

การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอน  
ที่วังพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย



ธัชชัย ใหม่จันทร์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา



การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอน  
ที่วุ้นพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย



ธัชชัย ใหม่ชนันท์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์  
และเถ้าลอย

ของ ธัชชัย ใหม่พันธ์

ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

.....ประธาน

(ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์)

.....กรรมการ

(ดร.สุริยาวัช ประอ้าย)

อนุมัติ

.....

(นายเทอดศักดิ์ โกไศยกานนท์)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

พฤษภาคม 2560

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบคุณ บิดา มารดา รวมไปถึงบุพการีทุก ๆ ท่านที่คอยให้กำลังใจ และส่งเสริมโอกาสในการเรียนรู้ในทุก ๆ ระดับชั้นเรียนตั้งแต่เล็กจนโต รวมทั้งสนับสนุนในการศึกษาและการเป็นอยู่ตลอดระยะเวลาในการศึกษา ให้กำลังใจในยามท้อแท้ ให้คำแนะนำที่เป็นแรงผลักดันต่าง ๆ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงที่สุด และขอบคุณอย่างที่สุด ที่สนับสนุนในทุก ๆ สิ่งเป็นอย่างดีตลอดมา

ผู้เขียนขอกราบขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เปิดโอกาสในด้านการศึกษาให้กับผู้เขียน คอยให้ความรู้ อบรมสั่งสอนทั้งในเรื่องการศึกษา และการใช้ชีวิตไม่ว่าจะเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและเรื่องที่ไม่เกี่ยวข้องกับการศึกษา คอยช่วยเหลือและจัดการกับปัญหาหลาย ๆ อย่างที่เกิดขึ้น คอยดูแลเอาใจใส่เปรียบเสมือนพี่ชาย/น้องชายคนหนึ่ง และสนับสนุนทุกด้านอย่างเต็มที่ จนเกิดเป็นผลสำเร็จที่ได้มาซึ่งเล่มวิทยานิพนธ์สมบูรณ์นี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และผู้เขียนรู้สึกเป็นเกียรติอย่างสูงที่ให้ ความกรุณาเป็นประธานคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้เกิดเป็นผลสำเร็จทางการศึกษาของผู้เขียน

ผู้เขียนขอกราบขอบคุณอาจารย์ และครูช่าง ในสาขาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำความรู้ และแนะแนวการทำงานเกี่ยวกับการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ คอบดูแลสอบถามเกี่ยวกับความคืบหน้าในการทำวิทยานิพนธ์อยู่อย่างตลอดมาซึ่งทำให้เล่มวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ได้มากขึ้น ตลอดไปจนถึงให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือ สถานที่ และวัสดุอุปกรณ์ สำหรับการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งเปรียบเสมือนบ้านอีกหลังหนึ่งของผู้เขียน

และสุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบผลสำเร็จทางการศึกษาให้แก่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่านทั้ง บิดา มารดา ญาติพี่น้องทุกคน ครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจในยามท้อแท้ และถ้าหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขออภัยไว้แต่เพียงผู้เดียว

ธัชชัย ไหมขันท์

**ชื่อเรื่อง:** การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

**ผู้วิจัย:** ธัชชัย ใหม่พันธ์ **วิทยานิพนธ์:** วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2560

**ประธานที่ปรึกษา:** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์, **กรรมการที่ปรึกษา:** ดร. สุริยาภูธ ประอ้าย

**คำสำคัญ:** ดินตะกอนกวี้นพะเยา, ปูนซีเมนต์, เถ้าลอย, กำลังรับแรงอัดแกนเดียว, ความคงทน

### บทคัดย่อ

กวี้นพะเยานับเป็นแหล่งน้ำจืดที่สำคัญในจังหวัดพะเยา ปัจจุบันปัญหาการดินขึ้นเกิดจากการสะสมของดินตะกอนที่ไหลพัดพามากับแม่น้ำ ส่งผลให้กวี้นพะเยามีปริมาณการกักเก็บน้ำได้น้อยลง โดยหน่วยงานภาครัฐในจังหวัดพะเยาได้ดำเนินการขุดลอกและดูดตะกอนออกจากกวี้นพะเยาทุกปี จึงเกิดปัญหาการกองตัวของดินตะกอนในบริเวณรอบ ๆ กวี้นพะเยาอยู่อย่างมก ส่งผลให้เกิดเป็นวัสนดุเหลือทิ้งและไม่ได้มีการนำไปใช้อย่างถูกต้อง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ/หรือเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยดินตะกอนกวี้นพะเยาจะถูกนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยส่วนผสมอย่างปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0-10 และเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 0-20 สำหรับทำการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 60, 90 และ 120 วัน และทำการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง สดท้ายในงานวิจัยนี้ได้นำผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวมาวิเคราะห์ในรูปแบบของแบบจำลองสมการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองสมการตัวแปรควบคุม จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า แบบจำลองที่ได้มีความเชื่อมั่นมากกว่า 80 เปอร์เซนต์ ดังนั้น แบบจำลองที่ได้ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถทำนายถึงพฤติกรรมด้านกำลังของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อนำไปใช้ออกแบบและศึกษาวิจัยเกี่ยวกับดินตะกอนกวี้นพะเยาต่อไปได้

**Title:** INVESTIGATION OF STRENGTH AND DURABILITY CHARACTERISTIC OF PHAYAO LAKE SEDIMENTARY SOIL IMPROVED BY CEMENT AND FLY ASH.

**Author:** Thachchai Maikhun, **Thesis:** M. Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2017

**Advisor:** Assistant Professor Dr. Thanakorn Chompoorat, **Co–advisor:** Dr. Suriyawut Praay

**Keywords:** Phayao lake sedimentary soil, Cement, Fly ash, Unconfined compressive strength, Durability

### ABSTRACT

Phayao Lake is an important semi-natural freshwater lake in Phayao province. The alluvium, in particular sedimentary soil, is currently causing a serious problem for Phayao Lake as it reduces the lake capacity. The government agency in Phayao province tries to dredge and pump out sediment every year. A large amount of sedimentary soil is inappropriately dumped around the lake, and is not put to good use. This paper aims to study the engineering characteristics of Phayao Lake sedimentary soil as improved by Portland cement type 1 and/or fly ash from Mae-Moh power plant. The sedimentary soil was improved by adding Portland cement at 0–10% and fly ash at 0–20%. The testing of the modified compaction test and the unconfined compression test were carried out on the specimens at the curing age of 7, 14, 28, 60, 90 and 120 days. The study also performed durability testing by wetting and drying methods. Finally, the result of unconfined compression test was analyzed by a multiple regression equation and a variable control equation. The study shows that the regression model and variable control model have more than 80 percent confidence. Thus, the models can predict the behavioral shear strength of sedimentary soil that is improved by cement and fly ash at Phayao Lake. It can also contribute towards further research that study about Phayao Lake sedimentary soil.

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	3
แนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	4
แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
ดินตะกอนกวี้นพะเยา.....	8
การปรับปรุงคุณภาพดิน.....	10
การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	20
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	32
การทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติทาง วิศวกรรม.....	33
การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยพหุคูณ.....	48
การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการหาตัวแปรคงที่.....	50
4 ผลการวิจัย.....	53
ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกวี้นพะเยา.....	53
ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	60
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว.....	63
การวิเคราะห์แบบจำลองด้านกำลังของดินตะกอนกวี้นพะเยา.....	68



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการใช้ตัวแปรควบคุม.....	72
ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง.....	76
<b>5 บทสรุป.....</b>	<b>85</b>
สรุปผลการวิจัย.....	85
การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากผลงานวิจัย.....	88
ข้อเสนอแนะ.....	89
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>90</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>96</b>
ภาคผนวก ก ภาพประกอบการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วย โปรแกรม Microsoft excel.....	97
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดสอบการบัดดแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	100
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว.....	101
ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง.....	106
<b>ประวัติผู้วิจัย.....</b>	<b>129</b>

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
2	ปริมาณตะกอนกัวนพะเยาที่ดูในแต่ละปี.....	9
3	วิธีปรับปรุงคุณภาพดินชนิดต่าง ๆ.....	10
4	ชนิดของดินผสมปูนซีเมนต์.....	13
5	วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ.....	16
6	ชั้นคุณภาพของถ้ำล่อยตามมาตรฐานต่าง ๆ.....	18
7	เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงและประเทศต่าง ๆ.....	19
8	มาตรฐานการออกแบบดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง.....	20
9	กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนและเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และถ้ำล่อย.....	22
10	กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และถ้ำล่อย.....	23
11	กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของดินลมหอบของแกนที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และซีเถ้ากลับ.....	26
12	ผลการทดสอบ UCS และ ES.....	27
13	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรม.....	34
14	โปรแกรมการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์และถ้ำล่อย.....	38
15	ผลการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและการจำแนกชนิดดินตะกอนกัวนพะเยาในทางวิศวกรรม.....	54
16	การจำแนกดินตะกอนกัวนพะเยาตามเกณฑ์ของ AASHTO.....	56
17	ผลการทดสอบ X-ray diffractometer ของดินตะกอนกัวนพะเยา.....	57
18	องค์ประกอบธาตุของดินตะกอนกัวนพะเยา ปูนซีเมนต์ และถ้ำล่อย.....	58
19	ข้อมูลปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนกัวนพะเยาเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน.....	60
20	ผลการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดด้วยสมการแบบตัวแปรควบคุม.....	75

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
21	ค่าร้อยละการสูญเสียจากกระบวนการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลัป แห้ง.....	77
22	เกณฑ์ข้อกำหนดค่าร้อยละการสูญเสียด้วยวิธีเปียกและแห้ง.....	83
23	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	100
24	ผลการทดสอบกำลังรับแกนเดียว.....	101
25	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F0.....	106
26	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F5.....	106
27	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F10.....	107
28	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F15.....	107
29	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F20.....	107
30	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F0.....	108
31	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F5.....	109
32	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F10.....	110
33	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F15.....	111
34	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F20.....	111
35	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F0.....	112
36	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F5.....	113
37	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F10.....	114
38	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F15.....	115
39	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F20.....	116
40	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F0.....	117
41	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F5.....	118
42	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F10.....	119
43	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F15.....	120
44	ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F20.....	121

## สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1	เรือดูดตะกอนและตะกอนกวี้นพะเยา.....	2
2	แผนแนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	6
3	พื้นที่ลุ่มน้ำที่ไหลลงสู่กวี้นพะเยา.....	8
4	กองดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ดูดขึ้นมากองทิ้งไว้.....	9
5	โครงสร้างของดินซีเมนต์.....	14
6	ลักษณะของดินผสมซีเมนต์โดยใช้กลังจูลทรศน์อิเลคตรอน.....	15
7	การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าลอย.....	17
8	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งความเค้นความเครียดกับอัตราส่วนปริมาตร ความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์.....	21
9	กำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ.....	23
10	วงกลมมอร์ของดินลมหอบที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และ เถ้าลอยที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	24
11	วงกลมมอร์ของดินลมหอบที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้า ลอยที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	25
12	การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินที่ผสมกับปูนซีเมนต์.....	27
13	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและ w/C ของดินตัวอย่าง.....	29
14	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดินเม็ดละเอียด.....	30
15	บริเวณเก็บตัวอย่างดินตะกอน.....	32
16	กองดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ถูกกองทิ้งไว้.....	33
17	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
18	อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	39
19	เครื่องมือกระแทกที่ใช้ในทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน.....	39
20	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นจากค้อนบดอัด	40
21	ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับระยะเวลาจากเครื่อง กระแทก.....	41

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
22	เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว.....	42
23	การแช่น้ำ 4 ชั่วโมงสำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว.....	42
24	โมล PVC ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่.....	43
25	ค้อนบดอัดที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่.....	43
26	แปรงขีดสำหรับการทดสอบความคงทน.....	46
27	แผนการทดสอบความคงทนด้วยวิธีแบบเปียกและแห้ง.....	47
28	โปรแกรม Microsoft excel.....	49
29	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัด.....	50
30	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดี่ยวและอายุบ่ม.....	52
31	การทดสอบหาขนาดคละของดินตะกอนกว้างพะเยา.....	54
32	เกณฑ์การจำแนกประเภทดินตะกอนกว้างพะเยาตามเกณฑ์ของ USCS.....	55
33	ผลการทดสอบ X-ray diffractometer.....	57
34	ภาพถ่ายจากการทดสอบด้วยการทดสอบ SEM.....	59
35	การบดอัดของดินตะกอนกว้างพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย.....	62
36	ค่า UCS ของดินตะกอนกว้างพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย.....	64
37	ค่า $E^{50}$ ของดินตะกอนกว้างพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย.....	66
38	พฤติกรรมความสัมพันธ์ในการเพิ่มขึ้นระหว่างค่า UCS และค่า $E^{50}$ ของตัวอย่างดินตะกอนกว้างพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ 5%.....	67
39	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับระยะเวลาในการบ่มของตัวอย่างที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์.....	68
40	การเปรียบเทียบของค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าจากการทดลอง.....	71
41	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวกับ w/C.....	73
42	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและอายุการบ่มของดิน.....	74
43	ความสัมพันธ์ของค่า UCS จากการทดลองกับค่าจากสมการตัวแปรควบคุม	76

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
44	ผลเปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียของสัดส่วนผสม C5F10 และ C10F10.....	78
45	การเปรียบเทียบค่าร้อยละการสูญเสียกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว.....	84
46	ข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ป้อนลงไปโปรแกรม Microsoft excel.....	97
47	ขั้นตอนการเปิดใช้ฟังก์ชัน Data analysis.....	97
48	ขั้นตอนการเลือกใช้คำสั่ง Regression ใน Analysis tool.....	98
49	ขั้นตอนในการป้อนข้อมูลทั้งตัวแปรต้นและตัวแปรตามบนฟังก์ชัน Regression.....	98
50	ผลการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Regression ในโปรแกรม Microsoft excel.....	99
51	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C3F0.....	122
52	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C3F5.....	122
53	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C3F10.....	122
54	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C3F15.....	123
55	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C3F20.....	123
56	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C5F0.....	123
57	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C5F5.....	124
58	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C5F10.....	124
59	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C5F15.....	124
60	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C5F20.....	125
61	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F0.....	125
62	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F5.....	125
63	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F10.....	126
64	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F15.....	126
65	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F20.....	126
66	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C10F0.....	127
67	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C10F5.....	127

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
68	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของลัดส่วน C10F10.....	127
69	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของลัดส่วน C10F15.....	128
70	ปริมาณร้อยละการสูญเสียของลัดส่วน C10F20.....	128



## อักษรย่อ

$\mu\text{m}$	=	ไมโครเมตร
AASHTO	=	American Association of State Highway and Transportation Officials
$\text{Al}_2\text{O}_3$	=	อลูมินัมออกไซด์
C	=	ปริมาณปูนซีเมนต์
$\text{C}_2\text{S}$	=	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
$\text{C}_3\text{A}$	=	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต
$\text{C}_3\text{S}$	=	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
$\text{C}_4\text{AF}$	=	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์
Ca	=	แคลเซียม
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	=	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
CAH	=	แคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต
CaO	=	แคลเซียมออกไซด์
CL	=	ดินพลาสติกชนิดต่ำ
cm	=	เซนติเมตร
$\text{cm}^3$	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	=	โครเมียมออกไซด์
CSH	=	แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต
CU	=	Consolidated undrain triaxial test
D	=	หน่วยน้ำหนักแห้ง
$E^{50}$	=	ค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของกำลังประลัย
EDS	=	Energy dispersive spectrometry
ES	=	โมดูลัสอีลาสติก
F	=	ปริมาณเถ้าลอย
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	=	ไฮดรอนออกไซด์หรือเฟอร์ริกออกไซด์



H <sub>2</sub> O	=	น้ำ
lb	=	ปอนด์
ICP-OES	=	Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry
in	=	นิ้ว
K <sub>2</sub> O	=	โพแทสเซียมออกไซด์
kg	=	กิโลกรัม
kJ/m <sup>3</sup>	=	กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร
km	=	กิโลเมตร
km <sup>3</sup>	=	ตารางกิโลเมตร
kN/m <sup>3</sup>	=	กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร
kPa	=	กิโลปาสคาล
ksc	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
LL	=	พิกัดเหลว
m	=	เมตร
m <sup>3</sup>	=	ลูกบาศก์เมตร
m <sup>3</sup> /year	=	ลูกบาศก์เมตรต่อปี
mg/kg	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
MgO	=	แมกนีเซียมออกไซด์
mm	=	มิลลิเมตร
mm/min	=	มิลลิเมตรต่อนาที
MnO	=	แมงกานีสออกไซด์
Na <sub>2</sub> O	=	โซเดียมออกไซด์
NAASRA	=	National Association of Australian State Road Authority
nm	=	นาโนเมตร
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	=	ฟอสเฟอรัสเพนตะออกไซด์
PCA	=	Portland Cement Association

PI	=	ดัชนีพลาสติก
PL	=	พิกัดพลาสติก
psi	=	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
SEM	=	Scanning electron microscope
SiO <sub>2</sub>	=	ซิลิกอนออกไซด์
SL	=	พิกัดหัตถ์
SO <sub>3</sub>	=	ซัลเฟอร์ออกไซด์
SrO	=	สตรอนเทียมออกไซด์
T	=	ระยะเวลาในการบ่ม
TRRL	=	Transport and road research laboratory
UC	=	การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว
UCS	=	กำลังรับแรงอัดแกนเดียว
USCS	=	Unified soil classification system
Wc	=	Clay-water content
Wc/C	=	Clay-water cement ratio
WDS	=	Wavelength dispersive spectrometry
XRD	=	X-ray diffractometer
XRF	=	X-ray fluorescence
ZrO	=	ซิงค์ออกไซด์
ถ.พ.	=	ค่าความถ่วงจำเพาะ

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กว๊านพะเยา ตั้งอยู่ในเขตตัวเมืองพะเยา เป็นทะเลสาบน้ำจืดขนาดใหญ่อันดับ 1 ในภาคเหนือ และอันดับ 3 ของประเทศไทย มีอาณาเขตมากกว่า 20 ตารางกิโลเมตร มีความลึกเฉลี่ยประมาณ 1.93 เมตร สามารถเก็บกักน้ำเฉลี่ยได้ถึง 33.84 ล้านลูกบาศก์เมตร (สำนักงานจังหวัดพะเยา, 2556) อย่างไรก็ตามสภาพภูมิประเทศรอบ ๆ บริเวณกว๊านพะเยานั้นถูกโอบล้อมด้วยภูเขาเมื่อฝนตกก็จะเกิดการชะล้างพังทลายของดิน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดและเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอน (Sediment) ภายในกว๊านพะเยา โดยจากเอกสารการประชุมโครงการพัฒนากว๊านพะเยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ครั้งที่ 1 ปี ได้กล่าวไว้ว่า กว๊านพะเยามีปริมาณตะกอนที่ไหลเข้าสู่กว๊านพะเยาปีหนึ่งเกือบ 200,000 ลูกบาศก์เมตร ส่งผลทำให้กว๊านพะเยาตื้นเขินขึ้นปีละ 3 – 4 เซนติเมตร/ปี (จังหวัดพะเยา, 2556) ด้วยเหตุนี้ทางหน่วยงานในจังหวัดพะเยาได้มีการดำเนินนโยบายเกี่ยวกับการดูแลเอาดินตะกอนออกเพื่อเพิ่มปริมาณการกักเก็บน้ำในกว๊านพะเยา ดังแสดงในภาพ 1 เป็นผลทำให้ในปัจจุบันพบว่า มีดินตะกอนกว๊านพะเยากองทิ้งอยู่บริเวณโดยรอบ ๆ กว๊านพะเยาอยู่เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันทั้งหน่วยงานภายในประเทศหรือต่างประเทศ ได้มีการรณรงค์ให้ตระหนักถึงการเอาใจใส่ทางด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เป็นผลทำให้เริ่มมีหลายหน่วยงานนำเอาวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมมาใช้ให้ก่อเกิดประโยชน์มากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการนำเอาดินตะกอนที่ได้จากการดูดออกใต้ท้องกว๊านพะเยา ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์กับงานด้านวิศวกรรมทาง เช่น นำมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) หรือชั้นพื้นทาง (Base) สำหรับก่อสร้างถนน อย่างไรก็ตามถ้าจะนำดินตะกอนกว๊านพะเยามาใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างถนนเลยนั้นอาจไม่เป็นไปตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้ เพราะดินตะกอนจะมีความชื้นตามธรรมชาติ (Natural water content) สูง และอาจมีปริมาณสารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) ปนอยู่ในดิน ทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) ที่ต่ำ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเทคโนโลยีปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil stabilization) มาใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering property) ของดินให้สามารถนำไปใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นทางได้ เช่น การปรับปรุงดินด้วยการผสมซีเมนต์ (Soil-cement mixing)



(a)



(b)

ภาพ 1 เรือดูดตะกอนและตะกอนกว๊านพะเยา (a) เรือดูดตะกอน (b) กองดินตะกอนกว๊านที่ถูกดูดขึ้นมา

ที่มา: หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา, 2557

ในการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อก่อสร้างถนนด้วยการผสมซีเมนต์จะต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีราคาค่อนข้างสูง จึงได้มีการศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้ง เช่น ถ้ำลอย (Fly ash) มาใช้เพื่อทดแทนและ/หรือลด

การใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ในบางกรณีอาจทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นได้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolan reaction) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสังเกตเห็นที่จะนำดินตะกอนนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นทางได้ แต่ปัญหาอยู่ที่ดินตะกอนนั้นไม่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรงเลยเนื่องจากลักษณะทางกายภาพจัดว่ามีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ไม่ดี (เม็ดดินตะกอนมีขนาดเม็ดที่เล็กละเอียดมาก) อีกทั้งดินตะกอนนี้ยังอาจมีสารอินทรีย์อื่น ๆ ปนอยู่ซึ่งอาจจะส่งผลให้มีกำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) ที่ต่ำ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นทางได้โดยตรง จึงต้องอาศัยวิธีเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินเข้ามาใช้เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติที่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้งาน เช่น มาทำการปรับปรุงด้วยการผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมผิวทาง (Pavement engineering) เพื่อเป็นการประยุกต์ให้วัสดุมีคุณสมบัติที่เพียงพอต่อเกณฑ์ข้อกำหนดสำหรับชั้นพื้นทาง (Base layer) อีกทั้งยังได้ศึกษาถึงพฤติกรรมทางด้านกายภาพ ทางเคมี และทางวิศวกรรมของดินตะกอน

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การศึกษาคูณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนกวีานพะเยามาใช้งานทางด้านวิศวกรรมผิวทาง
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางวิศวกรรมของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
3. ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
4. เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
5. เพื่อเป็นการสนับสนุนให้เกิดการนำเอาวัสดุภายในประเทศมาใช้ให้ก่อเกิดประโยชน์มากที่สุดอันจะนำมาซึ่งเป็นการบูรณาการความรู้ทางวิศวกรรมมาประยุกต์ร่วมกับวัสดุท้องถิ่น

### ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาคูณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย มีขอบเขตการวิจัยของโครงการ ดังต่อไปนี้

1. รวบรวมงานวิจัยและศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
2. ตัวอย่างในการทดสอบจะเลือกใช้ดินตะกอนกวี้นพะเยา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเถ้าลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง
3. ศึกษาพฤติกรรมด้านวิศวกรรมและทางเคมีของดินผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยขั้นต้นด้วยการทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของดิน และการทดสอบทางเคมี เช่น X-ray diffractometer (XRD) Scanning electron microscope (SEM) และการทดสอบการชะละลาย (Leaching test) เป็นต้น
4. การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test) การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compression test, UC) ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14, 28, 60, 90 และ 120 วัน และการทดสอบความคงทน (Durability test) ด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying)
5. การสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายผลทางวิศวกรรมของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย จะใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) และการวิเคราะห์ด้วยการใช้ตัวแปรควบคุม

#### แนวทางการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของแนวทางการดำเนินงานวิจัยจะแสดงแนวทางการดำเนินงาน โดยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนหลักใหญ่ ๆ ดังแสดงในหัวข้อด้านล่างและภาพ 2 ดังต่อไปนี้

1. ทบทวนการศึกษางานวิจัย บทความ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
2. ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางวิศวกรรมของดินตะกอนกวี้นพะเยา
3. ทำการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยการผสมปูนซีเมนต์ที่ปริมาณของปูนซีเมนต์เท่ากับ 0, 3, 5, 7 และ 10% ของน้ำหนักดิน
4. ทำการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยการผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ที่ปริมาณของเถ้าลอยเท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20% ของน้ำหนักดิน ในทุก ๆ ปริมาณร้อยละของซีเมนต์
5. หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry density) กับ ปริมาณความชื้น (Moisture content) เพื่อให้ได้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content)

6. ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ

7. ทำการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง

8. วิเคราะห์และประเมินผลจากการทดสอบ เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการถดถอยพหุคูณและความสัมพันธ์ในรูปแบบของตัวแปรควบคุม

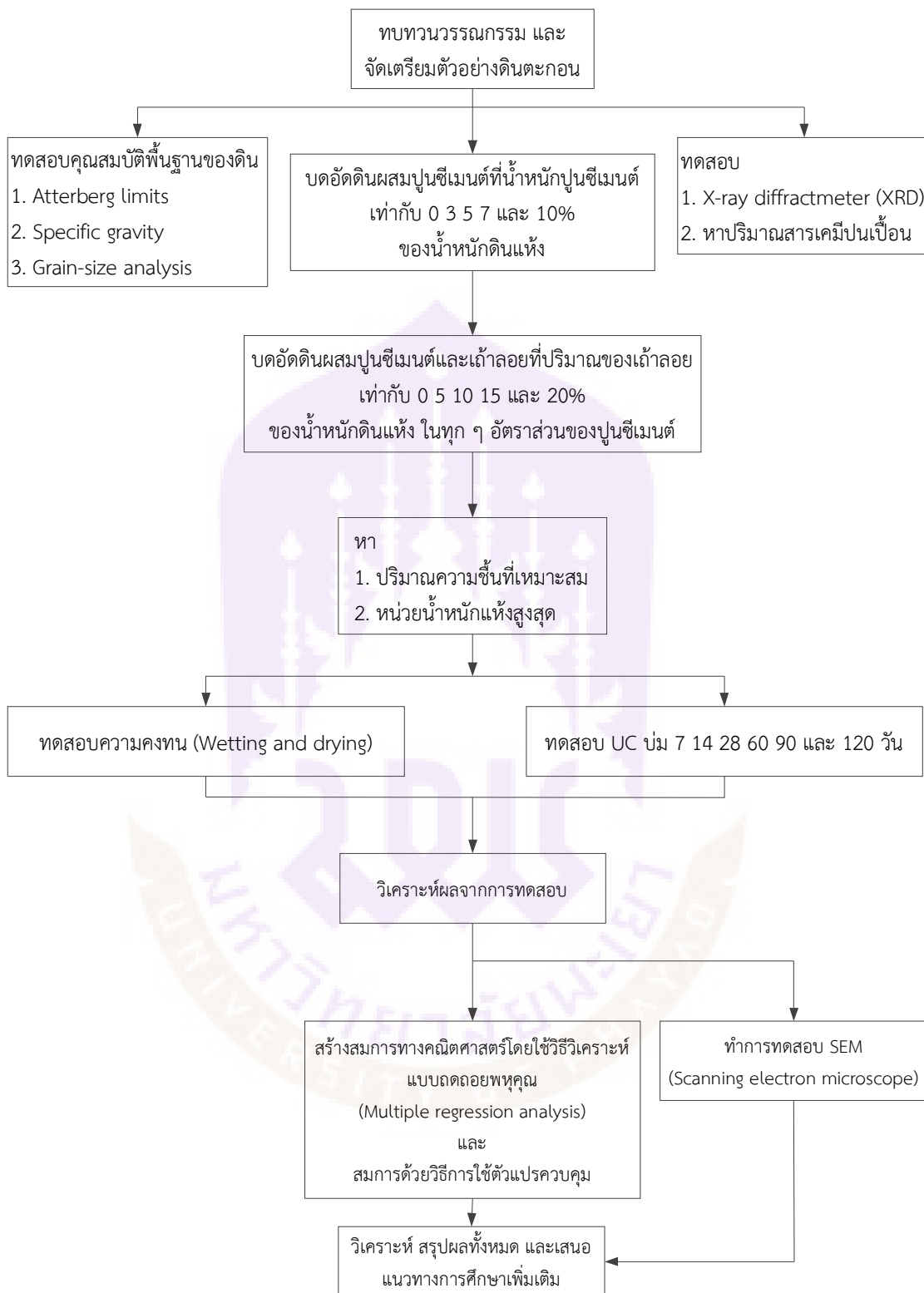
### แผนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับแผนของการดำเนินงานวิจัยจะแบ่งเป็นขั้นตอนตามลำดับวิธีวิจัย ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ ที่	รายละเอียดการดำเนินงาน	เดือน														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	ค้นคว้าข้อมูลเพื่อทำงานวิจัยดินตะกอนกวี้นพะเยา	■														
2	สำรวจแหล่ง ปริมาณดินตะกอน และนำตัวอย่างมาทำการทดสอบ และหาคุณสมบัติพื้นฐาน	■														
3	หาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินผสมปูนซีเมนต์และดินผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย		■													
4	ทดสอบ UC ของดินผสมปูนซีเมนต์และดินผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย				■											
5	ทดสอบความคงทนของดินผสมปูนซีเมนต์และดินผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าลอย								■							
6	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองและสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์											■				
7	จัดทำรูปแบบรายงาน และเตรียมนำเสนองานวิจัย															■

หมายเหตุ: UC คือ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compression test)



ภาพ 2 แผนแนวทางการดำเนินงานวิจัย



### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

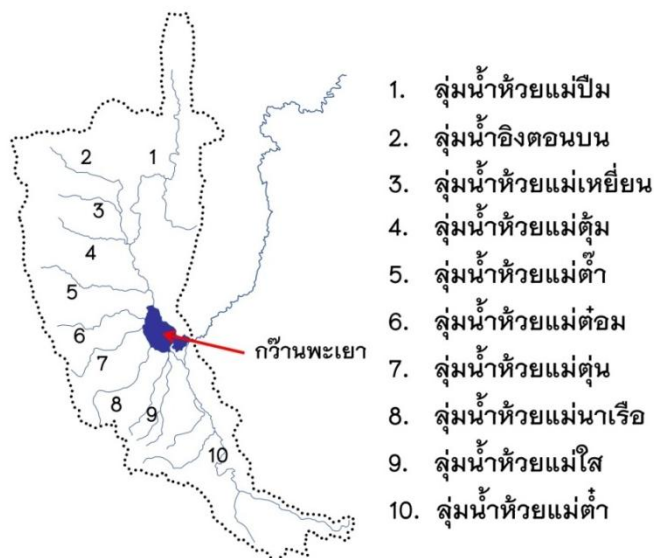
1. ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว้านพะเยาและดินตะกอนกว้านพะเยาที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
2. ได้แบบจำลองที่มีคุณภาพและสามารถนำไปใช้งานสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกว้านพะเยาที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
3. ทราบถึงพฤติกรรมการสูญเสียจากการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของดินตะกอนกว้านพะเยาและดินตะกอนกว้านพะเยาที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย
4. ได้แนวทางในการนำเอาดินตะกอนกว้านพะเยามาใช้ในงานวิศวกรรมการทาง
5. เป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ใหม่ ๆ ที่เกี่ยวกับแนวทางการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุทางวิศวกรรม เพื่อเป็นแรงสนับสนุนให้มีการนำทรัพยากรที่เหลือใช้หรือใช้งานได้ไม่หลากหลายให้นำมาใช้งานได้มากขึ้น
6. เป็นหลักฐานความรู้ของออกสู่หน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้มีแนวทางในการจัดการทรัพยากรที่ถูกต้องและเกิดผลประโยชน์สูงสุดแก่ชุมชน
7. ได้งานวิจัยที่มีคุณภาพซึ่งสามารถตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ/เอกสารประกอบการประชุมในระดับชาติหรือนานาชาติได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ดินตะกอนที่กว๊านพะเยา

กว๊านพะเยาเป็นแหล่งน้ำจืดหรือทะเลสาบขนาดใหญ่ที่สุดในภาคเหนือตอนบนและใหญ่เป็นอันดับสามของประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดพะเยา โดยมีความจุกักเก็บน้ำได้ประมาณ 33.84 ล้านลูกบาศก์เมตร มีพื้นที่ประมาณ 20.53 ตารางกิโลเมตร (12,831 ไร่) (องค์การบริหารส่วนจังหวัดพะเยา, 2556) ในปัจจุบันปัจจุบันกว๊านพะเยามีสภาพค่อนข้างเสื่อมโทรม ดินชั้นเก็บกักน้ำได้น้อย โดยส่วนหนึ่งก็เป็นปัญหาจากการสะสมของดินตะกอนอันเนื่องมาจากสภาพภูมิประเทศบริเวณโดยรอบของจังหวัดพะเยาถูกล้อมรอบด้วยภูเขาทุกทิศทาง และยังมีลุ่มน้ำที่เป็นตัวกลางพัดพาตะกอนไหลลงสู่กว๊านพะเยามากถึง 10 ลุ่มน้ำ ได้แก่ ลุ่มน้ำห้วยแม่ปืม ลุ่มน้ำอิงตอนบน ลุ่มน้ำห้วยแม่เหี้ยยน ลุ่มน้ำห้วยแม่ต๋ม ลุ่มน้ำห้วยแม่ต๋ำ ลุ่มน้ำห้วยแม่ต๋อม ลุ่มน้ำห้วยแม่ตุ๋น ลุ่มน้ำห้วยแม่เนาเรือ ลุ่มน้ำห้วยแม่ใส ลุ่มน้ำห้วยแม่ต๋ำ ดังแสดงในภาพ 3 ส่งผลให้เกิดการพัดพาตะกอนโดยมีแม่น้ำเหล่านี้เป็นตัวกลางพัดพาตะกอนมาสะสมในบริเวณกว๊านพะเยา ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาทางระบบนิเวศในกว๊านพะเยาหลาย ๆ ด้านด้วยกัน



ภาพ 3 พื้นที่ลุ่มน้ำที่ไหลลงสู่กว๊านพะเยา



ภาพ 4 กองดินตะกอนกวี้นพะเยาที่คูดขึ้นมากองทิ้งไว้

ในปัจจุบันหน่วยงานทางภาครัฐได้มีการดำเนินนโยบายในการปรับปรุงระบบนิเวศสำหรับพัฒนาแหล่งน้ำ ท้องกวี้น และบริเวณรอบ ๆ กวี้นพะเยา ซึ่งทางหน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชกวี้นพะเยา ในสังกัดของกรมประมงกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดพะเยา ได้ดำเนินการคูดตะกอนที่เกิดจากการสะสมภายในกวี้นพะเยา ที่มาจากการพัดพาด้วยแม่น้ำสะสมลงสู่กวี้นพะเยา ดังแสดงในภาพ 4 โดยในปี 2551–2557 นั้นพบว่า ดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ถูกคูดขึ้นมานั้นมีมากกว่า 290,000 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ปริมาณตะกอนกวี้นพะเยาที่ถูกคูดในแต่ละปี

