างไม่สามารถทนสภาวะเป็ยกสลั้บแห่งถึงรอบที่ 6 จึงเกิดการพังก่อนนำมาทดสอบ โดยมีแนวโน้มการลดลงของกำลังเหมือนกับรอบเป็ยกสลั้บแห่งรอบที่ 1 และ 3

ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.3 สำหรับที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังแสดงในภาพ 83(ข) พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}$  เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดแนวโน้มลดลงเหมือนกันที่อายุการบ่มตัว 7 วัน กล่าวคือส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  มากขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้นด้วยเนื่องจากส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  มากจะมีปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้น ส่วนการเพิ่มรอบเป็ยกสลั้บแห่งทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการผ่านสภาวะเป็ยกสลั้บแห่งทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างของดินบางส่วนส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งรอบเป็ยกสลั้บแห่งรอบที่ 1 3 และ 6 มีแนวโน้มที่ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน

ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.6 ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ดังแสดงในภาพ 83(ก) ส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,323.46 kPa ตรงกันข้ามกับส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 152.70 kPa เนื่องจากส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 0.2 ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า ในรอบเป็ยกสลั้บแห่งรอบที่ 1 เมื่อรอบเป็ยกสลั้บแห่งรอบที่ 3 พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}$  ลดลงเนื่องจากการผ่านสภาวะเป็ยกสลั้บแห่งทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างของดินบางส่วนส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งส่วนผสมที่

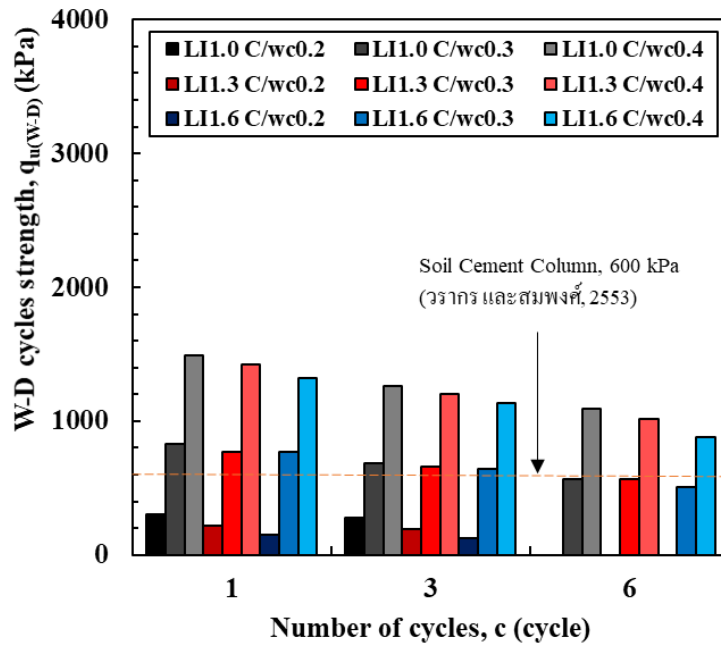
มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,131.87 kPa ตรงกันข้ามกับส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 123.35 kPa ซึ่งมีแนวโน้มการลดลงของกำลังเหมือนกับรอบเปือกสลับแห่งรอบที่ 1 เมื่อรอบเปือกสลับแห่งรอบที่ 6 พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}$  ลดลงเนื่องจากการผ่านสภาวะเปือกสลับแห่งมา 6 รอบทำให้โครงสร้างในมวลดินเกิดการพังทลายไปในบางส่วน หรือบางส่วนผสมไม่มีค่ากำลังรับแรงอัดเพราะตัวอย่างพังก่อนนำมาทดสอบ ซึ่งส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 876.90 kPa ตรงกันข้ามกับส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.3 มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 508.74 kPa ซึ่งส่วนผสม  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 ไม่มี  $q_{u(W-D)}$  เพราะตัวอย่างไม่สามารถทนสภาวะเปือกสลับแห่งถึงรอบที่ 6 จึงเกิดการพังก่อนนำมาทดสอบ โดยมีแนวโน้มการลดลงของกำลังเหมือนกับรอบเปือกสลับแห่งรอบที่ 1 และ 3

ส่วนผสม LI เท่ากับ 1.6 สำหรับที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังแสดงในภาพ 83(ข) พบว่ามีค่า  $q_{u(W-D)}$  เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม  $C/w_c$  เหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน กล่าวคือส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  มากขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้นด้วยเนื่องจากส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  มากจะมีปริมาณปูนซีเมนต์มากเช่นกัน ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้น ส่วนการเพิ่มรอบเปือกสลับแห่งทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการผ่านสภาวะเปือกสลับแห่งทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างของดินบางส่วนส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งรอบเปือกสลับแห่งรอบที่ 1 3 และ 6 มีแนวโน้มที่ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน

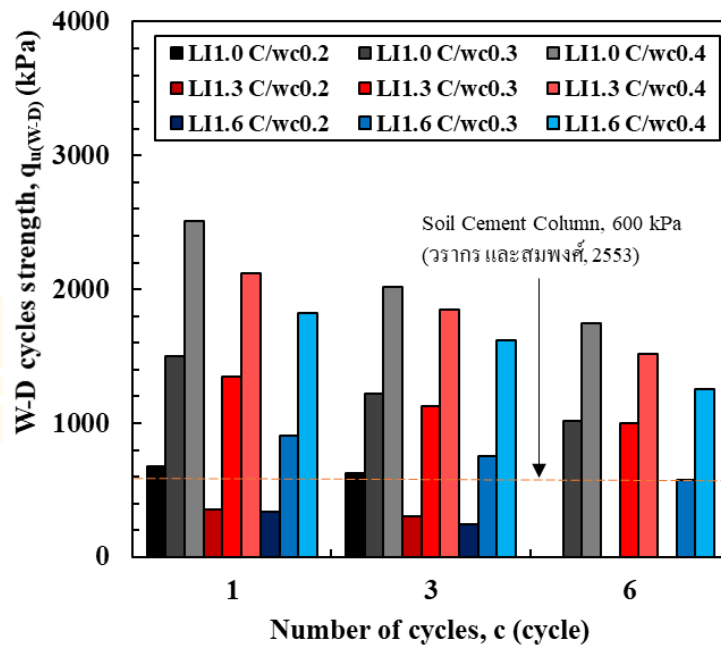
โดยภาพรวมเมื่อเพิ่มจำนวนรอบเปือกสลับแห่งทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปือกสลับแห่งลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมที่มีดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.0 1.3 และ 1.6 พบว่าเมื่อเพิ่ม LI ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปือกสลับลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำในมวลดินเริ่มต้นมากขึ้น ซึ่งผลการทดสอบตรงกับผลการทดสอบกำลังรับแรงแกนเดี่ยว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $C/w_c$ ) เท่ากับ 0.2 0.3 และ 0.4 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วน  $C/w_c$  ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปือกสลับเพิ่มขึ้น และสามารถทนต่อการเพิ่มจำนวนรอบสภาวะเปือกสลับแห่ง เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น สังเกตได้ว่าส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 ไม่สามารถทนต่อสภาวะเปือกสลับแห่งได้ถึง 6 รอบเพราะมีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยที่สุด ดังนั้น  $C/w_c$  เท่ากับ 0.3 และ 0.4 จึงได้นำไปศึกษาคุณสมบัติต่อในหัวข้อถัดไป เกี่ยวกับการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยปริมาณเถ้าลอย

## 2. ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

การทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยทำการทดสอบเหมือนกับข้อที่ 1 โดยในการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งได้ใช้ส่วนผสมเช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยของแต่ละรอบการทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้ง ดังแสดงในภาพ 84 พบว่า ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วัน ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ดังแสดงในภาพ 84(ก) ในรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ยังไม่ได้ทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้งหรือรอบที่ 0 ซึ่งส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 768.62 kPa ตรงกันข้าม ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 125.52 kPa จะสังเกตได้ว่าส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเถ้าลอย 0% เพราะมีปริมาณเถ้าลอยมากในการแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงด้วย ในรอบเปียกสลับแห้งที่ 3 พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเล็กน้อยอาจเป็นเพราะเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดินจากสภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% มีค่า  $q_{u(W-D)}$



(ก)



(ข)

ภาพ 83 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะเป็ยกสลั้บแห้ง แต่ละรอบกับค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะปกติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร ปูนซีเมนต์ (ก) อายุการบ่มตัว 7 วัน และ (ข) อายุการบ่มตัว 28 วัน

มากที่สุดเท่ากับ 643.50 kPa ตรงกันข้าม ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 103.78 kPa ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดแนวโน้มลดลงเหมือนรอบเปียกสลับแห่งรอบที่ 1 จนรอบเปียกสลับแห่งรอบที่ 6 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเพราะการผ่านสภาวะเปียกสลับแห่งมา 6 รอบทำให้โครงสร้างในมวลดินเกิดการพังทลายไปในบางส่วน หรือบางส่วนผสมไม่มีค่ากำลังรับแรงอัดเพราะตัวอย่างพังก่อนนำมาทดสอบ ซึ่งส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 508.74 kPa ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% ไม่มีค่า  $q_{u(W-D)}$  เนื่องจากตัวอย่างไม่สามารถทนสภาวะเปียกสลับแห่งได้ถึง 6 รอบ ทำให้ตัวอย่างพังก่อนนำมาทดสอบ

ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังแสดงในภาพ 84(ค) พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}$  เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจากที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัดเช่นเดียวกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ในรอบเปียกสลับแห่งรอบที่ 1 พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่ารอบที่ 0 หรือตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห่ง โดยส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 905.64 kPa ตรงกันข้าม ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 314.15 kPa จะสังเกตได้ว่าส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเถ้าลอย 0% เพราะมีปริมาณเถ้าลอยมากในการแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงด้วย ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเหมือนกับรอบเปียกสลับแห่งรอบที่ 1 ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน แต่มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่ารอบเปียกสลับแห่งรอบที่ 1 ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ในรอบเปียกสลับแห่งรอบที่ 3 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่ารอบที่ 1 จนรอบเปียกสลับแห่งรอบที่ 6 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่ารอบที่ 3 ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ในรอบที่ 6 เมื่ออายุการบ่มตัวที่ 60 วัน ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ดังแสดงในภาพ 84(จ) พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อยเมื่อเทียบกับช่วง 28 วัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยทำให้กำลังเพิ่มขึ้น ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดในรอบที่ 1 3 และ 6 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อายุการบ่มตัว 7 และ 28 วัน นอกจากนี้เมื่อเพิ่มเถ้าลอยมากทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากมีปริมาณเถ้าลอยมากในการแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงด้วย

ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 ดังแสดงในภาพ 84(ข) ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 วัน ในรอบเปียกสลับแห่งรอบที่ 1 พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ยัง

ไม่ได้ทดสอบในสภาวะเปียกสลับแห้งหรือรอบที่ 0 ซึ่งส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,323.46 kPa ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60 % มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 400.07 kPa จะสังเกตได้ว่าส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเถ้าลอย 0% เพราะมีปริมาณเถ้าลอยมากในการแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงด้วย ในรอบเปียกสลับแห้งที่ 3 พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเล็กน้อยอาจเป็นเพราะเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดินจากสภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1,131.87 kPa ตรงกันข้าม ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% ไม่มีค่า  $q_{u(W-D)}$  เพราะตัวอย่างไม่สามารถทนสภาวะเปียกสลับแห้งได้ทำให้ตัวอย่างพังก่อนการทดสอบ ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดแนวโน้มลดลงเหมือนรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 จนรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 6 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเพราะการผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งมา 6 รอบทำให้โครงสร้างในมวลดินเกิดการพังทลายไปในบางส่วน หรือบางส่วนผสมไม่มีค่ากำลังรับแรงอัดเพราะตัวอย่างพังก่อนนำมาทดสอบ ซึ่งส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 876.90 kPa ตรงกันข้ามส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% ไม่มีค่า  $q_{u(W-D)}$  เนื่องจากตัวอย่างไม่สามารถทนสภาวะเปียกสลับแห้งได้ถึง 6 รอบ ทำให้ตัวอย่างพังก่อนนำมาทดสอบ