ปี	เป้าหมาย (ม <sup>3</sup> )	ตะกอนที่คูด (ม <sup>3</sup> )
2551	490,000	491,420
2552	400,000	401,304
2553	330,000	334,181
2554	330,000	333,570
2555	310,000	314,265
2556	290,000	291,205
2557	290,000	291,205

ที่มา: หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา, 2551; หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา, 2552; หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา, 2553; หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา, 2554; หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา, 2555; หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา, 2556; หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา, 2557

### การปรับปรุงคุณภาพดิน

งานก่อสร้างถนนโดยทั่วไปนั้น ดินมักเป็นปัญหาและอุปสรรคในการก่อสร้างมากกว่าวัสดุประเภทอื่น ๆ ทั้งนี้ เพราะดินเป็นสิ่งที่เกิดตามธรรมชาติ ดังนั้น สมบัติต่าง ๆ มักเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่และลักษณะการกำเนิด ซึ่งในกรณีที่ดินจากแหล่งวัสดุท้องถิ่นที่มีอยู่ อาจมีคุณสมบัติไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน และไม่อาจสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาโดยการเปลี่ยนแปลงสถานที่ก่อสร้างได้ วิศวกรมักนิยมใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินมาใช้แทนการปรับปรุงดินส่งผลให้ดินมีความเสถียรภาพมากขึ้นหรือเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้กับดิน ในงานด้านวิศวกรรมการทาง การปรับปรุงดิน หมายถึง การปรับปรุงวัสดุท้องถิ่นที่มีอยู่ให้สามารถใช้งานและมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยทำการเพิ่มสารผสม (Stabilizing agent) การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุเป็นกระบวนการที่นักวิจัยพยายามจะใช้ปรับปรุงวัสดุที่มีคุณภาพต่ำหรือมีคุณภาพไม่ได้มาตรฐานให้มีคุณภาพดีขึ้น เพื่อใช้ประโยชน์ในการสร้างทาง โดย Hausmann (1990) กล่าวไว้ว่า การปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับนำมาใช้ในงานวิศวกรรมการทาง นั้นมีวัตถุประสงค์ก็เพื่อ เพิ่มความสามารถในการรับกำลัง (Strength) ลดการเสียรูป (Distortion) ภายใต้การเพิ่มขึ้นของแรง ลดความสามารถในการยุบอัดตัว (Compressibility) ควบคุมการหดตัวและการบวมตัว (Shrinkage and Swelling) ควบคุมการระบายน้ำ (Drainage) และการซึมน้ำ (Permeability)

United State Air Force (1966) ได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยแบ่งตามขนาดและค่าดัชนีพลาสติก (Plastic index) ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 วิธีปรับปรุงคุณภาพดินชนิดต่าง ๆ

ชนิดดิน	วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด	
Coarse granular	ผสมแอสฟัลท์ (Asphalt)	
	ผสมปูนซีเมนต์ (Cement)	
Fine granular	ผสมปูนขาวและเถ้าลอย (Lime and fly ash)	
	ผสมแอสฟัลท์	ผสมปูนขาวและเถ้าลอย
	ผสมปูนซีเมนต์	ผสมคลอไรด์ (Chloride)
Clay (low plasticity)	ผสมปูนซีเมนต์	
	ผสมปูนขาว	
Clay (high plasticity)	ผสมปูนขาว	

ที่มา: United State Air Force, 1966

ในการปรับปรุงคุณภาพดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ การปรับปรุงเชิงกล (Mechanical modification) การปรับปรุงทางไฮดรอลิก (Hydraulic modification) การปรับปรุงด้วยการผสมสารเคมี (Chemical modification) และการปรับปรุงด้วยการเสริมกำลัง (Modification by inclusions and confinement) โดยในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบด้วยวิธีการปรับปรุงโดยการผสมสารเคมีเท่านั้น

### 1. วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

การปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นการทำให้ดินตามธรรมชาติมีความสามารถในการรับแรงแบกทาน (Bearing capacity) ได้ดีขึ้น และทนทานต่อการสึกหรอ วิธีการปรับปรุงดินอาจเป็นการบดอัดให้แน่นหรือการใช้สารผสมเพิ่ม เช่น ปูนซีเมนต์ โดย Circeo, Davidson and David (1962) กล่าวว่า การใส่ปูนซีเมนต์ผสมลงไปดินเป็นการเปลี่ยนคุณสมบัติและโครงสร้างของดินไปด้วย โดยดินเกือบทุกชนิดสามารถปรับปรุงคุณภาพได้ แต่จะให้ผลที่แตกต่างกัน แม้ว่าดินจะมีสมบัติทางฟิสิกส์ (Physics) ที่เหมือนกัน และใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มาผสมเท่ากัน เพราะว่าในดินแต่ละชนิดนั้นจะมีคุณสมบัติทางเคมี (Chemical property) ที่แตกต่างกัน โดยคุณสมบัติดังกล่าวนี้ก็มีผลต่อกำลังของดินด้วย

Mitchell (1981) กล่าวว่าไว้ว่า การผสมสารเคมีลงในดินนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน เช่น ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรก็คือการบวมตัวหรือการหดตัวของดิน เมื่อสภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นดินด้วย ซึ่งจะเป็นปัจจัยส่งผลต่อกำลังของดินด้วย ในวิธีการของการควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินสามารถทำได้ด้วยการผสมสารเคมีที่มี ไฮเดรชัน-แคตไอออน (Hydration cation) ต่ำ ๆ เช่น แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) และอลูมิเนียม (Aluminum) เข้าไปในดินหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดการประสานของเม็ดดิน (Cementation) เกิดขึ้น การที่จะทำให้ดินสามารถรับแรงแบกทานได้มากขึ้นหรือมีกำลังมากขึ้นนั้นทำได้โดยการลดช่องว่างของเม็ดดิน การทำให้เม็ดดินเชื่อมติดกัน หรือการทำให้เกิดการตกตะกอน (Flocculation) รวมไปถึงการป้องกันไม่ให้เกิดการบวมตัวของดิน

### 2. การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

สารผสมเพิ่มในการใช้ปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมีอยู่หลายชนิด ดังนั้นการเลือกใช้สารผสมเพิ่มจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงสมบัติตามธรรมชาติของดินก่อนที่จะนำมาปรับปรุงสำหรับดินที่มีค่าดัชนีพลาสติคสูง ๆ นั้นนิยมใช้ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย หรือปูนขาวผสมเถ้าลอยเป็นต้น (Gordon, 1984) จากนั้น Wilmot (1995) กล่าวว่าไว้ว่า การปรับปรุงดิน

ในที่ (In-situ stabilization) สำหรับงานทางนิคมใช้ปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินให้เหมาะสมต่อการใช้งานที่มากขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีการใช้สารเคมีเป็นการปรับปรุงดินที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในงานทางด้านวิศวกรรมผิวทาง ซึ่งมีสารเคมีที่นำมาใช้ผสมนั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นกล่าวถึงปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นหลัก

**2.1 ปูนซีเมนต์ (Cement)** ปฏิกิริยาประสานที่สำคัญของปูนซีเมนต์ คือ ปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน (Cement hydration) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่เรียกว่า ซีเมนต์เจล (Cement gel) ซึ่งจะจับตัวแข็งเมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นและปูนซีเมนต์แต่ละชนิดจะประกอบด้วยสารแคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) ชนิดต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีความแตกต่างในด้านสมบัติการแข็งตัว

**2.2 การปรับปรุงดินด้วยปูนซีเมนต์** Highway Research Board's Committee on Soil-Portland Cement Stabilization (1959) ได้ให้คำจำกัดความของดินผสมปูนซีเมนต์ (Cement-treated soil) คือ การนำดินและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการมาผสมกับน้ำให้เข้ากันแล้วบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด และป้องกันการสูญเสียความชื้นในช่วงระยะเวลาระหว่างการบ่ม ดินซีเมนต์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ 5 ประเภท ดังตาราง 4

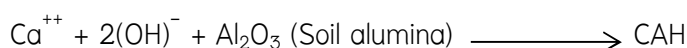
Lambe, Mitchells and Moh (1959); Moh (1962) ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดสารประกอบหลัก 4 ประเภท คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) และ เตตระแคลเซียมอะลูมิโน-เฟอไรต์ ( $C_4AF$ ) ซึ่งจะเป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ส่งผลให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และ Hydrate lime กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH โดยสารประกอบทั้งสองจะมีคุณสมบัติเป็นตัวยึดเกาะ ซึ่งสามารถยึดเกาะเม็ดดินเข้าด้วยกันทำให้เป็นเม็ดขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้น สำหรับ Hydrated lime ที่เกิดขึ้นจะแตกตัวเป็น  $Ca^{++}$  และจะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินา ในดินต่อไปอีก ทำให้เกิดสาร CSH และ CAH เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง ซึ่งอนุภาคดินจะฝังอยู่ใน Reaction product โดยจะมีลักษณะเป็นซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) และจะแข็งตัวตามระยะเวลาและเปลี่ยนโครงสร้างดินให้แข็งตัวด้วย

ตาราง 4 ชนิดของดินผสมปูนซีเมนต์

ประเภท	ลักษณะของดินที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์	ร้อยละปูนซีเมนต์ที่ใช้โดยประมาณ	การประยุกต์ใช้งาน
Cement Modified Silty Clay Soil	ดินอ่อนมากหรือดินที่มีลักษณะเปี้ยกและ เช่น Silty Clay	1 – 3	ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติดินเดิมให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุก
Cement Modified Granular Soil Mixture	ดินที่มีค่าพลาสติคิตี (Plasticity) สูง เช่น ดินทรายและกรวด	1 – 3	ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นรองพื้นทางให้มีกำลังรับน้ำหนักสูงขึ้น
Soil-Cement	ดินทุกประเภท เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพให้มิกำลังรับแรงตามมาตรฐานของ PCA หรือ AASHTO	5 – 7	ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้ เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน PCA หรือ AASHTO
Plastic Soil-Cement	ดินทุกประเภท เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพให้มิกำลังรับแรงตามมาตรฐานของ PCA หรือ AASHTO	2	ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้ เพื่อให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน PCA หรือ AASHTO
Cement-Treated Soil Slurries and Grouts	ดินทรายและน้ำ โดยมีปริมาณของน้ำสูงมาก	5	ใช้กับงานบำรุงรักษา เช่น การทำ Mud Jetting กับดินคันทางที่เกิดการทรุดตัว

หมายเหตุ: PCA คือ Portland Cement Association

Moh (1965) พบว่า การพัฒนากำลังอัดของดินซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยา Cement hydration เป็นหลัก เมื่ออนุภาคของซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำที่เรียกว่า Cement hydration ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตจะมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึด โดยสามารถเกาะยึดเข้าด้วยกันกับอนุภาคของเม็ดดินเป็นมวลดินที่มีความแข็งแรงสูง ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาในดินต่อไปอีกทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตเพิ่มจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากซีเมนต์โดยตรง และได้เขียนปฏิกิริยาของดินซีเมนต์เป็นสมการทางเคมี ดังนี้



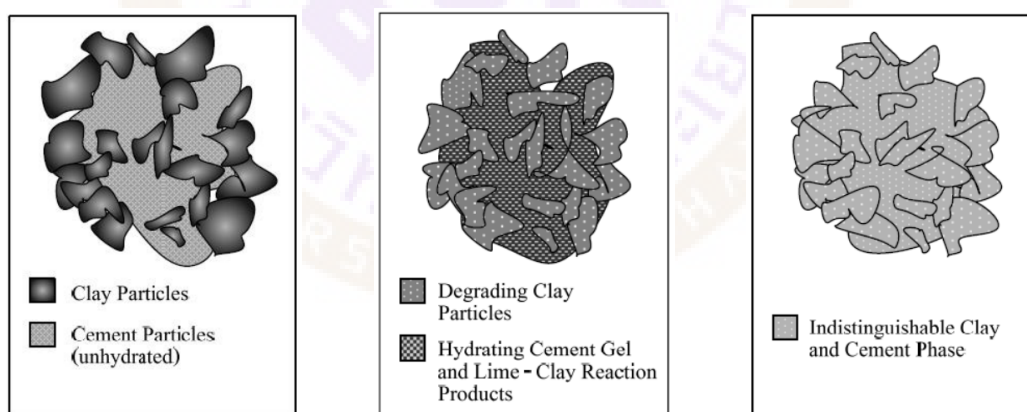
2.3 โครงสร้างของดินซีเมนต์ Mitchell and Jack (1966) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินภายหลังจากผสมปูนซีเมนต์ โดยการเปลี่ยนแปลงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สถานะ ดังนี้

2.3.1 สถานะขณะบดอัดอนุภาค ขั้นตอนนี้เป็นช่วงเวลาที่ปูนซีเมนต์จะเข้าไปผสมกับอนุภาคของเม็ดดิน ซึ่งสถานะนี้ยังไม่เกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ดังภาพ 5(a)

2.3.2 สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์ไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นซีเมนต์เจล เข้าแทรกซึมตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดดินและจะปล่อยปูนขาว โดยทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินาในดิน หลังจากนั้นซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะกระจายไปตามอนุภาคของดิน ดังภาพ 5(b)

2.3.3 สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ ทำให้ซีเมนต์เจลกระจาย และแทรกซึมไปทั่วดินซีเมนต์ ซึ่งทำให้กำลังของดินซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มสูงขึ้น ดังภาพ 5(c)

ลักษณะของดินกับซีเมนต์ หรือซีเมนต์เพลสที่เริ่มแข็งตัวเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป มีลักษณะดังแสดงในภาพ 6 จากภาพจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของดินที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์จะเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และเอททิงไจท์ (Ettringite) อย่างเห็นได้ชัดทำให้โพรงหรือช่องว่างที่มีอยู่มีปริมาณน้อยลงไป



(a) สถานะขณะบดอัดอนุภาค

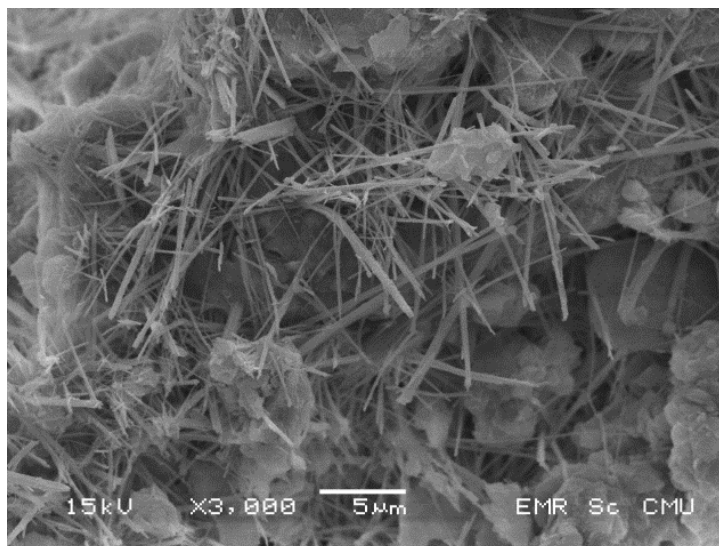
(b) สถานะภายใต้การบ่มระยะสั้น

(c) สถานะภายใต้การบ่มระยะยาว

ภาพ 5 โครงสร้างของดินซีเมนต์

ที่มา: Mitchell and Jack, 1966





ภาพ 6 ลักษณะของดินผสมซีเมนต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

**2.4 สารปอซโซลาน** ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า ปอซโซลาน (Pozzolan) ไว้ว่า สารปอซโซลาน คือ วัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกา และอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปสารปอซโซลานนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานที่น้อยมาก แต่เนื่องจากสารปอซโซลานมีความละเอียดที่สูงและมีปริมาณความชื้นเพียงพอที่จะสามารถทำปฏิกิริยาร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่อุณหภูมิห้องได้ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzalanic reaction)

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียม-ซิลิเกตไฮเดรตหรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมินัมออกไซด์ที่อยู่ในวัสดุปอซโซลานเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียม-อลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยสรุปไว้เป็นสมการดังแสดงในดังต่อไปนี้



สารปอซโซลานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้

1. สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural pozzlanas) โดยทั่วไปคือ วัสดุที่เกิดจากการระเบิดภูเขาไฟ เช่น หินเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic tuff) และหินพรุณ (Pumicite) เป็นต้น
2. สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzlanas) ส่วนใหญ่ คือ วัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ ดินเหนียว หินดินดาน (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ และเถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการทำเกษตรกรรม

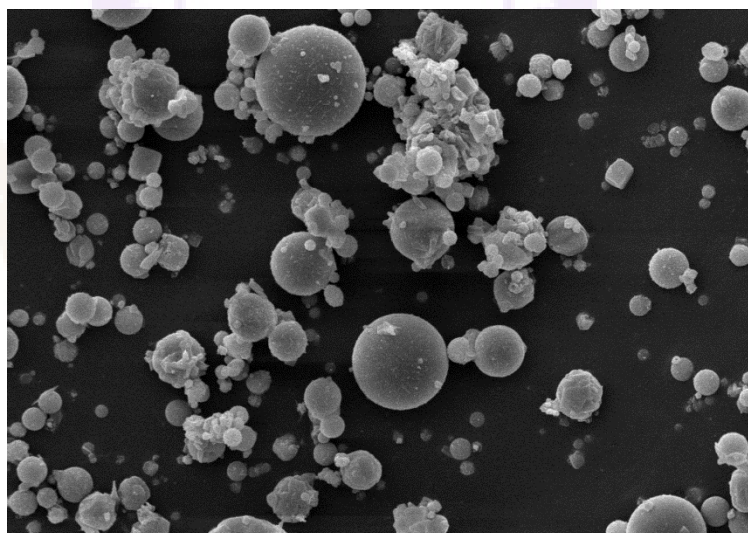
#### ตาราง 5 วัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ

ชื่อวัสดุผสมเพิ่ม	คุณลักษณะ
General Purpose Fly Ash Cement (โดยทั่วไปจะมีเถ้าลอยผสมอยู่ 25%)	เหมาะสำหรับดินเกือบทุกประเภท โดยปกติสามารถเพิ่มระยะเวลาการทำงานได้เป็น 4 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ
ปูนขาว/เถ้าลอย	เหมาะสำหรับดินปนดินเหนียว และดินที่มีลักษณะเป็นเม็ด ๆ อัตราส่วนผสมขึ้นอยู่กับสัดส่วนประกอบของดินโดยทั่วไปสามารถยืดอายุการทำงานได้เป็น 20 ชั่วโมง หรือมากกว่านี้
Hydrated Lime และ Quick Lime	ใช้ได้ผลดีกับดินเหนียว การเกิดปฏิกิริยาเกิดอย่างช้า ๆ ระยะเวลาการทำงานได้นาน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	ส่วนใหญ่ใช้ได้ดีกับดินปนกรวด ระยะเวลาการทำงานได้ จำกัดได้สูงสุด 2 ชั่วโมง
เถ้าลอย	เหมาะสมสำหรับดินเกือบทุกประเภท ระยะเวลาการทำงานได้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการผสม

ในประเทศไทยได้มีการนำเอาเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้งาน โดยเถ้าลอยดังกล่าวเมื่อนำมาผสมกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะแล้วบ่มทิ้งไว้จะเริ่มแข็งตัวภายใน 1 วัน เพราะเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะโดยส่วนใหญ่จะมีปริมาณแคลเซียม-ออกไซด์ (CaO) อยู่ในปริมาณที่มากเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็นแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) และทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก กับซิลิกาและอลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของ Non-crystalline glass จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่ CSH และ CAH ได้ การนำเถ้าลอย

แม่เมาะไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในงานดินสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ เถ้าลอยผสมน้ำและ เถ้าลอยบดอัด ในปี พ.ศ. 2530 ได้มีการใช้เถ้าลอยลิกไนต์มาก่อสร้างชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางของถนนภายในโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเหมืองลิกไนต์ จากนั้นในปี พ.ศ. 2535 ได้เริ่มนำเถ้าลอยผสมน้ำไปใช้ในการซ่อมแซมการทรุดตัวของระบบระบายน้ำรอบสถานีไฟฟ้าแรงสูง (สมชัย กกกำแพง, 2536) สำหรับในส่วนของ กรมทางหลวงประเทศไทย ได้เริ่มนำเถ้าลอยมาใช้ในการปรับปรุงชั้นทาง โดยได้เสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยเถ้าลอยโดยแบ่งตามคุณลักษณะต่าง ๆ ดังตาราง 5

**2.5 เถ้าลอย (Fly Ash)** เถ้าลอยเป็นวัสดุอย่างหนึ่งที่ได้มาจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าถ่านหิน ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน เถ้าลอยนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) เป็นส่วนใหญ่ ทั่วไปเถ้าลอยจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทาอมน้ำตาล ลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลมหรือรูปร่างที่ไม่แน่นอน เนื่องจากขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ความละเอียดและชนิดของตัวถ่านหินเอง เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและเป็นผงฝุ่นจะไม่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อม ดังแสดงในภาพ 7 ที่แสดง ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าลอย



ภาพ 7 การกระจายตัว ขนาด และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าลอย

ในเถ้าบางชนิดยังสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) เนื่องจากเถ้าลอยมีส่วนผสมของซิลิกาและอลูมินาที่สูง ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับปูนขาว แล้วเกิดเป็น Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งทำให้เม็ดของ

ถ้าเกิดการเกาะรวมกัน ซึ่งปฏิกิริยานี้คล้ายคลึงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (วิจิตรธัญญา สรรพกิจจานง, ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก และบุญเลิศ พัดฉวี, 2536) ดังนั้น การนำ ถ้ำลอยมาใช้งานจึงเป็นที่นิยมเนื่องจากสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายเพราะถ้ำลอยนั้นเป็น วัสดุเหลือใช้ที่ได้จากการกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินนั่นเอง

**2.6 การใช้งานถ้ำลอย** ประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินและถ่านหินผสม เชื้อเพลิงชีวมวลอยู่หลายแห่ง ซึ่งการนำถ้ำลอยแต่ละแหล่งมาใช้ในงานปรับปรุงดินเพื่อ จุดประสงค์การปรับปรุงและเพิ่มคุณภาพดิน หรือเพื่อการลดต้นทุน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงการใช้งาน ถ้ำลอย คือ คุณภาพทางเคมีและทางกายภาพของถ้ำลอยแหล่งนั้นๆ การใช้ถ้ำลอยจะ พิจารณาคัดเลือกตามคุณสมบัติที่เข้าเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 สำหรับ มาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2135-2545 หรือ วสท. 1014 โดยมีคุณสมบัติของถ้ำลอยตาม เกณฑ์มาตรฐานต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 6 ดังนั้น การใช้งานถ้ำลอยจำเป็นต้องอ้างอิงตาม มาตรฐานและข้อกำหนดอย่างเคร่งครัด

**ตาราง 6** ชั้นคุณภาพของถ้ำลอยตามมาตรฐานต่าง ๆ

ส่วนประกอบ ทางเคมี	ข้อกำหนด	วสท. 1014		ASTM C 618		ชั้น คุณภาพ พ 1	มอก.2135		ชั้น คุณภาพ 3
		ประเภท 1	ประเภท 2	Class F	Class C		ชั้น คุณภาพ 2		
							ชนิด ก	ชนิด ข	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ไม่ต่ำกว่า (ร้อยละ)	70	50	70	50	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	ไม่เกิน (ร้อยละ)	-	-	-	-	30	30	30	30
CaO	ไม่เกิน (ร้อยละ)	-	-	-	-	-	10	10	-
SiO <sub>3</sub>	ไม่เกิน (ร้อยละ)	-	-	-	-	5	5	5	5
MgO	ไม่เกิน (ร้อยละ)	-	5	-	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	ไม่เกิน (ร้อยละ)	1.5	1.5	1.5	1.5	-	-	-	-
ความชื้น	ไม่เกิน (ร้อยละ)	3	3	3	3	3	3	3	3
การสูญเสีย เนื่องจากการ เผาไหม้ (Lol)	ไม่เกิน (ร้อยละ)	6	5	6	6	6	6	6	12

อย่างไรก็ตามถ้ำลอยที่ได้จากแหล่งผลิตอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์ มาตรฐานและราคาถูก เนื่องจากวิศวกรมักนิยมนำเอาถ้ำลอยจากแหล่งอื่นมาใช้งานโดยการ ทดแทนตามสัดส่วนการออกแบบส่วนผสมของถ้ำลอยจากแม่เมาะ ซึ่งคุณสมบัติถ้ำลอยจาก

แหล่งอื่น ๆ จะไม่เหมือนกันกับถ้ำลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ดังนั้น การที่คิดว่าการใช้ถ้ำลอยที่ได้จากแหล่งผลิตใด ๆ ก็ย่อมเกิดผลเสียตามมา เพราะคุณสมบัติพื้นฐานของถ้ำลอยแต่ละที่ย่อมแตกต่างกัน ดังนั้น การใช้งานถ้ำลอยเพื่อทดแทนและลดการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุน หรือเพื่อการเพิ่มคุณสมบัติดินควรได้รับการออกแบบตามคุณสมบัติของถ้ำลอยในแต่ละแหล่งที่เรานำมาใช้ งาน เมื่อเรามีความเข้าใจการใช้งานถ้ำลอยอย่างถูกต้องจะช่วยทำให้เราสามารถปรับปรุงคุณภาพดินที่มีต้นทุนต่ำ และคุณภาพสูงได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทาง

**2.7 การออกแบบดินซีเมนต์** กรมทางหลวง ประเทศไทย ได้เลือกใช้ค่าการออกแบบกำลังรับแรงอัดแบบปราศจากแรงดันด้านข้าง (Unconfined compressive strength, *UCS*) ที่บ่มอายุ 7 วัน ของดินลูกรังหรือหินคลุกปรับปรุงด้วยดินซีเมนต์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 250 psi (17.5 ksc) ซึ่งค่าดังกล่าวแนะนำโดย Transport and road research laboratory (TRRL)

#### ตาราง 7 เกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงและประเทศต่าง ๆ

สถาบัน	เกณฑ์การออกแบบ
กรมทางหลวง	UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน 1) มีค่าไม่น้อยกว่า 350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทางหินคลุก 2) มีค่าไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สำหรับก่อสร้างชั้นพื้นทาง 3) มีค่าไม่น้อยกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สำหรับก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง
British Road Research Laboratory, United Kingdom	UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน มีค่าไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
National Association of Australian State Road Authority (NAASRA), Australia	UCS ที่บ่มอายุ 7 วัน อยู่ในช่วง 150 – 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

Ruenkairergsa (1989) ได้รายงานว่าการศึกษาถนนที่ก่อสร้างด้วยดินซีเมนต์ภายใต้เกณฑ์การออกแบบ *UCS* ข้างต้นนั้นเหมาะสมกับสภาพเงื่อนไขด้านจราจรในประเทศไทย และงานวิจัยฉบับนี้ได้แนะนำปริมาณปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ในการปรับปรุงดินอยู่ในช่วงร้อยละ 3–5 ซึ่งค่าปริมาณปูนซีเมนต์ดังกล่าวก็เพียงพอจะทำให้ค่า *UCS* ที่อายุการบ่ม 7 วัน จะอยู่ในช่วง 200–300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยตาราง 7 แสดงเกณฑ์การออกแบบดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงและประเทศต่าง ๆ และตาราง 8 แสดงมาตรฐานการออกแบบดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง

ตาราง 8 มาตรฐานการออกแบบดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง

วัสดุ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนดชั้นโครงสร้าง	
		พื้นทาง	รองพื้นทาง
ดินลูกรัง	ขนาดเม็ดดินโตสุด	50	50
	ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ไม่เกินร้อยละ	70	-
	ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกินร้อยละ	25	40
	ค่าขีดจำกัดเหลว (LL) ไม่เกินร้อยละ	40	40
	ค่าดัชนีพลาสติก (PI) ไม่เกินร้อยละ	15	20
	ค่าความสึกหรอบแบบลอสแอนเจลีส (Los Angeles) ไม่เกินร้อยละ	60	-
	กรณีที่มีค่า LL และ PI มีค่าเกินกว่าที่กำหนดต้องใช้ปูนขาวผสมไม่น้อยกว่าร้อยละ	2	2
ปูนซีเมนต์	ประเภทของปูนซีเมนต์	พอร์ตแลนด์	พอร์ตแลนด์หรือ
		ประเภท 1	ปูนซีเมนต์ผสม
น้ำ	สะอาดปราศจากสารต่าง ๆ เช่น เกลือ น้ำมัน กรด ต่าง และอินทรีย์วัตถุ และห้ามใช้น้ำทะเล		

**หมายเหตุ:** ขนาดของเม็ดดินหาโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้าง

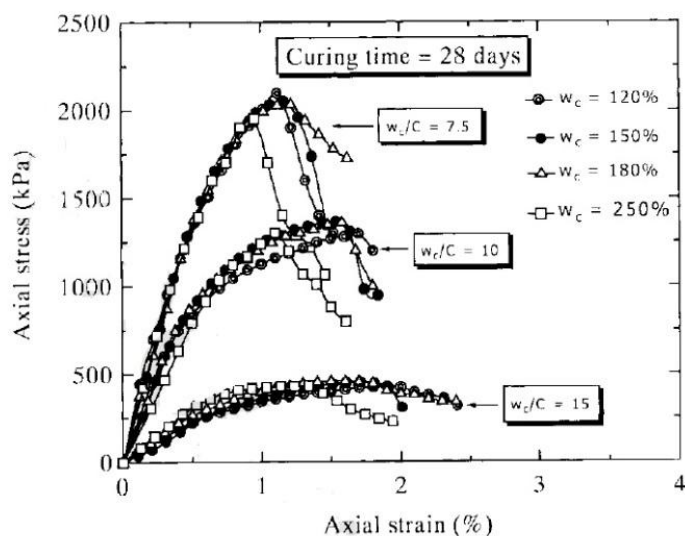
**ที่มา:** กรมทางหลวง, 2532; กรมทางหลวง, 2556

### การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

กรมทางหลวงและบริษัทปูนซีเมนต์ประเทศไทย จำกัด ได้ทดลองสร้างถนนตัวอย่างโดยใช้ดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ ประมาณ 5 km สายวารินชำราบ-เดชอุดม กม.4 ถึง กม.8 ในจังหวัดอุบลราชธานี โดยออกแบบให้เป็นชั้นทางแบบกึ่งยึดหยุ่นโดยกำหนดค่า UCS ต้องอยู่ในช่วง 17.5 ถึง 56.2 ksc ที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยได้สรุปไว้ว่าถ้ากำลัง UCS สูงกว่า 56.2 ksc จะทำให้ดินสูญเสียความยึดหยุ่นและเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นวัสดุแข็งเกร็ง ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาการแตกร้าวที่ผิวหน้าขึ้นได้ จากการทดลอง พบว่า ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 จะทำได้ค่า UCS ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน

Ruenkairergsa (1982) ได้รายงานไว้ว่าการก่อสร้างถนนโดยใช้ดินลูกรังผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือระยะทางประมาณ 1,400 km พบว่าดินลูกรังที่มีค่า PI ไม่เกิน 18 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำให้ค่า UCS มีค่ามากกว่า 250 psi (บ่มตัวอย่าง 7 วัน และแช่น้ำ 1 วันก่อนการทดสอบ) จะอยู่ในช่วงร้อยละ 3-5% ของน้ำหนักดินแห้ง ส่วนดินที่มีค่า PI สูงกว่านี้จะต้องเติมปูนขาวร้อยละ 2 เพื่อลดค่า PI ก่อนที่จะผสมกับปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ในรายงานฉบับนี้ยังได้สรุปไว้ว่าสิ่งสำคัญในการพัฒนาการปรับปรุงคุณภาพดินซีเมนต์ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นของดิน

Horpibusuk, Miura and Nagaraj (2005) ได้อธิบายปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์ โดยใช้ดินเหนียวอ่อนจากเมืองซะงะ (Saga) ประเทศญี่ปุ่น (Japan) ที่ระดับความลึก 2 m จากผิวดิน และมีคุณสมบัติเฉพาะคือค่า Liquid Limit เท่ากับร้อยละ 120 ค่า Plastic Limit เท่ากับร้อยละ 57 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 และค่าความชื้นตามธรรมชาติ (Natural water content) เท่ากับ 130% และทำการผสมกับซีเมนต์ โดยเตรียมตัวอย่างรูปร่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm สูง 100 mm หลังจากบ่มที่ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงดันด้านข้าง ด้วยอัตรา 1 mm/min พบว่า ค่าดังกล่าวแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณความชื้นในมวลดิน (Clay-water content,  $w_c$ ) ต่อปริมาณซีเมนต์ (Cement content,  $C$ ) โดยเรียกอัตราส่วนนี้ว่า Clay-water cement ratio ( $w_c/C$ )



ภาพ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งความเค้นความเครียดกับอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์

ที่มา: Horpibusuk, Miura and Nagaraj, 2005

โดยในขอบเขตของการทดสอบ คือ ปริมาณความชื้นในมวลดินจะอยู่ในช่วงร้อยละ 120–250 และปริมาณซีเมนต์อยู่ในช่วงร้อยละ 8–33 จากผลการทดสอบสรุปว่า เมื่อต้องการให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น ต้องทำการผสมดินและซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ต่ำลง ซึ่งสามารถกระทำได้โดยใส่ปริมาณซีเมนต์ให้มากขึ้น หรือลดปริมาณ

ความชื้นในดิน โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์แสดงดังภาพ 8

เกียรติศักดิ์ กลั้วเพชร และคณะ (2548) ได้ศึกษากำลังและพฤติกรรมของดินลมหอบแบบขอนแกนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ชุด โดยชุดที่หนึ่งจะเป็นดินอย่างเดียว ชุดที่สองและเป็นตัวอย่างดิน 95% ผสมสารผสมเพิ่ม 5% โดยที่ในสารผสมเพิ่มประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 60% เถ้าลอย 40% จากนั้นได้นำมาทดสอบด้วยวิธีทดสอบแบบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) และการทดสอบแรงอัดแกนเดี่ยว จากผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินลมหอบที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ จะมีกำลังสูงกว่าดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ จากการทดสอบแรงอัดแบบแกนเดี่ยวในตัวอย่างดินที่อายุการบ่ม 28 วัน กำลังของดินจะมีค่าสูงขึ้น 86% ของน้ำหนักของดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ส่วนกำลังของดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะมีกำลังเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ดังตาราง 9 และ 10 ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินทั้งสองประเภท แสดงให้เห็นว่า ดินลมหอบปกติจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำกว่า ความเครียดขณะวิบัติจะมีค่าสูงกว่า ส่วนดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะให้ค่ากำลังที่สูง แต่ความเครียดที่จุดวิบัติจะมีค่าต่ำลงมาก งานวิจัยนี้ยังสรุปไว้ว่า ในดินที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์จะทำให้มีพฤติกรรมค่อนข้างไปทางคอนกรีต ซึ่งส่งผลให้ดินมีกำลังรับแรงมากขึ้น แต่ก็จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในดินลดลงเช่นกัน

**ตาราง 9 กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนและเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของดินที่ถูกรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย**

อายุในการบ่ม, วัน	ความเครียดตามแนวแกน ในจุดวิบัติ (mm)	แรงอัดตามแนวแกน (kPa)	การเพิ่มกำลังรับแรงอัด ตามแนวแกน (%)
3	0.041	363.588	0.000
7	0.019	404.127	11.150
14	0.020	801.118	98.234
21	0.025	629.939	-21.368
28	0.025	1174.878	86.507

ที่มา: เกียรติศักดิ์ กลั้วเพชร และคณะ, 2548

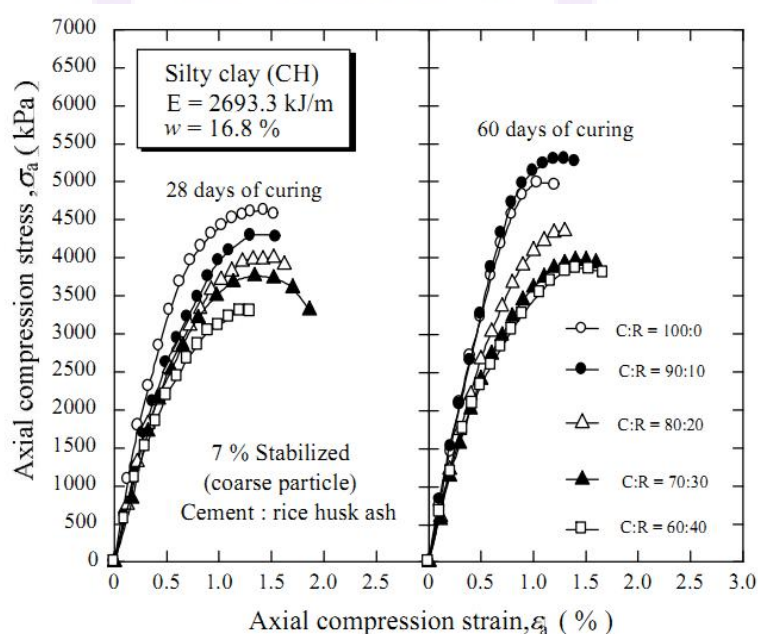


ตาราง 10 กำลังรับแรงเฉือนของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

ค่าน้ำหนักกดทับในแนวดิ่ง (kPa)	ค่ากำลังรับแรงเฉือน (kPa)			
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน
450	490.5	580.4	601.1	1893.7
500	829.1	920.9	1277.5	1319.4
550	1126.5	1343.7	1395.8	1647.5

ที่มา: เกียรติศักดิ์ กัลป์เพชร และคณะ, 2548

อภิชาติ คำภาห্লা, วรรัชย์ เกษกัน และสุชสันต์ หอพิบูลสุข (2550) ได้ทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเหนียวปนดินตะกอนที่ทำการบดอัดปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ โดยผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณ 3, 5 และ 7% ของน้ำหนักดิน และทำการลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยการแทนที่เถ้าแกลบทั้งชนิดที่ผ่านการบดละเอียดและไม่ผ่านการบดละเอียด ในปริมาณ 0, 10, 20, 30 และ 40% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ในการเตรียมตัวอย่างได้ทำการเตรียมภายใต้เงื่อนไขการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14, 28 และ 60 วัน

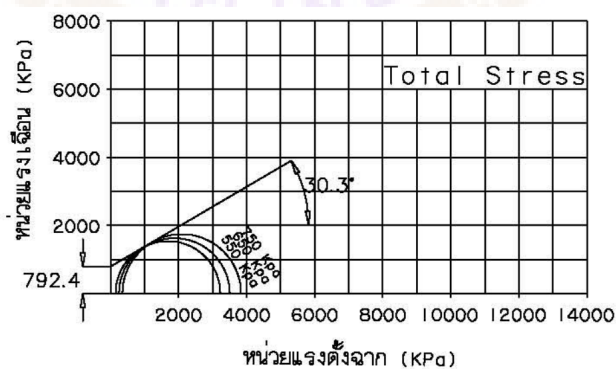


ภาพ 9 กำลังอัดของดินซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

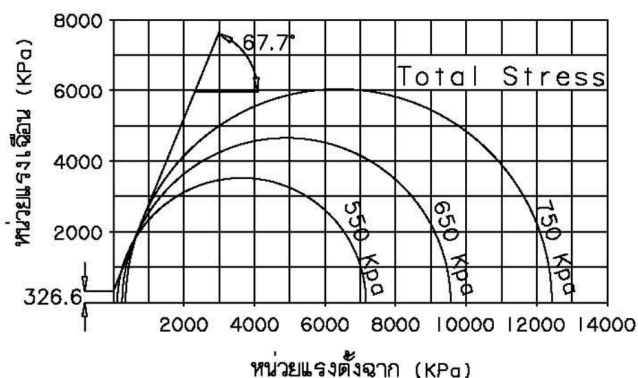
ที่มา: อภิชาติ คำภาห্লা, วรรัชย์ เกษกัน และสุชสันต์ หอพิบูลสุข, 2550

จากผลการทดสอบ พบว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ผสมซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ และก็เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ส่วนดินที่ผสมซีเมนต์และเถ้ากลบนั้น พบว่าค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน จะลดลงตามปริมาณของเถ้ากลบที่มากขึ้น แต่ที่อายุการบ่ม 60 วันค่ากำลังอัดของดินที่ผสมปูนซีเมนต์และเถ้ากลบในปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากกว่าดินที่ผสมเพียงซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพ 9

พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์ (2548) การศึกษากำลังและพฤติกรรมของดินลมหอบขนแค้น ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย ตัวอย่างดินลมหอบที่ไม่ได้ปรับปรุง และตัวอย่างดินลมหอบที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ได้ถูกเตรียมภายใต้เงื่อนไขในห้องปฏิบัติการโดย ผสมน้ำลงไปปริมาณเท่ากับ 9% ของน้ำหนักดิน และใส่ส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยในอัตราส่วน 60:40 ผสมลงไปดินในปริมาณ 1.5% ของน้ำหนักดิน จากนั้นได้นำตัวอย่างดินทั้ง 2 แบบมาทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบสามแกน ภายใต้เงื่อนไขแบบอัดตัวคายน้ำ และไม่ระบายน้ำ (Consolidated undrain triaxial test, CU) โดยให้แรงดันด้านข้าง (Confining pressure) เท่ากับ 550, 650 และ 750 kPa จากผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินลมหอบที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพจะมีกำลังสูงกว่าดินลมหอบที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ และกำลังของดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะมีกำลังเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ตัวอย่างดินที่อายุการบ่ม 7 วัน มีกำลังสูงขึ้นถึง 1 เท่าตัว และจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตั้งฉากและแรงเฉือนในรูปของวงกลมมอร์ (Mohr) ของดินทั้ง 2 ประเภท ดังในภาพ 10 และ 11 แสดงให้เห็นว่า ดินลมหอบปกติจะมีค่ากำลังแรงเฉือนต่ำกว่า แต่ความเครียดขณะวิบัติจะมีค่าสูง ส่วนดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว จะให้ค่ากำลังที่สูงแต่ความเครียดที่จุดวิบัติจะมีค่าต่ำลงมาก ขณะวิบัติดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะมีรูปแบบการวิบัติคล้ายกับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต



ภาพ 10 วงกลมมอร์ของดินลมหอบที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และเถ้าลอยที่อายุการบ่ม 7 วัน



ภาพ 11 วงกลมมอรัของดินลมหอบที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และ  
เถ้าลอยที่อายุการบ่ม 7 วัน

ที่มา: พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์, 2548

เกริก ตั้งสกุล, ปิยวัฒน์ ทองเกรียว และศรายุทธ ศรีตัมภวา (2552) ได้ทำการศึกษา กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying) ของดินลมหอบขอนแก่นที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และซีเถ้ากลบ โดยตัวอย่างทดสอบ จะถูกเตรียมภายใต้เงื่อนไขการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ด้วยอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และ เถ้ากลบ ดังตาราง 11

ในขั้นตอนของการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง ก็ได้ทำการทดสอบตาม มาตรฐาน ASTM D559 และการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตัวอย่างได้ถูกเตรียมในขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 50 และ 100 mm ตามลำดับ และทำการทดสอบกวดหา กำลังที่อายุการบ่ม 28 วัน ด้วยอัตราความเร็วในการกดเท่ากับ 1 mm/min จากผลการทดสอบ กำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความคงทน พบว่า ในตัวอย่างดินลมหอบที่ถูกปรับปรุงด้วย ซีเมนต์และซีเถ้ากลบ เมื่อมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่มากขึ้นกำลังรับแรงอัดและความทนทาน จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียที่น้อยลงตามปริมาณที่เพิ่มเข้าไป ส่วนตัวอย่างที่มีซีเถ้ากลบผสม อยู่ค่ากำลังรับแรงอัด จะพบว่า เมื่อปริมาณของซีเถ้ากลบมากขึ้นจะทำให้มีกำลังรับแรงที่ มากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง แต่ถ้ามีปริมาณของซีเถ้ากลบเพิ่มขึ้นไปอีกจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ส่วนค่าความคงทนนั้น พบว่า ยิ่งมีปริมาณซีเถ้ากลบที่มากขึ้นก็จะทำให้ความทนทานค่า เปอร์เซ็นต์การสูญเสียที่มากขึ้น

ตาราง 11 กำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของดินลมหอบของแกนที่  
ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และซีเถ้าแกลบ

ปริมาณดิน (%)	สารผสมเพิ่ม (%)	ปูนซีเมนต์ (%)	ซีเถ้าแกลบ (%)	กำลังรับแรงอัด (MPa)	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย (%)
97	3	1.5	1.5	2.50	4.23
97	3	1.0	2.0	3.79	5.85
97	3	2.5	0.5	4.26	2.45
96	4	2.0	2.0	4.32	3.55
96	4	2.5	1.5	5.83	2.00
96	4	3.0	1.0	6.95	1.49
95	5	2.5	2.5	2.73	2.37
95	5	3.0	2.0	6.05	2.11
95	5	4.0	1.0	8.99	0.85

ที่มา: เกริก ตั้งสกุล, ปิยวัฒน์ ทองเกรียว และศรายุทธ ศรีดีมภวา, 2552

Jaritngam, Yandell and Taneerananon. (2013) ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดของดินลูกรังภายในจังหวัดหาดใหญ่ ที่ความลึก 0.5–2 m ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ด้วยวิธีแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยการแปรผันตามอัตราส่วนผสมซีเมนต์ที่ 3, 5, 7 และ 9% โดยน้ำหนักของดิน และระยะเวลาในการบ่มที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน จากในผลการทดสอบจะพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์และระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง ดังแสดงในตาราง 12

หลังที่ได้ผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มีการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม ดังแสดงในภาพ 12 นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้สร้างแบบจำลองสำหรับทำนายค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น สำหรับดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในรูปแบบสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้สมการถดถอยพหุคูณ ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้แบบจำลองสำหรับทำนายค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวดังแสดงในสมการ 2.1 และ 2.2 แบบจำลองสำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ดังแสดงในสมการ 2.3 และ 2.4 แบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวและโมดูลัสยืดหยุ่นดังแสดงในสมการ 2.5

### ตาราง 12 ผลการทดสอบ UCS และ ES

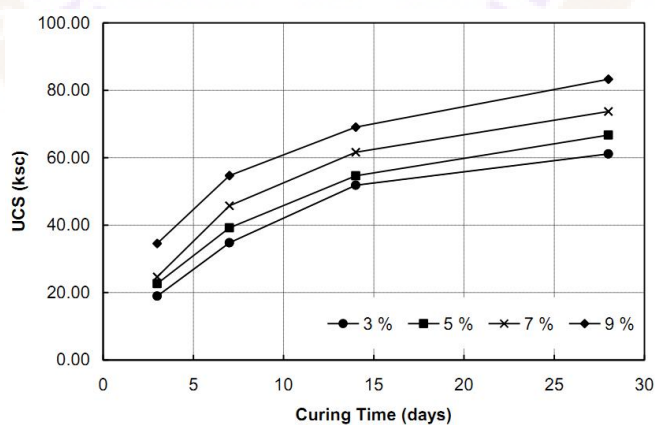
Test#	C <sub>c</sub>	T	D <sub>D</sub>	UCS	ES
C3T3	3	3	2.133	18.97	3548
C5T3	5	3	2.133	34.77	6400
C7T3	7	3	2.212	51.85	9010
C9T3	9	3	2.152	61.14	12014
C3T7	3	7	2.132	22.65	4332
C5T7	5	7	2.195	39.19	6900
C7T7	7	7	2.194	54.66	9710
C9T7	9	7	2.141	66.75	12838
C3T14	3	14	2.15	24.69	4963
C5T14	5	14	2.184	45.73	8100
C7T14	7	14	2.23	61.61	11515
C9T14	9	14	2.139	73.69	14716
C3T28	3	28	2.175	34.57	6680
C5T28	5	28	2.184	54.68	9702
C7T28	7	28	2.203	69.06	12690
C9T28	9	28	2.154	83.3	15544

หมายเหตุ: C<sub>c</sub> = ปริมาณของปูนซีเมนต์ (%), T = ระยะเวลาการบ่ม (Day),

D<sub>D</sub> = หน่วยน้ำหนักแห้ง (ton/m<sup>3</sup>), UCS = กำลังรับแรงอัดแกนเดียว (ksc)

และ ES = โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc)

ที่มา: Jaritngam, Yandell and Taneerananon, 2013



ภาพ 12 การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินที่ผสมกับปูนซีเมนต์

ที่มา: Jaritngam, Yandell and Taneerananon, 2013

สมการสำหรับกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

$$UCS = -6.045 + 7.685C_c + 0.713T \quad [R^2 = 0.971] \quad (2.1)$$

$$UCS = -108.468 + 7.607C_c + 0.674T + 47.656D_D \quad [R^2 = 0.976] \quad (2.2)$$

สมการสำหรับโมดูลัสยืดหยุ่น

$$ES = -1298.470 + 1467.375C_c + 131.584T \quad [R^2 = 0.974] \quad (2.3)$$

$$ES = -1873.914 + 1466.938C_c + 131.367T + 267.747D_D \quad [R^2 = 0.974] \quad (2.4)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่น

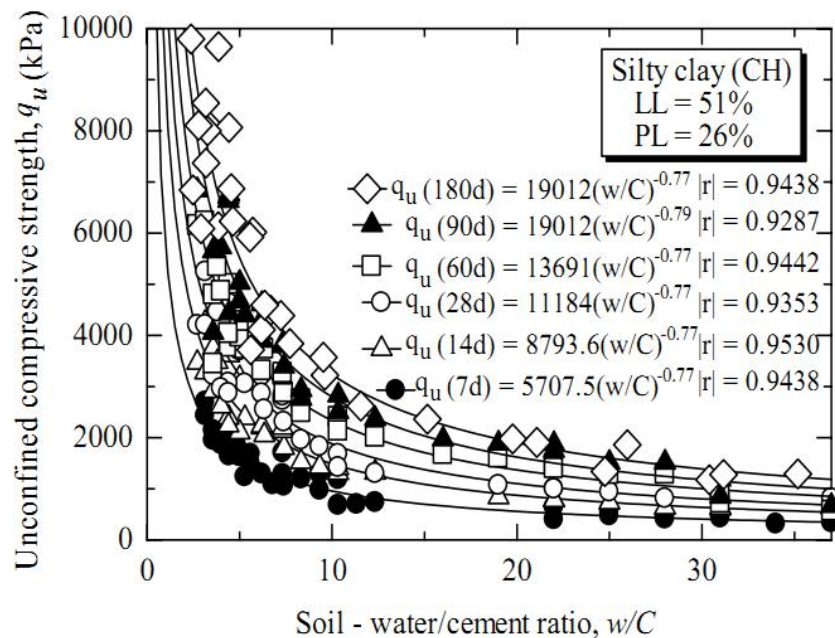
$$ES = -71.83 + 188.28UCS \quad [R^2 = 0.984] \quad (2.5)$$

ในงานวิจัยนี้ยังสรุปได้ว่า ค่ากำลังจะเพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 ksc เมื่อมีปริมาณของปูนซีเมนต์เพิ่มทุก ๆ 2% และค่ากำลังรับแรงอัดของดินลูกรังผสมซีเมนต์ จะมีความสัมพันธ์เชิงลอกกาลิทึมของระยะเวลาในการบ่ม

สนธยา แพทย์โนทัย (2548) ได้นำเสนอแบบจำลองกำลังอัดแกนเดียวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด ที่สร้างจากดินเหนียวปนดินตะกอน โดยแปรผันพลังงานบดอัด ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ และอายุบ่ม โดยแยกพิจารณาทางด้านหนึ่งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินเหนียวปนดินตะกอนที่เก็บมาจากบริเวณอาคารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา ที่ระดับความลึก 1.5-2.0 m และดินทรายปนดินตะกอนที่เก็บมาจากบริเวณหอพัก สุรสวัสดิ์แมนชั่น หมู่บ้านสุรสวัสดิ์แลนด์ ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมาที่ความลึก 1.5-2.0 m โดยผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณ 1, 3, 5 และ 7% ของน้ำหนักดินแห้ง ที่ปริมาณความชื้น 5 ค่า (ได้แก่ 60, 80, 100, 120 และ 140% ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม) ดินตัวอย่างจะถูกบดอัดด้วยพลังงาน 4 ค่า (ได้แก่ 296.3, 592.5, 1346.6 และ 2693.3 kJ/m<sup>3</sup>) ในสมการการทำนายอัตราส่วนกำลังอัดที่อายุบ่มใด ๆ ในช่วงปริมาณความชื้นระหว่าง 100-140 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม โดยอาศัยผลทดสอบที่ 28 วัน เพียงค่าเดียวสามารถที่จะประมาณกำลังอัดที่ระยะการบ่ม ปริมาณความชื้น และปริมาณซีเมนต์ใด ๆ เมื่อพบว่ากำลังอัดแกนเดียว

ของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดแปรผันตามปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ ดังนั้น จึงนำผลทดสอบที่ได้มาสร้างสมการทำนายกำลังอัดที่อายุการบ่มค่าหนึ่ง ดังแสดงในภาพ 13 ทำให้ได้สมการตั้งต้นดังต่อไปนี้

$$q_u = \frac{A}{(w/C)^B} \quad (2.6)$$



ภาพ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดี่ยวและ w/C ของดินตัวอย่าง

ที่มา: สนธยา แพทย์มโนทัย, 2548

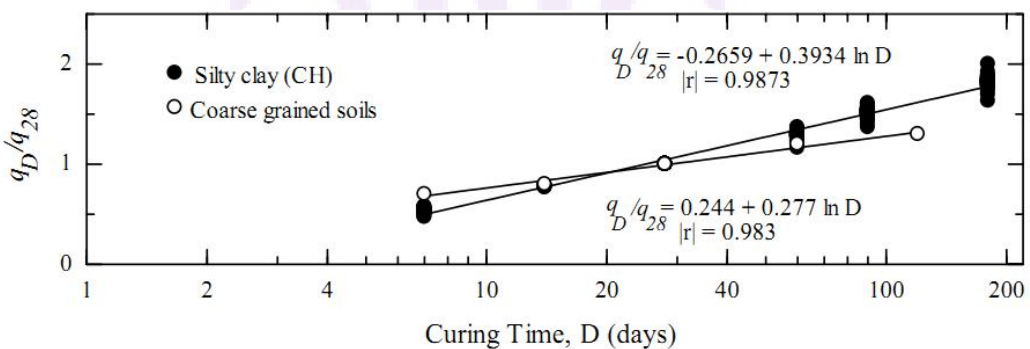
จากภาพ 13 ค่า B มีค่าประมาณ 0.77 เมื่อนำมาสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินเม็ดละเอียดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมและทางด้านเปียกที่ระยะบ่มค่าหนึ่ง ค่า A จะถูกตัดทอนออกไปในขั้นตอนการรวมสมการได้ดังสมการ 2.7

$$\left\{ \frac{q_{(w/c)1}}{q_{(w/c)2}} \right\} = \left[ \frac{(w/C)_2}{(w/C)_1} \right]^{0.77} \quad (2.7)$$

อย่างไรก็ตาม สมการ 2.7 ไม่สามารถประมาณกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์บดอัดที่อายุบ่มใด ๆ ได้ จากการสังเกตภาพ 13 พบว่าที่ w/C ค่าหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดกับเวลาจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ A เท่านั้น เนื่องจากพารามิเตอร์ B มีค่าเกือบคงที่ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.8

$$\frac{q_{D1}}{q_{D2}} = \frac{A_{D1}}{A_{D2}} \quad (2.8)$$

เนื่องจากค่าของพารามิเตอร์ A จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินซีเมนต์บดอัดและอายุบ่ม แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดต่อเวลาควรจะมีค่าเท่ากันสำหรับดินซีเมนต์บดอัดทุกชนิดที่ผสมซีเมนต์ชนิดเดียวกัน ดังนั้นสมการ 2.8 จึงน่าจะใช้ได้สำหรับดินซีเมนต์บดอัดทุกชนิดที่ผสมซีเมนต์ชนิดเดียวกัน จากแนวคิดข้างต้นผู้วิจัยได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุบ่มของดินเหนียวปนดินตะกอนภายใต้ภาวะตัวแปรการบดอัดต่าง ๆ และทำการ Normalization โดยใช้ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน เป็นค่าอ้างอิง ดังแสดงในภาพ 14 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่ม อัตราส่วนกำลังอัดแกนเดียวในพจน์ของอายุบ่ม เมื่อให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 28 วันเป็นค่าอ้างอิงดังสมการ 2.9



ภาพ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่มของดิน

ที่มา: สนธยา แพพัฒน์ไธย, 2548

$$\frac{q_D}{q_{28}} = -0.2659 + 0.3934 \ln D \quad (2.9)$$



จากการรวมสมการ 2.7 และ 2.9 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดี่ยว อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์และอายุบ่ม ของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด ที่ปริมาณ ดังนั้น จึงเป็นที่มาของแบบจำลองดังแสดงในสมการ 2.10

$$\left\{ \frac{q_{(w/c)D}}{q_{(w/c)28}} \right\} = \left[ \frac{w/c_{28}}{w/c_D} \right]^{0.77} (-0.2659 + 0.3934 \ln D) \quad (2.10)$$

สุดท้ายงานวิจัยนี้ได้สรุปเกี่ยวกับแบบจำลองที่ได้เห็นว่า สมการที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ดีทั้งทางด้านเปียกและทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นเหมาะสม ในทางด้านเปียกกำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัดจะแปรผันตามอัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และสมการที่สร้างขึ้นนี้ยังสามารถช่วยกำหนด ปริมาณความชื้น ปริมาณซีเมนต์ พลังงานบดอัด และระยะเวลาบ่มให้ได้กำลังอัดตามต้องการได้



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

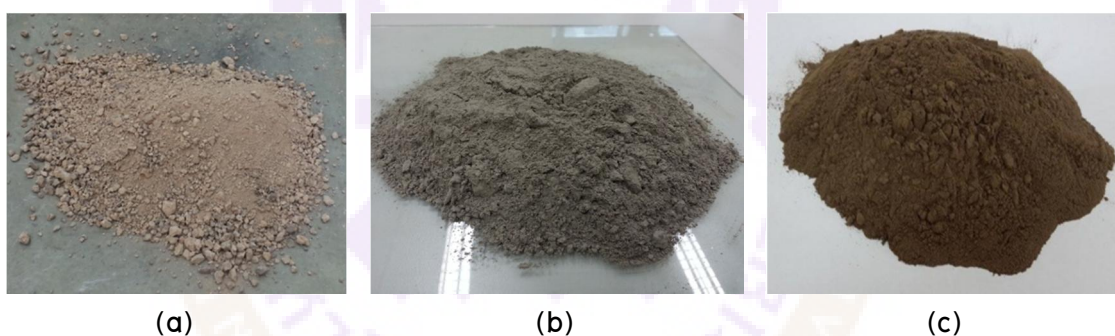
สำหรับวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาวิจัยนั้นประกอบด้วย ดินตะกอนกวีาน-พะเยา ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย ดังแสดงในภาพ 16 และ 17 โดยตัวอย่างดินตะกอนที่นำมาใช้จะเป็นดินที่ได้จากกระบวนการสูบจากท้องกวีานพะเยา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา และทำการเก็บตัวอย่างดินตะกอนจากในบริเวณพื้นที่ ที่ดังแสดงภาพ 15 ส่วนปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง



ภาพ 15 บริเวณเก็บตัวอย่างดินตะกอน



ภาพ 16 กองดินตะกอนกรวดน้ำที่ถูกกองทิ้งไว้



ภาพ 17 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (a) ดินตะกอนกรวดน้ำ (b) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 (c) ใ้ลยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

#### การทดสอบหาคคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรม

ในการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนกรวดน้ำที่ผสมปูนซีเมนต์และใ้ลย จะใช้ข้อกำหนดจากมาตรฐานดังตาราง 13 เป็นข้อกำหนดและควบคุมสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้

**ตาราง 13 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และคุณสมบัติทางวิศวกรรม**

การทดสอบ	วัตถุประสงค์	มาตรฐาน
การทดสอบหาขีดพิกต์อัดเตอร์เบิร์ก (Atterberg test)	เพื่อหาค่า LL PL PI และ SL	ASTM D4318 ASTM D 427
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test)	เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ	ASTM D 854
การหาขนาดคละ (Grain size analysis)	เพื่อหาขนาดคละและจำแนกดิน	ASTM D 442
X-ray diffractometer (XRD)	เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบแร่ธาตุ	-
X-ray fluorescence (XRF)	เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี	-
Scanning electron microscope (SEM)	เพื่อศึกษาลักษณะลัทธิฐานและของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง	-
การทดสอบหาปริมาณโลหะหนัก	เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโลหะหนัก	พรบ. ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535
การบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction test)	เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด	ASTM D 1157
กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดี่ยว (Unconfined compression test)	เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว	ASTM D 2166
การทดสอบความคงทน (Wetting and drying test)	เพื่อหาคุณสมบัติต่อความทนทานต่อการสึกหรอ	ASTM D 559-96

โดยในการทดสอบแต่ละประเภทมีรายละเอียดและความหมายดังนี้

### 1. การทดสอบขีดพิกต์อัดเตอร์เบิร์ก

1.1 ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) คือ ปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากของเหลว (Viscous fluid) ไปเป็นสารหนืดตัวในสถานภาพพลาสติก (Plastic state)

1.2 ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) คือ ปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่เปลี่ยนสถานภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง (Semi – solid state)

1.3 ขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage limit, SL) คือ ปริมาณความชื้นที่ดินเปลี่ยนจากสภาพกึ่งของแข็งเป็นของแข็ง และจะไม่มีการหดตัวต่อไปอีกแล้ว แต่เมื่อความชื้นยิ่งลดลงไป

ฟองอากาศจะเริ่มแทรกเข้าไปในมวลดิน และทำให้เกิดสภาวะไม่อึดตัวเกิดขึ้น จนกระทั่งไม่มีความชื้นอยู่เลย

ส่วนค่าความชื้นในสถานภาพพลาสติกของดิน เราเรียกว่า Plasticity index (PL) คือ ผลต่างของ LL และ PL มักเป็นตัวแสดงถึงความเหนียวของดินและยังแสดงความไวต่อการเปลี่ยนสถานภาพต่อความชื้นของมวลดินนั้นจึงเป็นค่าที่สำคัญใช้มากในการจำแนกมวลดิน

## 2. การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ของวัตถุใดๆ คือ อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของวัตถุต่อน้ำหนักน้ำที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}\text{C}$  ที่มีปริมาตรเท่าวัตถุนั้น ในมวลดินจะประกอบด้วยธาตุสารหลาย ๆ อย่าง ดังนั้นความถ่วงจำเพาะในมวลดินก็คือ ค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะของธาตุสารเหล่านั้น ดังจะเห็นได้ว่าดินลูกรังบางชนิดมีธาตุเหล็กอยู่มากจึงทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.00 หรือมากกว่า ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบสำคัญ ก็จะทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำประมาณ 2.00 แต่กระนั้นค่าเฉลี่ยของมวลดินโดยทั่วไปจะอยู่ในระหว่าง 2.60 ถึง 2.70

ค่าความถ่วงจำเพาะ จะเป็นคุณสมบัติพื้นฐานสำคัญอีกค่าหนึ่ง ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาตรช่องว่าง (Void volume) ความอึดตัว (Degree of saturation) ความพรุน (Porosity) และอื่น ๆ ได้ อีกทั้งยังจะทำให้อนุมานได้ว่ามวลดินนั้น ๆ ประกอบด้วยธาตุสารอะไรบ้างที่เป็นองค์ประกอบ

## 3. การทดสอบหาขนาดคละ

ในมวลดินปริมาณหนึ่งอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 cm ไปจนถึงขนาด 0.0002 mm ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของมวลดินจะขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดดิน เช่น มวลดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 mm) ส่วนมากจะไม่มี ความเหนียวหรือแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดิน ซึ่งเรียกว่าดินทราย (Granular soil) ส่วนดินที่มีส่วนประกอบเป็นเม็ดเล็กมาก ๆ (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ก็เรียกว่าดินเหนียว (Cohesive soil) นอกจากนั้นขนาดของเม็ดดินยังมีอิทธิพลกับการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ความแข็งแรง (Strength) อัตราการทรุดตัว (Rate of consolidation) และอื่น ๆ อีกมากมาย

การหาขนาดและการกระจายของเม็ดดินอาจทำได้ด้วยกันหลายวิธี แต่ที่จะนำมาปฏิบัติในงานวิจัยนี้ คือ วิธีร่อนผ่านตะแกรงแบบล้าง (Wet sieve analysis) สำหรับทดสอบกับดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.075 mm ขึ้นไป ส่วนวิธีตกตะกอนจะใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) สำหรับใช้วัดการตกตะกอน สำหรับทดสอบกับดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

#### 4. การทดสอบ X-ray diffractometer (XRD)

การทดสอบ X-ray diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของหน่วยของเซลล์ (Unit cell) ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบ (Pattern) ของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะทำให้ทราบว่าในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง

#### 5. การทดสอบ X-ray fluorescence (XRF)

การทดสอบ X-ray fluorescence (XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยสามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลาย ๆ ด้าน เช่น วัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อมทางการแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เป็นต้น การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอ็กซ์ ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอ็กซ์เข้าไปในตัวอย่างธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างธาตุจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คายหรือแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ที่ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้น ๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้นมีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง

#### 6. การทดสอบ Scanning electron microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอน (Electron) เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2  $\mu\text{m}$  และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จน ถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 nm อีกทั้งยังสามารถใช้งาน

ร่วมกับโหมดเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy dispersive spectrometry (EDS) และ Wavelength dispersive spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

### 7. การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

การบดอัดเป็นกระบวนการที่ใช้แรงหรือน้ำหนักมากกระทำเพื่อให้เม็ดดินเบียดตัวชิดกันเพื่อเพิ่มความแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว และลดการซึมผ่านของน้ำ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และทำการบดอัดตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ จุดประสงค์ก็เพื่อประมาณค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุผสมซีเมนต์และเถ้าลอยสำหรับนำไปใช้เตรียมตัวอย่างในการทดสอบอื่น ๆ ต่อไป

ในโปรแกรมการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตะกอนกวีานพะเยาผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยจะเป็นไปตามโปรแกรมการทดสอบในตาราง 14 โดยจะทำการทดสอบที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 3, 5, 7 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง และในแต่ละปริมาณของปูนซีเมนต์จะผสมเถ้าลอยที่ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20% ของน้ำหนักดินแห้ง ส่วนตัวอย่างดินที่ในการทดสอบดินจะถูกแยกขนาดโดยเลือกใช้ดินที่มีขนาดผ่านตระแกรงเบอร์ 4 และตัวอย่างดินจะถูกทำให้มีสภาพที่ปราศจากความชื้นโดยการนำไปอบก่อนทำการทดสอบขั้นต่อไป

สำหรับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังแสดงในภาพ 3.4 จะใช้โมลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ  $17.5 \pm 0.25$  cm และมีความสูงเท่ากับ  $15.2 \pm 0.25$  cm ซึ่งจะมีปริมาตรประมาณ  $3175.5$  cm<sup>3</sup> ส่วนค้อนสำหรับกระแทกจะมีน้ำหนักของค้อนรวมกันจับเท่ากับ 4.39 kg และมีระยะยกเท่ากับ 43 cm ซึ่งจะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการทดสอบดังแสดงในภาพ 18

ในขั้นตอนของการบดอัด หลังจากเตรียมตัวอย่างดินผสมซีเมนต์และเถ้าลอยที่ปริมาณอัตราส่วนใด ๆ แล้ว จากนั้นจะใส่น้ำเริ่มต้นผสมเข้าไปประมาณ 3% ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วเริ่มทำการบดอัดดินด้วยการแบ่งชั้นบดอัดออกเป็น 5 ชั้น ด้วยการบดอัดจากการตกกระแทกของค้อนจำนวนชั้นละ 56 ครั้ง เมื่อบดอัดครบจำนวนตามที่ชั้นบดอัดแล้วจะทำการตัดแต่งตัวอย่างให้มีขนาดเท่ากับโมลบดอัด แล้วทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักและปริมาณความชื้นของก้อนดินที่บดอัดไป ต่อจากนั้นจะทำการผสมดินอีกครั้งโดยเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปอีกเพื่อทำการบดอัดและเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะกระทำแบบนี้จนกว่าน้ำหนักของดินที่บดอัดแล้วมีค่าลดลง

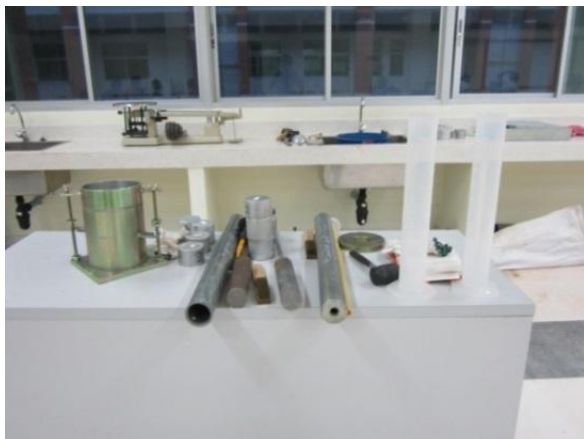
ตาราง 14 โปรแกรมการทดสอบในห้องปฏิบัติการของดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์และ  
เถ้าลอย

ส่วนผสม	การทดสอบ	การทดสอบกำลังรับ	การทดสอบ	ส่วนผสม	การทดสอบ	การทดสอบกำลังรับ	การ ทดสอบ ความคงทน
	การบดอัด	แรงอัดแกนเดียว	ความคงทน		การบดอัด	แรงอัดแกนเดียว	
COF0	✓	✓	✓	C7F0	✓	✓	✓
COF5	✓	✓	✓	C7F5	✓	✓	✓
COF10	✓	✓	✓	C7F10	✓	✓	✓
COF15	✓	✓	✓	C7F15	✓	✓	✓
COF20	✓	✓	✓	C7F20	✓	✓	✓
C3F0	✓	✓	✓	C10F0	✓	✓	✓
C3F5	✓	✓	✓	C10F5	✓	✓	✓
C3F10	✓	✓	✓	C10F10	✓	✓	✓
C3F15	✓	✓	✓	C10F15	✓	✓	✓
C3F20	✓	✓	✓	C10F20	✓	✓	✓
C5F0	✓	✓	✓				
C5F5	✓	✓	✓				
C5F10	✓	✓	✓				
C5F15	✓	✓	✓				
C5F20	✓	✓	✓				