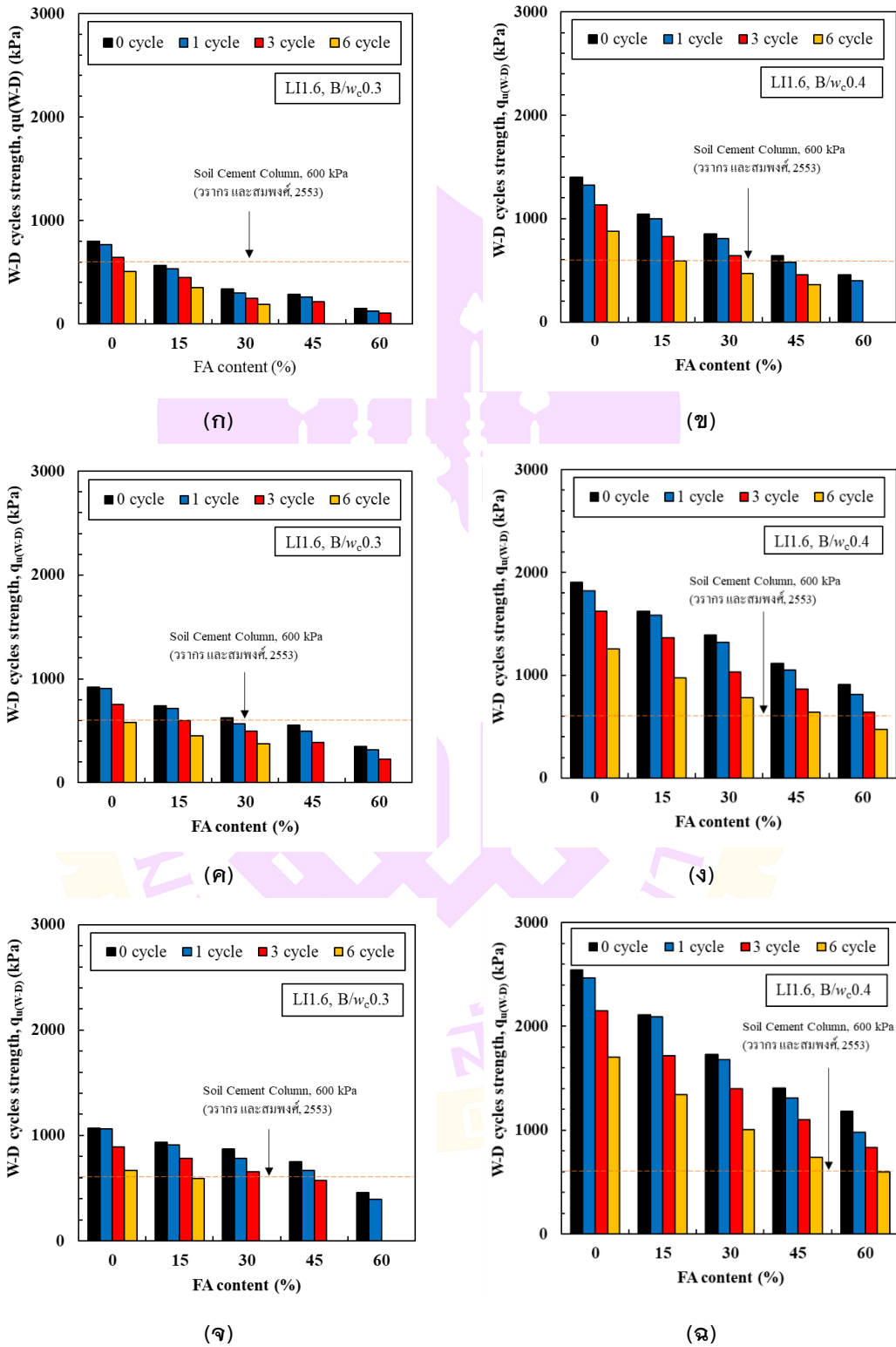
ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังแสดงในภาพ 84(ง) พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}$  เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจากที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัดเช่นเดียวกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ในรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่ารอบที่ 0 หรือตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  มากสุดเท่ากับ 1821.22 kPa ตรงกันข้าม ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% มีค่า  $q_{u(W-D)}$  น้อยสุดเท่ากับ 813.54 kPa จะสังเกตได้ว่าส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเถ้าลอย 0% เพราะมีปริมาณเถ้าลอยมากในการแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงด้วย ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเหมือนกับรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน แต่มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่ารอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ในรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 3 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่ารอบที่ 1 จนรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 6 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่ารอบที่ 3 ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วันในรอบที่ 6 เมื่ออายุการบ่มตัวที่ 60 วัน ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$

เท่ากับ 0.4 ดังแสดงในภาพ 84(จ) พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อยเมื่อเทียบกับช่วง 28 วันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยทำให้กำลังเพิ่มขึ้น ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดในรอบที่ 1 3 และ 6 มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่อายุการบ่มตัว 7 และ 28 วัน นอกจากนี้เมื่อเพิ่มเถ้าลอยมากทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากมีปริมาณเถ้าลอยมากในการแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงด้วย

โดยภาพรวมพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งลดลงเนื่องจากมีปริมาณเถ้าลอยมากในการแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มรอบเปียกสลับแห้งจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ในส่วนผสมที่มีเถ้าลอยเดียวกัน เนื่องจากการผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งในแต่ละรอบทำให้โครงสร้างในมวลดินค่อย ๆ เกิดการพังทลายไปในบางส่วนทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoobanpot et al. (2020) ที่กล่าวว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงด้วยการเพิ่มจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเนื่องจากการเกิดการแตกร้าวในตัวอย่างเมื่อผ่านสภาวะเปียกจะทำให้เกิดการบวมตัวของดิน เมื่อผ่านสภาวะแห้งจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวเพราะปริมาตรของโพรงลดลงและการสูญเสียน้ำในอนุภาคดินส่งผลทำให้เกิดรอยแตกที่พื้นผิวและแรงดึงในตัวอย่างดิน

เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์วัสดุผสมต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $B/w_c$ ) เท่ากับ 0.3 และ 0.4 พบว่า  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับมากกว่า 0.3 อย่างเห็นได้ชัดในแต่ละรอบ และแต่ละทุกอายุการบ่มตัว ที่ปริมาณเถ้าลอยเดียวกัน เนื่องจากมีปริมาณซีเมนต์และปริมาณเถ้าลอยที่มากกว่า  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 นอกจากนี้ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 15% สามารถทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งได้ถึง 6 รอบโดยที่ไม่มีตัวอย่างที่พังก่อนที่จะทดสอบเลย จึงเป็นส่วนผสมเถ้าลอยที่เหมาะสมในการแทนที่ปูนซีเมนต์ นอกจากนี้มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0%

ดังนั้นจึงได้สรุปค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวในสภาวะเปียกสลับแห้ง ( $q_{u(W-D)}$ ) ที่ผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วันของส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 0 กับ 15% ในตาราง 29



ภาพ 84 ความสัมพันธ์ค่า  $q_{u(W-D)}$  กับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอย (ก)  $B/w_c=0.3$  ที่ 7 วัน (ข)  $B/w_c=0.4$  ที่ 7 วัน (ค)  $B/w_c=0.3$  ที่ 28 วัน (ง)  $B/w_c=0.4$  ที่ 28 วัน (จ)  $B/w_c=0.3$  ที่ 60 วัน (ฉ)  $B/w_c=0.4$  ที่ 60 วัน

ตาราง 29 ค่า  $q_{u(W-D)}$  ที่ผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม			รอบเปียก สลั้บแห่ง (รอบ)	ค่า $q_{u(W-D)}$ (kPa)	เกณฑ์การ ออกแบบ
ดัชนีเหลว, LI	อัตราส่วน $B/w_c$	เถ้าลอย, FA (%)			
1.6	0.3	0	1	905.64	ผ่าน
			3	750.97	ผ่าน
			6	578.49	ไม่ผ่าน
		15	1	715.13	ผ่าน
			3	601.37	ผ่าน
			6	453.29	ไม่ผ่าน
	0.4	0	1	1821.22	ผ่าน
			3	1621.11	ผ่าน
			6	1257.50	ผ่าน
		15	1	1528.68	ผ่าน
			3	1368.13	ผ่าน
			6	971.96	ผ่าน

### ผลการทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลั้บแห่ง

การทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลั้บแห่ง (shrinkage test by image processing in wetting and drying condition) ของดินเหนียวกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างที่ครบอายุการบ่มตัวไปเติมน้ำให้ตัวอย่างจนตัวอย่างอิ่มตัวไปด้วยน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะเปียกแล้วนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะแห้งแล้วจึงนำไปทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่าย ทำซ้ำกันแบบเดิมทั้งหมด 6 รอบ โดยในการทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพถ่ายในสภาวะเปียกสลั้บแห่งได้ใช้ส่วนผสมเช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CDF (crack density factor) กับจำนวนรอบเปียกสลั้บแห่งแต่ละรอบ ดังแสดงในภาพ 85 พบว่า ส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์วัสดุผสมต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $B/w_c$ ) เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ดังแสดงในภาพ 85(ก) ในรอบเปียกสลั้บแห่งรอบที่ 1

พบว่าค่า CDF เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่า CDF ในสภาวะปกติ เพราะเมื่อตัวอย่างสัมผัสกับน้ำในสภาวะเปียกทำให้เกิดการบวมตัวพองน้ำไปอบในสภาวะแห้งทำให้เกิดการหดตัวที่มากกว่าเดิม โดยที่ค่า CDF มากสุดคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 45% เท่ากับ 11.37% ตรงกันข้ามค่า CDF น้อยสุดคือส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0 เท่ากับ 6.90% จะสังเกตได้ว่า การเพิ่มเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมทำให้เกิดการหดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ในรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 3 พบว่า ค่า CDF เพิ่มขึ้นทุกส่วนผสมจากรอบที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตั้งแต่ช่วงรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 จนถึงรอบที่ 3 มีอัตราการเกิดการหดตัวอย่างมาก ซึ่งอัตราการหดตัวแต่ละส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเถ้าลอย เพราะการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่สมบูรณ์เมื่อผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งทำให้เกิดการหดตัวอย่างมาก โดยที่ค่า CDF มากสุดคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 30% เท่ากับ 12.80% ตรงกันข้ามค่า CDF น้อยสุดคือ ส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% เท่ากับ 8.05% จนรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 6 ค่า CDF ลดลงและ/หรือคงที่ทุกส่วนผสม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราการเกิดการหดตัวลดลงทุกส่วนผสม เพราะระหว่างรอบเปียกสลับแห้งตั้งแต่รอบที่ 3 ขึ้นไปตัวอย่างเกิดการโพรงมากขึ้นในมวลดินส่งผลทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างในมวลดิน ซึ่งสังเกตได้จากผิวพื้นดินขรุขระตั้งแต่รอบที่ 3 จนถึง 6 ส่งผลให้ค่อย ๆ หยุดพฤติกรรมเกิดการบวมตัวและการหดตัวลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tang et al. (2011)

ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ที่อายุการบ่มตัวที่ 28 วัน ดังแสดงในภาพ 85(ค) พบว่า ค่า CDF ลดลงเมื่อเทียบค่า CDF ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ซึ่งมีพฤติกรรมหดตัวเหมือนกันในช่วง 7 วันแรก ในรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 โดยที่ค่า CDF มากสุดคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% เท่ากับ 8.31% ตรงกันข้ามค่า CDF น้อยสุดคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 15% เท่ากับ 6.42% ในรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 3 พบว่าค่า CDF เพิ่มขึ้นเล็กน้อยทุกส่วนผสมเป็นเพราะหลังจากการบ่มตัว 28 วันทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ใกล้สมบูรณ์ ทำให้เกิดการอัตราหดตัวไม่รุนแรงเหมือนกับที่ 7 วัน โดยที่ค่า CDF มากสุดคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% เท่ากับ 8.72% ตรงกันข้ามค่า CDF น้อยสุดคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 15% เท่ากับ 7.50% จนรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 6 ค่า CDF ลดลงและหรือคงที่ทุกส่วนผสม ซึ่งพฤติกรรมหดตัวเหมือนกันในที่อายุการบ่มตัว 7 วัน

ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ดังแสดงในภาพ 85(ข) พบว่าค่า CDF เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่า CDF ในสภาวะปกติ เพราะเมื่อตัวอย่างสัมผัสกับน้ำในสภาวะ

เป็ยกทำให้เกิดการรวมตัวพอนำไปอบในสภาวะแห้งทำให้เกิดการหดตัวที่มากกว่าเดิม ในรอบเป็ยกสลับแห่งรอบที่ 1 โดยที่ค่า CDF มากสุดคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 60% เท่ากับ 8.67% ตรงกันข้ามค่า CDF น้อยสุดคือ ส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% เท่ากับ 7.56% ในรอบเป็ยกสลับแห่งรอบที่ 3 พบว่า ค่า CDF เพิ่มขึ้นจากรอบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าตั้งแต่ช่วงรอบเป็ยกสลับแห่งรอบที่ 1 จนถึงรอบที่ 3 มีอัตราการเกิดการหดตัวที่เพิ่มขึ้นทุกส่วนผสม แต่น้อยกว่าอัตราเกิดการหดตัวกับส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 เพราะมีปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในส่วนผสมที่มากทำให้สามารถลดอัตราเกิดการหดตัวลง โดยที่ค่า CDF มากสุดคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 45% เท่ากับ 9.88% ตรงกันข้ามค่า CDF น้อยสุดคือ ส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% เท่ากับ 7.61% จนรอบเป็ยกสลับแห่งรอบที่ 6 ค่า CDF ลดลงและหรือคงที่ทุกส่วนผสม แสดงให้เห็นถึงอัตราการเกิดการหดตัวลดลงเหมือนกับส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ในรอบที่ 6