หมายเหตุ: 1. C คือ ปูนซีเมนต์ และ F คือ เถ้าลอย

- หน่วยของปริมาณส่วนผสมคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักดินแห้ง เช่น C5F10 คือ สัดส่วนดินตะกอนกว่านพะเยาที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 5 เปอร์เซ็นต์ และ เถ้าลอย 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง





ภาพ 18 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

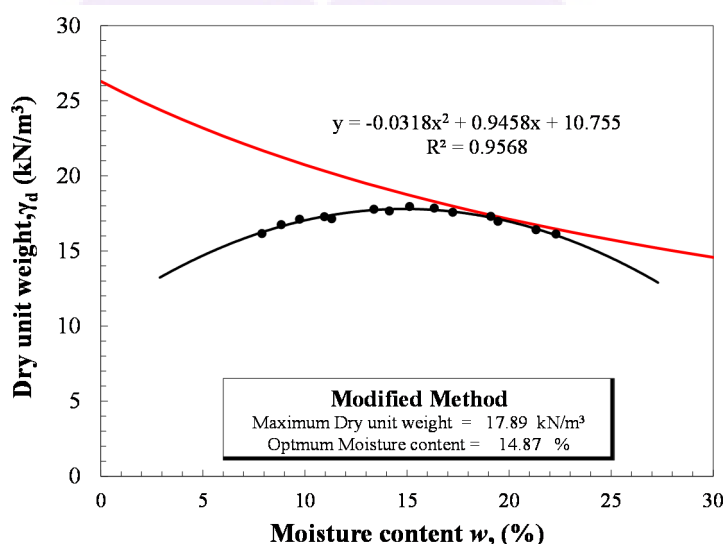
แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องมือกระแทกดังแสดงในภาพ 19 มาประยุกต์ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานแทนที่ค้อนบดอัดแบบมาตรฐานเดิม เพื่อการลดระยะเวลาในการทำงานและทุนแรงในการทำการทดสอบ แต่ก่อนขั้นตอนการใช้งานด้วยเครื่องกระแทก ย่อมต้องมีการปรับแก้วิธีการใช้เครื่องมือให้เหมาะสมก่อนนำไปทำการทดลอง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่เป็นการนำเข้ามาประยุกต์ใช้ ดังนั้น จำต้องมีการทดสอบปรับแก้เครื่องมือก่อน โดยรายละเอียดการปรับแก้เครื่องมือทดสอบจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



ภาพ 19 เครื่องมือกระแทกที่ใช้ในทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

**7.1 การประยุกต์และปรับแก้ใช้เครื่องกระแทกสำหรับทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน** การนำเครื่องมือทดสอบประยุกต์อื่น ๆ มาใช้งานย่อมส่งผลเสียเนื่องจากต้องทำการปรับแก้เครื่องมือที่ใช้ก่อน เพราะว่าเราไม่สามารถรู้ได้เกี่ยวกับค่าความหนาแน่นของตัวอย่างและพลังงานที่ใช้ในการบดอัดได้ ซึ่งเทคนิคในการปรับแก้จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

7.1.1 ทำการบดอัดตัวอย่างด้วยการทดสอบตามปกติ (ใช้ค้อนบดอัด) เป็นการบดอัดตัวอย่าง 5 ชั้น ๆ ละ 56 ครั้ง สำหรับหาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพ 20

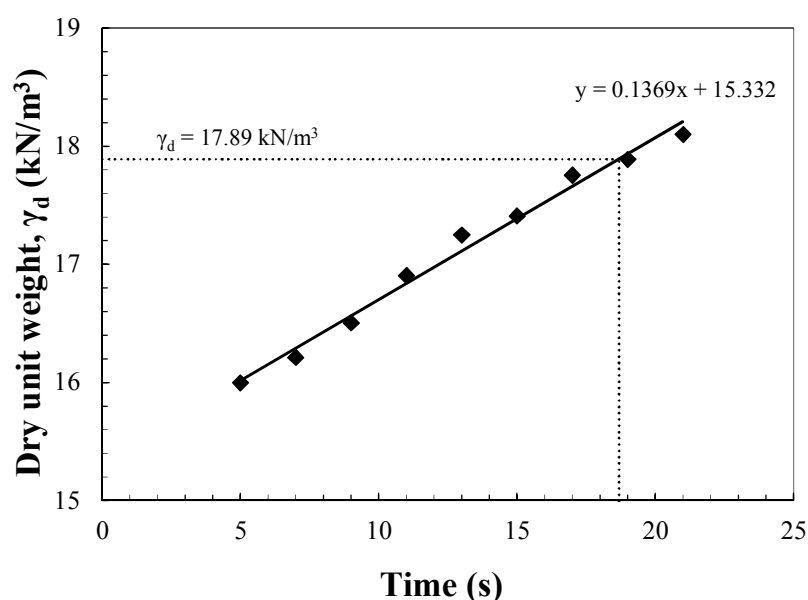


ภาพ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นจากค้อนบดอัด

7.1.2 หลังจากที่ได้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมแล้วจึงนำข้อมูลปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้นำไปเตรียมตัวอย่างผสมดินสำหรับการบดอัดด้วยเครื่องกระแทก

7.1.3 ทดลองทำการบดอัดด้วยเครื่องกระแทกด้วยเทียบกับเวลา ด้วยการบดอัด 5 ชั้น โดยจะกำหนดว่าจะใช้เวลาในการบดอัดในแต่ละชั้นนานเท่าไรและใช้ปริมาณความชื้นเท่ากับ 14.9 % ตามข้อมูลที่ได้ในข้อที่ 1 หลังจากทำการบดอัดเสร็จเรียบร้อยแล้วก็เก็บบันทึกข้อมูลเพื่อคำนวณหาค่าหน่วยน้ำหนัก และควรทำการทดลองซ้ำเรื่อย ๆ โดยการเพิ่มระยะเวลาให้มากขึ้น

7.1.4 หลังจากที่ได้ข้อมูลหน่วยน้ำหนักแห้งและระยะเวลาในการบดอัดด้วยเครื่องกระแทกแล้ว จึงนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับระยะเวลา ดังแสดงในภาพ 21



ภาพ 21 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับระยะเวลาจากเครื่องกระแทก

7.1.5 เทียบค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด จากข้อที่ 1 ลงไปในเส้นกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งกับระยะเวลาที่ได้จากข้อ 4 จะทำให้ได้รู้ถึงระยะเวลาในการบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่องกระแทก

## 8. การทดสอบกำลังรับแรงอัดเดี่ยว

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวเป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดโดยที่ไม่มีแรงดันด้านข้างเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยงานวิจัยนี้อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2166 โดยในภาพ 22 แสดงเครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ทดสอบจะเป็นดินตะกอนกัวนพะเยาที่ในขนาดที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 4 โดยตัวอย่างทดสอบจะทำการขึ้นรูปด้วยการใช้ข้อมูลจากค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการบดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ก่อนตัวอย่างหลังจากที่ทำการขึ้นรูปแล้วจะทำการบ่มต่อที่ระยะเวลา 7, 14, 28, 60, 90 และ 120 วัน เมื่อครบกำหนดการบ่มตัวอย่างแล้วตัวอย่างจะถูกนำไปแช่น้ำ

เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพ 23 ก่อนนำไปทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ขณะทำการกดตัวอย่างในขั้นตอนนี้จะทดสอบด้วยอัตราความเร็วในการกดอยู่ที่ 1.0 mm/min (1% Strain) โดยโปรแกรมการทดสอบจะเป็นไปตามอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยดังแสดงในตาราง 14 ส่วนการเตรียมตัวอย่างทดสอบถูกเตรียมขึ้นด้วยการใช้โมลพีวีซี (PVC mole)



ภาพ 22 เครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว



ภาพ 23 การแช่น้ำ 4 ชั่วโมงสำหรับตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

**8.1 การประดิษฐ์โมล PVC และค้อนบดอัดสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว** ในส่วนของตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวจากขนาดตัวอย่างทดสอบเดิมจะใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่เท่ากับโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งในการทดลองต้องมีการเตรียมตัวอย่างในปริมาณมากและค่อนข้างใช้ทรัพยากรสำหรับทดสอบที่เยอะ ดังนั้นจึงได้ประดิษฐ์โมลสำหรับทำการทดสอบด้วยการใช้ท่อ PVC ขนาด 2 in ทำเป็นโมล

เตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยการผ่าครึ่งตามแนวยาวของท่อ และกำหนดความสูงของโมล PVC นี้ ให้มีอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเทียบกับความสูงเท่ากับ 1 ต่อ 2 ที่แสดงดังในภาพ 24



ภาพ 24 โมล PVC ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่



ภาพ 25 ค้อนบดอัดที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่

เนื่องจากการประดิษฐ์โมล PVC ขึ้นมาใหม่ทำให้การบดอัดไม่สามารถใช้ค้อนบดอัดทดสอบแบบเดิมได้ ดังนั้นจึงได้ทำการประดิษฐ์ค้อนบดอัดที่มีขนาดเล็กกลงเพื่อให้สามารถนำมาใช้บดอัดให้เข้ากับโมล PVC ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้ โดยในภาพ 25 จะแสดงถึงค้อนบดอัดขนาดใหม่ที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งค้อนบดอัดใหม่นี้จะมีน้ำหนักค้อนรวมกันยกเท่ากับ 1.619 kg และระยะยกเท่ากับ 35.5 cm

**8.2 การออกแบบพลังงานการบดอัด** จากจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด แกนเดียวและการทดสอบความคงทน ซึ่งโดยเฉพาะการทดสอบดังกล่าว ที่ต้องใช้ตัวอย่างใน ขนาดที่แตกต่างกับตัวอย่างจากทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน นี้เหตุผลนี้เองทำให้ต้องมีการควบคุมหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างเพื่อให้ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนั้น มีหน่วยน้ำหนักที่ เท่ากันกับดินที่บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งวิธีการควบคุมหน่วยน้ำหนักจะทำได้โดยวิธีการ เทียบพลังงานในการบดอัด โดยมีวิธีการคำนวณเทียบพลังงานในการบดอัดจากสมการ 3.1 ดังนี้

$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V} \quad (3.1)$$

เมื่อ	$E$	คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด
	$B$	คือ จำนวนครั้งที่ใช้ในการบดอัดในแต่ละชั้น
	$L$	คือ จำนวนชั้นที่ใช้ในการบดอัด
	$W$	คือ น้ำหนักของค้อนบดอัด (รวมก้านยกด้วย)
	$H$	คือ ความสูงของระยะยกของค้อนบดอัด
	$V$	คือ ปริมาตรของโมล

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาพลังงานบดอัดจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 15.2 cm

ขนาดความสูงของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ 17.7 cm

จะได้ปริมาตรของโมลบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่ากับ  $3211.814 \text{ cm}^3$

น้ำหนักของค้อนเท่ากับ 4.39 kg

ระยะยกของค้อนบดอัดเท่ากับ 43 cm

จำนวนชั้นบดอัด 5 ชั้น

จำนวนครั้งในการบดอัดแต่ละชั้น 56 ครั้ง

จากสมการ 
$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$$

จะได้ 
$$E = \frac{56 \times 5 \times 4.39 \times 43}{3211.814} = 16.4566 \text{ cm} - \text{kg} / \text{cm}^3$$

ขั้นตอนที่ 2 ย้ายสมการเพื่อคำนวณหาจำนวนครั้งในการบดอัดในท่อ PVC

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโมลด์อัดแบบท่อ PVC เท่ากับ 5.21 cm

ขนาดความสูงของโมลด์อัดแบบท่อ PVC เท่ากับ 10.42 cm

จะได้ปริมาตรของโมลด์อัดแบบท่อ PVC เท่ากับ  $222.1432 \text{ cm}^3$

น้ำหนักของค้อนบดอัดแบบใหม่เท่ากับ 1.619 kg

ระยะยกของค้อนแบบใหม่เท่ากับ 35.5 cm

จำนวนชั้นบดอัด 3 ชั้น

พลังงานจากการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน  $16.4566 \text{ cm}\cdot\text{kg}/\text{cm}^3$

จากสมการ 
$$E = \frac{B \times L \times W \times H}{V}$$

จะได้ 
$$16.4566 = \frac{B \times 3 \times 1.619 \times 35.5}{222.1432}$$

ดังนั้นจะทำการบดอัดชั้นละ

$$B = \frac{16.4566 \times 222.1432}{3 \times 1.619 \times 35.5} = 21.343 \approx 22 \text{ ครั้ง}$$

## 9. การทดสอบความคงทนด้วยวิธีแบบเปียกและแห้ง

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างดิน โดยวิธีแบบเปียกและแห้ง โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D559 ซึ่งจะเป็นการจำลองสภาพธรรมชาติของตัวอย่างที่อยู่ในสถานะต่าง ๆ เช่น แห้งหรือเปียก เป็นต้น โดยการทดสอบนั้นจะใช้ข้อมูลหน่วยน้ำหนักและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานมาทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบความคงทน วัสดุดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบนั้น กำหนดให้ดินมีขนาดผ่านตะแกรงขนาด 4.75 mm (เบอร์ 4) ซึ่งตัวอย่างทดสอบจะมีขนาดหน้าตัดประมาณ  $10.15 \pm 0.05 \text{ cm}$  (4 in) ตัวอย่างมีความสูงประมาณ  $12.15 \pm 0.05 \text{ cm}$  (4.58 in) และทำการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างด้วยการใช้สมการพลังงานในการบดอัดเหมือนที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเข้ามาช่วย เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบมีความหนาแน่นเทียบเท่ากับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ในการทดลองดินตัวอย่างจะถูกเตรียมเป็นจำนวน 2 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ 1 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างดิน และตัวอย่างที่ 2 เพื่อศึกษาร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างดินดังแผนการทดสอบความคงทน ซึ่งรายละเอียดจะแสดงอธิบายในแผนการทดสอบความคงทนด้วยวิธีแบบเปียกและแห้ง ดังแสดงในภาพ 27

สำหรับตัวอย่างที่ 2 ในขั้นตอนของการขัดตัวอย่างด้วยแปรงนั้น ตัวแปรงขัดจะใช้เป็นแปรงทองเหลืองตามมาตรฐาน ASTM D559 ซึ่งต้องมีกลุ่มขนแปรงจำนวน 50 กลุ่ม ประกอบด้วยด้านกว้าง 5 กลุ่ม และด้านยาว 10 กลุ่ม โดยด้ามแปรงต้องเป็นไม้เนื้อแข็งและจะต้องให้มีน้ำหนักรวมทั้งหมดประมาณ 3 lb หรือประมาณ 1.5 kg ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการตัดเศษเหล็กเหลือใช้มาประกอบกับแปรงโดยใช้กาวอีพ็อกซี่ (Epoxy) เป็นตัวยึดประสาน ดังแสดงในภาพ 26



ภาพ 26 แปรงขัดสำหรับการทดสอบความคงทน

สำหรับสมการที่ใช้สำหรับคำนวณการทดสอบความคงทนจะแสดงดังต่อไปนี้

$$A = \frac{B}{C + 100} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $A$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างดินที่ถูกต้อง (Corrected oven-dry weight)

$B$  คือ น้ำหนักของดินแห้ง เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบทั้ง 12 รอบวัฏจักร

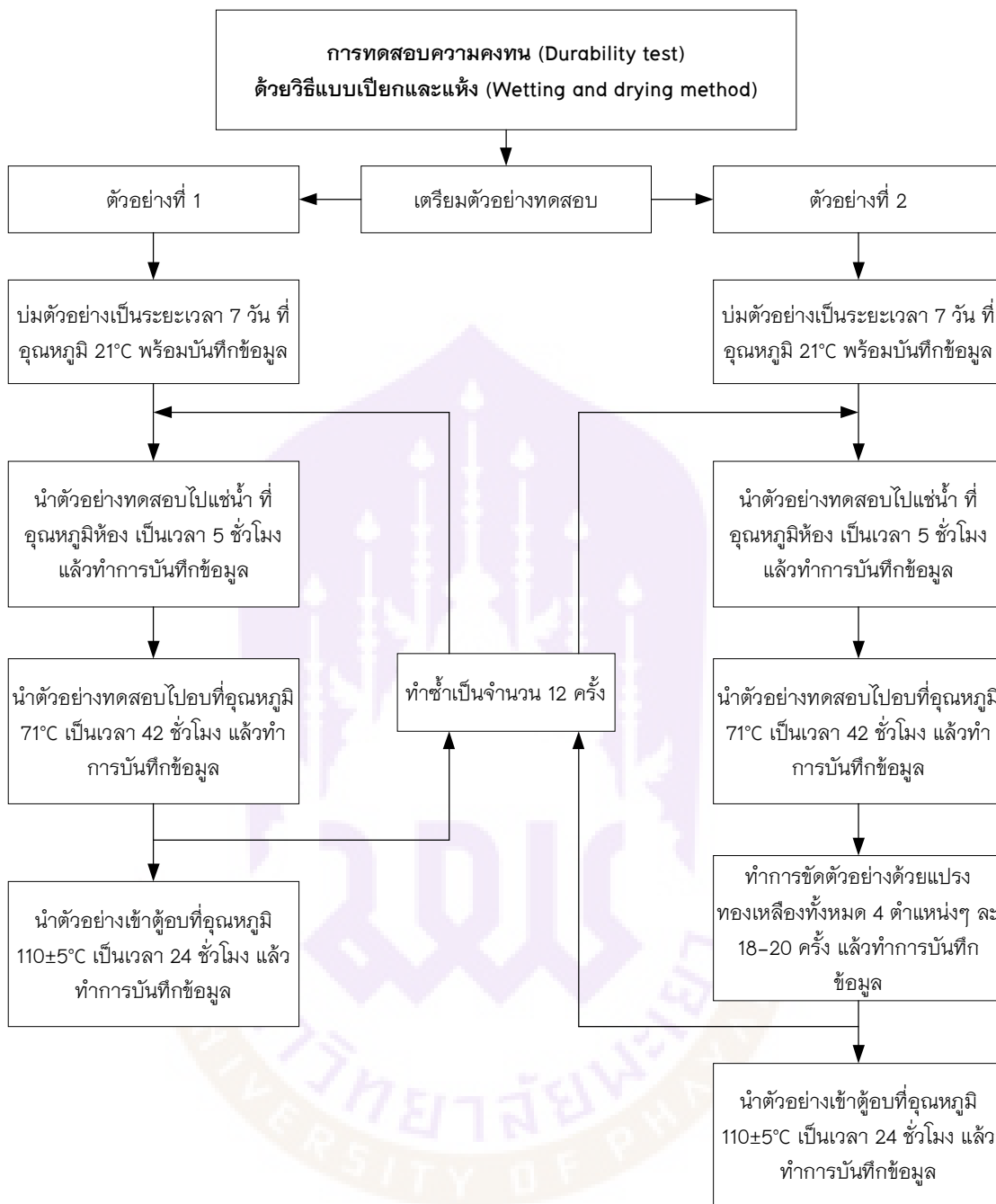
$C$  คือ ปริมาณความชื้นของดินตัวอย่าง

$$\text{Soil cement loss, \%} = \frac{D}{E} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $D$  คือ น้ำหนักของดินตัวอย่างหลังจากทำการทดสอบ

$E$  คือ น้ำหนักของดินตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ





ภาพ 27 แผนการทดสอบความคงทนด้วยวิธีแบบเปียกและแห้ง

### การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยพหุคูณ

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและความคงทนที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้จะมีการนำมาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักสถิติด้วยโปรแกรม Microsoft excel ดังแสดงในภาพ 28 เบื้องต้นจะทำการวิเคราะห์ผลที่ได้พื้นฐาน เช่น ความถูกต้องเชิงตัวเลขจากผลการทดลองต่าง ๆ โดยเลือกใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์ ปริมาณของเถ้าลอย อายุการบ่ม และหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight,  $\gamma_d$ ) เป็นตัวแปรอิสระสำหรับการสร้างแบบจำลอง เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ในการสร้างแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นสำหรับประมาณค่าตัวแปรตามได้ เพื่อสร้างแบบจำลอง 2 รูปแบบ ได้แก่

1. แบบจำลองค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength: UCS)
2. แบบจำลองค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Elastic modulus at 50% of maximum compressive strength:  $E^{50}$ )

ในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองซึ่งมีตัวแปรอิสระมากกว่า 2 ตัวทำให้ไม่สามารถใช้สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายในการวิเคราะห์ได้ แต่ในการวิเคราะห์นี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple regression analysis) โดยการวิเคราะห์แบบการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณจะมีรูปแบบสมการ 3.4

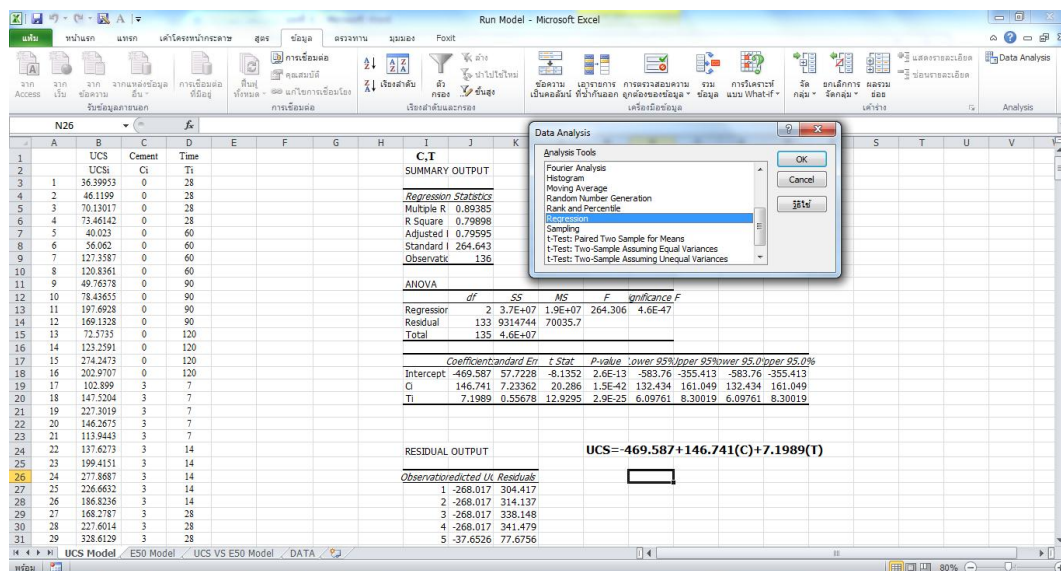
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \dots + \beta_i X_{ii}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

โดยที่  $Y$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรตาม

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

$X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, X_{ii}$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรอิสระใด ๆ

หลังจากที่ได้แบบจำลองแล้ว ตัวแบบจำลองจะถูกนำไปวิเคราะห์และตรวจสอบผลถึงความเป็นไปได้สำหรับการใช้งานของแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ แล้วสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองและผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อดูว่าความน่าจะเป็นสำหรับการนำไปใช้งานต่อไป



ภาพ 28 โปรแกรม Microsoft excel

ในวิธีการสร้างสมการถดถอยด้วยโปรแกรม Microsoft excel ก่อนอื่นต้องมีการสรุปข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด ได้แก่ ค่า UCS ค่า  $E^{50}$  และ ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ดังนั้นการสรุปข้อมูลที่ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลจากค่าเฉลี่ย และปรับแก้โดยเลือกใช้ค่าข้อมูลเพื่อความเหมาะสม สำหรับนำไปสร้างแบบจำลองที่ได้ความน่าเชื่อถือที่ดีที่สุด

สำหรับขั้นตอนการสร้างสมการถดถอยจากโปรแกรม Microsoft excel หลังจากที่ทำ การสรุปข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็สามารถทำการสร้างแบบจำลองโดยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กรอกข้อมูลลงในโปรแกรม Microsoft excel โดยแยกข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตามไว้ในแต่ละคอลัมน์ดังแสดงในภาพ 46 (ภาคผนวก ก)

2. เปิดใช้ฟังก์ชัน Data analysis ดังแสดงในภาพ 47 (ภาคผนวก ก)

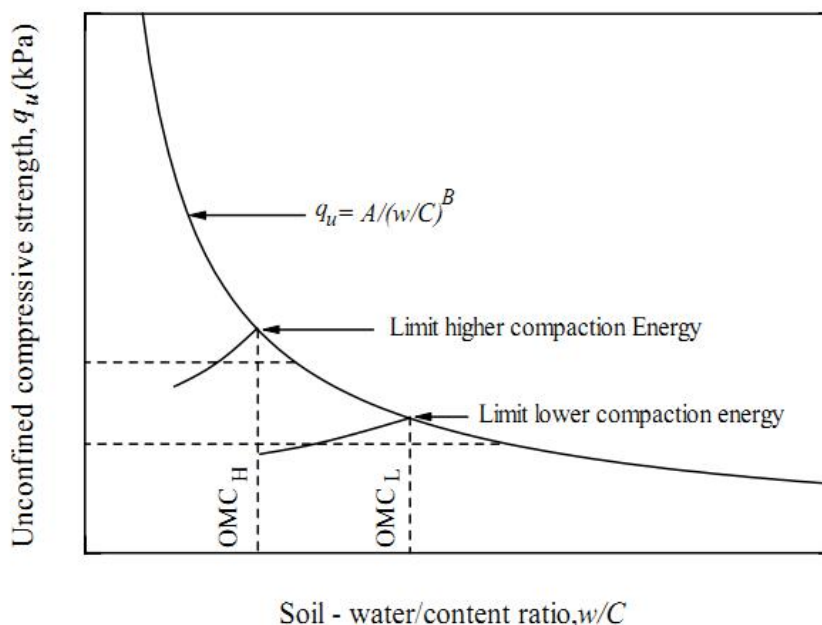
3. หลังจากที่เปิดใช้ฟังก์ชัน Data analysis จะปรากฏหน้าต่าง Data analysis ขึ้นมา และหลังจากนั้นจะทำการเลือกคดที่ Regression ดังแสดงในภาพ 48 (ภาคผนวก ก)

4. เมื่อคดที่ Regression แล้วหน้าต่าง Regression จะปรากฏขึ้น ในช่อง Input Y range จะเลือกเป็นตัวแปรต้น (ค่า UCS และค่า  $E^{50}$ ) ส่วนในช่อง Input X range จะเลือกเป็นตัวแปรตาม (ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย อายุการบ่ม และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด) เมื่อป้อนข้อมูลเสร็จไปทั้งตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นที่เรียบร้อยแล้วดังแสดงในภาพ 49 (ภาคผนวก ก) หลังจากนั้นก็ทำการคดที่ OK

5. หลังจากที่เกิดคำสั่ง OK แล้วผลการวิเคราะห์จะแสดงออกมาในหัวข้อที่ชื่อว่า Summary output ดังแสดงในภาพ 50 (ภาคผนวก ก)

### การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการใช้ตัวแปรควบคุม

จากแนวคิดของ วรรัชย์ เกษกัน (2548) ที่ว่ากำลังรับแรงอัดจะแปรผันเป็นปฏิภาคกลับกับอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และได้เสนอความสัมพันธ์ในรูปแบบของฟังก์ชันกำลัง (Power function) ดังสมการที่ 2.6 โดยพารามิเตอร์ A เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและอายุปุม ส่วนพารามิเตอร์ B เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ปริมาณซีเมนต์และปริมาณความชื้นเป็นตัวแปรที่อยู่ในสมการสำหรับพลังงาน โดยเป็นตัวแปรที่แฝงอยู่ในสมการคือ พลังงานจะทำให้สามารถบดอัดดินซีเมนต์ที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ต่ำได้ ดังนั้นจึงจะสร้างความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันกับดินเม็ดละเอียดแสดงในภาพ 29 เพื่อดูว่ากำลังอัดของดินเม็ดละเอียดนั้นเป็นฟังก์ชันกำลังหรือไม่



ภาพ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์กับกำลังอัด

ที่มา: วรรัชย์ เกษกัน, 2548

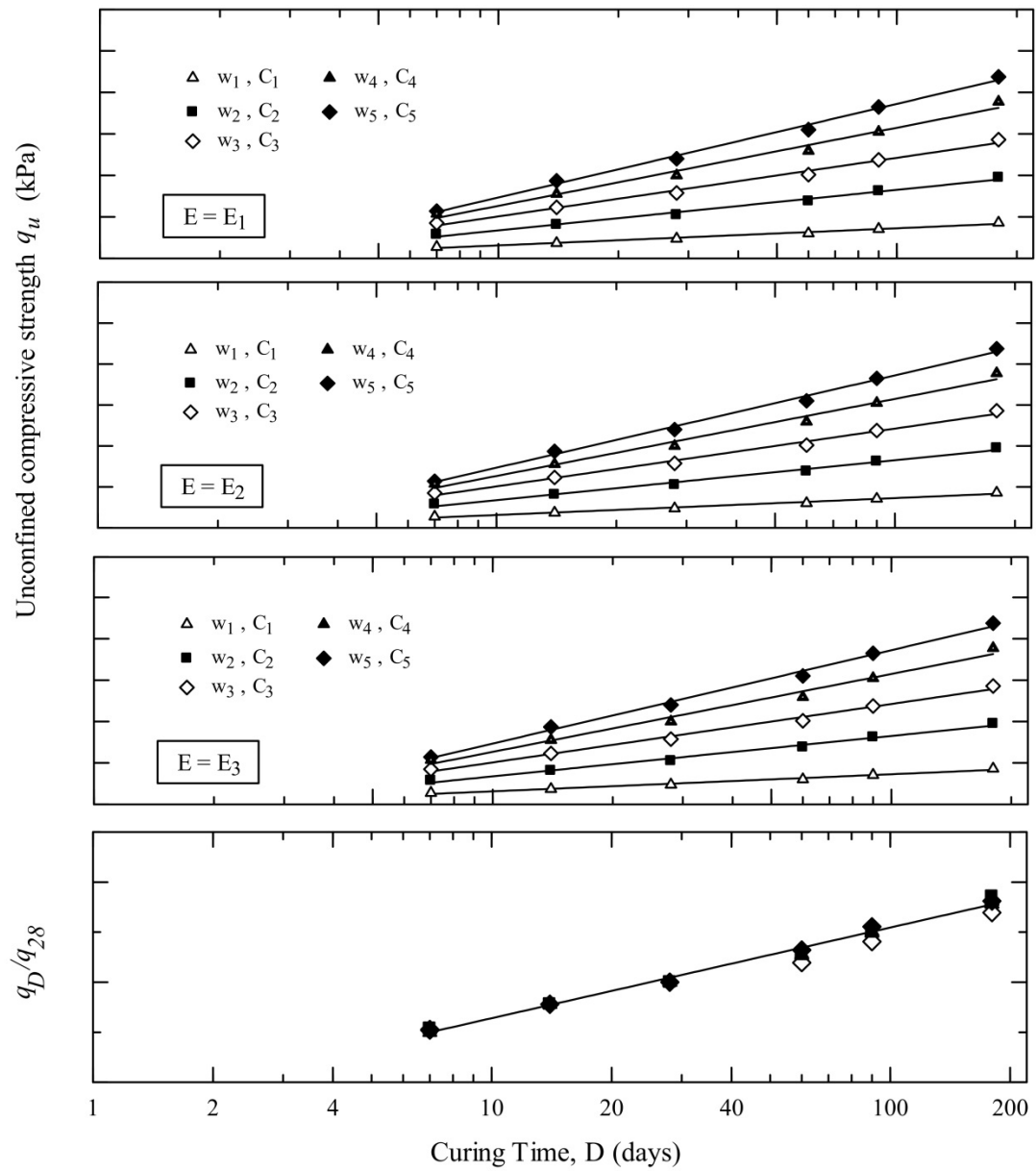
ส่วนในปีจจัยอายุบ่ม วรรณชัย เกษกัน (2548) พบว่ากราฟ Semi-log ระหว่างกำลังอัดสัมพันธ์กับอายุบ่มที่อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์และพลังงานต่าง ๆ เป็นกราฟเส้นตรง และเมื่อหาร (Pormalize) ด้วยกำลังอัดที่อายุบ่มอ้างอิงหนึ่ง (28 วัน) จะได้กราฟเส้นตรงเดียวกันสำหรับทุกอัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์เดียวกันและทุกพลังงาน ถ้าพบว่าสมการเป็นฟังก์ชันกำลังเช่นเดียวกับดินเม็ดหยาบ จะทำให้ได้ค่าของตัวแปรดังกล่าวจากกราฟทำให้ได้สมการทำนายกำลังเช่นเดียวกับดินเม็ดหยาบดังในสมการที่ 3.5

$$\frac{q_{(w/C)1,D}}{q_{(w/C)1,28}} = \left\{ \frac{q_{(w/C)2,D}}{q_{(w/C)3,28}} \right\} \left[ \frac{(w/c)_{2,D}}{(w/C)_{3,D}} \right]^B \quad (3.5)$$

แต่สมการนี้ยังไม่คำนึงถึงอิทธิพลของอายุบ่มจึงจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระยะบ่มกำลังอัดที่อัตราส่วนระหว่างความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และพลังงานการบดอัดต่าง ๆ เช่นเดียวกับดินเม็ดหยาบดังแสดงในภาพ 30 และจะหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ 3.6 ที่ใช้กับดินเม็ดละเอียด

ดังนั้นสำหรับดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด ถ้านำมาเขียนกราฟกำลังอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และสามารถกำหนดฟังก์ชันกำลังเข้ากับข้อมูลจากนั้นก็ทำการเขียนกราฟกำลังอัดสัมพันธ์กับอายุบ่มสำหรับแต่ละพลังงาน และเมื่อหารด้วยกำลังอัดที่ 28 วัน ถ้าสามารถกำหนดเส้นตรงเข้ากับข้อมูลได้ ก็จะสามารถสรุปได้ว่าการกำลังอัดสำหรับดินเม็ดละเอียดเป็นไปตามสมการที่ 3.6

$$\left\{ \frac{q_{(w/C)D}}{q_{(w/C)28}} \right\} = \left[ \frac{(w/c)_{28}}{(w/C)_D} \right]^B (E + F \ln D) \quad (3.6)$$



ภาพ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและอายุบ่ม

ที่มา: วรรัชย์ เกษกัน, 2548

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกัวนพะเยา

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกัวนพะเยาในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกัวนพะเยา โดยผู้วิจัยได้แบ่งประเภทของการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานออกเป็นสองประเภท ได้แก่ การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแบบทางวิศวกรรม และการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแบบพิเศษ

#### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแบบทางวิศวกรรม

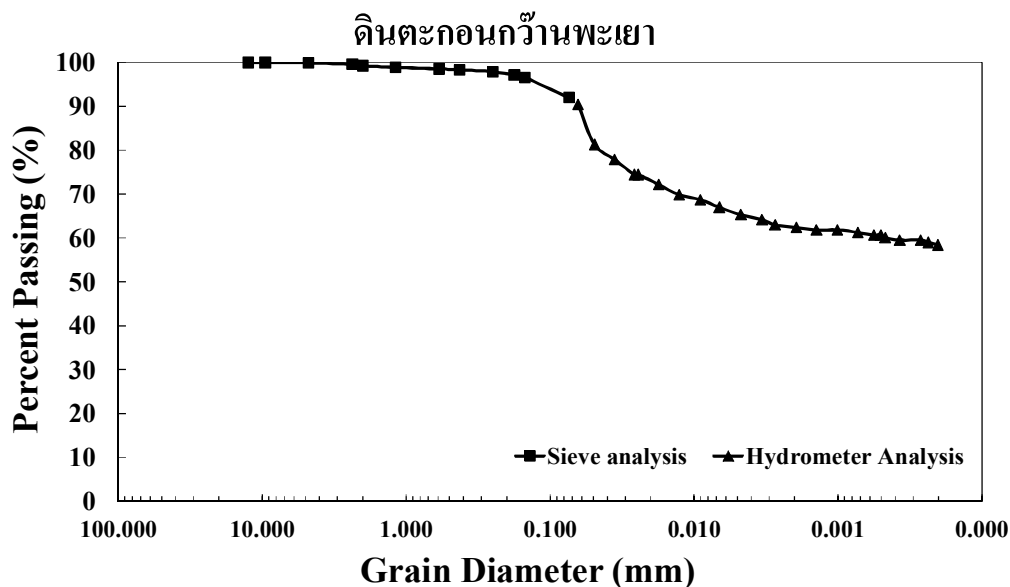
ในการทดสอบแบบพื้นฐานทางวิศวกรรม ได้มีการทดสอบหาขีดพิกต์อัดเตอร์เบิร์ก (Atterberg test) การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test) การทดสอบหาขนาดคละ (Grain size analysis) โดยในการทดสอบดังกล่าวสามารถทำให้ได้ข้อมูลเพื่อใช้จำแนกชนิดของดินตะกอนกัวนพะเยาตามหลักเกณฑ์ทางวิศวกรรมต่อไปได้ โดยผลการทดสอบจะแสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

การทดสอบหาขีดพิกต์อัดเตอร์เบิร์ก ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบกับตัวอย่างดินตะกอนกัวนพะเยา โดยขั้นต้นจะทำการแยกขนาดเล็กลงใช้ดินตะกอนขนาดที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 40 (0.425 mm) จากการทดสอบพบว่าค่าขีดพิกต์เหลว (Liquid limit, LL) มีค่าเท่ากับ 41.70 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) มีค่าเท่ากับ 23.40% และขีดพิกต์หดตัว (Shrinkage Limit, SL) มีค่าเท่ากับ 20.44% จากข้อมูลค่าพิกต์เหลวและค่าพิกต์พลาสติกที่ให้พบว่าดินตะกอนกัวนพะเยานั้นมีค่าดัชนีพลาสติกชิตตี้ (Plasticity index, PI) เท่ากับ 18.30%

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบกับดินตะกอนกัวนพะเยาที่ไม่ได้ทำการแยกขนาดโดยแต่อย่างใด ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของดินตะกอนกัวนพะเยานั้นมีความถูกต้องมากที่สุด โดยจากในการทดสอบพบว่าดินตะกอนกัวนพะเยามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72

การทดสอบหาขนาดคละ ในการทดสอบนี้ได้ทดสอบกับดินตะกอนกัวนพะเยา โดยเลือกทำการทดสอบทั้งวิธีร่อนผ่านตระแกรงแบบล้าง และวิธีตกตะกอนด้วยไฮโดรมิเตอร์ ซึ่งในการทดสอบทั้งสองวิธีพบว่าดินตะกอนกัวนพะเยามีขนาดที่เป็นเม็ดเล็กละเอียดมากพอสมควร จากการทดสอบด้วยการร่อนผ่านตระแกรงพบว่าดินตะกอนกัวนพะเยามีร้อยละการผ่านตระแกรง เบอร์ 4 (4.75 mm) เท่ากับ 99.94% ร้อยละการผ่านตระแกรง เบอร์ 10

(2 mm) เท่ากับ 99.26% ร้อยละการผ่านตระแกรงเบอร์ 40 (0.425 mm) เท่ากับ 98.37% และร้อยละการผ่านตระแกรงเบอร์ 200 (0.075 mm) เท่ากับ 92.00% ส่วนกราฟผลการทดสอบการหาขนาดคละด้วยทั้งวิธีร่อนผ่านตระแกรงแบบล้าง และวิธีตกตะกอนด้วยไฮโดรมิเตอร์ของดินตะกอนกัว้นพะเยาจะแสดงดังในภาพ 31



ภาพ 31 กราฟแสดงผลการทดสอบหาขนาดคละของดินตะกอนกัว้นพะเยา

ตาราง 15 ผลการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและการจำแนกชนิดดินตะกอนกัว้นพะเยาในทางวิศวกรรม

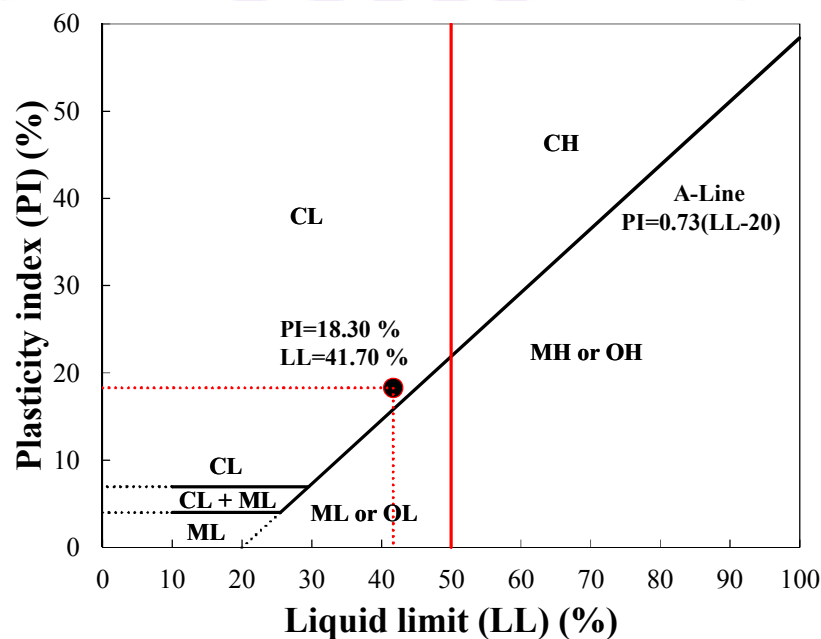
การทดสอบ	ผลการทดสอบ
	LL = 41.70%
การทดสอบหาหาคัดพิกต์แอดเตอร์เปิร์ก	PL = 23.40%
	SL = 20.44%
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	2.72
การทดสอบหาขนาดคละ	ผ่านตระแกรง เบอร์ 4 เท่ากับ 99.94 % ผ่านตระแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 92.00 %
การจำแนกตามเกณฑ์ของ AASHTO	A-7-6
การจำแนกตามเกณฑ์ของ USCS	CL



หลังจากที่ทำการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานแบบทางวิศวกรรมไปแล้วข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทำให้เราสามารถที่จะจำแนกชนิดของดินตะกอนกวี้นพะเยาด้วยวิธีทางวิศวกรรมได้ โดยเกณฑ์ที่ใช้ในจะอาศัยการจำแนกตามเกณฑ์ของ AASHTO (AASHTO soil classification system) และตามเกณฑ์ของ USCS (Unified soil classification system)

จากเกณฑ์การจำแนกแบบ AASHTO เนื่องด้วยดินตะกอนกวี้นพะเยานั้นที่มีร้อยละของขนาดที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 92% ซึ่งมิต่ำกว่า 35% ในเบื้องต้นดินจะถูกจัดในกลุ่มของวัสดุจำพวกตะกอน-ดินเหนียว (Silt-clay material) เมื่อทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมให้ลึกลงไปอีกครั้ง โดยอ้างอิงผลการทดสอบของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่มีค่าดัชนีพลาสติกซีดี เท่ากับ 18.30% ซึ่งในการจำแนกเชิงลึกจากข้อมูลที่ได้ในการทดสอบเบื้องต้นพบว่าดินตะกอนกวี้นพะเยาจัดอยู่ในกลุ่มของดินชนิด A-7-6 ทำให้บ่งบอกได้ว่าจัดเป็นดินประเภทตะกอนดินเหนียวตามเกณฑ์การจำแนกของ AASHTO ดังแสดงในตาราง 16

จากเกณฑ์การจำแนกแบบ USCS เนื่องจากผลการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ได้จากข้อมูลที่ได้ เช่น ชีตพิกัดเหลวเท่ากับ 41.70% ชีตจำกัดพลาสติกเท่ากับ 23.40% และค่าดัชนีพลาสติกซีดี เท่ากับ 18.30% เมื่อนำมาจำแนกตามเกณฑ์แบบ USCS พบว่า ค่าข้อมูลที่ได้บ่งบอกว่าดินตะกอนกวี้นพะเยาจัดเป็นดินประเภทดินพลาสติกซีดีต่ำ หรือ CL (Low plastic clay) ดังแสดงในภาพ 32



ภาพ 32 รูปเกณฑ์การจำแนกประเภทดินตะกอนกวี้นพะเยาตามเกณฑ์ของ USCS

ตาราง 16 ตารางการจำแนกดินตะกอนกัว้นพะเยาตามเกณฑ์ของ AASHTO

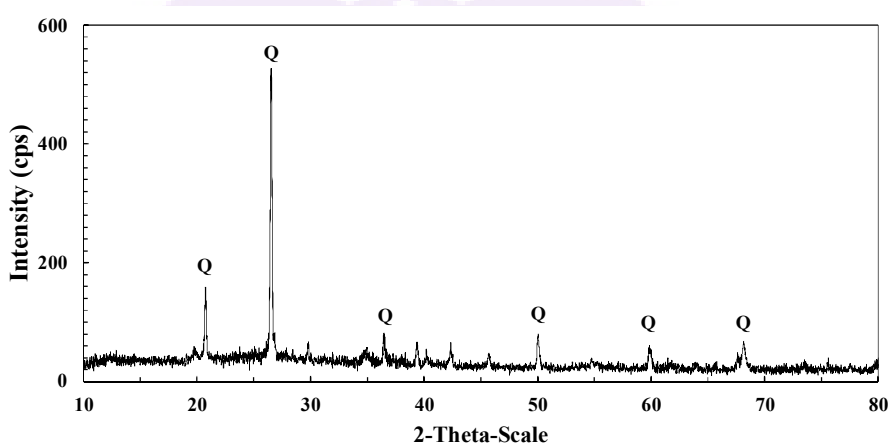
Major division	Group	AASHTO symbol	Typical name	Sieve analysis (Percent passing)	Atterberg limit
Granular material (35% or less passing No.200 sieve)	Group A-1	A-1-a	Stone or gravel fragment	Percent passing: No. 10 $\leq$ 50%	P.I. $\leq$ 6
				No. 40 $\leq$ 30%	
	Group A-1	A-1-b	Gravel and sand mixture	No. 40 $\leq$ 50%	P.I. $\leq$ 6
				No. 200 $\leq$ 25%	
	Group A-3	A-3	Fine sand that is nonplastic	No. 40 $>$ 50%	P.I. = 0 (nonplastic)
				No. 200 $\leq$ 10%	
	Group A-2	A-2-4	Silty gravel and sand	Percent passing No. 200 sieve $\leq$ 35%	L.L. $\leq$ 40 P.I. $\leq$ 10
				Percent passing No. 200 sieve $\leq$ 35%	L.L. $>$ 40 P.I. $\leq$ 10
		A-2-6	Clayey gravel and sand	Percent passing No. 200 sieve $\leq$ 35%	L.L. $\leq$ 40 P.I. $>$ 10
				Percent passing No. 200 sieve $\leq$ 35%	L.L. $>$ 40 P.I. $>$ 10
A-2-7		Clayey gravel and sand	Percent passing No. 200 sieve $\leq$ 35%	L.L. $>$ 40 P.I. $>$ 10	
Silt-clay material (More than 35% passing No.200 sieve)	Group A-4	A-4	Silty soil	Percent passing No. 200 sieve $>$ 35%	L.L. $\leq$ 40 P.I. $\leq$ 10
	Group A-5	A-5	Silty soil	Percent passing No. 200 sieve $>$ 35%	L.L. $>$ 40 P.I. $\leq$ 10
	Group A-6	A-6	Clayey soil	Percent passing No. 200 sieve $>$ 35%	L.L. $\leq$ 40 P.I. $>$ 10
				Percent passing No. 200 sieve $>$ 35%	L.L. $>$ 40 P.I. $\leq$ (L.L. - 30) P.I. $>$ 10
	Group A-7	A-7-6	Clayey soil	Percent passing No. 200 sieve $>$ 35%	L.L. $>$ 40 P.I. $>$ (L.L. - 30) P.I. $>$ 10
				Percent passing No. 200 sieve $>$ 35%	L.L. $>$ 40 P.I. $>$ 10
	Highly organic	Group A-8	A-8	Peat and other highly organic soil	Primarily organic matter, dark in cooler, and organic cooler

## 2. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานแบบพิเศษ

ในการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานแบบพิเศษงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับดินตะกอนกัว้นพะเยา โดยในการทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบทางเคมีเพื่อหาองค์ประกอบ

ทางเคมีและดูรูปลักษณะทางกายภาพของดินตะกอนกรวดน้ำพุเยา และดินตะกอนกรวดน้ำพุเยาที่ผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ซึ่งในการทดสอบดังกล่าวจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ในการทดสอบ X-ray diffractometer หรือ XRD ของโดยทำการทดสอบกับดินตะกอนกรวดน้ำพุเยาพบว่าในการทดสอบพบองค์ประกอบของแร่ควอตซ์ (Quartz) เป็นส่วนใหญ่ประกอบอยู่ ซึ่งพบได้ในปริมาณที่มากถึง 98.97 เปอร์เซ็นต์ และนอกจากนั้นยังพบแร่คาโอลิไนท์ (Kaolinite) กับ แร่อิลไลต์ (Illite) ที่เป็นส่วนประกอบรองลงมาในปริมาณ 0.93 และ 0.09 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 33 ที่แสดงกราฟผลการทดสอบ XRD และตาราง 17 ที่แสดงรายงานผลการทดสอบ XRD ของดินตะกอนกรวดน้ำพุเยา



ภาพ 33 กราฟผลการทดสอบ X-ray diffractometer

ตาราง 17 ผลการทดสอบ X-ray diffractometer ของดินตะกอนกรวดน้ำพุเยา

Left Angle	Right Angle	Net Height	Raw Area	Net Area	Minerals (%)
2-Theta°	2-Theta°	Cps	Cps x 2-Theta°	Cps x 2-Theta°	
26.19	27.01	735.00	133.90	125	Quartz 98.97
12.23	12.67	4.32	2.02	1.18	Kaolinite 0.93
8.77	9.01	1.67	0.59	0.12	Illite 0.09

ในการทดสอบ X-ray Fluorescence หรือ XRF โดยทำการทดสอบหาองค์ประกอบของธาตุของดินตะกอนกรวดน้ำพุเยา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าผลที่ได้สำหรับดินตะกอนกรวดน้ำพุเยามีองค์ประกอบ

ของธาตุซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO<sub>2</sub>) และแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) เป็นส่วนใหญ่ โดยพบได้ในปริมาณที่มากถึง 59.9 และ 28.5% ตามลำดับ

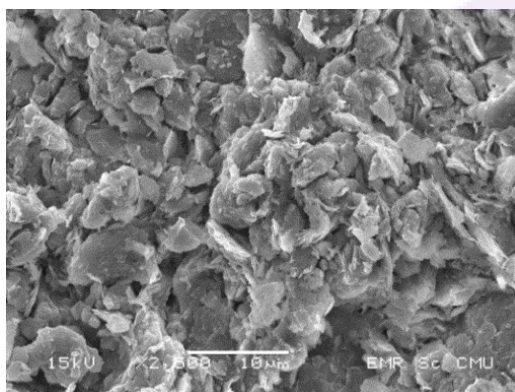
**ตาราง 18 องค์ประกอบธาตุของดินตะกอนกรวดบ้านพะเยา ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย**

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	ดินตะกอนกรวดบ้านพะเยา	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย
Aluminum Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.40	4.76	17.60
Calcium oxide (CaO)	28.49	65.41	23.24
Chromium Oxide (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.60	ไม่พบ	ไม่พบ
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.87	3.41	14.80
Manganese oxide (MnO)	0.16	1.25	2.12
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	ไม่พบ	0.24	1.50
Phosphorus pentoxide (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2.48	ไม่พบ	ไม่พบ
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	4.52	0.35	2.73
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	59.88	20.90	30.90
Strontium Oxide (SrO)	0.11	ไม่พบ	ไม่พบ
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	0.99	2.71	3.87
Zinc Oxide (ZrO)	0.09	ไม่พบ	ไม่พบ

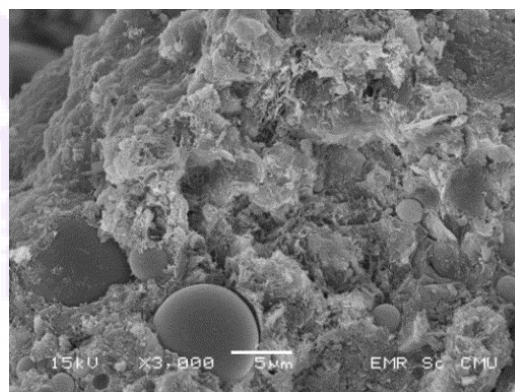
ส่วนผลการทดสอบ XRF ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะโดยอ้างอิงผลการทดสอบจาก Likitlersuang & Chompoorat (2016) ซึ่งพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีสารประกอบ CaO และ SiO<sub>2</sub> อยู่ในปริมาณ 65.41 และ 20.90% ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจากลำปาง ซึ่งตัวเถ้าลอยนี้เป็นผลพลอยได้จากการบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยจากการทดสอบพบว่า มีสารประกอบ SiO<sub>2</sub>, อลูมินัมออกไซด์ (Aluminum Oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และไอรอนออกไซด์ (Iron oxide, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ประกอบอยู่ในปริมาณ 30.90, 17.60 และ 14.80% ตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์จัดประเภทตามเกณฑ์การจำแนกของ ASTM C 618 พบว่าจัดอยู่ในประเภท Class C โดยอ้างอิงจากรายการ 8 ในบทที่ 2 และข้อมูลองค์ประกอบธาตุของดินตะกอนกรวดบ้านพะเยา ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยที่ได้จากการทดสอบ XRF จะแสดงในตาราง 18

ในการศึกษาคุณลักษณะโครงสร้างในระดับกำลังขยายที่สูงมาก ๆ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหรือ SEM นั้น พบว่า ดินตะกอนกรวดบ้านพะเยามีลักษณะแบบแผ่นที่รูปร่างแบบแผ่นที่ไม่แน่นอน เมื่อวิเคราะห์พิจารณาจากภาพ 34(d)

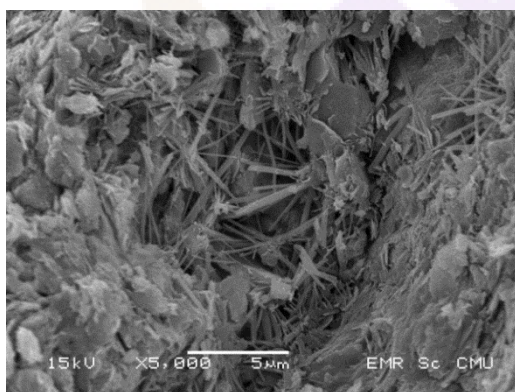
ที่กำลังขยาย 2500 เท่าพบว่ามิลักษณะคล้าย ๆ เป็นแบบแผ่นที่ไม่เสมอกันซ้อนทับกันอยู่ ส่วนภาพ 34(b) ซึ่งเป็นตัวอย่างดินตะกอนที่ผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยพบว่าที่กำลังขยาย 3000 เท่า มีการพบผลึกเอททริงไจต์ (Ettringite) ประกอบอยู่ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะแสดงในรูปถัดมา คือ ภาพ 34(c) ซึ่งจะเป็นรูปที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ทำให้สามารถมองเห็นผลึกได้อย่างชัดเจน ส่วนภาพ 34(d) เป็นรูปเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งจากลักษณะจะพบว่า มีรูปร่างที่เป็นทรงกลม



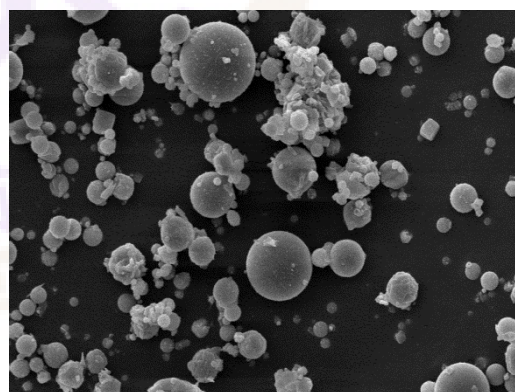
(a) ดินตะกอนกวีานพะเยาที่กำลังขยาย  
2,500 เท่า



(b) ดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสม  
ปูนซีเมนต์ 5 %และเถ้าลอย 10 %  
อายุการบ่ม 7 วัน ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



(c) ดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ 5 %  
และเถ้าลอย 10 % อายุการบ่ม 7 วัน ที่กำลังขยาย  
5,000 เท่า



(d) เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ  
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

ภาพ 34 ภาพถ่ายจากการทดสอบด้วยการทดสอบ SEM

ในการทดสอบหาปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนักที่อยู่ในดินตะกอนกวีานพะเยาด้วยวิธีการทดสอบ AOAC 2005 (Inductively coupled plasma–optical emission spectrometry, ICP–OES) โดยทำการเลือกทดสอบหาโลหะหนักที่มีความอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิต จำนวนทั้งหมด 4 ชนิดได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม สารหนู และปรอท ซึ่งผลการทดสอบหาสารปนเปื้อนพบว่าโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียม ปนเปื้อนอยู่ประมาณ 20.00 และ 3.49 mg/kg ส่วนโลหะหนักอย่างสารหนูและปรอทนั้นไม่พบในการตรวจสอบ ดังแสดงข้อมูลในตาราง 19 จากผลการทดสอบโลหะหนักที่ได้มานั้น เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพดินตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 พบว่า ดินตะกอนกวีานพะเยามีค่าการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม สารหนู และปรอท อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด จึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

ตาราง 19 ข้อมูลปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนกวีานพะเยาเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน

ชนิดของโลหะหนัก	ปริมาณปนเปื้อน (mg/kg)	ค่ามาตรฐานที่กำหนด (mg/kg)
ตะกั่ว (Lead)	20.0	750
แคดเมียม (Cadmium)	3.49	810
สารหนู (Arsenic)	ไม่พบ	27
ปรอท (Mercury)	ไม่พบ	610

#### ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

สำหรับผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จากทั้งหมด 25 ส่วนผสมของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย พบว่ามีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight,  $\gamma_{d\max}$ ) อยู่ระหว่าง 15.16–16.62 kN/m<sup>3</sup> และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, *OMC*) นั้นมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 20.63 – 28.66% โดยหลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น จะพบว่า ปริมาณของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยที่ผสมเข้าไปกับดินตะกอนกวีานพะเยานั้นล้วนส่งผลต่อค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินตะกอน

เมื่อวิเคราะห์สัดส่วนดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว ที่ปริมาณเถ้าลอยเท่ากับ 0 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนักดินแห้ง ดังแสดงในภาพ 35(a) พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด จะมีค่าอยู่ประมาณ 15.58–16.62 kN/m<sup>3</sup> ส่วนค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมนั้น มีค่าอยู่ที่ประมาณ 19.04–22.41% โดยตัวอย่างดินตะกอนกวีานพะเยาที่ไม่ผสม

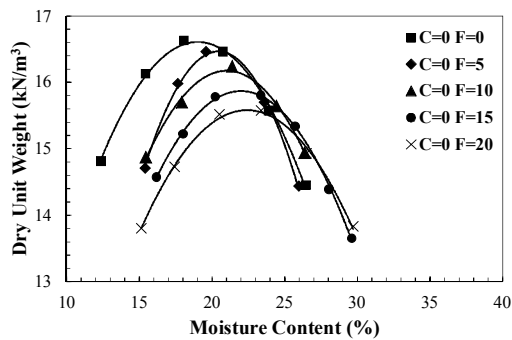
ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเลย (ปูนซีเมนต์ 0 เปอร์เซ็นต์ เถ้าลอย 0 เปอร์เซ็นต์) จะพบว่ามีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งที่สูงที่สุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ต่ำที่สุด และเมื่อไרותก็ตามที่ดินตะกอนกวี้นพะเยามีการใส่เถ้าลอยเพิ่มเข้าไป ก็จะส่งผลให้มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดลดลงและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น ยิ่งมีปริมาณของสารผสมเพิ่มอย่างเถ้าลอยที่ใส่เข้าไปเยอะขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดก็จะลดลงและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมก็จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยที่ใส่เข้าไป

ส่วนในตัวอย่างดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพ 35(f) จากผลการทดสอบพบว่าสัดส่วนดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ไม่ผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยหรือดินตะกอนกวี้นพะเยาเพียงอย่างเดียวจะมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าน้อยที่สุด เมื่อไרותที่ตัวอย่างดินตะกอนกวี้นพะเยามีการใส่สารผสมเพิ่มอย่างปูนซีเมนต์เข้าไปค่าหน่วยน้ำหนักแห้งก็จะมีค่าที่ลดลงและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมก็จะเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับตัวอย่างดินตะกอนที่ผสมกับเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

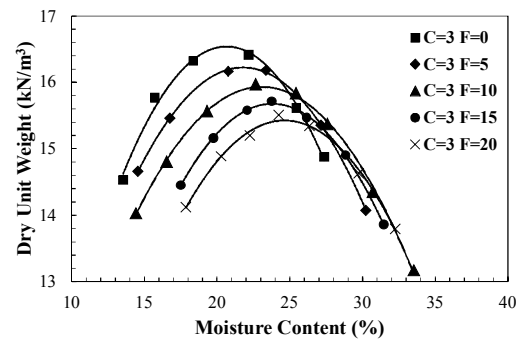
จากตัวอย่างที่กลุ่มสัดส่วนดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ผสมด้วยเถ้าลอยกับกลุ่มสัดส่วนดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์นั้น พบว่าทั้งการใส่สารผสมเพิ่มทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าลอยต่างส่งผลต่อค่าหน่วยน้ำหนักและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม โดยผลลัพธ์ต่างเป็นไปในทางเดียวกันคือ ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งจะลดลงและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของสารผสมเพิ่มที่ใส่เข้าไป ดังนั้นจากสัดส่วนดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ที่ 3 5 7 และ 10% ดังในภาพ 35(b) 35(c) 35(d) และ 35(e) ซึ่งในแต่ละปริมาณปูนซีเมนต์ดังกล่าวที่มีการผสมเถ้าลอยเข้าไปพบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนของเส้นกราฟการบดอัดเช่นเดียวกับดินตะกอนที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ และดินตะกอนที่ผสมด้วยเถ้าลอยทั้งหมดทุกตัวอย่าง เช่น เส้นกราฟการบดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์ 5% ดังในภาพ 35(c) พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่ใส่เพิ่มเข้าไปมากขึ้นก็จะพบว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งลดลงเช่นกัน และค่าปริมาณน้ำก็เพิ่มมากขึ้น

เมื่อไרותก็ตามที่มีการเติมปูนซีเมนต์และ/หรือเถ้าลอยเข้าไปมากขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าน้อยลง และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมก็จะเพิ่มขึ้นตามไป ด้วย ดังแสดงในภาพ 35 และในตาราง 23 (ภาคผนวก ข) ที่แสดงข้อมูลผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้น ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานกับดินตะกอนกวี้นพะเยาที่มีการใส่ปูนซีเมนต์และ/หรือเถ้าลอยเข้าไป จะทำให้เส้นกราฟการบดอัดของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์และ/หรือเถ้าลอยเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใส่เข้าไป โดยจะทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งลดลงและปริมาณน้ำที่เหมาะสมก็เพิ่มขึ้น

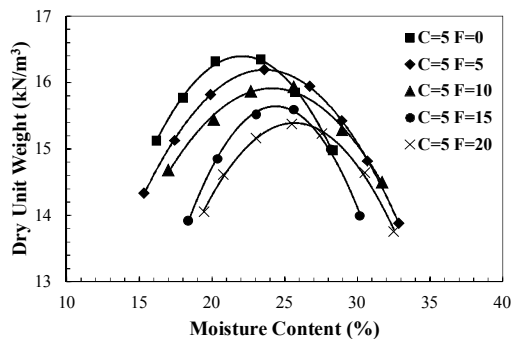
เนื่องจากตัวอย่างในแต่ละสัดส่วนมีการดูดซึมน้ำและอุ้มน้ำที่มากขึ้น ประกอบกับค่าหน่วยน้ำหนักของน้ำที่มีค่าต่ำกว่าค่าหน่วยน้ำหนักของดิน จึงเป็นเหตุผลที่มาของการลดลงของค่าหน่วยน้ำหนักในแต่ละสัดส่วนนั่นเอง



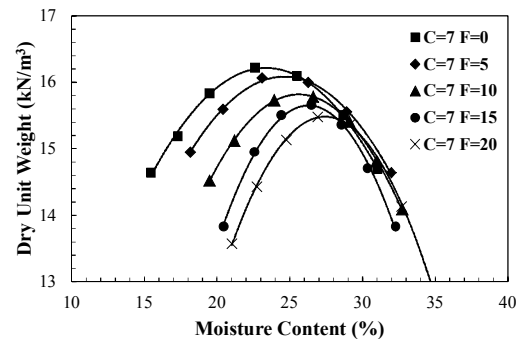
(a) ปูนซีเมนต์ 0%



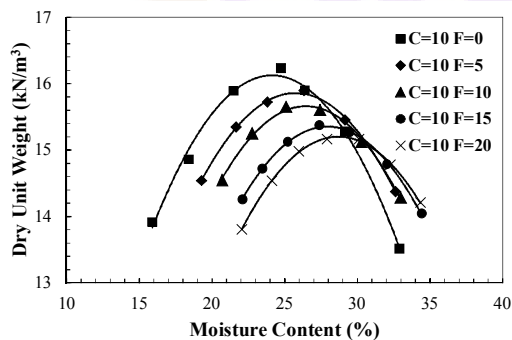
(b) ปูนซีเมนต์ 3%



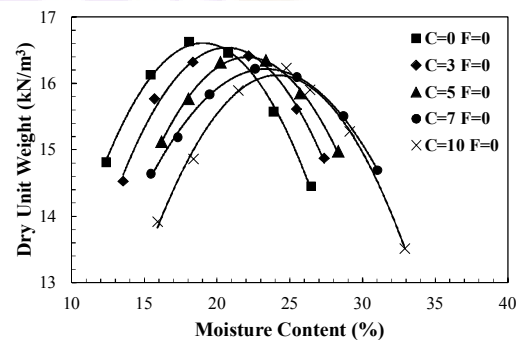
(c) ปูนซีเมนต์ 5%



(d) ปูนซีเมนต์ 7%



(e) ปูนซีเมนต์ 10%



(f) ปูนซีเมนต์ในแต่ละสัดส่วน

ภาพ 35 กราฟการบดอัดของดินตะกอนกัวนพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย



### ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

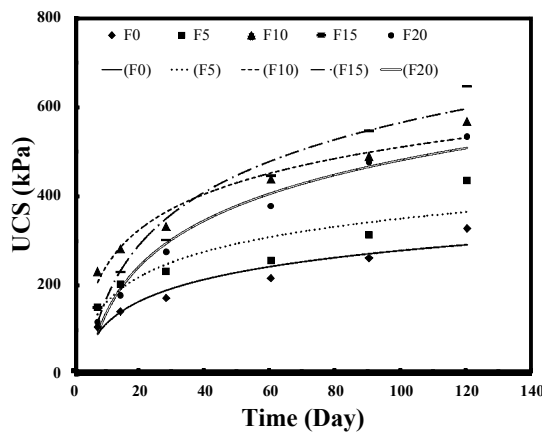
ในการทดสอบหาค่ากำลังรับแกนเดียวของดินตะกอนที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยนั้นพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, *UCS*) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใส่เข้าไป แต่การใส่เถ้าลอยผสมเข้าไปพบว่า เมื่อมีการเติมปริมาณเถ้าลอยเข้าไปก็จะส่งผลให้ค่า *UCS* เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกับปูนซีเมนต์ แต่ว่าการใส่เถ้าลอยเข้าไปผสมในปริมาณที่มากเกินไปก็จะส่งผลเชิงลบทำให้ค่า *UCS* มีค่าลดลงได้เช่นกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมนั้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 10-15% เนื่องจากในปริมาณของเถ้าลอยที่ 10% จะให้ค่า *UCS* ที่อายุก่อน 28 วัน จะมีค่าที่สูงที่สุด และปริมาณเถ้าลอยที่ 15% ก็จะให้ค่า *UCS* ที่สูงที่สุดหลังจากอายุการบ่ม 28 วันขึ้นไป

ส่วนปัจจัยของอายุการบ่มตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์นั้นจะมีอัตราการการพัฒนาเพิ่มขึ้นของค่า *UCS* ที่อายุก่อน 28 วัน อย่างรวดเร็วมากกว่าที่อายุหลังจาก 28 วันไปแล้ว ซึ่งจะพบว่าที่อายุหลังจาก 28 วันอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า *UCS* จะค่อย ๆ น้อยลง แต่ตัวอย่างดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยพบว่าในช่วงอายุก่อน 28 วัน พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของค่า *UCS* จะคล้ายกับตัวอย่างดินตะกอนที่ผสมกับปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว แต่ที่อายุหลังจาก 28 วันไปแล้วจะพบว่ามีการพัฒนาของค่า *UCS* อย่างต่อเนื่องเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolan reaction) ที่เกิดจากเถ้าลอย ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างดินตะกอนนั้นมีค่า *UCS* ที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพ 32 ที่แสดงผลค่า *UCS* ของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในอายุการบ่มต่าง ๆ

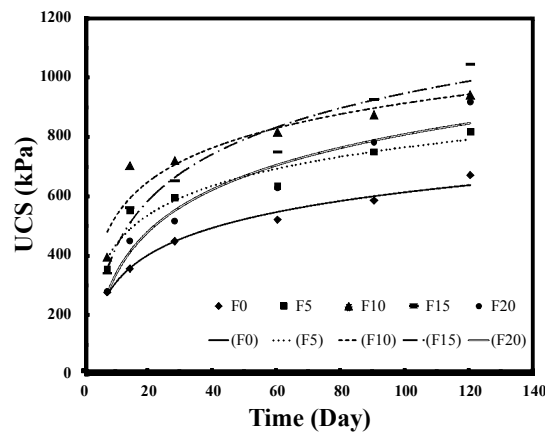
จากภาพ 36(a) เป็นผลการทดสอบค่า *UCS* ของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ 3% โดยผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่าง C3F0 และ C3F5 ในช่วงอายุการบ่มตั้งแต่ 7-120 วัน ค่า *UCS* มีการพัฒนาที่น้อย แต่ตัวอย่าง C3F10 C3F15 และ C3F20 ในช่วงอายุการบ่มตั้งแต่ 7-120 วัน นั้นมีการพัฒนาของค่า *UCS* มากกว่าตัวอย่าง C3F0 และ C3F5 และในช่วงอายุการบ่มก่อน 28 วันจะพบว่า ค่า *UCS* ที่สูงที่สุดในชุด C3 คือ C3F10 แต่ในช่วงหลังอายุการบ่มที่ 28 วันเป็นต้นไปตัวอย่าง C3F15 จะพัฒนาค่า *UCS* ได้มากกว่าทำให้ตัวอย่าง C3F15 มีค่า *UCS* สูงกว่าตัวอย่าง C3F10

จากภาพ 36(b) เป็นผลการทดสอบค่า *UCS* ของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ 5% จากผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่าง C5F0 และ C5F5 ในช่วงอายุการบ่มตั้งแต่ 7-120 วัน ค่า *UCS* มีการพัฒนาที่น้อย แต่รูปแบบของการพัฒนาของค่า *UCS* ก็ยังรูปแบบการพัฒนาที่มีมากกว่าตัวอย่าง C3F0 และ C3F5 ส่วนตัวอย่าง C5F10 C5F15 และ C5F20 ในช่วงอายุการบ่มตั้งแต่ 7-120 วัน นั้นมีการพัฒนาของค่า *UCS* จะมากกว่าตัวอย่าง C5F0

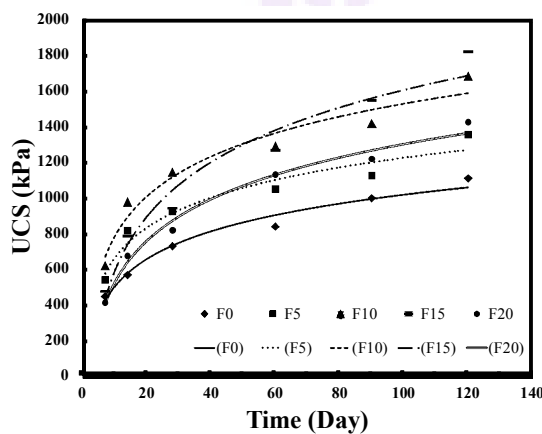
และ C5F5 และในช่วงอายุการบ่มก่อน 28 วันจะพบว่า ค่า  $UCS$  ที่สูงที่สุดในชุด C5 คือ C5F10 แต่ในช่วงหลังอายุการบ่มที่ 28 วันเป็นต้นไปตัวอย่าง C5F15 จะพัฒนาค่า  $UCS$  ได้มากกว่า ทำให้ตัวอย่าง C5F15 มีค่า  $UCS$  สูงกว่าตัวอย่าง C5F10



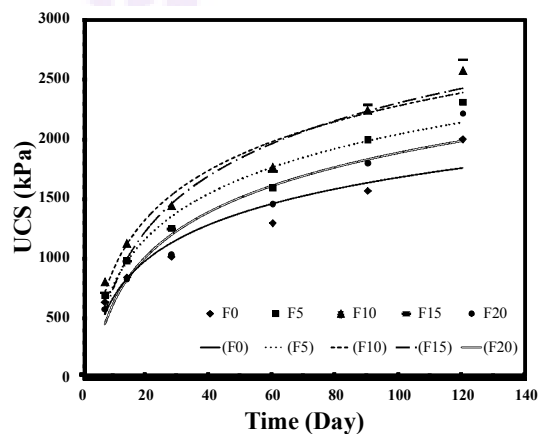
(a) ปูนซีเมนต์ 3%



(b) ปูนซีเมนต์ 5%



(c) ปูนซีเมนต์ 7%



(d) ปูนซีเมนต์ 10%

ภาพ 36 ค่า  $UCS$  ของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

จากภาพ 36(c) เป็นผลการทดสอบค่า  $UCS$  ของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ 7% จากผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่าง C7F0 และ C7F5 ในช่วงอายุการบ่มตั้งแต่ 7-120 วัน ค่า  $UCS$  มีการพัฒนาดีขึ้นเนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่มีความเหมาะสมกว่า ตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ 3 และ 5% ส่วนตัวอย่าง C7F10 C7F15 และ C7F20 ในช่วงอายุการ

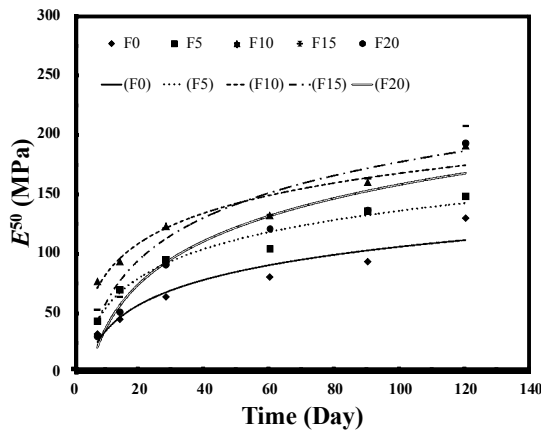
บ่มตั้งแต่ 7-120 วัน นั้นการพัฒนาของค่า *UCS* ก็ยังมีค่ามากกว่าตัวอย่าง C7F0 และ C7F5 อยู่ดี ส่วนในช่วงอายุการบ่มก่อน 28 วันจะพบว่า ค่า *UCS* ที่สูงที่สุดในชุด C7 คือ C7F10 แต่ในช่วงหลังอายุการบ่มที่ 28 วันเป็นต้นไป ตัวอย่าง C7F15 จะพัฒนาค่า *UCS* ได้มากกว่า ทำให้ตัวอย่าง C7F15 มีค่า *UCS* สูงกว่าตัวอย่าง C7F10

จากภาพ 36(d) เป็นผลการทดสอบค่า *UCS* ของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ 10% จากผลการทดสอบพบว่า ที่ผสมเท่าทั้งหมดในทุกปริมาณการทดสอบ ในช่วงอายุการบ่มตั้งแต่ 7-120 วัน ค่า *UCS* มีรูปแบบการเพิ่มขึ้นไปในแนวทางเดียวกันทั้งหมด ทำให้เส้นแนวโน้มของค่ากำลังไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ผสมเข้าไป มีปริมาณที่มากที่สุดในการวิจัย และทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เกิดขึ้นได้ดีกว่าตัวอย่างดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณอื่น ๆ ส่วนตัวอย่าง C10F10 C10F15 และ C10F20 ในช่วงอายุการบ่มตั้งแต่ 7-120 วัน ก็ยังคงมีการพัฒนาค่า *UCS* ได้ดีกว่าตัวอย่าง C10F0 และ C10F5 อยู่ดี ส่วนในช่วงอายุการบ่มก่อน 28 วันจะพบว่า ค่า *UCS* ที่สูงที่สุดในชุด C10 คือ C10F10 แต่ในช่วงหลังอายุการบ่มที่ 28 วันเป็นต้นไปตัวอย่าง C10F15 จะพัฒนาค่า *UCS* ได้มากกว่าทำให้ตัวอย่าง C10F15 มีค่า *UCS* สูงกว่าตัวอย่าง C10F10 เหมือนกับตัวอย่างดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณอื่น ๆ เช่นกัน

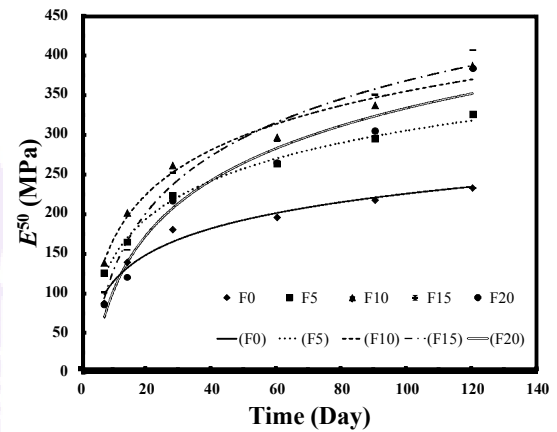
ดังนั้น สาเหตุของการเพิ่มขึ้นของค่า *UCS* จะพบว่าในส่วนของการผสมปูนซีเมนต์เข้าไปนั้นส่งผลให้เกิดเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้เองที่เป็นตัวทำให้ดินตะกอนกวีานพะเยามีค่า *UCS* ที่สูงขึ้น มีความเสถียรภาพมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลทำให้ได้สารประกอบตัวใหม่เกิดขึ้นมาอย่างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, CSH) กับแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (Calcium aluminate hydrate, CAH) ซึ่งจะอยู่ในรูปของผลึก และคุณสมบัติหลักก็คือให้ความแข็งแรงนั่นเอง จึงทำให้ตัวอย่างดินตะกอนกวีานพะเยามีค่า *UCS* ที่สูงขึ้นตามไปด้วย แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดขึ้นได้ดีคือในช่วงระยะเวลาที่อายุการบ่มก่อน 28 วัน ซึ่งเมื่อสังเกตดูจากภาพ 36 ก็พบว่ามีความสอดคล้องตรงกันกับการเพิ่มขึ้นของค่า *UCS* ในช่วงอายุการบ่มก่อน 28 วัน

ในการนำถ้ำลอยมาทำการผสมกับดินตะกอนกวีานพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ แล้วนั้นพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า *UCS* ด้วยเช่นกัน และก็ยังส่งผลให้มีความเสถียรภาพตามไปด้วย เนื่องจากปัจจัยการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดก็มาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากถ้ำลอยที่มีองค์ประกอบหลักอย่างซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) ที่สูง ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide,  $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่หลงเหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แล้วไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบอย่างซิลิกาและอลูมินา

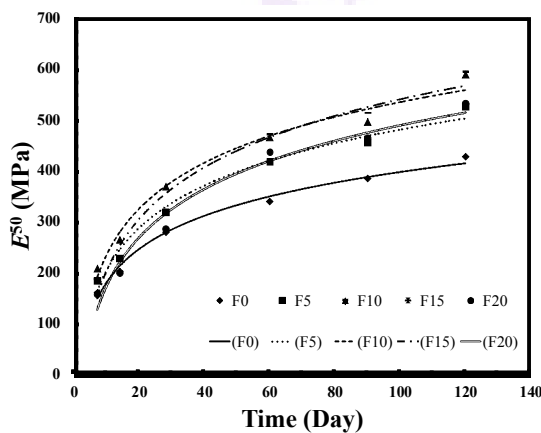
ที่อยู่ในถ้ำลอยซึ่งจะทำให้ได้สารประกอบใหม่ที่คล้ายกับสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และยังให้ความแข็งแรงเช่นเดียวกันด้วย โดยทั่วไปปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และจะเริ่มสังเกตเห็นได้หลังจากที่อายุการบ่มตั้งแต่หลัง 28 วัน เป็นต้นไป



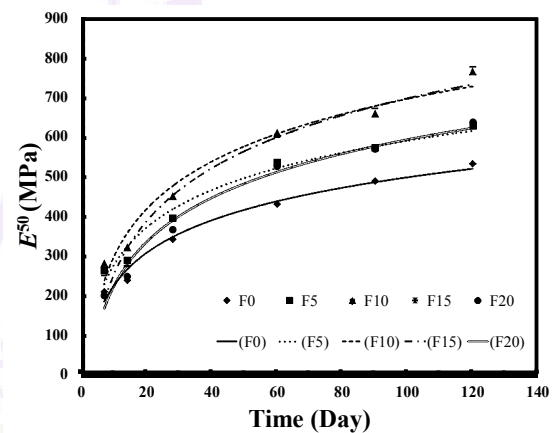
(a) ปูนซีเมนต์ 3%



(b) ค่า ปูนซีเมนต์ 5%



(c) ปูนซีเมนต์ 7%



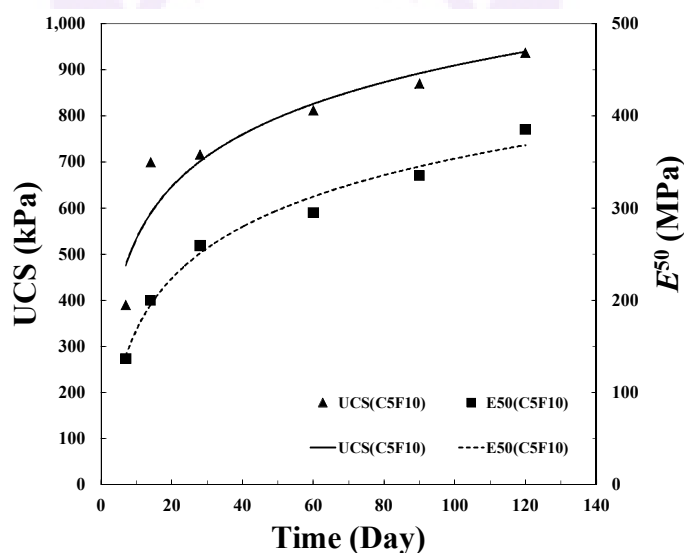
(d) ปูนซีเมนต์ 10%

ภาพ 37 ค่า  $E^{50}$  ของดินตะกอนกัวนพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และถ้ำลอย

ส่วนข้อมูลค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Modulus elastic at 50% of maximum compressive strength,  $E^{50}$ ) ที่ได้จากการทดสอบหาค่า UCS นั้นพบว่ามีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกันกับค่า UCS โดยค่า  $E^{50}$  จะแปรผันตามปริมาณของ

ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยเช่นกัน เช่น เมื่อใส่ปริมาณของปูนซีเมนต์หรือเถ้าลอยลงไปในตัวอย่างดินตะกอนกัวนพะเยาเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้จะทำให้ค่า  $UCS$  เพิ่มขึ้นแล้วก็จะส่งผลไปถึงการเพิ่มขึ้นของค่า  $E^{50}$  ด้วยเช่นกัน โดยค่า  $E^{50}$  จะเพิ่มขึ้นแบบเดียวกันกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวด้วย ดังแสดงในภาพ 37

ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากภาพ 37 พบว่าทั้งรูปแบบของการเพิ่มขึ้นของค่า  $E^{50}$  ในช่วงอายุการบ่มก่อน 28 วันก็พบว่าค่า  $E^{50}$  นั้นก็มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงอายุการบ่มหลัง 28 วัน อีกประเด็นหนึ่งที่บ่งบอกได้ว่าค่า  $E^{50}$  นั้นมีพฤติกรรมเหมือนกับค่า  $UCS$  เนื่องจากภาพ 37 นั้นพบว่า ปริมาณของปูนซีเมนต์ส่งผลให้ค่า  $E^{50}$  มีค่ามากขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ ส่วนปริมาณของเถ้าลอยพบว่า ปริมาณที่เหมาะสมของเถ้าลอยจะอยู่ที่ 10-15% ของน้ำหนักดินแห้งที่จะทำให้ค่า  $E^{50}$  มีค่าที่สูงที่สุดในแต่ละปริมาณของปูนซีเมนต์ โดยที่อายุการบ่มก่อน 28 วัน ปริมาณเถ้าลอยที่ทำให้ค่า  $E^{50}$  มีค่าที่สูงที่สุดคือที่ 10% และอายุการบ่มที่หลัง 28 วัน ปริมาณเถ้าลอยที่ทำให้ค่า  $E^{50}$  มีค่าที่สูงที่สุดคือที่ 15% ซึ่งจะพบว่ามีคุณสมบัติคล้ายเหมือนกับค่า  $UCS$  อย่างชัดเจน



ภาพ 38 กราฟแสดงพฤติกรรมความสัมพันธ์ในการเพิ่มขึ้นระหว่างค่า  $UCS$  และค่า  $E^{50}$  ของตัวอย่างดินตะกอนกัวนพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ 5%

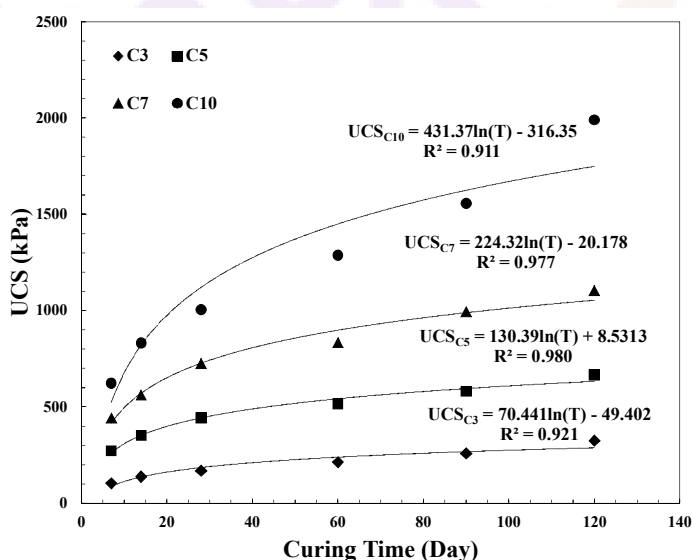
จากภาพ 38 จะแสดงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นระหว่างค่า  $UCS$  และค่า  $E^{50}$  เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการบ่มของดินตะกอนกัวนพะเยาที่ผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยสัดส่วนตัวอย่างที่นำเสนอคือ C5F10 ซึ่งพบว่าในช่วงอายุการบ่มก่อน 28 วันค่า  $UCS$  และค่า  $E^{50}$  ก็

มีการพัฒนาค่าควบคุมไปด้วยกัน ส่วนหลังอายุการบ่มที่ 28 วัน ค่า  $UCS$  และค่า  $E^{50}$  ก็จะมี การพัฒนาเพิ่มขึ้นของค่าข้อมูลควบคุมไปด้วยกันเหมือนเดิม

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าค่า  $E^{50}$  และค่า  $UCS$  นั้นมีความสัมพันธ์ต่อกันและกัน และ ผลลัพธ์ก็ยิ่งขึ้นอยู่ระหว่างกันและกันอีกด้วย เมื่อไหร่ก็ตามที่ค่า  $UCS$  มีค่าที่ต่ำลงก็จะส่งผลให้ ค่า  $E^{50}$  ต่ำลงไปด้วย และเมื่อไหร่ก็ตามที่ค่า  $UCS$  มีค่าที่สูงขึ้นก็จะส่งผลให้ค่า  $E^{50}$  มีค่าที่ สูงขึ้นไปด้วย ส่วนการพัฒนาเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดของดินตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจาก ปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานจากเถ้าลอย ส่วนข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด แขนเดี่ยว ในงานวิจัยนี้ได้สรุปไว้ในตาราง 24 (ภาคผนวก ค)

#### การวิเคราะห์แบบจำลองด้านกำลังด้วยวิธีสมการถดถอยพหุคูณ

ในขั้นเริ่มต้นจะทำการวิเคราะห์เฉพาะตัวแปรของปูนซีเมนต์เทียบกับเวลาในการบ่ม เพียงอย่างเดียว โดยยังไม่นำตัวแปรของเถ้าลอยมาวิเคราะห์ร่วม เพื่อตรวจสอบถึง ความสัมพันธ์ในเบื้องต้นว่าตัวแปรต้นอย่างค่า  $UCS$  กับตัวแปรตามอื่น ๆ ที่จะนำมาทำการ วิเคราะห์ เช่น ปริมาณของปูนซีเมนต์นั้นจะมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ ดังนั้น จึงทำการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์กับตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ โดยการใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบลอกกาลิทึม อย่างง่ายเข้ามาช่วยในการตรวจวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพ 39



ภาพ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $UCS$  กับระยะเวลาในการบ่มของตัวอย่างที่ผสมด้วย ปูนซีเมนต์

จากสมการความสัมพันธ์เชิงลอกกาลิทึมในภาพ 39 บ่งบอกได้ว่าตัวแปรของปูนซีเมนต์และตัวแปรระยะเวลาในการบ่มมีความสัมพันธ์ต่อค่า UCS ดังนั้น ทางผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า UCS เพื่อสามารถที่จะนำปัจจัยนั้น ๆ มากำหนดเป็นตัวแปรสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายค่า UCS และ  $E^{50}$  โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกกำหนดใช้ตัวแปรค่า UCS และ ค่า  $E^{50}$  จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรต้น ส่วนตัวแปรอื่น ๆ อย่างเช่น ปริมาณปูนซีเมนต์ ( $C$ ) ปริมาณเถ้าลอย ( $F$ ) ระยะเวลาในการบ่ม ( $T$ ) และ หน่วยงานหนักแห้ง ( $D$ ) จะกำหนดให้เป็นตัวแปรตาม จากนั้นจะนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการถดถอยพหุคูณ โดยอาศัยแบบจำลองพื้นฐานของสมการถดถอยพหุคูณดังแสดงในสมการ 4.1 ดังนี้

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \dots + \beta_n x_{in}, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (4.1)$$

เมื่อ  $y_i$  คือ ค่าของตัวแปรต้น (ได้แก่ UCS และ  $E^{50}$ )

$\beta_i$  คือ ค่าคงที่ของสมการ

$x_{ii}$  คือ ตัวแปรตาม (เช่น  $C$   $F$  และ  $T$  เป็นต้น)

เมื่อกำหนดตัวแปรได้ทั้งหมดแล้ว ต่อมาจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในรูปของสมการถดถอยด้วยโปรแกรม Microsoft Excel โดยในการวิเคราะห์ได้ทำการวิเคราะห์เป็นแบบจำลองจำนวนทั้งหมด 2 กลุ่ม

กลุ่มแรกเป็นแบบจำลองค่า UCS ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองย่อยที่หนึ่งคือแบบจำลองค่า UCS ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$  และ  $T$  แบบจำลองย่อยที่สองคือแบบจำลองค่า UCS ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$   $T$  และ  $D$  ส่วนแบบจำลองย่อยที่สามคือแบบจำลองค่า UCS ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$   $F$   $T$  และ  $D$

กลุ่มที่สองเป็นแบบจำลองค่า  $E^{50}$  ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองย่อยที่หนึ่งคือแบบจำลองค่า  $E^{50}$  ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$  และ  $T$  แบบจำลองย่อยที่สองคือแบบจำลองค่า  $E^{50}$  ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$   $T$  และ  $D$  ส่วนแบบจำลองย่อยที่สามคือแบบจำลองค่า  $E^{50}$  ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$   $F$   $T$  และ  $D$

โดยแบบจำลองที่ได้แบ่งออกเป็นแบบจำลองของค่า UCS และแบบจำลองของค่า  $E^{50}$  โดยข้อมูลที่ใช้ในการสร้างสมการถดถอยพหุคูณเป็นข้อมูลที่ได้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compressive test,  $UC$ ) ซึ่งข้อมูลที่ได้ในการทดสอบทั้งหมดจะ

ทำการสรุปแล้วตัดข้อมูลที่ได้ที่มีค่า  $UCS$   $E^{50}$  และ  $D$  ที่มีค่าเท่ากับศูนย์ (ตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับศูนย์) ออกไปทำให้เหลือชุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง 120 ชุด ข้อมูล ดังนั้น แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยพหุคูณจะแสดงดังต่อไปนี้

แบบจำลองค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว

$$UCS = -529.8 + 145.672(C) + 5.363(T) \quad [R^2 = 0.892] \quad (4.2)$$

$$UCS = -702.077 + 145.531(C) + 5.357(T) + 11.241(D) \quad [R^2 = 0.892] \quad (4.3)$$

$$UCS = -3531.74 + 164.073(C) + 1.564(F) + 5.37(T) + 189.578(D) \quad [R^2 = 0.868] \quad (4.4)$$

แบบจำลองค่าโมดูลัสอีลาสติคที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

$$E^{50} = -134847.044 + 43488.96(C) + 1730.78(T) \quad [R^2 = 0.888] \quad (4.5)$$

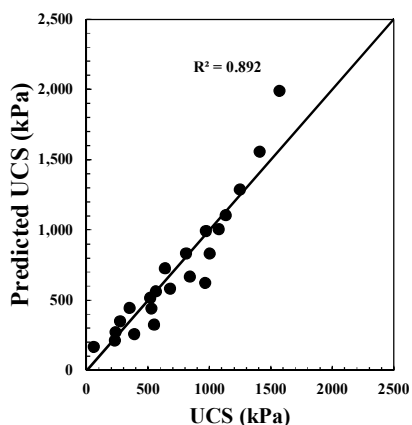
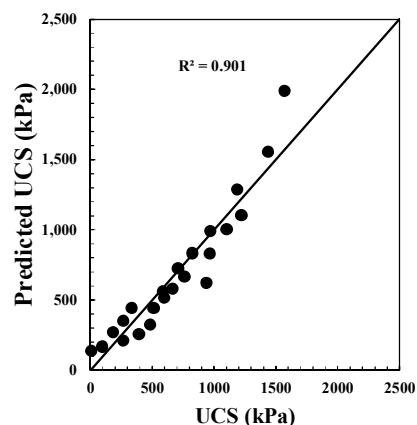
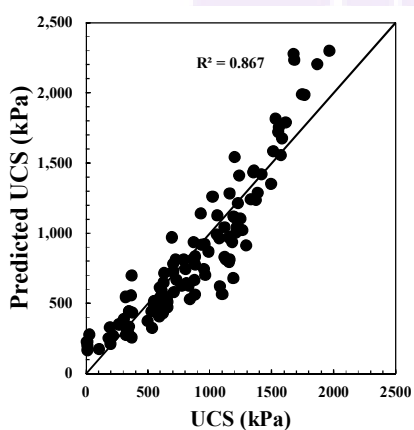
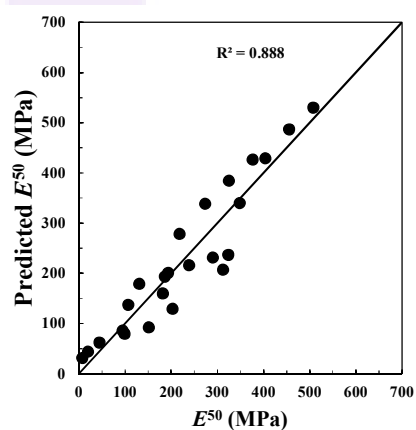
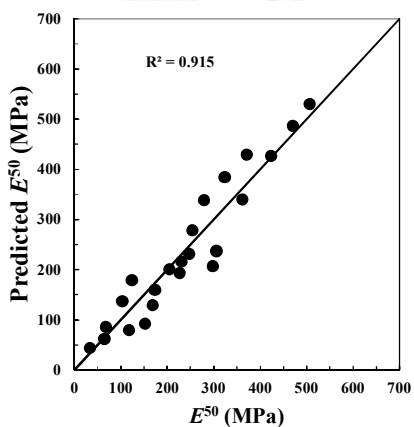
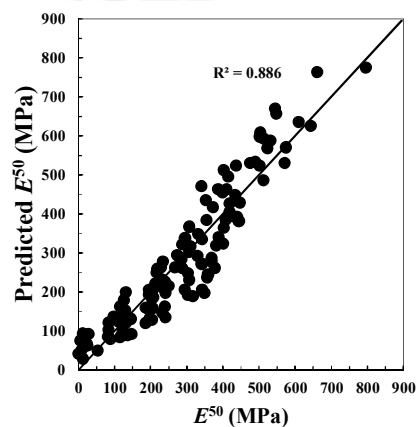
$$E^{50} = -224878.958 + 43415.259(C) + 1727.647(T) + 5874.548(D) \quad [R^2 = 0.888] \quad (4.6)$$

$$E^{50} = -1133454.574 + 49507.28(C) + 476.471(F) + 1845.051(T) + 62562.564(D) \quad [R^2 = 0.888] \quad (4.7)$$

เมื่อ	$UCS$	คือ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (kPa)
	$E^{50}$	คือ ค่าโมดูลัสอีลาสติคที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (kPa)
	$C$	คือ ปริมาณของปูนซีเมนต์ (%)
	$F$	คือ ปริมาณของเถ้าลอย (%)
	$T$	คือ ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)
	$D$	คือ หน่วยน้ำหนักแห้ง ( $\text{kN/m}^3$ )

ผลลัพธ์ในวิเคราะห์จากแบบจำลองทั้งแบบจำลองค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และแบบจำลองค่าโมดูลัสอีลาสติคที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการตรวจสอบถึงความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา หรือที่เรียกว่าการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ (Back calculate) โดยผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้จะแสดงดังในภาพ 40



(a) UCS ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$  และ  $T$ (b) UCS ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$   $T$  และ  $D$ (c) UCS ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$   $F$   $T$  และ  $D$ (d)  $E^{50}$  ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$  และ  $T$ (e)  $E^{50}$  ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$   $T$  และ  $D$ (f)  $E^{50}$  ที่เป็นฟังก์ชันกับ  $C$   $F$   $T$  และ  $D$ 

ภาพ 40 การเปรียบเทียบของค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าจากการทดลอง

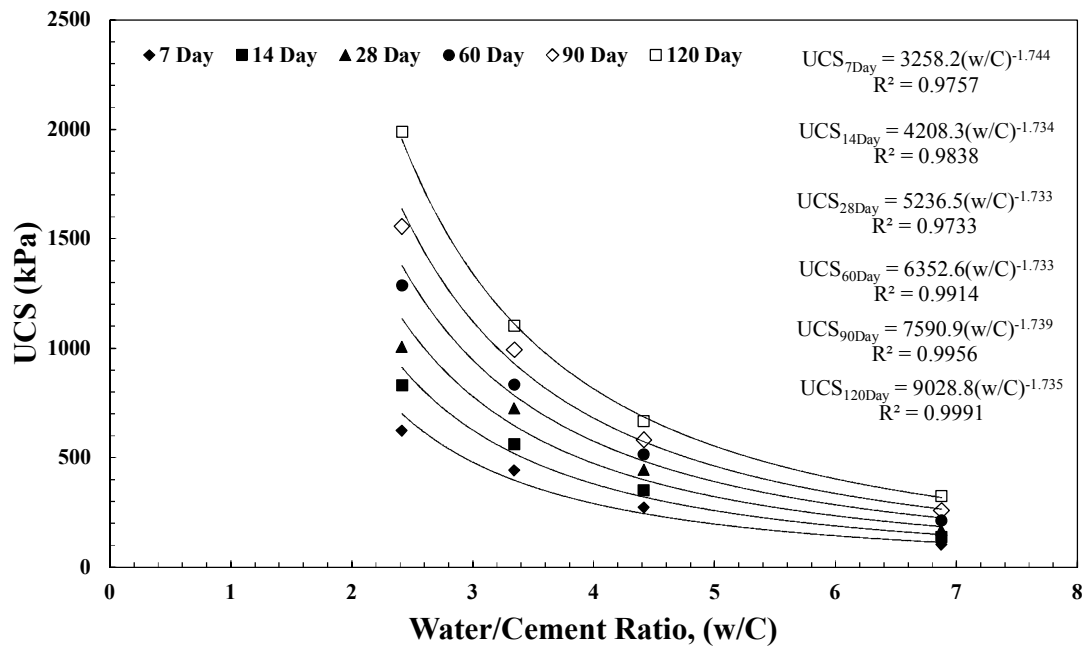
ส่วนในการพิสูจน์ความสัมพันธ์ของค่า  $E^{50}$  และค่า  $UCS$  กับข้อเท็จจริงที่ว่าค่า  $E^{50}$  จะมีความแปรผันตามค่า  $UCS$  หรือไม่ หรือที่เรียกว่ามีความเป็นสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple correlation) กัน ซึ่งการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวนี้ โดยความสัมพันธ์นี้จะบอกให้ทราบว่าตัวแปรต้นทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันในระดับใด โดยจะทำการพิสูจน์เปรียบเทียบความสัมพันธ์นี้ด้วยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือค่า  $E^{50}$  และค่า  $UCS$  มาวิเคราะห์ในรูปแบบของสมการถดถอยอีกครั้ง ซึ่งจากการหาความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวนี้ ทำให้ได้แบบจำลองค่า  $E^{50}$  ที่เป็นฟังก์ชันกับค่า  $UCS$  ดังแสดงในสมการ 4.8

$$E^{50} = 327.448(UCS) \quad [R^2 = 0.985] \quad (4.8)$$

ดังนั้น จากสมการ 4.8 จึงสรุปได้ว่า ค่า  $UCS$  กับค่า  $E^{50}$  นั้นมีความสัมพันธ์กันทางข้อมูลและเป็นค่าที่ส่งผลต่อกันในทางพฤติกรรมด้านกำลังอีกด้วย และความสัมพันธ์นี้เรียกว่าเป็นสหสัมพันธ์เชิงบวก (Positive correlations) ซึ่งหมายความว่า เมื่อตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดลงอีกตัวแปรหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วยเช่นกัน ส่วนความสัมพันธ์ของค่า  $UCS$  กับค่า  $E^{50}$  ดังกล่าวนี้พบว่าอัตราส่วนของค่า  $E^{50}$  ต่อ  $UCS$  มีค่าเท่ากับ 327.448 ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่สามารถนำไปประยุกต์ในการออกแบบต่อไปได้

#### การวิเคราะห์แบบจำลองด้านกำลังด้วยวิธีการใช้ตัวแปรควบคุม

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณทำให้ได้แบบจำลองในรูปแบบของสมการที่ง่ายและสะดวกต่อการนำไปใช้งาน แต่เนื่องจากแบบจำลองที่ได้นั้นมาจากการทดลองทำให้มีขอบเขตในการใช้งานอยู่พอสมควร เช่น การออกแบบปริมาณของส่วนผสมเช่น ปูนซีเมนต์ต้องอยู่ในช่วงของ 3-10 เปอร์เซ็นต์ หรืออายุการบ่มก็ต้องอยู่ในช่วง 7-120 วัน เป็นต้น ดังนั้น ในข้อจำกัดของการใช้งานที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงอัตราส่วนค่าคงที่ของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (Water cement ratio, w/C) ซึ่งในการวิเคราะห์เบื้องต้นจะใช้ข้อมูลค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว มาเขียนกราฟเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยจะพบว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) ดังแสดงในภาพ 41 โดยพบว่าค่า B คือ ค่าดัชนียกกำลัง โดยจะมีค่าอยู่ประมาณ 1.736



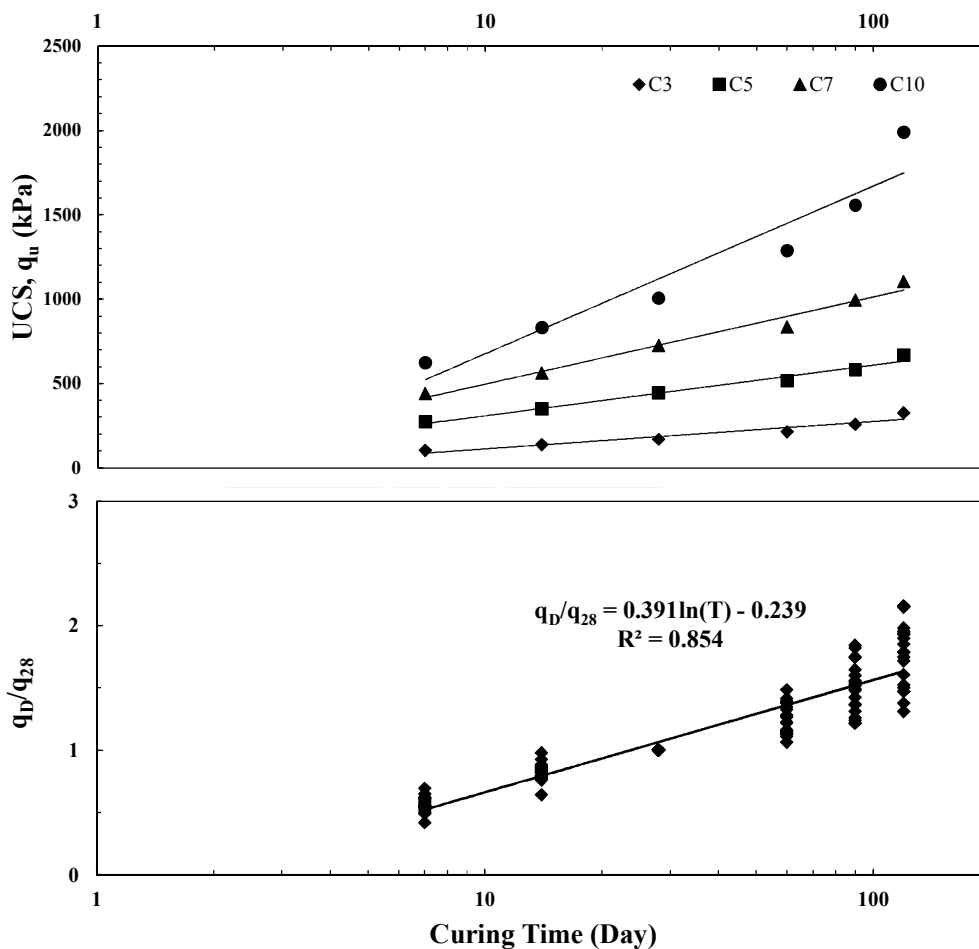
ภาพ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวกับ w/C