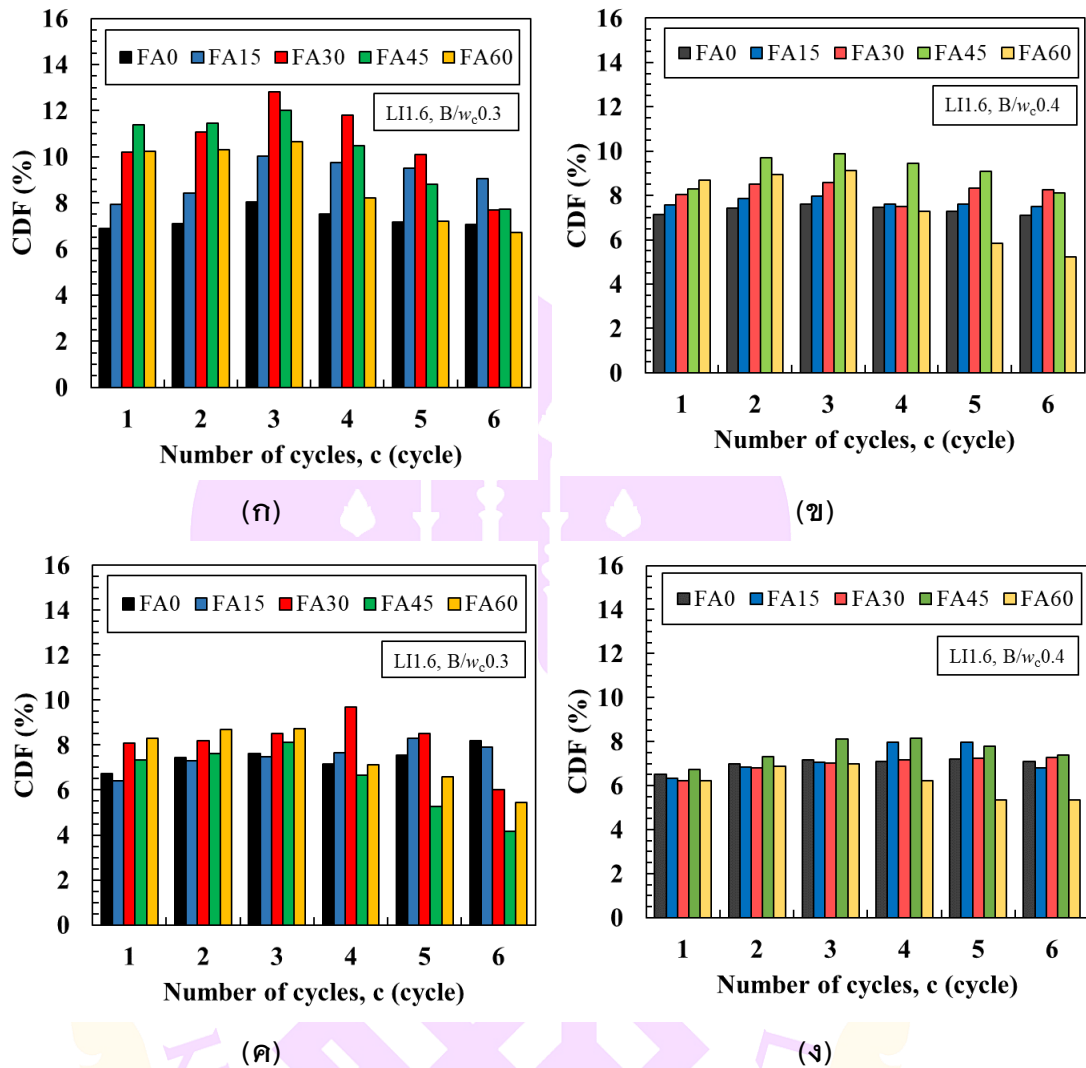
ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังแสดงในภาพ 85(ง) พบว่าค่า CDF ลดลงเมื่อเทียบกับอายุการบ่มตัวที่ 7 วัน และมีพฤติกรรมการหดตัวเหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ในรอบเป็ยกสลับแห่งรอบที่ 1 โดยที่ค่า CDF มากสุดคือ ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 45% เท่ากับ 7.63% ตรงกันข้ามค่า CDF น้อยสุดคือส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 15% เท่ากับ 6.33% ในรอบเป็ยกสลับแห่งรอบที่ 3 พบว่า ค่า CDF เพิ่มขึ้นเล็กน้อยทุกส่วนผสมเพราะหลังจากการบ่มตัว 28 วันทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ใกล้เคียงสมบูรณ์ และปริมาณเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์ช่วยลดช่องว่างในมวลดิน ทำให้เกิดการหดตัวไม่รุนแรงเหมือนกับที่อายุการบ่มตัว 7 วัน โดยที่ค่า CDF มากสุดคือส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 45% เท่ากับ 8.12 % ตรงกันข้ามค่า CDF น้อยสุดคือส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 30% เท่ากับ 6.79% จนรอบเป็ยกสลับแห่งรอบที่ 6 ค่า CDF ลดลงและหรือคงที่ทุกส่วนผสม ซึ่งพฤติกรรมการหดตัวเหมือนกับในอายุการบ่มตัวที่ 7 วัน

โดยภาพรวมเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นทำให้ค่า CDF เพิ่มขึ้นทุกส่วนผสม แต่อัตราการหดตัวแต่ละส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเถ้าลอย โดยแบ่งอัตราการหดตัวเป็น 2 ช่วง ดังนี้ ช่วงแรกคือรอบเป็ยกสลับแห่งรอบที่ 1 ถึง 3 จะมีอัตราการหดตัวเพิ่มขึ้นมาก เพราะที่สภาวะเป็ยกตัวอย่างเกิดการรวมตัว มาที่สภาวะแห้งตัวอย่างเกิดการหดตัวอย่างรุนแรง และช่วงหลังคือ รอบเป็ยกสลับแห่งรอบที่ 3 ถึง 6 จะมีอัตราการหดตัวที่ค่อย ๆ ลดลงและหรือคงที่ เพราะอัตราการหดตัวช่วงแรกทำให้เกิดโพรงภายในมวลดินมากส่งผลให้เกิดความ

เสียหายในมวลดิน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 และ 0.4 พบว่าส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีการเกิดอัตราการหดตัวในช่วงแรก (รอบที่ 1 ถึง 3) ที่น้อยกว่าส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 เพราะมีปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่มากกว่าส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ทำให้ลดอัตราการเกิดการหดตัวได้น้อยกว่าส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ที่ปริมาณเถ้าลอยเดียวกัน ในรอบเปียกสลับแห่งรอบที่ 3 นอกจากนี้ อัตราการเกิดการหดตัวในช่วงหลัง (รอบที่ 3 ถึง 6) ส่วนใหญ่จะพบว่าค่า CDF หรือเปอร์เซ็นต์การหดตัวลดลงเป็นเพราะการค่อย ๆ เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดิน พื้นผิวดินขรุขระ ตัวอย่างดินแตกเป็นเม็ดเล็ก ๆ รวมตัวกับตัวอย่างดินเดิมเนื่องจากการแช่น้ำในแต่ละรอบจนทำให้รวมเป็นพื้นผิวเดียวกัน ส่งผลให้การหดตัวลดลง

สรุปได้ว่าที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 15% สามารถช่วยลดการหดตัวในสภาวะเปียกสลับแห่งในอัตราการหดตัวช่วงแรกได้ดีกว่าส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอย หรือ FA เท่ากับ 0% จึงเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ โดยได้สรุปค่าการหดตัวในสภาวะเปียกสลับแห่ง ( $CDF_{w-D}$ ) ในอัตราการหดตัวช่วงแรกของส่วนผสมที่ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสภาวะเปียกสลับแห่งผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังแสดงในตาราง 30





ภาพ 85 ความสัมพันธ์ค่า CDF หรือเปอร์เซ็นต์การหลุดตัวกับรอบเบียดสลับแห้ง

ตาราง 30 ค่า  $CDF_{W-D}$  ที่ส่วนผสมผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน

ส่วนผสม			รอบเป็ยก สลั้บแห่ง (รอบ)	ค่า $CDF_{W-D}$ (%)	ค่า $q_{u(W-D)}$ (kPa)	กรรมกร ออกแบบ
ดัชนี เหลว, LI	อัตราส่วน $B/w_c$	เถ้าลอย , FA (%)				
1.6	0.3	0	1	6.735	905.64	ผ่าน
			3	7.622	750.97	ผ่าน
		15	1	6.423	715.13	ผ่าน
			3	7.495	601.37	ผ่าน
	0.4	0	1	6.501	1821.22	ผ่าน
			3	7.149	1621.11	ผ่าน
		15	1	6.327	1582.68	ผ่าน
			3	7.064	1368.13	ผ่าน

### ความสัมพันธ์ด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

1. ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัวใด ๆ กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวอายุการบ่มตัว 28 วัน

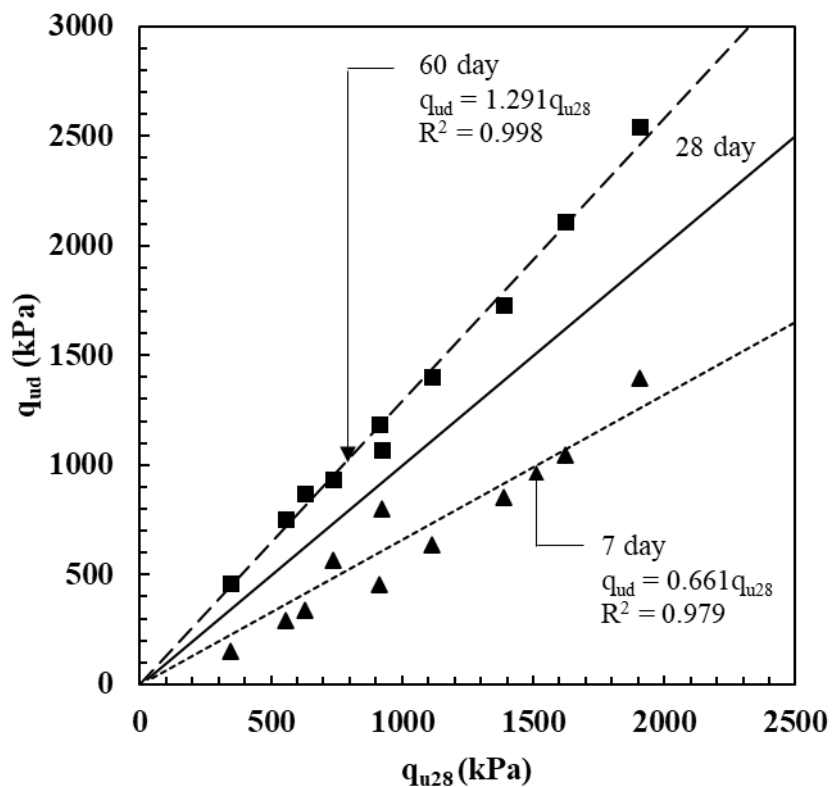
ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัวใด ๆ กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัว 28 วัน แสดงในภาพ 86 พบว่า ได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 7 วัน มีค่าประมาณ 66.34% กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 28 วัน โดยได้สมการและค่า  $R^2$  ของค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 7 วัน ต่อ 28 วัน ดังสมการที่ 12

$$q_{u7day} = 0.661q_{u28day}, R^2=0.979 \quad (12)$$

และค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 60 วัน มีค่าประมาณ 129.14% กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 28 วัน โดยได้สมการและค่า  $R^2$  ของค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ 60 วันต่อ 28 วันดังสมการที่ 13

$$q_{u60day} = 1.291q_{u28day}, R^2=0.998 \quad (13)$$

ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Jamsawang et al. (2020) โดยที่ค่าอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดแกนเดียวอายุการบ่มตัวใด ๆ ต่ออายุการบ่มตัวที่ 28 วัน เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตัวที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน และมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



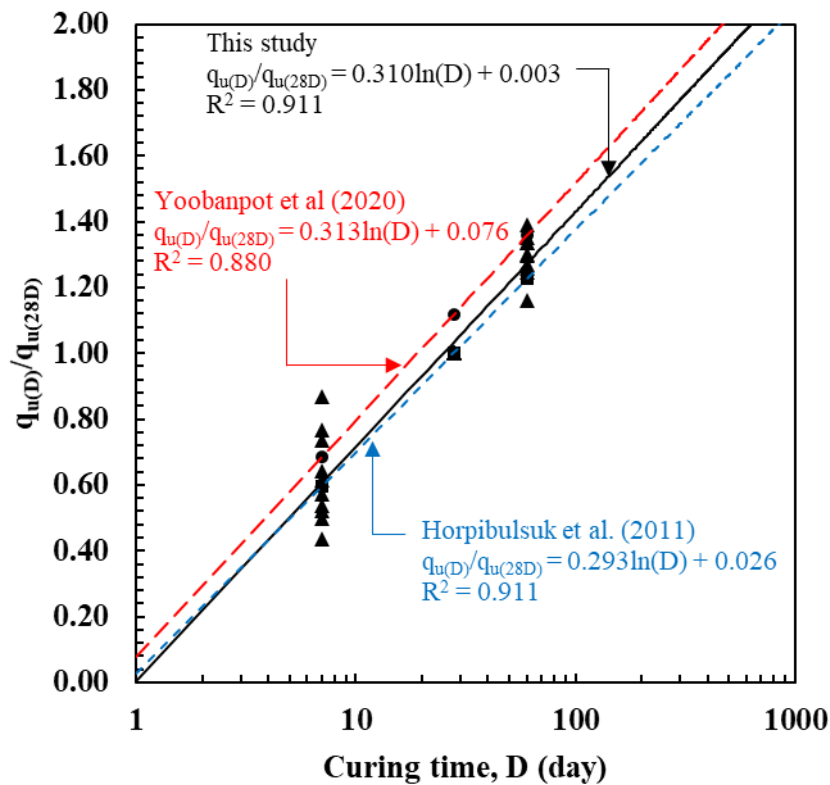
ภาพ 86 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัวใด ๆ กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัว 28 วัน

2. ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัวใด ๆ ต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัว 28 วัน เทียบกับเวลาการบ่มตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับอายุการบ่มตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ดังแสดงในภาพ 87 พบว่า ได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงโดยมาตราส่วนลอการิทึม ซึ่งสมการ และค่า  $R^2$  ดังแสดงในสมการที่ 14

$$\frac{q_{u,D}}{q_{u,28}} = 0.310\ln(D) + 0.004, R^2 = 0.911 \quad (14)$$

เมื่อ  $q_{u,D}$  คือค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่มตัวที่เวลาใด ๆ  $q_{u,28D}$  คือค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุบ่มตัวที่ 28 วัน และ  $D$  คือเวลาการบ่มตัว เมื่อเทียบสมการดังกล่าวกับสมการของงานวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2011) ที่ทำการศึกษาดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และเถ้าชีวมวล กับ Yoobanpot et al. (2020) ที่ทำการศึกษาดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย มีความใกล้เคียงกัน