เมื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดแกนเดี่ยวของดินที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ระยะการบ่มค่าหนึ่งทำให้ค่า A จะถูกตัดทอนออกไปซึ่งจะได้สมการออกมาดังแสดงในสมการ 4.9

$$\left\{ \frac{q_{(w/c)1}}{q_{(w/c)2}} \right\} = \left[ \frac{(w/C)_2}{(w/C)_1} \right]^{1.736} \quad (4.9)$$

หลังจากนั้นเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงกึ่งลอการิทึม (Semi log) ของดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมปูนซีเมนต์ ดังแสดงในภาพ 42 ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวกับระยะเวลาในการบ่ม ของสัดส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่า สามารถแสดงออกมาในรูปของสมการเส้นตรงได้ และทำการนอมอลไลต์เซชัน (Normalization) โดยการใช้ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน เป็นค่าอ้างอิง ดังนั้น จะทำให้ได้สมการออกมาดังแสดงในสมการ 4.10

$$\frac{q_D}{q_{28}} = -0.239 + 0.391 \ln(T) \quad (4.10)$$



ภาพ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียวและอายุการบ่มของดิน

เมื่อรวมสมการ 4.9 และ 4.10 จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดแกนเดียว อัตราส่วนปริมาณความชื้นต่อปริมาณซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่ม และจะทำให้ได้สมการสำหรับทำนายค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ดังแสดงในต่อไปนี้

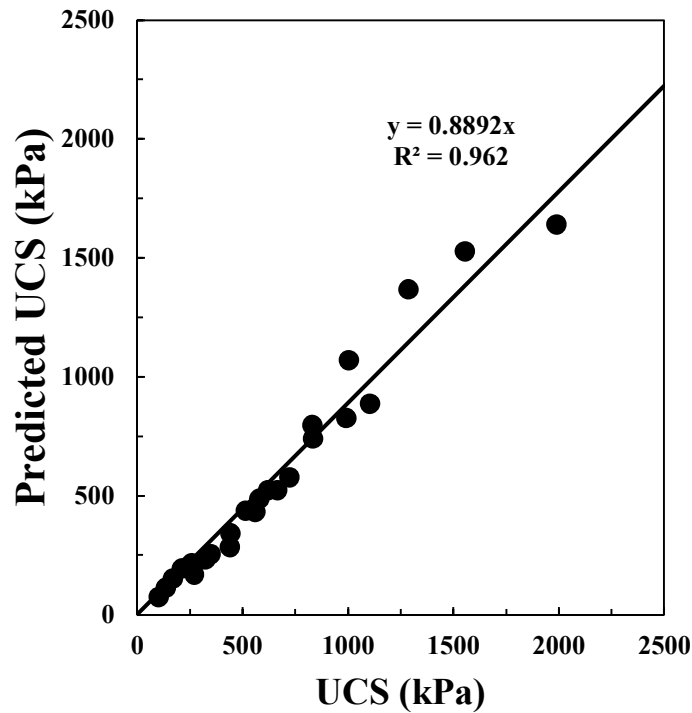
$$\left\{ \frac{q_{(w/c)D}}{q_{(w/c)28}} \right\} = \left[ \frac{(w/C)_{28}}{(w/C)_D} \right]^{1.736} [-0.239 + 0.391 \ln(T)] \quad (4.11)$$

จากสมการทำนายค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ได้ใน สมการ 4.11 พบว่าสามารถทำนายค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินตะกอนกัว้นพะเยาที่ผสมกับปูนซีเมนต์ ในปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุการบ่มใด ๆ ได้ โดยอาศัยการเทียบผลค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่อายุ

28 วัน ส่วนช่วงอายุการบ่มที่เหมาะสมสำหรับการใช้ทำนายจะอยู่ในช่วง 7-120 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 3-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินแห้ง และความน่าเชื่อถือของสมการทำนายกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวแบบตัวแปรควบคุมนี้จะแสดงในตาราง 20 และภาพ 43

**ตาราง 20 ผลการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดด้วยสมการแบบตัวแปรควบคุม**

OMC (%)	Time (Day)	Cement (%)	w/C	Predicted UCS (kPa)	Lab UCS (kPa)
16.686	7	3	5.562	73.942	102.899
17.373	7	5	3.475	167.333	271.409
17.954	7	7	2.565	283.430	441.186
18.003	7	10	1.800	523.982	622.787
16.686	14	3	5.562	112.343	137.627
17.373	14	5	3.475	254.236	350.870
17.954	14	7	2.565	430.628	561.342
18.003	14	10	1.800	796.110	831.169
16.686	28	3	5.562	150.744	168.279
17.373	28	5	3.475	341.140	443.356
17.954	28	7	2.565	577.826	724.398
18.003	28	10	1.800	ค่าอ้างอิง	1004.084
16.686	60	3	5.562	192.967	212.882
17.373	60	5	3.475	436.693	515.550
17.954	60	7	2.565	739.675	833.622
18.003	60	10	1.800	1367.451	1287.033
16.686	90	3	5.562	215.431	257.871
17.373	90	5	3.475	487.528	581.249
17.954	90	7	2.565	825.780	992.532
18.003	90	10	1.800	1526.635	1555.747
16.686	120	3	5.562	231.369	324.345
17.373	120	5	3.475	523.597	665.968
17.954	120	7	2.565	886.873	1103.657
18.003	120	10	1.800	1639.579	1988.789



ภาพ 43 ความสัมพันธ์ของค่า *UCS* จากการทดลองกับค่าจากสมการตัวแปรควบคุม

#### ผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Wetting and drying)

จากการทดสอบความคงทนของดินตะกอนกัวนพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยด้วยวิธีแบบเปียกและแห้ง พบว่า ค่าร้อยละการสูญเสียที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างแบบควบคุม (Control sample) และตัวอย่างแบบซัดสี (Testing sample) จะมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามจำนวนรอบหรือวัฏจักรเปียกและแห้งสลับไปมา โดยตัวอย่างแบบซัดสีจะพบว่ามีอัตราร้อยละการสูญเสียที่สูงกว่าตัวอย่างแบบควบคุม เนื่องจากตัวอย่างแบบซัดสีนั้นจะมีการปัดด้วยแปรงขัดควบคู่ระหว่างการทดสอบในแต่ละวัฏจักรไปด้วย

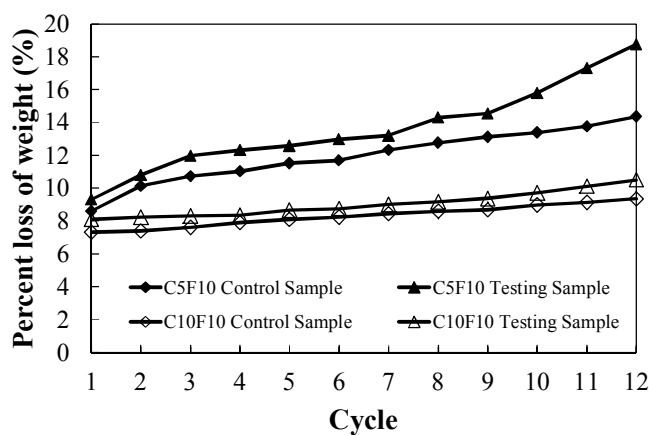
จากในการทดสอบความคงทนในงานวิจัยนี้ พบว่า ดินตะกอนกัวนพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยนั้นมีค่าร้อยละการสูญเสียอยู่ตั้งแต่ 7% ขึ้นไป โดยในตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% ส่วนมากจะมีการพังเสียหายระหว่างการทดสอบก่อนที่จะครบวัฏจักรเปียกและแห้ง 12 วัฏจักร ส่วนตัวอย่างที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่มากกว่า 5% จะมีค่าร้อยละการสูญเสียที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% และตัวอย่างส่วนใหญ่ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่มากกว่า 5% จะพบว่า สามารถที่จะทดสอบจนครบวัฏจักรเปียกและแห้งได้ ดังแสดงในตาราง 21

ตาราง 21 ค่าร้อยละการสูญเสียจากกระบวนการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกสลั  
บแห้ง

ส่วนผสม	ตัวอย่างแบบขีดสี		ตัวอย่างแบบควบคุม	
	ค่าร้อยละการสูญเสียทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)	รายละเอียด	ค่าร้อยละการสูญเสียทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)	รายละเอียด
C0F0	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0
C0F5	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0
C0F10	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0
C0F15	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0
C0F20	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0	100.00	พังในรอบวัฏจักรที่ 0
C3F0	20.72	พังในรอบวัฏจักรที่ 2	21.44	พังในรอบวัฏจักรที่ 2
C3F5	16.86	พังในรอบวัฏจักรที่ 2	15.30	พังในรอบวัฏจักรที่ 2
C3F10	16.43	พังในรอบวัฏจักรที่ 5	16.37	พังในรอบวัฏจักรที่ 6
C3F15	11.16	พังในรอบวัฏจักรที่ 1	10.71	พังในรอบวัฏจักรที่ 1
C3F20	10.25	พังในรอบวัฏจักรที่ 1	9.84	พังในรอบวัฏจักรที่ 1
C5F0	22.59	พังในรอบวัฏจักรที่ 9	18.52	พังในรอบวัฏจักรที่ 5
C5F5	20.07	ไม่พัง	16.70	ไม่พัง
C5F10	18.76	ไม่พัง	14.37	ไม่พัง
C5F15	15.79	ไม่พัง	13.43	ไม่พัง
C5F20	11.06	พังในรอบวัฏจักรที่ 2	9.36	พังในรอบวัฏจักรที่ 2
C7F0	16.34	ไม่พัง	14.90	ไม่พัง
C7F5	14.63	ไม่พัง	13.01	ไม่พัง
C7F10	13.17	ไม่พัง	12.02	ไม่พัง
C7F15	10.81	ไม่พัง	10.64	ไม่พัง
C7F20	11.39	ไม่พัง	10.10	ไม่พัง
C10F0	14.14	ไม่พัง	12.06	ไม่พัง
C10F5	11.47	ไม่พัง	10.21	ไม่พัง
C10F10	10.50	ไม่พัง	9.35	ไม่พัง
C10F15	9.44	ไม่พัง	8.61	ไม่พัง
C10F20	8.57	ไม่พัง	7.48	ไม่พัง

ในปัจจุบันของปูนซีเมนต์ที่ผสมเข้าไป พบว่า ปริมาณของปูนซีเมนต์ส่งผลโดยตรงต่อค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างทดสอบ โดยในตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก พบว่าค่าร้อยละการสูญเสียจะลดน้อยลง แต่ถ้ามีปริมาณของปูนซีเมนต์ที่น้อยลง ก็จะทำให้ค่าอัตราการสูญเสียมีค่าที่มากขึ้น ส่วนปัจจัยของแฉะลยที่ใส่เข้าไป พบว่า จะมีลักษณะพฤติกรรม

คล้ายกับปูนซีเมนต์ โดยเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้นค่าอัตราร้อยละการสูญเสียก็จะลดน้อยลงเช่นกัน ส่วนข้อแตกต่างระหว่างตัวอย่างทดสอบแบบควบคุมกับแบบขัดสี พบว่าตัวอย่างแบบขัดสีจะมีค่าร้อยละการสูญเสียที่มากกว่าตัวอย่างแบบควบคุม ดังแสดงในภาพ 44



ภาพ 44 ผลเปรียบเทียบร้อยละการสูญเสียของสัดส่วนผสม C5F10 และ C10F10

ในตัวอย่างชุดดินตะกอนกรวดปนทรายที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 0% ซึ่งตัวอย่างนี้จะเป็นดินที่ผสมกับเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว ซึ่งความเสียหายของตัวอย่างในการทดสอบ จะพังในขณะที่แช่น้ำก่อนเริ่มการทำการทดสอบทั้งหมด โดยรูปแบบของความเสียหายจะเป็นแบบหลุดร่อนและละลายและไปในน้ำทั้งก่อนตัวอย่างแบบขัดสีและแบบควบคุม เนื่องจากเพราะว่าเถ้าลอยที่ผสมเข้าไปไม่ได้มีคุณสมบัติเชื่อมประสานทันทีที่จะทำให้ตัวอย่างดินคงสภาพอยู่ได้โดยไม่เสียหายหรือพังทลายลงไป

ในตัวอย่างชุดดินตะกอนกรวดปนทรายที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณเท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งความเสียหายของตัวอย่างในการทดสอบจะมีการพังอย่างถาวรในขณะที่เริ่มทำการทดสอบตั้งแต่เริ่มแช่น้ำครั้งแรก เนื่องจากตัวอย่างไม่สามารถคงตัวอย่างอยู่ในภาพเดิมได้จึงส่งผลให้ไม่มีตัวอย่างใด ๆ ที่ไม่ผสมปูนซีเมนต์ทำการทดสอบได้

ในตัวอย่างชุดดินตะกอนกรวดปนทรายที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 3% และเถ้าลอยในปริมาณเท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งความเสียหายของตัวอย่างในการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

C3F0 จะพังในวัฏจักรที่ 2 โดยจะพังแบบหลุดร่อนบริเวณตรงขอบของตัวอย่างจากนั้นขณะแช่น้ำตัวอย่างก็เกิดการพังขึ้น ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขัดสีก่อนตัวอย่างพังมีค่าเท่ากับ 20.72 และ 21.44 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 51



C3F5 จะฟังในวัฏจักรที่ 2 โดยจะฟังแบบหลุดร่อนหลังจากแช่น้ำทั้งตัวอย่างแบบควบคุมและชดสี ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบชดสีก่อนตัวอย่างฟังมีค่าเท่ากับ 16.86 และ 15.30 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 52

C3F10 ตัวอย่างแบบชดสีจะฟังในวัฏจักรที่ 5 โดยจะฟังแบบหลุดร่อนตรงขอบบนและล่าง ตัวอย่างแบบควบคุมจะฟังในวัฏจักรที่ 6 โดยจะฟังแบบหลุดร่อนตรงขอบบนขอบล่างและตรงกลางก่อนตัวอย่าง ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบชดสีก่อนตัวอย่างฟังมีค่าเท่ากับ 16.43 และ 16.37 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 53

C3F15 จะฟังในวัฏจักรที่ 1 โดยจะฟังแบบหลุดร่อนตรงกลาง ล่างและด้านบนของตัวอย่าง ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบชดสีก่อนตัวอย่างฟังมีค่าเท่ากับ 11.16 และ 10.71 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 54

C3F20 จะฟังในวัฏจักรที่ 1 โดยจะฟังแบบหลุดร่อนและฟังบริเวณขอบ ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบชดสีก่อนตัวอย่างฟังมีค่าเท่ากับ 10.25 และ 9.84 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 55

ทั้งนี้รูปแบบของความเสียหายโดยรวมจะเป็นแบบหลุดร่อนและละลายและไปในน้ำทั้งก่อนตัวอย่างแบบชดสีและแบบควบคุม ดังนั้นสัดส่วนดินตะกอนที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณ 3% ตัวอย่างดินจะเริ่มทำการทดสอบความคงทนได้แต่ไม่สามารถทำการทดสอบในรอบวัฏจักรเปียกและแห้งที่จำนวนหลาย ๆ ครั้งได้

ในตัวอย่างชุดดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 5% และเถ้าลอยในปริมาณเท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งความเสียหายของตัวอย่างในการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

C5F0 ตัวอย่างแบบชดสีจะฟังในวัฏจักรที่ 9 โดยจะค่อย ๆ ฟังที่ละนิคจนกระทั่งในวัฏจักรที่ 9 ไม่สามารถวัดตัวอย่างได้อีก ซึ่งที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างมีการพังเสียหายอย่างมาก ส่วนตัวอย่างแบบควบคุมจะฟังในวัฏจักรที่ 5 โดยจะฟังที่บริเวณด้านล่างของตัวอย่างทดสอบ ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบชดสีก่อนตัวอย่างฟังมีค่าเท่ากับ 22.59 และ 18.52 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 56

C5F5 โดยตัวอย่างทั้งแบบชดสีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบชดสีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 20.07 และ 16.70 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 57

C5F10 โดยตัวอย่างทั้งแบบขี้ดลีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขี้ดลีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 18.76 และ 14.37 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 58

C5F15 โดยตัวอย่างทั้งแบบขี้ดลีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขี้ดลีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 15.79 และ 13.43 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 59

C5F20 โดยตัวอย่างแบบขี้ดลีและควบคุมจะพังในวัฏจักรที่ 2 โดยมีการพังที่บริเวณด้านข้างทั้งสองและตรงกลางด้วย ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขี้ดลีก่อนตัวอย่างพังมีค่าเท่ากับ 11.06 และ 9.36 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 60

ในตัวอย่างดินตะกอนกวีานพะเยาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 5% นั้นจะเริ่มมีสัดส่วนผสมอย่าง C5F5, C5F10 และ C5F15 ที่ทำการทดสอบจนครบทั้ง 12 รอบวัฏจักรเป็ยกและแห้งได้ เพราะว่ตัวอย่างมีปริมาณของปูนซีเมนต์ในชั้นต่ำที่เพียงพอที่จะทำให้ตัวอย่างมีความคงทนที่จะสามารถทำการทดสอบจนครบทั้ง 12 รอบวัฏจักรเป็ยกและแห้งได้

ในตัวอย่างชุดดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 7% ที่ผสมเ้าลอยในปริมาณเท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งความเสียหายของตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ทั้ง 7% นี้ ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดสามารถทำการทดสอบจนครบทั้ง 12 รอบวัฏจักรการทดสอบทั้งหมด ถึงแม้ว่ก่อนตัวอย่างทดสอบบางก้อนจะมีการหลุดร่อนบ้างแต่ก็ยังสามารถทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องได้

C7F0 โดยตัวอย่างทั้งแบบขี้ดลีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขี้ดลีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 16.34 และ 14.90 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 61

C7F5 โดยตัวอย่างทั้งแบบขี้ดลีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขี้ดลีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 14.63 และ 13.01 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 62

C7F10 โดยตัวอย่างทั้งแบบขี้ดลีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุม

และแบบขัดสีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 13.17 และ 12.02 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 63

C7F15 โดยตัวอย่างทั้งแบบขัดสีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขัดสีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 10.81 และ 10.64 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 64

C7F20 โดยตัวอย่างทั้งแบบขัดสีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขัดสีก่อนตัวอย่างทั้งมีค่าเท่ากับ 11.39 และ 10.10 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 65

ในตัวอย่างดินตะกอนกัวนพะเยาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 7% นั้นจะพบว่าตัวอย่างในกลุ่มนี้สามารถทำการทดสอบครบตลอดทั้ง 12 รอบวัฏจักรได้และค่าร้อยละการสูญเสียส่วนใหญ่จะลดลงและน้อยกว่าชุดที่ผสมปูนซีเมนต์ 5%

ในตัวอย่างชุดดินตะกอนกัวนพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ 10% ที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณเท่ากับ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งความเสียหายของตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ทั้ง 10% นี้ ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดสามารถทำการทดสอบจนครบทั้ง 12 รอบวัฏจักรการทดสอบทั้งหมด และก่อนตัวอย่างทดสอบบางก่อนจะมีการหลุดร่อนน้อยกว่าชุดผสมปูนซีเมนต์อื่น ๆ

C10F0 โดยตัวอย่างทั้งแบบขัดสีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขัดสีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 14.14 และ 12.06 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 66

C10F5 โดยตัวอย่างทั้งแบบขัดสีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขัดสีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 11.47 และ 10.21 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 67

C10F10 โดยตัวอย่างทั้งแบบขัดสีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขัดสีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 10.50 และ 9.35 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 68

C10F15 โดยตัวอย่างทั้งแบบขี้ดลีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขี้ดลีที่เกิดขึ้นหลังจากจบการทดสอบมีค่าเท่ากับ 9.44 และ 8.61 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 69

C10F20 โดยตัวอย่างทั้งแบบขี้ดลีและแบบควบคุมมีการหลุดร่อนบ้างแต่ยังสามารถวัดค่าทำการทดสอบได้จนครบทั้ง 12 วัฏจักร ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างแบบควบคุมและแบบขี้ดลีก่อนตัวอย่างพังมีค่าเท่ากับ 8.57 และ 7.48 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 70

ในตัวอย่างดินตะกอนกวี้นพะเยาที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 10% นั้นจะพบว่าตัวอย่างในกลุ่มนี้สามารถทำการทดสอบครบตลอดทั้ง 12 รอบวัฏจักรได้และค่าร้อยละการสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นน้อยมาก โดยพบว่ามีการสูญเสียที่ต่ำกว่าชุดตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์อื่น ๆ อีกด้วย

นอกจากนี้ผลข้อมูลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง งานวิจัยนี้ได้สรุปเป็นตารางรายละเอียดข้อมูล และกราฟทดสอบของแต่ละลัดส่วน ดังแสดงใน ภาคผนวก ง

ดังนั้น ความคงทนของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย พบว่าปริมาณของปูนซีเมนต์นั้นมีผลต่อค่าร้อยละการสูญเสียโดยตรง โดยจากการทำการทดลองพบว่า ในลัดส่วนใด ๆ ที่มีปริมาณของปูนซีเมนต์ที่มากย่อมส่งผลให้มีค่าร้อยละการสูญเสียที่น้อยลง แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ปริมาณของปูนซีเมนต์มีน้อยย่อมส่งผลให้ค่าร้อยละการสูญเสียมีมากขึ้น และทำให้โอกาสที่ตัวอย่างจะพังเสียหายย่อมมีมากขึ้นด้วย ทั้งนี้ที่ตัวอย่างคงสภาพอยู่ได้ก็เนื่องจากได้รับผลพวงมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพราะมีการบ่มที่เวลา 7 วัน ก่อนนำไปทำการทดสอบตามวัฏจักรเปียกและแห้ง ส่วนปริมาณของเถ้าลอยที่ใส่เข้าไปนั้น พบว่า ปริมาณของเถ้าลอยไม่ส่งผลต่อการเพิ่มความคงทนในทางด้านเคมีเลย เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ยังไม่เกิดขึ้น แต่สาเหตุที่การใส่ปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้นแล้วทำให้ตัวอย่างมีความคงทนที่สูงขึ้น (ค่าร้อยละการสูญเสียลดลง) ได้นั้น ซึ่งอาจเป็นผลบวกทางด้านกายภาพมากกว่า เพราะเนื่องจากเถ้าลอยอาจเข้าไปแทรกยังช่องว่างในเม็ดดิน ทำให้มีความคงทนที่มากขึ้น ส่งผลให้ในผลการทดสอบ พบว่า ค่าร้อยละการสูญเสียนั้นลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่ใส่เข้าไปด้วย

ในการเทียบผลทดสอบระหว่างการทดสอบความคงทนกับการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เพื่อเป็นการพิจารณาถึงหลักเกณฑ์ขั้นต่ำในการเลือกใช้ปริมาณวัสดุสำหรับการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ โดยจำลองถึงประเด็นเกี่ยวกับงานวิศวกรรมผิวทางในประเทศไทย

ที่ชั้นผิวทางจะต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวตามเกณฑ์ที่กำหนดอย่างมาตรฐานงานทางของกรมทางหลวง แต่เนื่องด้วยในความเป็นจริงชั้นทางนั้นต้องรับสภาพการจราจรที่กระทำซ้ำไปมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในการทดสอบความคงทนที่เปรียบเสมือนเป็นการจำลองสภาพของชั้นผิวทางที่ต้องพบกับสถานะต่าง ๆ ทั้งเปียก แห้ง และการจราจรจากพาหนะ อีกประการหนึ่งก็คือ มาตรฐานการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งในประเทศไทยนั้น ยังไม่ได้มีเป็นข้อกำหนดที่ใช้กันอย่างถูกต้องและแพร่หลาย และเกณฑ์ข้อกำหนดค่าร้อยละการสูญเสียด้วยวิธีเปียกและแห้ง (Fang, 2013) ที่ใช้เป็นเกณฑ์พื้นฐานอ้างอิงในงานวิจัยนี้จะแสดงในตาราง 22

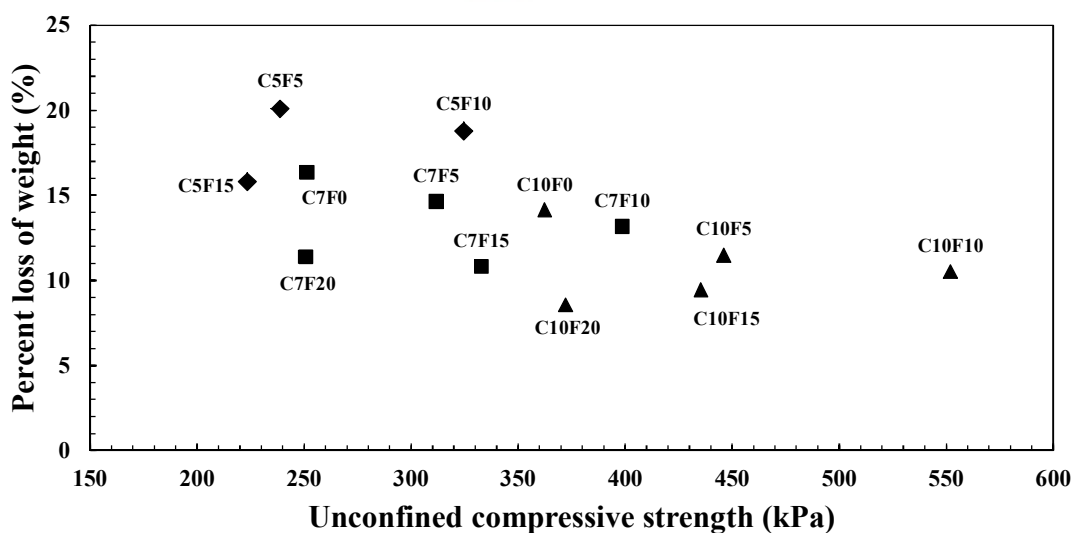
ตาราง 22 เกณฑ์ข้อกำหนดค่าร้อยละการสูญเสียด้วยวิธีเปียกและแห้ง

Soil Classification		Soil-cement losses during 12 cycles of the wet-dry test (%)
AASHTO	Unified	
A-1	GW, GP, GM, SW, SP, SM	
A-2-4, A-2-5	GM, GC, SM, SC	14
A-3	SP	
A-2-6, A-2-7	GM, GC, SM, SC	
A-4	CL, ML,	10
A-5	ML, MH, OH	
A-6	CL, CH	
A-7	OH, MH, CH	7

ที่มา: Fang, 2013

หลังจากที่ทราบข้อมูลค่าร้อยละการสูญเสียของดินซีเมนต์ จากตาราง 22 ค่ากำลังรับแรงแกนเดียวของตัวอย่างดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ที่อายุการบ่ม 7 วัน จะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าร้อยละการสูญเสีย ที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบซัดสี โดยจะเลือกเฉพาะข้อมูลดินตะกอนกวี้นผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ในสัดส่วนที่สามารถทำการทดสอบความคงทนด้วยวิธีแบบเปียกและแห้งได้จนครบ 12 วัฏจักร ซึ่งจากการนำมาเปรียบเทียบ ดังแสดงในภาพ 45 พบว่า ในขณะที่ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สูงขึ้น ค่าร้อยละการสูญเสียก็จะมีค่าน้อยลง ซึ่งตรงและสอดคล้องกันกับปริมาณของปูนซีเมนต์ที่มีการเติมใส่เข้าไป ส่วนในประเด็นของค่าร้อยละการสูญเสียของดินตะกอนกวี้นพะเยา พบว่า ตัวอย่างนั้นเมื่อเริ่มทำการทดสอบจะเกิดการพังเสียหายก่อน ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบจนครบทั้ง 12 รอบวัฏจักรเปียกและแห้งได้เลย ดังนั้น การเติมสาร

ผสมเพิ่มอย่างปูนซีเมนต์เข้าไป นอกจากจะช่วยให้มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นแล้ว ยังส่งผลให้มิต่ำร้อยละการสูญเสียที่ลดลงด้วย ในงานวิจัยนี้ยังทำให้ทราบว่า ปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของเสถียรภาพในดินตะกอนกรวดานพะเยานั้นคือสารผสมเพิ่มอย่างปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยเฉพาะปูนซีเมนต์ที่ว่า ถึงแม้จะส่งผลให้มิต่ำกำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวเพิ่มขึ้นแล้ว นอกจากนั้นก็ยังคงส่งผลให้มิต่ำร้อยละการสูญเสียที่น้อยลงด้วย



ภาพ 45 การเปรียบเทียบค่าร้อยละการสูญเสียกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยว

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### สรุปผลการวิจัย

ในบทสรุปผลการศึกษาวิจัยในหัวข้อเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกัวนพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โดยในการทดสอบเพื่อต้องการศึกษาถึงพฤติกรรมและคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม รวมไปถึงคุณสมบัติด้านกำลังและความคงทนของดินตะกอนกัวนพะเยาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถประยุกต์ใช้กับดินตะกอนกัวนพะเยา และเป็นหลักฐานอ้างอิงแหล่งข้อมูลในด้านงานวิจัยที่เกี่ยวกับดินตะกอนกัวนพะเยา ทั้งยังเป็นการส่งเสริมให้มีการนำวัสดุเหลือใช้มาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อการบริหารจัดการโดยหน่วยงานดูแลที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเหลือใช้อย่างดินตะกอนกัวนพะเยาได้เหมาะสม โดยทดสอบสามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังนี้

#### 1. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกัวนพะเยา

จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกัวนพะเยา ด้วยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม ซึ่งพบว่า จากการทดสอบหาขีดพิคัดอัด-เตอร์เบิร์กนั้นดินตะกอนกัวนพะเยามีค่าขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และขีดจำกัดหดตัวเท่ากับ 41.7, 23.4 และ 20.4% ตามลำดับ การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะพบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72 และการทดสอบหาขนาดคละ พบว่า เม็ดดินมีขนาดผ่านตระแกรงเบอร์ 10 (2.00 mm) เบอร์ 40 (0.425 mm) และเบอร์ 200 (0.075 mm) เท่ากับ 99.3, 98.4 และ 92.0% ตามลำดับ

ส่วนการทดสอบเพิ่มเติม ได้แก่ การทดสอบ X-ray diffractometer พบว่ามีองค์ประกอบของแร่ควอตซ์ (Quartz) ที่มากถึง 98.97% และนอกจากนั้นยังพบแร่คาโอลิไนท์ (Kaolinite) กับ แร่อิลไลต์ (Illite) เป็นส่วนประกอบในปริมาณ 0.93 และ 0.09% ตามลำดับ การทดสอบ X-ray Fluorescence พบว่า มีองค์ประกอบของธาตุซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณ 59.9 และ 28.5% ตามลำดับ

โดยผลการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนกัวนพะเยาที่ได้ เมื่อนำมาเทียบการจำแนกชนิดของดินเบื้องต้นด้วยวิธีทางวิศวกรรมตามเกณฑ์ของ Unified soil classification พบว่าดินตะกอนกัวนพะเยาจัดอยู่ในกลุ่มชนิดดินแบบ CL (Low plastic clay) และเกณฑ์การจำแนกของ AASTHO พบว่าจัดอยู่ในกลุ่ม A-7-6 ซึ่งข้อมูลและคำอธิบายจากเกณฑ์

จำแนกทั้งสองแบบ พบว่า ดินตะกอนกวี้นพะเยาจัดว่าเป็นดินประเภทดินเหนียว แต่ว่าข้อมูลผลการทดสอบด้วยการทดสอบทางเคมีอย่าง XRD และ XRF โดยพบว่าดินตะกอนกวี้นพะเยาพบปริมาณของแร่ควอตซ์และธาตุซิลิกอนไดออกไซด์ประกอบอยู่จำนวนมาก โดยที่แร่ควอตซ์และธาตุซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในดินประเภททราย และแร่ควอตซ์นั้นก็เป็แร่ที่มีความเสถียรภาพสูงทำให้สลายตัวได้ยาก ดังนั้น เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการทดสอบให้ละเอียดอย่างถี่ถ้วนทั้งหมด จะพบว่า ดินตะกอนกวี้นพะเยานั้นจัดเป็นประเภทตะกอนดินเหนียวปนตะกอนทราย

## 2. การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 3, 5, 7 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง และเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20% ของน้ำหนักดินแห้งในทุก ๆ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ ในผลการทดสอบพบว่า มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดอยู่ระหว่าง 15.16–16.63  $\text{kN/m}^3$  และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 20.63 – 28.66% โดยในการนำปูนซีเมนต์และเถ้าลอยมาผสมกับดินตะกอนกวี้นพะเยานั้น พบว่า มีผลต่อการลดลงของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและการเพิ่มขึ้นของค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ถ้าอธิบายอีกความหมายหนึ่งก็คือ เมื่อใส่ปูนซีเมนต์และ/หรือเถ้าลอยเข้าไปจะทำให้ดินตะกอนมีการดูดซึมน้ำที่มากขึ้นอุมน้ำมากขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าหน่วยน้ำหนักลดลง เนื่องด้วยน้ำมีค่าหน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่าดิน ทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งลดลงและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มมากขึ้น

## 3. การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนกวี้นพะเยา โดยเป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ตามสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยผลค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ได้นั้น พบว่า จะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใส่เข้าไป และปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการทดลองนี้ พบว่า ที่อายุการบ่มก่อน 28 วันปริมาณเถ้าลอยที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่สูงที่สุดจะเท่ากับร้อยละ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ส่วนที่อายุการบ่มหลังจาก 28 วัน พบว่า ปริมาณของเถ้าลอยที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวนั้นมีค่าสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 15% ของน้ำหนักดินแห้ง นอกจากนี้ในการทดสอบนี้ที่ให้ผลค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวแล้ว ยังทำให้ทราบค่าโมดูลัสอีลาสติคที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวด้วย โดยค่าดังกล่าวนี้ได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงอัดสูงสุด และความเครียดที่จุดเดียวกันกับความเค้นครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งค่าโมดูลัสอีลาสติคที่ 50% ของ



กำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่ได้นั้น พบว่า มีพฤติกรรมแบบเดียวกันกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามปริมาณของปูนและเถ้าลอยที่ใส่เข้าไปเช่นกัน และมีความสัมพันธ์กันทางด้านการเพิ่มขึ้นของค่าข้อมูล จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอยแบบพหุคูณ พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว มีความเป็นสหสัมพันธ์เชิงบวกด้วยกันและกัน ซึ่งก็คือเมื่อไหร่ที่ค่าตัวใดตัวหนึ่งเพิ่มขึ้นหรือลดลง ค่าอีกตัวหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วย

#### 4. การวิเคราะห์แบบจำลองด้านกำลังของดินตะกอน

จากผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณของปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าลอย อายุการบ่ม และหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง นับเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่ส่งผลต่อค่ากำลังในดินตะกอนกวีานพะเยา ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กันเหล่านี้จึงทำให้เป็นที่มาของแบบจำลองค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และแบบจำลองค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ดังแสดงในบทที่ 4 ซึ่งพบว่ามีค่าความเชื่อมั่นที่สูงกว่า 80% ขึ้นไป ทั้งนี้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมายังสามารถคาดคะเน/ทำนายพฤติกรรมค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เมื่อทำการใส่สารผสมเพิ่มอย่างปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเข้าไป โดยในแบบจำลองที่ได้ในการวิจัยนับว่าเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง เช่น เกี่ยวกับการออกแบบชั้นทางที่ใช้ดินตะกอนกวีานพะเยา เป็นวัสดุ หรือประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกัดินตะกอนกวีานพะเยาได้