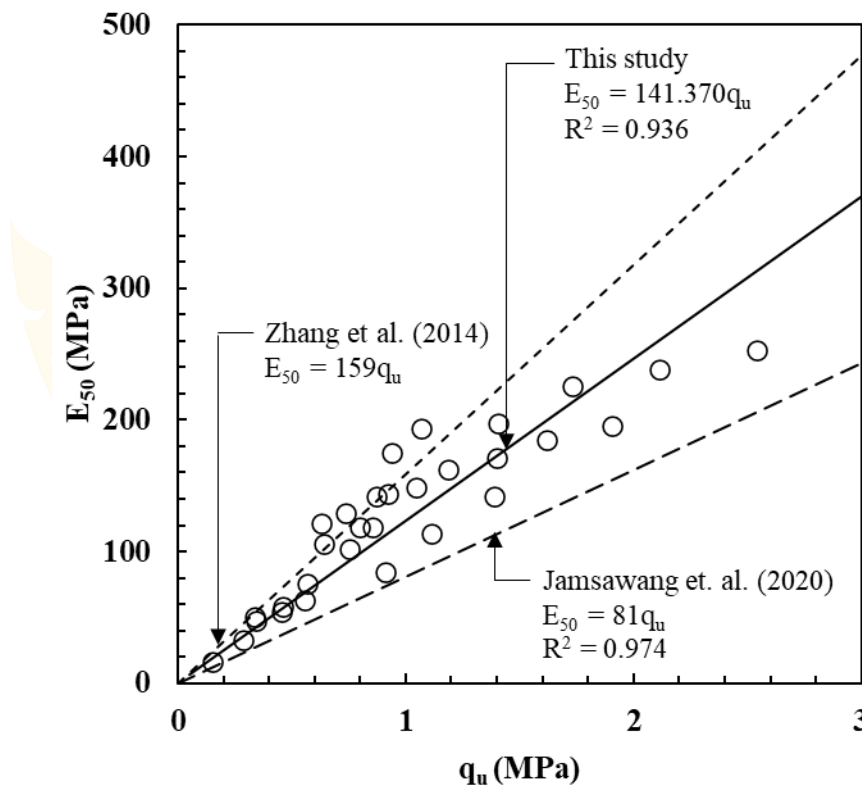


ภาพ 87 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัวใด ๆ ต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุการบ่มตัว 28 วันเทียบกับเวลาการบ่มตัว

3. ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

กราฟความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $E_{50}$ ) กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว แสดงในภาพ 88 พบว่า ได้กราฟความสัมพันธ์แบบเส้นตรง กล่าวคือ หากค่าโมดูลัสของยังที่ 50% เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตาม ซึ่ง  $E_{50}$  มีค่าประมาณ 141.37 กับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ซึ่งผลงานวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2014) ที่มีส่วนผสมเป็น ที่มีส่วนผสมเป็นดินเหนียวแม่น้ำที่มีดินขาวผสมปูนซีเมนต์ และ Jamsawang et al. (2020) ที่ทำการศึกษาดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และถั่วลอ่ย สมการและค่า  $R^2$  ดังแสดงในสมการที่ 15

$$E_{50} = 141.37q_u, R^2 = 0.936 \quad (15)$$

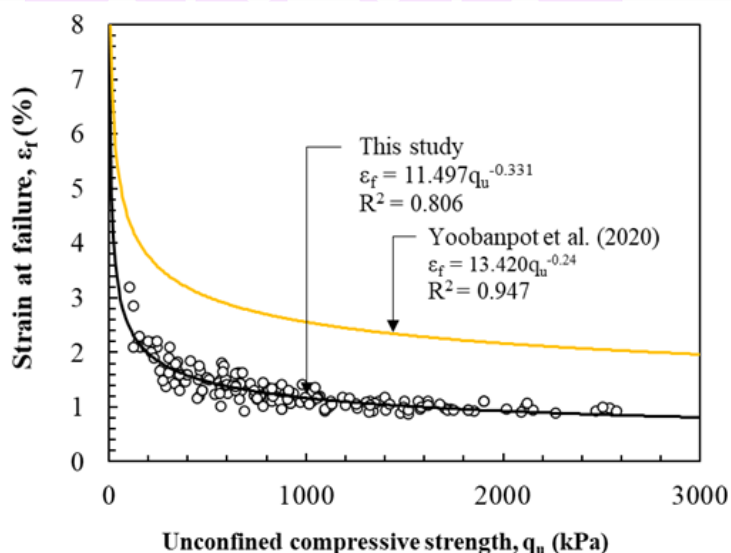


ภาพ 88 ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

#### 4. ความสัมพันธ์ค่าความเครียดที่จุดวิบัติกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่จุดวิบัติกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ดังแสดงในภาพ 89 พบว่า เมื่อค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นค่าค่าความเครียดที่จุดวิบัติลดลง ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันยกกำลังได้สมการและค่า  $R^2$  ดังสมการที่ 16 ซึ่งผลงานวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoobanpot et al. (2020) ที่ทำการศึกษาดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

$$\varepsilon_f = 11.497 \times q_u^{-0.331}, R^2 = 0.806 \quad (16)$$



ภาพ 89 ความสัมพันธ์ค่าความเครียดที่จุดวิบัติกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

#### 5. ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับค่าอัตราช่องว่าง

ตามส่วนที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ระยะเวลาในการบ่มจะมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย จากงานวิจัยของ Lorenzo and Bergado (2004), Jongpradist et al. (2011, 2018, 2019) และ Jamsawang et al. (2017) แสดงให้เห็นว่าปริมาณปูนซีเมนต์ และเวลาในการบ่มตัวส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์รวมถึงหน่วยน้ำหนัก ปริมาณน้ำในมวลดิน และความถ่วงจำเพาะ

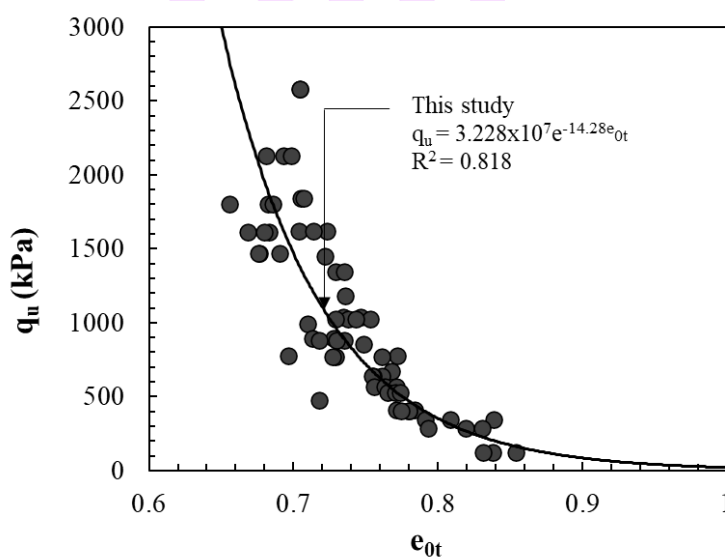
ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างโดยรวมของตัวอย่าง Lorenzo and Bergado (2004) ได้อธิบายว่าช่องว่างหลังจากการบ่มตัว ( $e_{ot}$ ) สามารถใช้เป็นสมบัติทางกายภาพที่อธิบายลักษณะความแข็งแรงของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ ดังที่แสดงในสมการ 17

$$e_{ot} = \frac{(1+w_t)G_{st}\gamma_w}{\gamma_t} - 1 \quad (17)$$

โดยที่  $w_t$  คือปริมาณน้ำในมวลดินหลังการบ่มตัวของตัวอย่างหลังจากเวลาในการบ่มตัว "t"  $G_{st}$  คือค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่าง  $\gamma_t$  คือหน่วยน้ำหนักหลังการบ่มตัวของตัวอย่าง

ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับค่าอัตราช่องว่างหลังการบ่มตัวอย่าง ดังแสดงในภาพ 90 พบว่า เมื่อค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราช่องว่างหลังการบ่มตัวอย่างลดลง ( $e_{ot}$ ) ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันยกกำลังได้สมการและค่า  $R^2$  ดังสมการที่ 18

$$q_u = 3.228 \times 10^7 \times e^{-14.28e_{ot}}, R^2 = 0.818 \quad (18)$$



ภาพ 90 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับค่าอัตราช่องว่างหลังการบ่มตัวอย่าง

6. ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะเปื่อยกสลับแห้งแต่ละรอบ กับค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะปกติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะเปื่อยกสลับแห้งแต่ละรอบกับค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะปกติ ดังแสดงในภาพ 91 พบว่า ได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงซึ่งมีสมการและค่า  $R^2$  ของแต่ละรอบดังนี้

ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน

$$\text{รอบที่ 1 } q_{u(W-D)} = 0.940q_u \quad R^2 = 1.000 \quad (19)$$

$$\text{รอบที่ 3 } q_{u(W-D)} = 0.796q_u \quad R^2 = 1.000 \quad (20)$$

$$\text{รอบที่ 6 } q_{u(W-D)} = 0.662q_u \quad R^2 = 0.999 \quad (21)$$

ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน

$$\text{รอบที่ 1 } q_{u(W-D)} = 0.951q_u \quad R^2 = 0.999 \quad (22)$$

$$\text{รอบที่ 3 } q_{u(W-D)} = 0.801q_u \quad R^2 = 0.999 \quad (23)$$

$$\text{รอบที่ 6 } q_{u(W-D)} = 0.668q_u \quad R^2 = 1.000 \quad (24)$$

ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ดังแสดงในภาพ 91(ก) ในรอบที่ 1 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่ากำลังรับอัดในสภาวะเปื่อยกสลับแห้งลดลงประมาณ 6% เทียบกับสภาวะปกติเนื่องจากการผ่านสภาวะเปื่อยกสลับแห้งทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดินส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง ในรอบที่ 3 พบว่าค่าอัตราส่วนกำลังรับอัดในสภาวะเปื่อยกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับอัดในสภาวะปกติ ( $q_{u(W-D)}/q_u$ ) ลดลงจากรอบที่ 1 ประมาณ 15% เมื่อผ่านสภาวะเปื่อยกสลับแห้งไป 6 รอบพบว่าได้ค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ลดลงจากรอบที่ 3 ประมาณ 13% อาจเป็นเพราะการผ่านสภาวะเปื่อยกสลับแห้งมา 6 รอบทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดิน หรือมีบางตัวอย่างพังก่อนนำไปทดสอบ

ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ดังแสดงในภาพ 91(ข) ในรอบที่ 1 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่ากำลังรับอัดในสภาวะเปื่อยกสลับแห้งลดลงประมาณ 5% เทียบกับสภาวะปกติเนื่องจากการผ่านสภาวะเปื่อยกสลับแห้งทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดินส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง ในรอบที่ 3 พบว่าค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ลดลงจากรอบที่ 1 ประมาณ 15% เมื่อผ่านสภาวะ

เปียกสลับแห้งไป 6 รอบพบว่าได้ค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ลดลงจากรอบที่ 3 ประมาณ 14% เป็นเพราะ การผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งทำให้ตัวอย่างมีลักษณะพรุน จำนวนช่องว่างเพิ่มขึ้น จนบาง ตัวอย่างฟังก์อนนำมาทดสอบส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

โดยภาพรวมจะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนรอบเปียกสลับแห้งรอบ ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สภาวะเปียกสลับแห้ง ( $q_{u(W-D)}$ ) น้อยกว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่สภาวะปกติ ( $q_u$ ) ผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoobanpot et al. (2020) ที่กล่าวว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงด้วยการเพิ่มจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเนื่องจากการเกิดการแตกร้าวในตัวอย่างเมื่อผ่านสภาวะเปียกจะทำให้เกิดการบวมตัวของดิน เมื่อผ่านสภาวะแห้งจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหดตัว เพราะปริมาตรของโพรงลดลงและการสูญเสียน้ำในอนุภาคดิน ส่งผลให้เกิดรอยแตกที่พื้นผิวและแรงดึงในตัวอย่างดิน

7. ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะเปียกสลับแห้งแต่ละรอบกับค่ากำลังรับอัดแกนเดียวในสภาวะปกติของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์ผสมเก๋าลอย

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะเปียกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติ ที่อายุการบ่มตัวที่ 7 28 และ 60 วัน ดังแสดงในภาพ 92 จากผลการทดสอบพบว่า ได้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง มีสมการและค่า  $R^2$  ของแต่ละรอบดังนี้

ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน

$$\text{รอบที่ 1 } q_{u(W-D)} = 0.943q_u \quad R^2=1.000 \quad (25)$$

$$\text{รอบที่ 3 } q_{u(W-D)} = 0.787q_u \quad R^2=0.999 \quad (26)$$

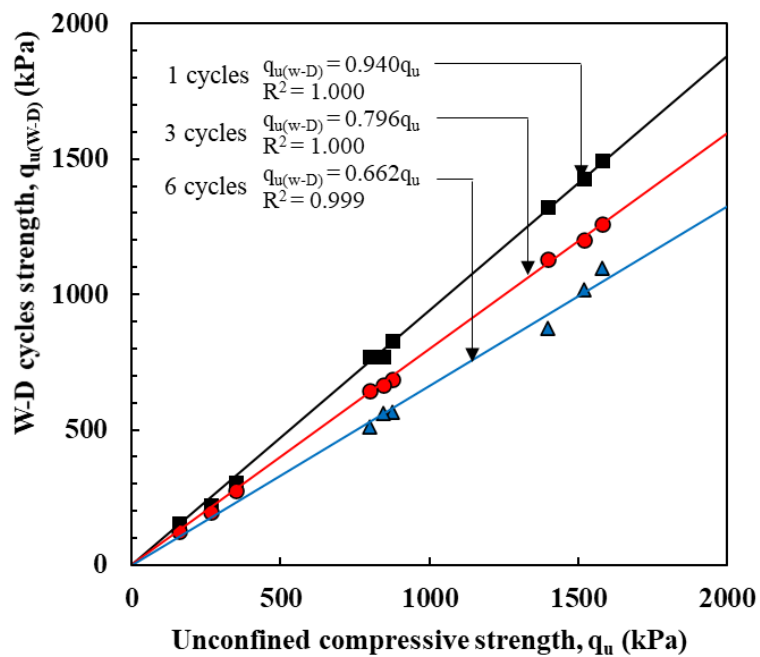
$$\text{รอบที่ 6 } q_{u(W-D)} = 0.598q_u \quad R^2=0.997 \quad (27)$$

ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน

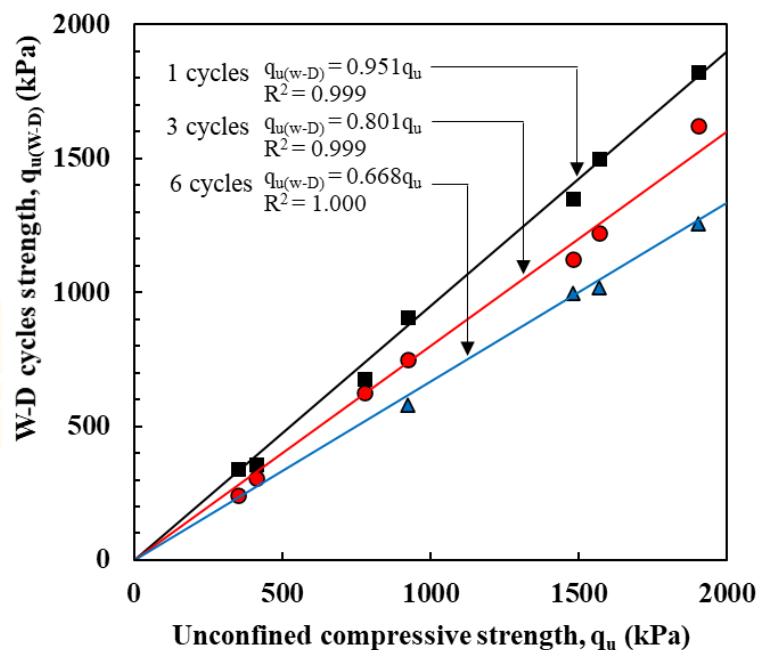
$$\text{รอบที่ 1 } q_{u(W-D)} = 0.953q_u \quad R^2=1.000 \quad (28)$$

$$\text{รอบที่ 3 } q_{u(W-D)} = 0.804q_u \quad R^2=0.996 \quad (29)$$

$$\text{รอบที่ 6 } q_{u(W-D)} = 0.606q_u \quad R^2=0.995 \quad (30)$$



(ก)



(ข)

ภาพ 91 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะเปียกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติ (ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน (ข) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน

ที่อายุการบ่มตัว 60 วัน

$$\text{รอบที่ 1 } q_{u(W-D)} = 0.957q_u \quad R^2 = 0.998 \quad (31)$$

$$\text{รอบที่ 3 } q_{u(W-D)} = 0.811q_u \quad R^2 = 0.998 \quad (32)$$

$$\text{รอบที่ 6 } q_{u(W-D)} = 0.618q_u \quad R^2 = 0.992 \quad (33)$$

เมื่อรอบการทดสอบเปื่อยกสลั้บแห้งเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติลดลงเมื่อเทียบกับการทดสอบที่ผ่านสภาวะเปื่อยกสลั้บรอบที่ 1 ในที่อายุการบ่มตัว 7 วัน ดังแสดงในภาพ 92(ก) เมื่อผ่านสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งรอบที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะลดลงเนื่องจากการการผ่านสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดินส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง โดยค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติ ( $q_{u(W-D)}/q_u$ ) ประมาณ 6% ในรอบเปื่อยกสลั้บแห้งรอบที่ 1 หลังจากผ่านสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งรอบที่ 3 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเริ่มมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปื่อยกสลั้บแห้ง โดยค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ประมาณ 21% จนมาถึงสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งรอบที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลงอย่างเห็นได้ชัด หรือไม่มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเลย เพราะเมื่อผ่านสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้ง 6 รอบทำให้โครงสร้างของมวลดินพังจนทำให้บางตัวอย่างพังก่อนมาถึงรอบที่ 6 โดยค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ประมาณ 39%

เมื่อครบอายุการบ่มตัว 28 วันมีพฤติกรรมการลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเช่นเดียวกับ 7 วัน ดังแสดงในภาพ 92(ข) เมื่อผ่านสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งรอบที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะลดลงเนื่องจากการการผ่านสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดินส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง โดยค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ประมาณ 5% ในรอบเปื่อยกสลั้บแห้งรอบที่ 1 หลังจากผ่านสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งรอบที่ 3 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเริ่มมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปื่อยกสลั้บแห้ง โดยค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ประมาณ 20% จนมาถึงสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้งรอบที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลงอย่างเห็นได้ชัด หรือไม่มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเลย เพราะเมื่อผ่านสภาวะเปื่อยกสลั้บแห้ง 6 รอบทำให้โครงสร้างของมวลดินพังจนทำให้บางตัวอย่างพังก่อนมาถึงรอบที่ 6 โดยค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ประมาณ 40%

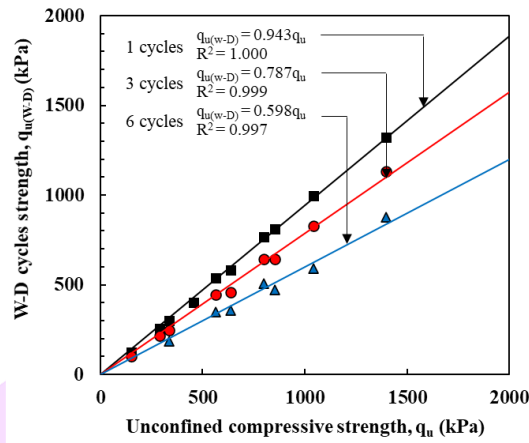
เมื่อครบอายุการบ่มตัว 60 วันมีพฤติกรรมการลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว เช่นเดียวกับ 7 และ 28 วัน ดังแสดงในภาพ 92(ค) เมื่อผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะลดลงเนื่องจากการการผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดินส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลง โดยค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ประมาณ 5% ในรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 หลังจากผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งรอบที่ 3 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเริ่มมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง โดยค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ประมาณ 19% จนมาถึงสภาวะเปียกสลับแห้งรอบที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวลดลงอย่างเห็นได้ชัด หรือไม่มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวเลย เพราะเมื่อผ่านสภาวะเปียกสลับแห้ง 6 รอบทำให้โครงสร้างของมวลดินพังจนทำให้บางตัวอย่างพังก่อนมาถึงรอบที่ 6 โดยค่า  $q_{u(W-D)}/q_u$  ประมาณ 38%

โดยภาพรวม อัตราส่วน  $q_{u(W-D)}/q_u$  มีค่าลดลงตามการเพิ่มจำนวนอายุการบ่มตัวเมื่อเทียบกับแต่ละรอบเปียกสลับแห้งที่เป็นรอบเดียวกัน เป็นเพราะการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยเกือบสมบูรณ์ทำให้ตัวอย่างแข็งขึ้น แต่ความทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งลดลง

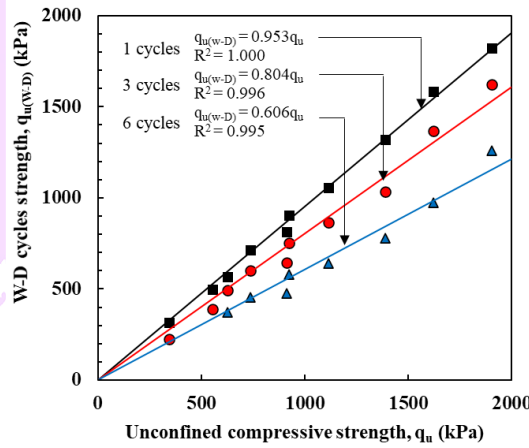
8. ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนที่สภาวะเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติกับจำนวนรอบเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์

ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนที่สภาวะเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติ ( $q_{u(W-D)}/q_{u(\text{unsoaked})}$ ) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ดังแสดงในภาพ 93 พบว่า เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วน  $q_{u(W-D)}/q_{u(\text{unsoaked})}$  ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ได้สมการและค่า  $R^2$  ดังสมการที่ 34 ซึ่งผลงานวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kampala et al. (2014) ที่ทำการศึกษาดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย และ Yoobanpot et al. (2020) ที่ทำการศึกษาดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเช่นกัน

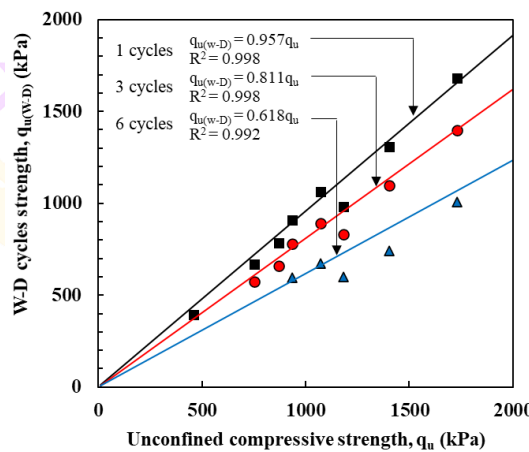
$$\frac{q_{u(W-D)}}{q_u} = 0.970 - 0.054c, R^2 = 0.882 \quad (34)$$



(ก)

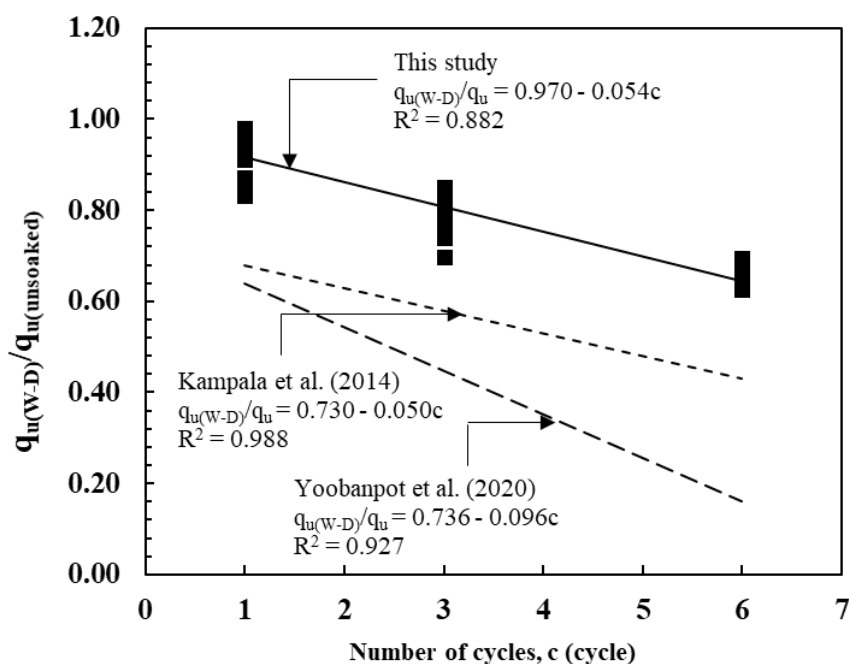


(ข)



(ค)

ภาพ 92 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะเปียกสลับแห้งกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติ (ก) ที่อายุการบ่มตัว 7 วัน (ข) ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน และ (ค) ที่อายุการบ่มตัว 60 วัน

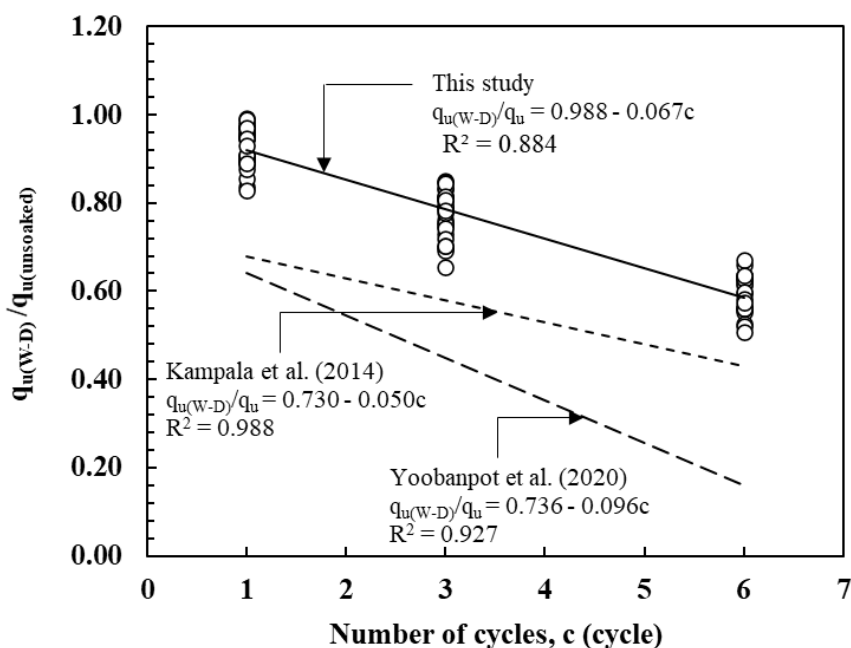


ภาพ 93 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนที่สภาวะเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่สภาวะปกติกับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง

9. ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนที่สภาวะเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่สภาวะปกติกับจำนวนรอบเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนที่สภาวะเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวที่สภาวะปกติ ( $q_{u(W-D)}/q_{u(unsaturated)}$ ) กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ดังแสดงในภาพ 94 พบว่า เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วน  $q_{u(W-D)}/q_{u(unsaturated)}$  ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ได้สมการและค่า  $R^2$  ดังสมการที่ 35 ซึ่งผลงานวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kampala et al. (2014) ที่มีส่วนผสมเป็นดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย และ Yoobanpot et al. (2020) ที่มีส่วนผสมเป็นดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเช่นกัน

$$\frac{q_{u(W-D)}}{q_u} = 0.988 - 0.067c, R^2 = 0.884 \quad (35)$$

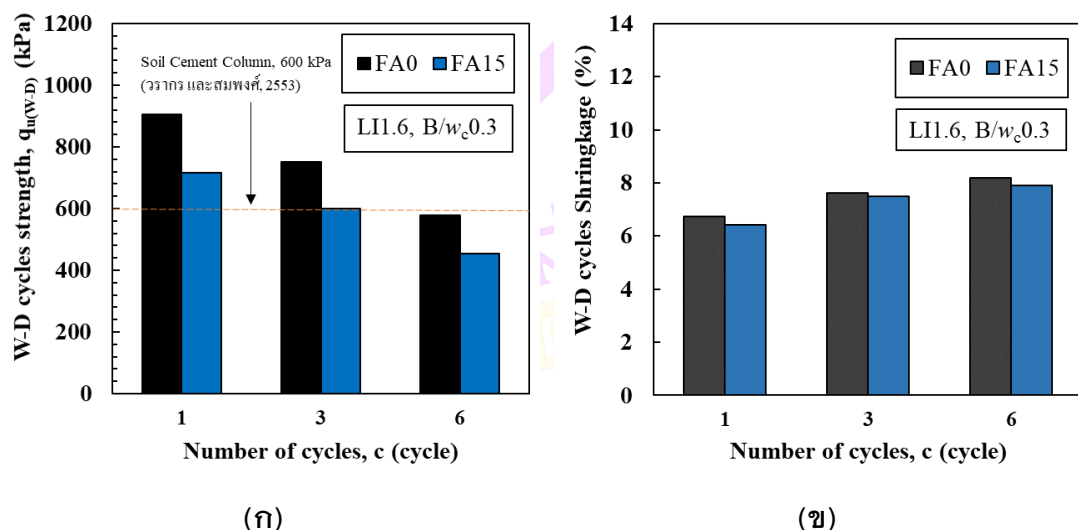


ภาพ 94 ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงอัดแกนที่สภาวะเปียกสลับแห้งต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สภาวะปกติกับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง

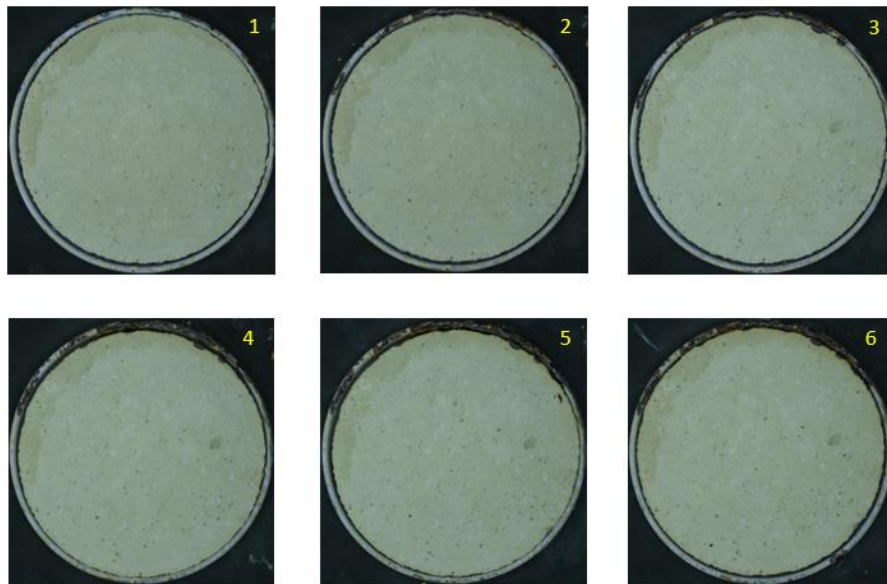
การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะเปียกสลับแห้ง

จากแต่ ละการทดสอบที่ ผ่านมาได้ ข้อสรุปว่า ส่วนผสม L1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 L1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับเสาเข็มดินซีเมนต์ เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สภาวะปกติและสภาวะเปียกสลับแห้งที่ผ่านเกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์ ดังภาพ 95(ก) ในข้อกำหนดการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลึก (deep cement mixing) (วรากร ไม้เรียง และสมพงษ์ โรจน์กิงสตาล, 2553) ได้กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 28 วันไม่ต่ำกว่า 600 kPa สำหรับการก่อสร้างรองรับบริเวณถนน และบนคันคลอง นอกจากนั้นยังได้ค่าการหดตัวน้อยมาก ประมาณ 5 ถึง 6% ที่สภาวะปกติและสภาวะเปียกสลับแห้งจากการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะเปียกสลับแห้งของทั้ง 2 ส่วนผสมดังกล่าวพบว่า เมื่อค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวลดลง ดังภาพ 95(ข) ในรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 ส่วนผสม L1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 มีค่ากำลังรับแรงอัด มากและมีค่าการหดตัวน้อย อยู่ที่ 905.64 kPa และ 6.74% ซึ่งเมื่อดูภาพ 96 ตัวอย่าง ดินมี ลักษณะแข็ง สีเทา ผิวเรียบหยาบ พื้นที่ การหดตัวน้อย ส่วนผสม L1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยและมีค่าการหดตัวน้อยที่สุดอยู่ที่ 715.13 kPa และ

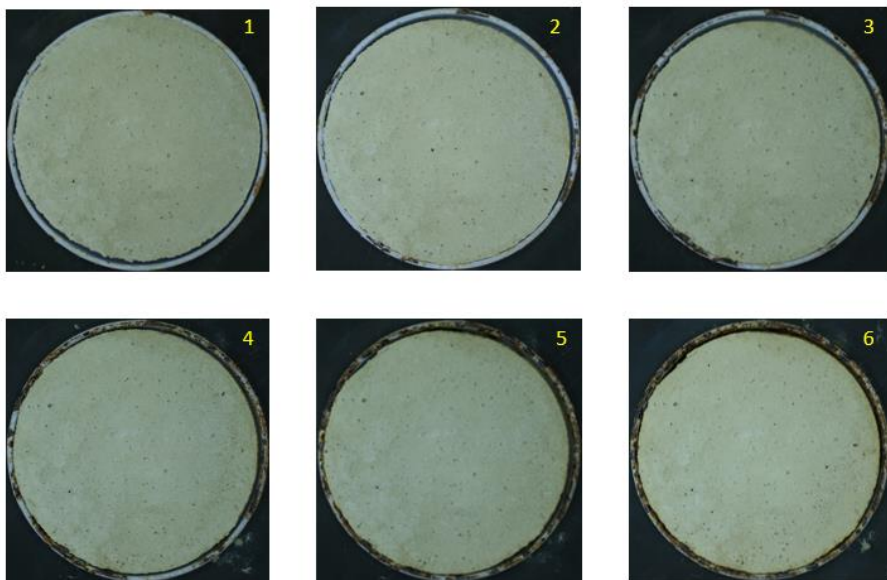
6.42% ซึ่งเมื่อคุณภาพ 97 ตัวอย่างดินมีลักษณะแข็ง สีเทาออกขาว ผิวเรียบเนียน พื้นที่การหดตัวน้อยใกล้เคียงกับส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 ต่อมาในรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 3 พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเป็นเพราะการผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งมา 3 รอบทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดิน ส่วนการหดตัวก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นเพราะการเกิดอัตราการหดตัวมากในสภาวะเปียกสลับแห้งช่วงแรก (รอบที่ 1 ถึง 3) ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ (C.-S. Tang et al., 2011) จนรอบเปียกสลับแห้งรอบที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงและการหดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งมาถึง 6 รอบทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดินส่งผลให้ตัวอย่างดินค่อย ๆ พังทลายลง ซึ่งการพัฒนากการเปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบเปียกสลับแห้งของส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 และ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 ดังแสดงในภาพ 96 และ 97 ตามลำดับ นอกจากนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 แต่ยังผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ ส่วนการหดตัวได้น้อยกว่าของส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 ในแต่ละรอบ แสดงให้เห็นถึงการทนต่อสภาวะเปียกสลับแห้งได้ถึง 6 รอบ และมีการหดตัวที่น้อยด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสรุปว่า LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานเสาเข็มดินซีเมนต์ และยังเป็นทางเลือกที่ประหยัดค่าใช้จ่ายในโครงการเพราะมีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ รวมไปถึงมีคุณสมบัติเชิงกลที่อยู่ในระดับดี



ภาพ 95 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะเปียกสลับแห้ง (ก) กราฟค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งกับรอบเปียกสลับแห้ง (ข) กราฟค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวในสภาวะเปียกสลับแห้งกับรอบเปียกสลับแห้ง



ภาพ 96 LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0



ภาพ 97 LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สรุปผลการทดสอบทั้งหมดของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยมีหัวข้อดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย

1.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม พบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครมีปริมาณความชื้นของดินในธรรมชาติ (natural water content) เท่ากับ 62.24% ค่าหน่วยน้ำหนักรวม (total unit weight,  $\gamma_t$ ) เท่ากับ 16.81 kN/m<sup>3</sup> ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity,  $G_s$ ) เท่ากับ 2.64 ค่าขีดจำกัดเหลว (liquid limit, LL) เท่ากับ 77.80% ค่าขีดจำกัดพลาสติก (plastic limit, PL) เท่ากับ 35.78% ค่าขีดจำกัดหดตัว (shrinkage limit, SL) เท่ากับ 16% ค่าดัชนีพลาสติก (plasticity index, PI) เท่ากับ 42.02% ค่าดัชนีเหลว (liquidity index, LI) เท่ากับ 0.63 และปริมาณดินผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 mm) เท่ากับ 56.90% จากผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนสามารถบ่งบอกได้ว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครจัดอยู่ในประเภทดินที่มีความเป็นพลาสติกซีตัสสูง (high plasticity clay, CH) ตามการกำหนดดินกรรพวิธีรวม (unified soil classification system, USCS)

1.2 คุณสมบัติทางเคมี ในการทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO<sub>2</sub>) เท่ากับ 48.09% อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เท่ากับ 16.29% และเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เท่ากับ 8.64% วัสดุประสานในงานวิจัยนี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอย โดยผลการทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) ของปูนซีเมนต์พบว่า มีแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) เท่ากับ 65.41% และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) เท่ากับ 20.90% ส่วนผลการทดสอบ XRF ของเถ้าลอยพบว่า มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) เท่ากับ 23.56% อลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เท่ากับ

15.35% และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 14.80% ผลรวมของ  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 53.71% ซึ่งอยู่ในช่วง 50 ถึง 70% ดังนั้นถ้าลอยในงานวิจัยนี้จัดอยู่ในประเภท Class C ตามเกณฑ์การจำแนกของ ASTM C618

การทดสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) พบว่า ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวอนุภาคขรุขระ โดยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ  $1 \mu\text{m}$  ส่วนถ้าลอยมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมอย่างชัดเจน ผิวอนุภาคค่อนข้างเรียบ โดยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าหรือเท่ากับ  $4 \mu\text{m}$

## 2. การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ พบว่า เมื่อเพิ่มค่าดัชนีเหลว (LI) ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัด (unconfined compression strength,  $q_u$ ) และค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด (Young's modulus at 50% of strength,  $E_{50}$ ) ลดลง และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $C/w_c$ ) ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัด ( $q_u$ ) และค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด ( $E_{50}$ ) เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นซึ่งสารประกอบหลักได้แก่  $\text{C}_3\text{S}$   $\text{C}_2\text{S}$   $\text{C}_3\text{A}$  เมื่อผสมกับน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{CSH} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับอายุการบ่มตัวด้วยเช่นกัน ยิ่งมีอายุการบ่มตัวมากทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมาก

2.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์ผสมถ้าลอย ซึ่งนำปริมาณถ้าลอยมาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ พบว่า ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $B/w_c$ ) เท่ากับ 0.4 มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่า 0.3 สำหรับการเพิ่มถ้าลอย (fly ash, FA) แทนที่ปูนซีเมนต์เข้าไปไม่สามารถเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าโมดูลัสของยังที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างได้สอดคล้องกับงานวิจัยของนพนันท์ พรรณขาม (2556) เพราะสารประกอบที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพียงพออยู่แล้วในดินเหนียว โดยปฏิกิริยาปอซโซลานิก-จากถ้าลอยเกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เป็นผลผลิตรองของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เมื่อนำผสมกับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ของถ้าลอยทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

ช่วยเพิ่มกำลังให้มากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงด้วย ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง

2.3 การประยุกต์ใช้ในงานเสาะเข็มดินซีเมนต์ของวัสดุผสม โดยการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ สำหรับใช้ในงานเสาะเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีผสมลึก (deep mixing) มีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มาก 150 ถึง 300 kg/m<sup>3</sup> เนื่องจากการควบคุมคุณภาพของส่วนผสมดินซีเมนต์ โดยเกณฑ์การออกแบบเสาะเข็มดินซีเมนต์จะต้องได้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ 28 วันไม่ต่ำกว่า 600 kPa สำหรับการก่อสร้างรองรับบริเวณถนน และบนคันคลอง (วรากร ไม้เรียง และ สมพงศ์ โรจน์กังสดาล, 2553) ส่วนผสมเหมาะสมกับการออกแบบเสาะเข็มดินซีเมนต์ที่ผสมเถ้าลอยได้แก่ ส่วนผสม B/w<sub>c</sub> เท่ากับ 0.3 ที่มีเถ้าลอยเท่ากับ 15 และ 30% ผ่านเกณฑ์การออกแบบเสาะเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยที่มากกว่า 30% คือ 45 และ 60% ไม่ผ่านเกณฑ์การออกแบบเสาะเข็มดินซีเมนต์ สำหรับส่วนผสม B/w<sub>c</sub> เท่ากับ 0.4 ที่มีเถ้าลอยทั้งหมดผ่านเกณฑ์การออกแบบเสาะเข็มดินซีเมนต์เพราะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์มากโดยได้สรุปส่วนผสมและค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์การออกแบบเสาะเข็มดินซีเมนต์ในตาราง 20

2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสม สำหรับผลการทดสอบโดยวิธีเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) และการทดสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ได้ทำการทดสอบเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 และ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30 ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน ผลการทดสอบ EDS พบว่า ส่วนผสมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ (LI1.6) เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 พบว่า ค่า Ca/Si เพิ่มขึ้นและค่า Si/Al ลดลงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินเพิ่มขึ้นจากการเกิดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อเพิ่มส่วนผสมกับเถ้าลอย 15% แทนที่ปูนซีเมนต์ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 พบว่า ค่า Ca/Si ลดลงและค่า Si/Al เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 เพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเนื่องจากการแทนที่เถ้าลอย 15% ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเพิ่มเถ้าลอยเป็น 30% LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30 พบว่า ค่า Ca/Si ลดลงและค่า Si/Al เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 เพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเนื่องจากการแทนที่เถ้าลอย 30% ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงซึ่งน้อยกว่า LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ส่วนผลการทดสอบ SEM พบว่า ส่วนผสม LI1.6 มีลักษณะของอนุภาคดินไม่เป็นรูปร่าง และมีช่องว่างจำนวนมาก เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 พบว่ามีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, CSH) กระจายตัวอยู่ และเอททริงไกต์ (Ettringite, Et) ที่มีรูปร่างเป็นแท่งเข็มกระจายอยู่เต็มพื้นผิวของอนุภาคดินส่งผลให้อนุภาคดินแน่นขึ้น จำนวนช่องว่างลดลง ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาผสมกับเถ้าลอยเพิ่มมา 15% แทนที่ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 พบว่า เอททริงไกต์ (Et) มีจำนวนลดลงเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 15% ส่งผลให้ค่ากำลังรับอัดแกนเดียวลดลงแต่จำนวนช่องว่างลดลงทำให้อนุภาคดินแน่นพอ ๆ กับ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3 เมื่อเพิ่มเถ้าลอยเป็น 30% เป็นส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA30 พบว่า จำนวนช่องว่างลดลงอย่างเห็นได้ชัดทำให้อนุภาคดินแน่นขึ้นกว่าเถ้าลอย 15% ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วัน แม้มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเทียบกับ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 เพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเนื่องจากการแทนที่เถ้าลอย 30%

3. ผลการหดตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยวิธีภาพถ่าย พบว่า การเพิ่มเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้การหดตัวลดลงที่อายุการบ่มตัว 60 วันขึ้นไป เนื่องจากการเพิ่มเถ้าลอยจะช่วยให้การลดช่องว่างทำให้อนุภาคในมวลดินแน่นขึ้นส่งผลให้ลดอัตราการหดตัวตามขนาดของช่องว่างที่ลดลงไปด้วย แต่ที่อายุการบ่มตัว 28 วันแรก การเพิ่มเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอลิไซคลานิกยังไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดอัตราการหดตัวเพิ่มขึ้นแต่เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยพบว่า ส่วนผสมที่มีเถ้าลอยมีค่าการหดตัวที่ต่ำกว่าส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอย โดยพบว่าส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 ให้ค่าการหดตัวที่ต่ำที่สุด ซึ่งส่วนผสมที่มีค่าดัชนีเหลว (LI) เท่ากับ 1.3 มีการหดตัวต่ำกว่า 1.6 อยู่เล็กน้อย ส่วนอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน (C/w<sub>c</sub>) เท่ากับ 0.3 มีค่าการหดตัวที่ต่ำกว่า 0.4 นอกจากนี้เมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำสูงเช่นกันพบว่า ดินที่ปรับปรุงคุณภาพสามารถลดการหดตัวได้ประมาณ 25%

การเกิดรอยแตกในส่วนผสมมีจำนวนที่น้อยมาก และส่วนใหญ่แทบจะไม่มีรอยแตกเลยที่อายุการบ่มตัวที่ 7 และ 28 วัน จนอายุการบ่มตัว 60 และ 90 วันพบว่าเกิดการเกิดรอยแตกในแต่ละส่วนผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า LI เท่ากับ 1.6 จะมียอยแตกมากกว่า 1.3 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดินเริ่มต้น ส่วนผสมที่มี B/w<sub>c</sub> เท่ากับ 0.4 จะมียอยแตกน้อยกว่า 0.3 จากผล

การทดสอบการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยอาจทำให้เกิดรอยแตกมากขึ้นในแต่ละส่วนผสมเมื่ออายุการบ่มตัวมากขึ้น แต่ในส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 15% จะไม่พบรอยแตกหรือเกิดรอยแตกลดน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใส่ปริมาณเถ้าลอยอื่น ๆ นอกจากนี้เมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำสูงเช่นกันพบว่า ดินที่ปรับปรุงคุณภาพสามารถช่วยลดการเกิดรอยแตกลงได้ประมาณ 14%

ความกว้างรอยแตกจะขึ้นอยู่กับการเกิดรอยแตก โดยเมื่อมีรอยแตกเพิ่มขึ้นจะทำให้มีความกว้างรอยแตกเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้เกิดความกว้างรอยแตกในแต่ละส่วนผสมมากขึ้นเมื่ออายุการบ่มตัวมากขึ้น แต่ในส่วนผสมเดียวกันยังช่วยลดความกว้างรอยแตกด้วยเมื่ออายุการบ่มตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า  $LI$  เท่ากับ 1.3 จะมีความกว้างรอยแตกลดน้อยกว่า 1.6 ที่อายุการบ่มตัว 60 วันเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดินเริ่มต้น ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีความกว้างรอยแตกลดน้อยกว่า 0.3 แต่ในส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอย 15% จะไม่พบรอยแตกหรือเกิดความกว้างรอยแตกลดน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใส่ปริมาณเถ้าลอยอื่น ๆ นอกจากนี้เมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำสูงเช่นกันพบว่า ดินที่ปรับปรุงคุณภาพสามารถช่วยลดความกว้างรอยแตกลงได้ประมาณ 0.1 เซนติเมตร

ตัวอย่างดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพจะมีรอยแตกเป็นจำนวนมาก ก่อนรอยแตกแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ทำให้มีความยาวรอยแตก และความกว้างรอยแตกมาก โดยลักษณะรอยแตกรูปร่างตัว “T” มักจะมีจุดตัดที่เกิดขึ้นถูกรอบด้วยรูปร่าง “Y” เมื่อเทียบกับดินที่ปรับปรุงคุณภาพ พบว่ามีรอยแตกลดน้อยกว่าดินที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ โดยลักษณะรอยแตกจะเป็นรอยแตกตามยาวมีความกว้างของรอยแตกเล็กน้อย

#### 4. คุณสมบัติความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวกรุงเทพฯ

4.1 ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลับแห้งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ผสมปูนซีเมนต์ พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบเปียกสลับแห้งทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมที่มีดัชนีเหลว ( $LI$ ) เท่ากับ 1.0 1.3 และ 1.6 พบว่าเมื่อเพิ่ม  $LI$  ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำในมวลดินเริ่มต้นมาก เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์ปูนซีเมนต์ต่อเปอร์เซ็นต์น้ำในมวลดิน ( $C/w_c$ ) เท่ากับ 0.2 0.3 และ 0.4 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วน  $C/w_c$  ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้น และสามารถทนต่อการเพิ่มจำนวนรอบสภาวะเปียกสลับแห้ง

เนื่องจากมีปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น แต่ส่วนผสมที่มี  $C/w_c$  เท่ากับ 0.2 ไม่สามารถทนต่อสภาวะเปียกสลั้บแห้งได้ถึง 6 รอบเพราะมีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยที่สุด

4.2 ผลการทดสอบความคงทนในสภาวะเปียกสลั้บแห้งของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลั้บแห้งลดลงเนื่องจากมีปริมาณเถ้าลอยมากในการแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปูนซีเมนต์ลดลงส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มรอบเปียกสลั้บจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ในส่วนผสมที่มีปริมาณเถ้าลอยเดียวกัน เนื่องจากการเกิดการแตกร้าวในตัวอย่าง เมื่อผ่านสภาวะเปียกจะทำให้เกิดการบวมตัวของดิน เมื่อผ่านสภาวะแห้งจะทำให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวเพราะ ปริมาตรของโพรงลดลง และการสูญเสียน้ำในอนุภาคดินส่งผลทำให้เกิดรอยแตกที่พื้นผิว และแรงดึงในตัวอย่างดิน นำไปสู่การเกิดการพังทลายไปในบางส่วน ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 และ 0.4 พบว่า  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีค่ากำลังรับแรงอัดในสภาวะเปียกสลั้บมากกว่า 0.3 อย่างเห็นได้ชัดในแต่ละรอบ และแต่ละทุกอายุการบ่มตัว ที่ปริมาณเถ้าลอยเดียวกัน เนื่องจากมีปริมาณซีเมนต์และปริมาณเถ้าลอยที่มากกว่า  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 นอกจากนี้ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 15 เปอร์เซ็นต์สามารถทนต่อสภาวะเปียกสลั้บแห้งได้ถึง 6 รอบโดยที่ไม่มีตัวอย่างที่พังก่อนที่จะทดสอบเลย จึงเป็นส่วนผสมเถ้าลอยที่เหมาะสมในการแทนที่ปูนซีเมนต์

5. ผลการหดตัวในสภาวะเปียกสลั้บแห้งของดินเหนียวกรุงเทพฯ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้นทุกส่วนผสม แต่อัตราการหดตัวแต่ละส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเถ้าลอย โดยแบ่งอัตราการหดตัวเป็น 2 ช่วง ดังนี้ ช่วงแรกคือ รอบเปียกสลั้บแห้งรอบที่ 1 ถึง 3 จะมีอัตราการหดตัวเพิ่มขึ้นมาก เพราะที่สภาวะเปียกตัวอย่างเกิดการบวมตัวมาที่สภาวะแห้งตัวอย่างเกิดการหดตัวอย่างรุนแรง และช่วงหลังคือ รอบเปียกสลั้บแห้งรอบที่ 3 ถึง 6 จะมีอัตราการหดตัวที่ค่อย ๆ ลดลงและ/หรือคงที่ เพราะอัตราการหดตัวช่วงแรกทำให้เกิดโพรงภายในมวลดินมากส่งผลให้เกิดความเสียหายในมวลดิน เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 และ 0.4 พบว่า ส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.4 มีการเกิดอัตราการหดตัวในช่วงแรก (รอบที่ 1 ถึง 3) ที่น้อยกว่าส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 เพราะมีปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่มากกว่าส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ทำให้ลดอัตราการเกิดการหดตัวได้น้อยกว่าส่วนผสมที่มี  $B/w_c$  เท่ากับ 0.3 ที่ปริมาณเถ้าลอยเดียวกัน ในรอบเปียกสลั้บแห้งรอบที่ 3 อัตราการเกิดการหดตัวในช่วงหลัง (รอบที่ 3 ถึง 6) ส่วนใหญ่จะ

พบว่าค่าการหดตัวลดลงเป็นเพราะการค่อย ๆ เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างในมวลดินพื้นผิวดินขรุขระ ตัวอย่างดินแตกเป็นเม็ดเล็ก ๆ รวมตัวกับตัวอย่างดินเดิมเนื่องจากการแช่น้ำในแต่ละรอบจนทำให้รวมเป็นพื้นผิวเดียวกันส่งผลให้การหดตัวลดลง ส่วนผสมที่มีเถ้าลอย 15% ที่อายุการบ่มตัว 28 วันสามารถช่วยลดการหดตัวในสภาวะเปียกกลับแห้งในอัตราการหดตัวช่วงแรกได้ต่ำกว่าส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอยหรือ FA เท่ากับ 0% จึงเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์

6. การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะเปียกกลับแห้ง จากหัวข้อที่ 2.3 ได้พบว่าส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 และ LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 มีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ผ่านเกณฑ์การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ในสภาวะเปียกกลับแห้ง จึงได้นำ 2 ส่วนผสมนี้มาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่สภาวะเปียกกลับแห้ง พบว่า เมื่อค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวลดลง ส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 แต่ยังผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ ส่วนการหดตัวได้น้อยกว่าของส่วนผสม LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA0 ในแต่ละรอบ แสดงให้เห็นถึงการทนต่อสภาวะเปียกกลับแห้งได้ถึง 6 รอบ และมีการหดตัวที่น้อยด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสรุปว่า LI1.6B/w<sub>c</sub>0.3FA15 เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานเสาเข็มดินซีเมนต์ และยังเป็นทางเลือกค่าใช้จ่ายในโครงการเพราะมีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ต่ำ รวมไปถึงมีคุณสมบัติเชิงกลที่อยู่ในระดับดี โดยได้สรุปกำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับเปอร์เซ็นต์การหดตัวของส่วนผสมที่ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสภาวะเปียกกลับแห้งผ่านมาตรฐานเสาเข็มดินซีเมนต์ ดังแสดงในตาราง 30

### ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถควบคุมคุณภาพของตัวอย่างที่ทำการทดสอบได้ ดังนั้นจึงอยากให้มีการศึกษาเพิ่มเติมในการประยุกต์การใช้งานจริงในภาคสนาม
2. ควรมีโปรแกรมในการวิเคราะห์การทดสอบการหดตัวด้วยวิธีภาพแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการหดตัวจากภาพถ่าย

3.ควรมีมาตรฐานหรือข้อกำหนดการหดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ชัดเจน เพื่อนำไม่  
เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้ออกแบบไว้

4.ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอย สำหรับการใช้งาน  
จริงในสนามมีความแตกต่างกับในห้องปฏิบัติการอย่างไร พร้อมแนวทางการแก้ไขในอนาคต

5.ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับการหดตัว  
ของเสาเข็มดินซีเมนต์



## บรรณานุกรม

- Abd El-Halim, A. A. (2017). **Image processing technique to assess the use of sugarcane pith to mitigate clayey soil cracks: Laboratory experiment.** Soil and Tillage Research, 169, 138–145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2017.02.007>
- Balasubramaniam, A., Oh, E., Bolton, M., Bergado, D. T. and Phienweij, N. (2005). **Deep-well pumping in the Bangkok Plain and its influence on ground improvement development with surcharge and vertical drains.** Proceedings of the ICE – Ground Improvement, 9. doi:10.1680/grim.2005.9.4.149
- Cho, Y.-H., Lee, K.-W. and Ryu, S.-W. (2006). **Development of Cement-Treated Base Material for Reducing Shrinkage Cracks.** Transportation Research Record, 1952(1), 134–143. doi:10.1177/0361198106195200115
- Chompoorat, T. and Likitlersuang, S. (2016). **Assessment of shrinkage characteristic in blended cement and fly ash admixed soft clay.** Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2(6), 311–316. doi:10.3208/jgssp.THA-01
- Circeo, L. J., Davidson, D. and David, H. J. H. R. B. B. (1962). **Strength-maturity relations of soil-cement mixtures.** (353).
- Flodin, N. and Broms, B. (1981). **Chapter 1 – Historical Development of Civil Engineering in Soft Clay.** In Developments in Geotechnical Engineering (Vol. 20, pp. 25–156): Elsevier.
- Gunther, J., Holm, G., Westberg, G. and Eriksson, H. (2004). **MODIFIED DRY MIXING (MDM) – A NEW POSSIBILITY IN DEEP MIXING Modified Dry Mixing (MDM) –New Possibilities.** doi:10.1061/40744(154)127
- Horpibulsk, S., Rachan, R., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A. J. S. and Foundations. (2011). **Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations.** 51(2), 239–251.
- Horpibulsuk, S., Phojan, W., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A. and Liu, M. D. (2012). **Strength development in blended cement admixed saline clay.** Applied Clay Science, 55, 44–52. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.10.003>

- Horpibulsuk, S., Rachan, R. and Suddeepong, A. (2011). **Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay.** *Construction and Building Materials*, 25(4), 1521–1531.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.006>
- Jamsawang, P., Bergado, D. T. and Voottipruex, P. (2011). **Field behaviour of stiffened deep cement mixing piles.** 164(1), 33–49. doi:10.1680/grim.900027
- Jamsawang, P., Charoensil, S., Namjan, T., Jongpradist, P. and Likitlersuang, S. (2020). **Mechanical and microstructural properties of dredged sediments treated with cement and fly ash for use as road materials.** *Road Materials and Pavement Design*, 1–25. doi:10.1080/14680629.2020.1772349
- Jamsawang, P., Poorahong, H., Yoobanpot, N., Songpiriyakij, S. and Jongpradist, P. (2017). **Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste.** *Construction and Building Materials*, 154, 61–71.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.188>
- Jamsawang, P., Voottipruex, P., Boathong, P., Mairaing, W. and Horpibulsuk, S. (2015). **Three-dimensional numerical investigation on lateral movement and factor of safety of slopes stabilized with deep cement mixing column rows.** *Engineering Geology*, 188, 159–167. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.017>
- Jongpradist, P. (2011). **Effective Void Ratio for Assessing the Mechanical Properties of Cement–Clay Admixtures at High Water Content.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, 621–627.
- Jongpradist, P., Homtragoon, W., Sukkarak, R., Kongkitkul, W. and Jamsawang, P. (2018). **Efficiency of Rice Husk Ash as Cementitious Material in High-Strength Cement–Admixed Clay.** *Advances in Civil Engineering*, 2018, 8346319.  
doi:10.1155/2018/8346319
- Jongpradist, P., Jamsawang, P. and Kongkitkul, W. (2019). **Equivalent void ratio controlling the mechanical properties of cementitious material–clay mixtures with high water content.** *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(10), 1151–1162. doi:10.1080/1064119X.2018.1539534

- Kampala, A., Horpibulsuk, S., Prongmanee, N. and Chinkulkijniwat, A. (2014). **Influence of Wet-Dry Cycles on Compressive Strength of Calcium Carbide Residue Fly Ash Stabilized Clay**. 26(4), 633–643. doi:doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000853
- Katha, B. R., Dissertations, P., Theses and Engineering, U. o. T. a. A. C. o. (2002). **Shrinkage Strain Characterization of Expansive Soils Using Digital Imaging Technology**: University of Texas at Arlington.
- Kim, S. R. (1991). **Stress Strain Behavior and Strength Characteristics of Lightly Over consolidated Clays**. Asian Institute of Technology, Bangkok,
- Lai, Y. P., Bergado, D. T., Lorenzo, G. A. and Duangchan, T. (2006). **Full-scale reinforced embankment on deep jet mixing improved ground**. 10(4), 153–164. doi:10.1680/grim.2006.10.4.153
- Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T. (2004). **Fundamental Parameters of Cement-Admixed Clay**;New Approach. 130(10), 1042–1050. doi:doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1042)
- Mukherjee, K. and Mishra, A. (2019). **Hydro-Mechanical Properties of Sand-Bentonite-Glass Fiber Composite for Landfill Application**. KSCE Journal of Civil Engineering, 23. doi:10.1007/s12205-019-2015-9
- Puppala, A. J., Punthutaecha, K., Vanapalli, S. K. J. J. o. G. and Engineering, G. (2006). **Soil-water characteristic curves of stabilized expansive soils**. 132(6), 736–751.
- Rafizul, I. and Datta, D. (2018). **Quantification of Geometrical and Morphological Characteristics of Desiccation Crack and Shrinkage Behavior of Composite Clay Liner**. Volume 9, 284–294. doi:10.5829/ijee.2018.09.04.09
- Ren, J., Li, X. and Zhao, K. J. C. G. S. (2015). **Quantitative analysis of relationships between crack characteristics and properties of soda-saline soils in Songnen Plain, China**. 25(5), 591–601.
- Shibuya, S., Tamrakar, S. and Manakul, W. (2003). **Geotechnical hazards in Bangkok – Present and future**. Lowland technology international, 5, 1–13.

- Singh, S. P., Rout, S. and Tiwari, A. (2018). **Quantification of desiccation cracks using image analysis technique**. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(4), 383–388. doi:10.1080/19386362.2017.1282400
- Sinsakul, S. (2000). **Late Quaternary geology of the Lower Central Plain, Thailand**. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(4), 415–426. doi:https://doi.org/10.1016/S1367-9120(99)00075-9
- Srichan, S. (2001). **Compressive strength of cement–fly ash stabilized Bangkok clay mixtures under static and cyclic loading**. King Mongkuts University of Technology Thonburi. Bangkok (Thailand),
- Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E. and Guan, H. (2012). **Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays**. *Soils and Foundations*, 52(4), 682–697. doi:https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.07.009
- Takeda, T., Yamane, Y., Yamamura, M. and Ueki., H. (1998). **Ground Improvement by Jet & Mechanical Mixing Method**. 2<sup>nd</sup> International Conference on Ground Improvement Techniques.
- Tang, C.–S., Cui, Y.–J., Shi, B., Tang, A.–M. and Liu, C. (2011). **Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles**. *Geoderma*, 166(1), 111–118. doi:https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.018
- Tang, C.–S., Shi, B., Cui, Y.–J., Liu, C. and Gu, K. J. C. G. J. (2012). **Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber–reinforced clayey soil**. 49(9), 1088–1101.
- Tang, C., Shi, B., Liu, C., Zhao, L. and Wang, B. (2008). **Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils**. *Engineering Geology*, 101(3), 204–217. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.05.005
- Voottipruex, P., Suksawat, T., Bergado, D. T. and Jamsawang, P. (2011). **Numerical simulations and parametric study of SDCM and DCM piles under full scale axial and lateral loads**. *Computers and Geotechnics*, 38(3), 318–329. doi:https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.11.006
- Wilhelm Burger and Mark J. Burge. (2016). **Digital Image Processing**: Springer, London.

Yoobanpot, N., Jamsawang, P., Poorahong, H., Jongpradist, P. and Likitlersuang, S. (2020).

**Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash.**

Engineering Geology, 267, 105491. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105491>

Zhang, T., Yue, X., Deng, Y., Zhang, D. and Liu, S. (2014). **Mechanical behaviour and micro-structure of cement-stabilised marine clay with a metakaolin agent.**

Construction and Building Materials, 73, 51–57.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.041>

เกษม เพชรเกตุ. (2541). **เทคนิคการใช้ Deep Soil Stabilization สำหรับงานดินอ่อนในประเทศไทย.** การสัมมนาทางวิชาการเรื่อง การปรับปรุงคุณภาพดิน '41.

ชยานนท์ ศรีเจริญ, รุ่งลาวัลย์ ราชัน และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2557). **การพัฒนากำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์และเสาเข็มดินซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในชั้นดินเหนียวอ่อน กรุงเทพฯ.** วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 37(2), 151–164.

ธัชชัย ไหมขันท์. (2560). **การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกวนพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย.** มหาวิทยาลัยพะเยา,

นพนันท์ พรรณขาม และสุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง (2556). **พฤติกรรมการหดตัวของดินเหนียวอ่อนที่ผสมด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย.** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, <http://doi.org/10.14457/CU.the.2013.1366>.

ปิยะ รัตนสุวรรณ และวรรณสิริ พันธุ์อุไร (2555). **การวิเคราะห์และออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบกำแพงกันดิน อาคารจอดรถ อิมแพ็ค อาร์น่า เมืองทองธานี.** วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 23(2).

พีรพงษ์ ลิมารัตน์, พิทยา แจ่มสว่าง, อุทัยฤทธิ โจรณีวิภาต และกมลวัลย์ ลือประเสริฐ. (2561). **การปรับปรุงคุณภาพตะกอนดินชุดด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทาง: กรณีศึกษาเขื่อนแม่สาบ.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, 23.

รศ.ดร.วรารกร ไหมเรียง และสมพงษ์ โจรณ์กั้งสาดล. (2553). **คู่มือการก่อสร้างและแนวทางการแก้ไขปัญหาการก่อสร้างเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ :กรณีศึกษาในโครงการระบายน้ำบริเวณสนามบินสุวรรณภูมิ.** 136.

สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง (2551). **ปฐพีกลศาสตร์: หลักการพื้นฐาน: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**

ว.ส.ท. (2520). ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง.

สัญญาธิ เจริญศิลป์, พิทยา แจ่มสว่าง, เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช และอุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต

(2561). การใช้ตะกอนดินขุดปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุทาง.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, 23.

สาธิต ดีเดชา (2548). การศึกษากำล้างต้านทานแรงอัดทิศทางเดียวและความสามารถในการ

อัดตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์และเถ้าลอยที่ปริมาณความชื้น

สูง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,





## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	อนุพงศ์ คำปลอด
วัน เดือน ปี เกิด	19 กุมภาพันธ์ 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสมเด็จพระเจ้าตากสินมหาราช จังหวัดตาก
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2)
ที่อยู่ปัจจุบัน	91/2 ม.3 ต.ตากออก อ.บ้านตาก จ.ตาก 63120
ผลงานตีพิมพ์	งานวิจัยเรื่อง คุณลักษณะการหดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 (15-17 กรกฎาคม 2563)
รางวัลที่ได้รับ	เหรียญเงิน การแข่งขันประกวดโครงการด้านวิศวกรรมปฐพี ประจำปี การศึกษา 2560 จัดโดยมูลนิธิศาสตราจารย์ ดร.ชัย มุกตพันธ์ ร่วมกับ คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมปฐพี ในคณะกรรมการสาขา วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ เรื่อง พฤติกรรมการหดตัวของดินตะกอนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ด้วยวิธีภาพถ่าย  ทุนผู้ช่วยสอน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ปี 2561- 2563  นักวิจัย โครงการทดสอบด้านกำลังและการดูดซึมน้ำด้วยวิธีอัดแรงดัน สูงของดินบดอัดผสมปูนซีเมนต์และโพลีเมอร์ ของถนนทางเข้าศูนย์ พัฒนาโครงการหลวงเลอตอ อำเภอแม่ระมาด จังหวัดตาก  ผู้ดำเนินโครงการ 1 ตำบล 1 มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ในความร่วมมือของกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ประจำปี 2564