ส่วนประเด็นในการคำนึงถึงปัจจัยความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวกับค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงได้สร้างสมการถดถอยที่มาจากสมการที่ 4.4 และ 4.7 หลังจากการวิเคราะห์ผล จะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว โดยเป็นฟังก์ชันกับค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวดังแสดงในสมการที่ 4.8 ซึ่งจากแบบจำลองนี้ พบว่า สามารถบ่งบอกได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว นั้นมีความสัมพันธ์กันและเป็นสหสัมพันธ์เชิงบวกซึ่งกันและกัน และพบว่าอัตราส่วนค่าคงที่ของค่าโมดูลัสอีลาสติกที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวต่อค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 327.45

ส่วนแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยวิธีใช้ตัวแปรควบคุม พบว่า สามารถใช้ทำนายค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวสำหรับดินตะกอนกวีานพะเยาที่ผสมกับปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวได้เป็นอย่างดี ซึ่งในการนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในงานออกแบบ โดยปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 3-10 เปอร์เซ็นต์ และอายุการบ่มควรจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 7-120 วัน ส่วน

ค่าปริมาณความชื้นที่ใช้ออกแบบก็ควรจะอยู่ในช่วงของค่าที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานตามในงานวิจัยจากวิทยานิพนธ์นี้

ดังนั้น การนำแบบจำลองที่ได้จากในงานวิจัยนี้ไปใช้งาน ทั้งแบบจำลองแบบสมการ ถดถอยพหุคูณและแบบจำลองด้วยการใช้ตัวแปรควบคุม ซึ่งทั้งสองแบบจำลองที่ได้ดังกล่าว สามารถใช้ในการทำนายค่าข้อมูลค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวได้เป็นอย่างดีทั้งสองแบบจำลอง แต่ขอบเขตของการใช้งานตัวแปรต่าง ๆ จากในแบบจำลองก็ควรอยู่ในช่วงของโปรแกรมการทดสอบที่เกิดขึ้นตามในงานวิทยานิพนธ์นี้ด้วย จึงจะทำให้ได้ค่าที่มีความเหมาะสมและมีความน่าเชื่อถือสูงสุด

### 5. การทดสอบความคงทนด้วยวิธีแบบเปียกและแห้ง

จากการทดสอบความคงทนด้วยวิธีการทดสอบแบบเปียกและแห้งของดินตะกอน กวีนพะเยา โดยตัวอย่างดินตะกอนจะทำการผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยตามปริมาณที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว จากการทดสอบพบว่าค่าร้อยละการสูญเสียที่ต่ำที่สุดในการทดสอบทั้งหมดจะมีค่าตั้งแต่ 7 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป

โดยในตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% ตัวอย่างจะมีการพังเสียหายระหว่างการทดสอบก่อนที่จะทดสอบครบ 12 วัฏจักรเป็นส่วนใหญ่ ส่วนตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์มากกว่า 5% จะมีค่าร้อยละการสูญเสียที่น้อยกว่าตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% และโดยส่วนใหญ่ จะพบว่า สามารถทำการทดสอบจนครบวัฏจักรเปียกและแห้งทั้ง 12 วัฏจักรได้

ดังนั้น ในปัจจุบันการใส่ปูนซีเมนต์เข้าไป ปริมาณของปูนซีเมนต์ส่งผลโดยตรงต่อค่าร้อยละการสูญเสียของตัวอย่างทดสอบ โดยในตัวอย่างที่ผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก พบว่า ค่าร้อยละการสูญเสียจะลดน้อยลง แต่ถ้ามีปริมาณของปูนซีเมนต์ที่น้อยลงก็จะส่งผลให้ค่าอัตราการสูญเสียมีค่าที่มากขึ้น และปัจจุบันการใส่เถ้าลอยเข้าไป พบว่า จะมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายกับปูนซีเมนต์โดยเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น ค่าอัตราร้อยละการสูญเสียก็จะลดน้อยลงเช่นกัน

### การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากผลงานวิจัย

1. แบบจำลองที่ได้จากในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นต้นแบบและพื้นฐานของงานวิจัยต่อยอดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดินตะกอนกวีนพะเยาได้

2. แบบจำลองที่ได้จากในงานวิจัยนี้สามารถใช้ในการออกแบบดินตะกอนกวี้นพะเยาที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเพื่อใช้สำหรับงานทาง และการปรับปรุงคุณภาพของดินตะกอนกวี้นพะเยาในงานอื่น ๆ ได้

3. งานวิจัยนี้สามารถเป็นหลักฐานอ้างอิงที่วิจัยเกี่ยวกับดินตะกอนกวี้นพะเยาเพื่อการบูรณาการกับวัสดุในท้องถิ่น และเป็นประโยชน์กับหน่วยงานราชการที่ดูแลดินตะกอนกวี้นพะเยาสำหรับการบริหารจัดการกับวัสดุเหลือใช้ที่ขาดการใช้งานอย่างเกิดประโยชน์สูงสุด

4. สามารถที่จะประยุกต์ดินตะกอนกวี้นพะเยาให้สามารถใช้งานที่หลากหลายมากขึ้นอย่างเช่น การนำดินตะกอนไปออกแบบเป็นวัสดุชั้นทางต่อไปได้

### ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาด้านกำลังของดินตะกอนกวี้นพะเยา ถ้าต้องการที่จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนกวี้นพะเยามีค่าสูงขึ้นย่อมทำได้โดยการเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์เข้าไป แต่ปัญหาที่ตามมาก็คือค่าใช้จ่ายที่สูงย่อมเกิดขึ้น ดังนั้น จึงมีการใช้สารผสมเพิ่มอื่น ๆ อย่างเถ้าลอยแทนที่เข้าไปเพื่อเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ และทำให้ค่ากำลังมีค่าที่สูงขึ้น ดังนั้น วิธีการแก้ไขปัญหาก็เหมาะสมควรจะทำการปรับปรุงดินตะกอนกวี้นพะเยาในทางด้านกายภาพของก้อน เช่น การผสมทรายเข้าไปเพื่อให้ดินมีความเสถียรภาพที่ดีขึ้น และสามารถส่งผลให้สามารถลดปริมาณในการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้อีกด้วย

แต่ในการใช้งานจริงย่อมมีมากกว่าหนึ่งปัจจัยที่จะเป็นตัวควบคุมคุณภาพของดินตะกอน ดังนั้น ควรมีการทดสอบและมีการวิจัยเพิ่มเติมอื่นเข้าไปด้วย เพื่อการใช้งานได้อย่างยั่งยืนและก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีอย่างสูงสุด

ส่วนในการใส่สารผสมเพิ่มอื่น ๆ เข้าไป เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเอาวัสดุเหลือใช้อย่างเถ้าชีวมวล (Biomass ash) หรือกากของเสียภายในโรงงานอย่างกากแคลเซียม-คาร์ไบด์มาใช้วิจัยเพิ่มเติม ซึ่งวัสดุเหลือใช้เหล่านี้ ย่อมเกิดเป็นวัสดุเหลือใช้ในและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการประยุกต์ดินตะกอนกวี้นพะเยาเข้าร่วมกับวัสดุอื่น ๆ ให้มากยิ่งขึ้นเพื่อศึกษาและเป็นการรณรงค์ให้เอาวัสดุอื่น ๆ มาวิจัยเพิ่มเติม และให้ตอบเจตนาในหัวข้อการนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิลได้



บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

- กรมทางหลวง. (7 กุมภาพันธ์ 2532). **มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ ทล.-ม. 206/2532.** สืบค้นเมื่อ 22 เมษายน 2558, จาก <http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs206-32.pdf>
- กรมทางหลวง. (15 พฤศจิกายน 2556). **มาตรฐานรองพื้นทางดินซีเมนต์ ทล.-ม. 204/2556.** สืบค้นเมื่อ 22 เมษายน 2558, จาก <http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs204-56.pdf>
- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2546) **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ้ำลอยจากถ่านหินใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตมาตรฐาน มอก. 2135-2545**
- เกริก ตั้งสกุล, ปิยะวัฒน์ ทองเกรียว และ ศราวุธ ศรีตัมภวา. (2552). **ความคงทนของดินลมหอบขอนแก่นที่ถูกรับปรุงคุณภาพโดยซีเมนต์และซีเถ้ากลบสำหรับงานถนน.** ปริญญาณิพนธ์ วศ.บ., มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- เกียรติศักดิ์ กลับเพชร, ธนากร คำวงศ์, ชีระ สารยศ และพัฒน์พงศ์ ไฉนงุ่น. (2548). **กำลังและพฤติกรรมของดินลมหอบแบบขอนแก่นที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยซีเมนต์และถ้ำลอย.** ปริญญาณิพนธ์ วศ.บ., มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- จังหวัดพะเยา. (28 กุมภาพันธ์ 2556) พย 0017.2/ว 1106. **การประชุมโครงการพัฒนาคว้านพะเยาอันเนื่องมาจากพระราชดำริ.**
- พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535. (20 ตุลาคม 2547). **ราชกิจจานุเบกษา.** 121(119 ง). หน้า 170-181.
- พงศกร พรรณรัตน์ศิลป์. (2-4 พฤษภาคม 2548). **พฤติกรรมและกำลังของดินลมหอบที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์และถ้ำลอย. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10** (หน้า 317-322). ชลบุรี: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- วรรณชัย เกษกัน. (2548). **กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินเม็ดหยาบผสมซีเมนต์บดอัด.** วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

วิจิตรอัจฉรา สรรพกิจจำนง, ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก และบุญเลิศ พัดฉวี (2536). เก็บถอยในในงานทาง. ใน **รายงานฉบับที่ วพ.131**. กรุงเทพฯ: กรมทางหลวงสำนักวิจัยและพัฒนาทางทาง.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. (2540). **ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

สนธยา แพทย์โนทัย. (2548). **กำลังอัดของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์บดอัด**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

สมชัย กกกำแหง (2536). การนำถั่วลอชลีกไนต์มาใช้ในงานก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ใน **การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2536**. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

สำนักงานจังหวัดพะเยา. (ม.ป.ป.). **บรรยายสรุปจังหวัดพะเยา**. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2560, จาก [www.phayao.go.th/au/all\\_phayao\\_2556.pdf](http://www.phayao.go.th/au/all_phayao_2556.pdf)

หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา. (2551). **รายงานประจำปีหน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา**. พะเยา.

หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา. (2552). **รายงานประจำปีหน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา**. พะเยา.

หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา. (2553). **รายงานประจำปีหน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา**. พะเยา.

หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา. (2554). **รายงานประจำปีหน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา**. พะเยา.

หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา. (2555). **รายงานประจำปีหน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา**. พะเยา.

หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา. (2556). **รายงานประจำปีหน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา**. พะเยา.

หน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา. (2557). **รายงานประจำปีหน่วยงานควบคุมและกำจัดวัชพืชจังหวัดพะเยา**. พะเยา.

อภิชาติ คำภาหาล้า, วรรัชย์ เกษกัน และสุชสันต์ หอพิบูลสุข. (2-4 พฤษภาคม 2550). กำลังกัด  
 แกรนเดียมของดินเหนียวปนดินตะกอนผสมซีเมนต์และเถ้าแกลบ. ใน **เอกสาร  
 ประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12** (หน้า 176-182).  
 พิษณุโลก: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

American Society for Testing and Materials. (1989). **ASTM D 422-63: Standard Test  
 Method for particle size analysis of soils.** West Conshohocken, Pennsylvania:  
 n.p.

American Society for Testing and Material. (1995a). **ASTM D427-95: Test Method for  
 Shrinkage Factor of Soil by the Mercury Method.** West Conshohocken,  
 Pennsylvania: n.p.

American Society for Testing and Material. (1995b). **ASTM D4318-95: Standard Test  
 Method for Liquid Limit Plastic Limit and Plasticity Index of Soils.** West  
 Conshohocken, Pennsylvania: n.p.

American society for testing and material. (1996). **ASTM D 559-96: Standard test  
 method for wetting and drying compacted soil-cement mixture.** West  
 Conshohocken, Pennsylvania: n.p.

American Society for Testing and Materials. (1997). **ASTM D 854-92: Standard Test  
 Method for specific gravity of soils.** West Conshohocken, Pennsylvania: n.p.

American society for testing and material. (2006a). **ASTM D 2166-06: Standard test  
 method for unconfined compressive strength of cohesive soils.** West  
 Conshohocken, Pennsylvania: n.p.

American Society for Testing and Material. (2006b). **ASTM D 2487-06: Standard  
 practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil  
 classification system).** West Conshohocken, Pennsylvania: n.p.

American Society for Testing and Materials. (2007). **ASTM D1557-07: Standard Test  
 Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using  
 Modified Effort.** West Conshohocken, Pennsylvania: n.p.

- American Society for Testing and Materials. (2008). **ASTM C618 – 08: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. West Conshohocken, Pennsylvania: n.p.
- Circeo, L. J., Davidson, D. T. and David, H. T. (January 8–12 1962). Strength maturity relation of soil–cement mixture. In **Iowa State University for 41<sup>th</sup> Annual Meeting of the Highway Research Board** (pp. 35–45). Washington DC, USA: National Research Council.
- Fang, H. Y. (2013). **Foundation Engineering Handbook**. New York: Springer Science+Business Media.
- Gordon, R. G. (1984). Recent experiences and developments in design and construction of cement stabilized pavement. In Australian Road Research Board (Ed.), **21<sup>st</sup> ARRB Regional Symposium** (pp. 140–154). Darwin, Australia: Vermont South.
- Hausmann. (1990). **Engineering Principles of Ground Modification**. Sydney: McGraw–Hill Publ.
- Highway Research Board Committee on Soil–Cement Stabilization. (1959). Definition of term Relating to Soil–Portland Cement Stabilization. **Highway Research Abstracts**. 6(29), 28–129.
- Horpibulsuk, S., Miura, N. and Nagaraj, T. S. (2005). Clay–water/cement ratio identity for cement admixed soft clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**. 131(2), 187–192.
- Jaritngam, S., Yandell, W. O. and Taneerananon, P. (2013). Development of Strength Model of Lateritic Soil–Cement. **ENGINEERING JOURNAL**. 17(1), 69–78.
- Lambe, T. W., Mitcheals, A. S. and Moh, Z. C. (1959). Improvements of Soil Cement with Alkali Metal Compounds. **Highway Research Board Bulletin**. 241, 67–103.
- Mitchell, J. K. (June 1981). Soil Improvement–State of The Art. In **Proceedings of the 14<sup>th</sup> international conference on soil mechanics and foundation engineering** (509–565). Stockholm, Sweden: The international conference on soil mechanics and foundation engineering.



- Mitchell, J. K. and El Jack, S. A. (August 23–26 1965). The Fabric of Clay Cement and Its Formation. In **14<sup>th</sup> North American Clay Minerals Conference** (pp. 297–305). California: University of California.
- Moh, Z. C. (1962). Soil stabilization with cement and sodium additive. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division: SMFD**, 88(6), 81–105.
- Moh, Z. C. (1965). Reaction of soil minerals with cement and chemicals. **Highway Research Record**. 86, 39–61.
- National Association of Australian State Road Authorities. (1988). **Guide to traffic Engineering Practice**. Sydney: n.p.
- Ruenkrairergsa, T. (1982). **Principle of soil stabilization**. Bangkok, Thailand: Department of Highways.
- Ruenkrairergsa, T. (1989). **Development of soil cement road in Thailand**. Bangkok, Thailand: Department of Highways.
- Likitlersuang, S. and Chompoorat, T. (2016). Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures. **International Journal of Pavement Research and Technology**, 9(5), 337–344.
- Transport and Road Research Laboratory (TRRL). (1963). **A method of measuring saturation Flow at traffic signals**. London: HMSO.
- United States Air Force (1966). Manual AFM 88–51 Materials Testing. **Department of the Air Force**. New York: n.p.
- Wilmot, T.D. (1995). Selection of Additive for Stabilization and Recycling of Road Pavement. **Pavement Rehabilitation Workshop** (pp. 1–14). Queensland, Australia: n.p.

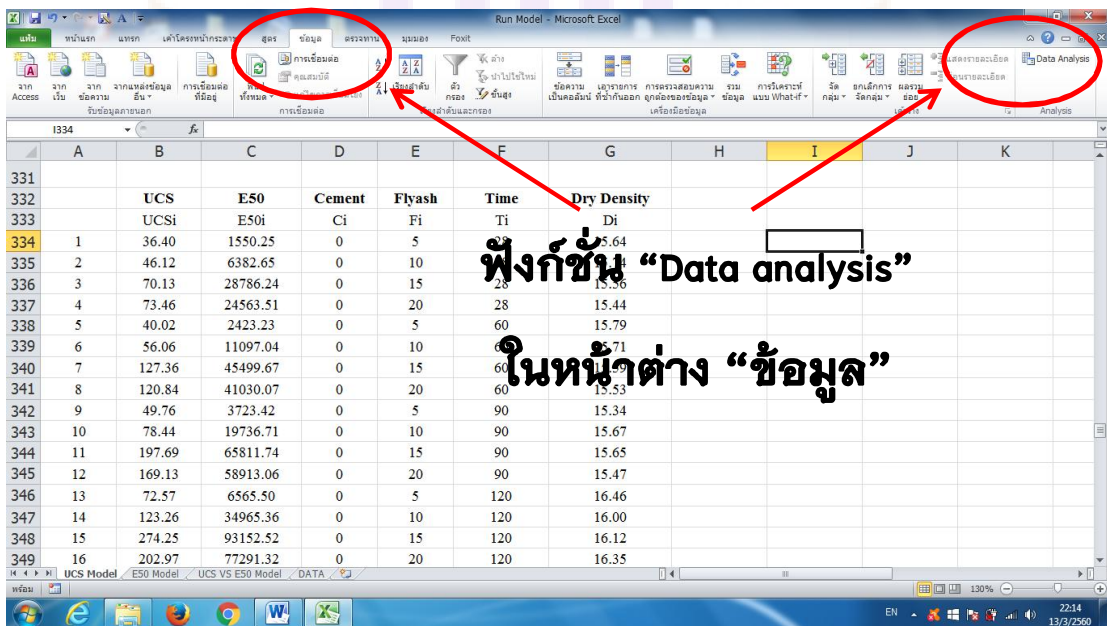


ภาคผนวก

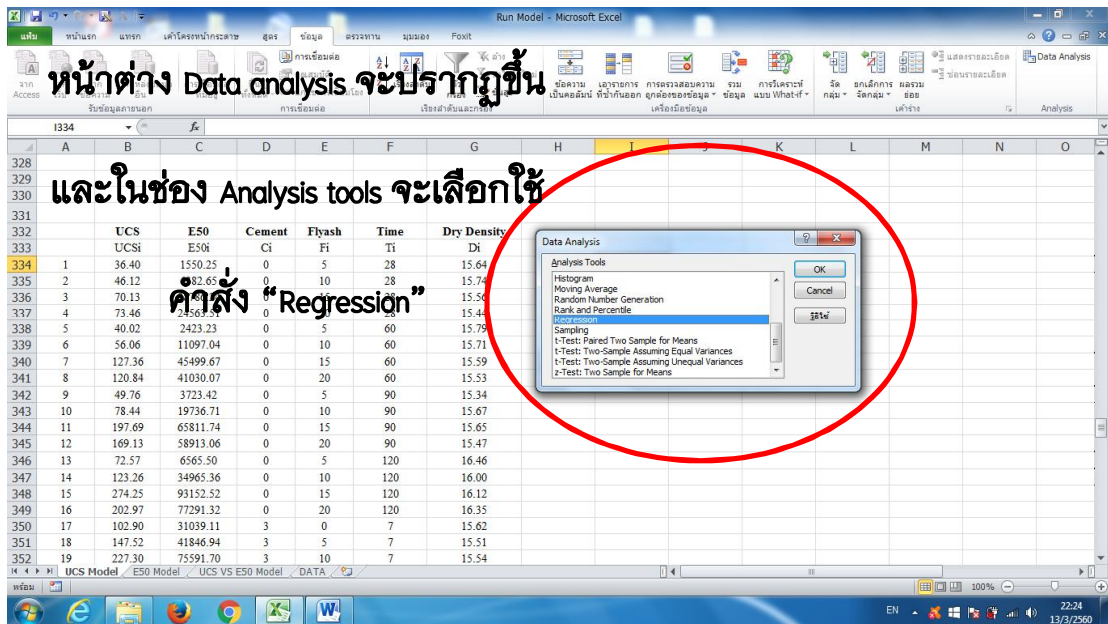
ภาคผนวก ก ภาพประกอบการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยโปรแกรม Microsoft excel

	UCS	E50	Cement	Flyash	Time	Dry Density	
333	UCSi	E50i	Ci	Fi	Ti	Di	
334	1	36.40	1550.25	0	5	28	15.64
335	2	46.12	6382.65	0	10	28	15.74
336	3	70.13	28786.24	0	15	28	15.56
337	4	73.46	24563.51	0	20	28	15.44
338	5	40.02	2423.23	0	5	60	15.79
339	6	56.06	11097.04	0	10	60	15.71
340	7	127.36	45499.67	0	15	60	15.59
341	8	120.84	41030.07	0	20	60	15.53
342	9	49.76	3723.42	0	5	90	15.34
343	10	78.44	19736.71	0	10	90	15.67
344	11	197.69	65811.74	0	15	90	15.65
345	12	169.13	58913.06	0	20	90	15.47
346	13	72.57	6565.50	0	5	120	16.46
347	14	123.26	34965.36	0	10	120	16.00
348	15	274.25	93152.52	0	15	120	16.12
349	16	202.97	77291.32	0	20	120	16.35

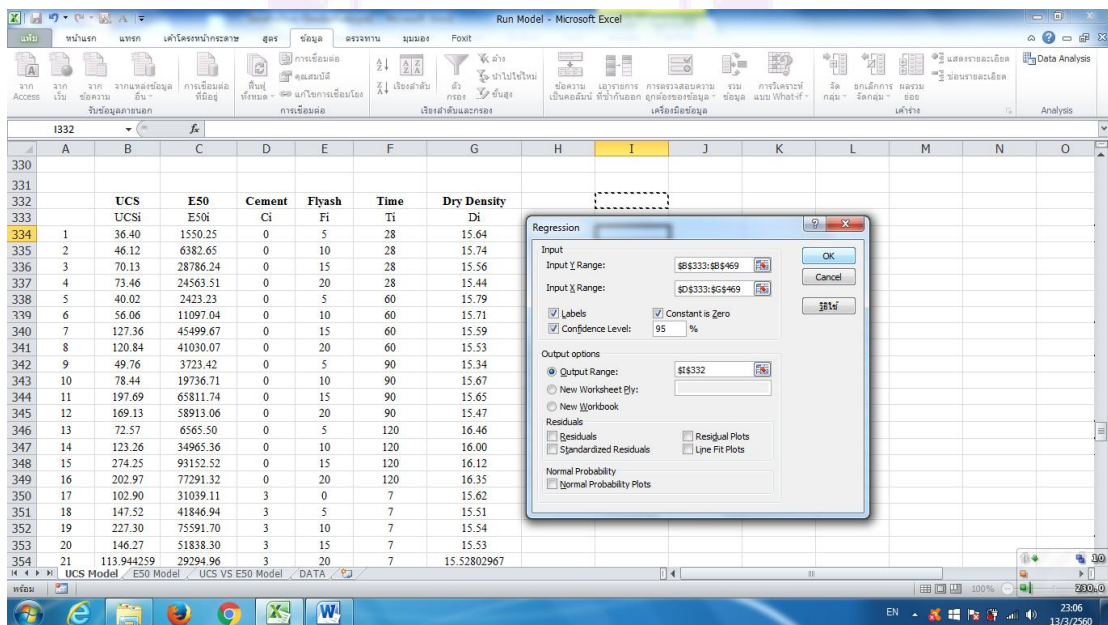
ภาพ 46 ข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ป้อนลงไปโปรแกรม Microsoft excel



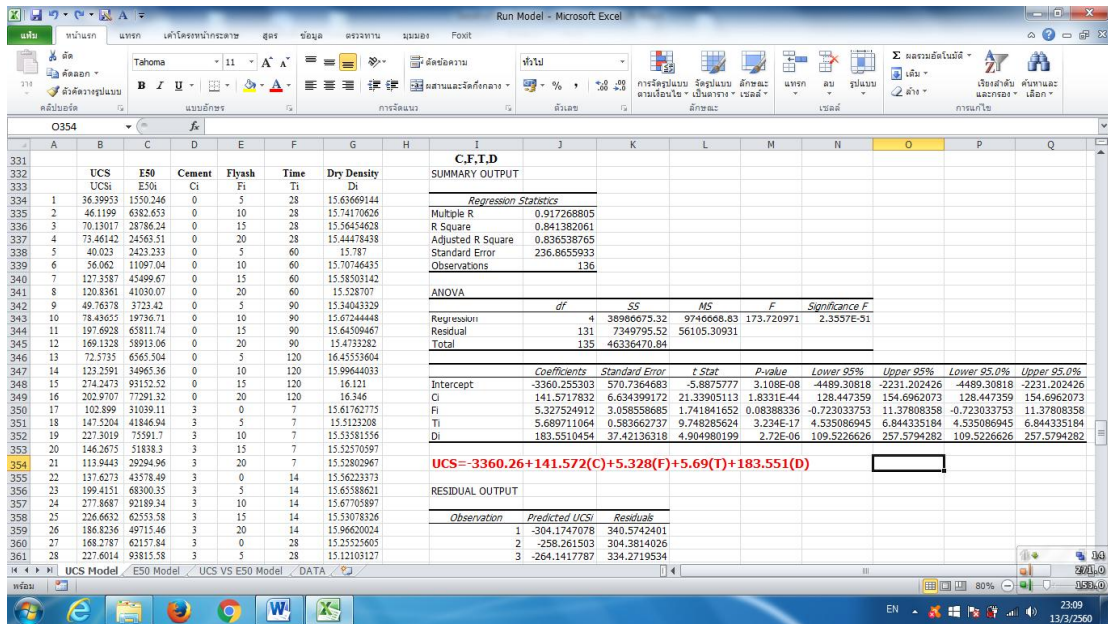
ภาพ 47 ขั้นตอนการเปิดใช้ฟังก์ชัน Data analysis



ภาพ 48 ขั้นตอนการเลือกใช้คำสั่ง Regression ใน Analysis tool



ภาพ 49 ขั้นตอนในการป้อนข้อมูลทั้งตัวแปรต้นและตัวแปรตามบนฟังก์ชัน Regression



ภาพ 50 ผลการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Regression ในโปรแกรม Microsoft excel

ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ตาราง 23 ข้อมูลผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ปริมาณปูนซีเมนต์ (%)	ปริมาณเถ้าลอย (%)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%)	หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (kN/m <sup>3</sup> )
0	0	19.038	16.622
	5	20.453	16.481
	10	21.022	16.183
	15	21.988	15.867
	20	22.412	15.583
3	0	20.628	16.524
	5	21.787	16.228
	10	23.037	15.914
	15	23.816	15.693
	20	24.635	15.424
5	0	22.077	16.410
	5	23.586	16.165
	10	24.088	15.884
	15	24.377	15.646
	20	25.645	15.380
7	0	23.415	16.242
	5	24.611	16.080
	10	25.630	15.825
	15	26.292	15.654
	20	27.390	15.450
10	0	24.151	16.135
	5	25.738	15.854
	10	26.429	15.640
	15	27.986	15.388
	20	28.659	15.162

ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับแแกนเดี่ยว

ตาราง 24 ข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับแแกนเดี่ยว

จำนวน	ปริมาณ ปูนซีเมนต์ (%)	ปริมาณ ถ้ำลอย (%)	เวลาใน การบ่ม (วัน)	UCS (kPa)	ความเครียด ณ จุดวิบัติ (%)	$E^{50}$ (kPa)	หน่วย น้ำหนักแห้ง (kN/m <sup>3</sup> )
1	0	0	7	0.000	0.00000	0.000	0.000
2	0	5	7	0.000	0.00000	0.000	0.000
3	0	10	7	0.000	0.00000	0.000	0.000
4	0	15	7	0.000	0.00000	0.000	0.000
5	0	20	7	0.000	0.00000	0.000	0.000
6	3	0	7	102.899	0.00507	31039.107	15.618
7	3	5	7	147.520	0.00544	41846.944	15.512
8	3	10	7	227.302	0.00502	75591.699	15.536
9	3	15	7	146.268	0.00373	51838.301	15.526
10	3	20	7	113.944	0.00310	29294.960	15.528
11	5	0	7	180.758	0.00227	85568.572	15.701
12	5	5	7	238.924	0.00235	123299.459	15.699
13	5	10	7	324.615	0.00327	136316.608	15.630
14	5	15	7	223.601	0.00454	99098.561	15.775
15	5	20	7	175.784	0.00332	83638.179	15.594
16	7	0	7	251.403	0.00181	159332.962	15.767
17	7	5	7	311.741	0.00311	183192.962	15.603
18	7	10	7	398.662	0.00684	206078.333	15.443
19	7	15	7	332.887	0.00437	185939.341	15.561
20	7	20	7	250.799	0.00261	155853.107	15.321
21	10	0	7	362.433	0.00261	206591.312	15.841
22	10	5	7	446.080	0.00242	261394.336	16.030
23	10	10	7	551.958	0.00401	277851.930	15.816
24	10	15	7	435.426	0.00443	248436.041	14.780
25	10	20	7	372.228	0.00758	197721.466	15.413
26	0	0	14	0.000	0.00000	0.000	0.000
27	0	5	14	0.000	0.00000	0.000	0.000
28	0	10	14	0.000	0.00000	0.000	0.000
29	0	15	14	0.000	0.00000	0.000	0.000
30	0	20	14	0.000	0.00000	0.000	0.000
31	3	0	14	137.627	0.00473	43578.493	15.562
32	3	5	14	199.415	0.00676	68300.345	15.656

ตาราง 24 (ต่อ)

จำนวน	ปริมาณ ปูนซีเมนต์ (%)	ปริมาณ เถ้าลอย (%)	เวลาใน การบ่ม (วัน)	UCS (kPa)	ความเครียด ณ จุดวิบัติ (%)	$E^{50}$ (kPa)	หน่วย น้ำหนักแห้ง ( $\text{kN/m}^3$ )
33	3	10	14	277.869	0.00451	92189.343	15.677
34	3	15	14	226.663	0.00582	62553.579	15.531
35	3	20	14	186.824	0.00367	49715.458	15.966
36	5	0	14	407.725	0.00488	137044.559	15.860
37	5	5	14	546.639	0.00612	162679.892	15.570
38	5	10	14	698.405	0.00642	199662.082	15.767
39	5	15	14	556.356	0.00545	153078.191	15.677
40	5	20	14	445.007	0.00490	118267.387	15.537
41	7	0	14	592.618	0.00425	200796.524	16.069
42	7	5	14	811.970	0.00451	227009.675	15.966
43	7	10	14	970.813	0.00440	263251.479	15.753
44	7	15	14	780.765	0.00499	231042.602	15.753
45	7	20	14	668.430	0.00428	198169.931	15.832
46	10	0	14	769.299	0.00406	236960.249	15.560
47	10	5	14	969.796	0.00376	286866.525	15.685
48	10	10	14	1115.869	0.00620	319196.032	15.838
49	10	15	14	965.517	0.00551	272002.146	15.167
50	10	20	14	815.031	0.00576	245511.789	15.382
51	0	0	28	0.000	0.00000	0.000	0.000
52	0	5	28	36.400	0.03029	1550.246	15.637
53	0	10	28	46.120	0.00810	6382.653	15.742
54	0	15	28	70.130	0.00554	28786.243	15.565
55	0	20	28	73.461	0.00657	24563.511	15.445
56	3	0	28	168.279	0.00325	62157.840	15.255
57	3	5	28	227.601	0.00297	93815.578	15.121
58	3	10	28	328.613	0.00407	121968.006	16.157
59	3	15	28	298.602	0.00284	120157.356	16.831
60	3	20	28	271.517	0.00205	89624.326	16.839
61	5	0	28	443.356	0.00319	178749.561	15.504
62	5	5	28	590.562	0.00348	221373.592	16.681
63	5	10	28	770.865	0.00394	259125.893	16.709
64	5	15	28	647.062	0.00417	250045.616	16.623
65	5	20	28	511.921	0.00471	214772.543	16.746
66	7	0	28	746.603	0.00221	278256.794	15.255
67	7	5	28	918.459	0.00336	317032.262	16.651



ตาราง 24 (ต่อ)

จำนวน	ปริมาณ ปูนซีเมนต์ (%)	ปริมาณ เถ้าลอย (%)	เวลาใน การบ่ม (วัน)	UCS (kPa)	ความเครียด ณ จุดวิบัติ (%)	$E^{50}$ (kPa)	หน่วย น้ำหนักแห้ง ( $\text{kN/m}^3$ )
68	7	10	28	1138.866	0.00339	367218.280	16.568
69	7	15	28	936.351	0.00328	321886.049	16.215
70	7	20	28	812.909	0.00304	284326.970	16.127
71	10	0	28	1004.084	0.00555	340037.897	15.355
72	10	5	28	1241.826	0.00429	393682.943	16.201
73	10	10	28	1433.735	0.00352	448201.173	16.247
74	10	15	28	1236.156	0.00369	392290.483	16.288
75	10	20	28	1021.683	0.00297	364438.755	15.678
76	0	0	60	0.000	0.00000	0.000	0.000
77	0	5	60	40.023	0.00788	2423.233	15.787
78	0	10	60	56.062	0.00724	11097.039	15.707
79	0	15	60	127.359	0.00301	45499.670	15.585
80	0	20	60	120.836	0.00405	41030.067	15.529
81	3	0	60	188.683	0.00401	79179.659	15.365
82	3	5	60	252.380	0.00322	102735.528	15.331
83	3	10	60	435.385	0.00451	130957.456	16.230
84	3	15	60	442.912	0.00305	131258.454	16.950
85	3	20	60	406.477	0.00419	119810.354	16.732
86	5	0	60	491.437	0.00493	193601.933	15.385
87	5	5	60	627.930	0.00400	261344.542	16.940
88	5	10	60	811.207	0.00286	294803.519	16.683
89	5	15	60	744.250	0.00262	290631.530	16.702
90	5	20	60	623.877	0.00493	262692.486	16.481
91	7	0	60	853.634	0.00361	338296.625	15.174
92	7	5	60	1043.091	0.00421	416894.092	16.760
93	7	10	60	1283.849	0.00352	463709.141	16.914
94	7	15	60	1261.739	0.00311	470488.823	16.160
95	7	20	60	1125.988	0.00315	435162.188	16.287
96	10	0	60	1346.974	0.00413	428972.215	15.501
97	10	5	60	1583.886	0.00524	533996.617	16.290
98	10	10	60	1754.266	0.00365	608262.960	16.447
99	10	15	60	1719.943	0.00429	598156.540	16.366
100	10	20	60	1445.722	0.00390	523731.931	15.326
101	0	0	90	0.000	0.00000	0.000	0.000
102	0	5	90	49.764	0.02322	3723.420	15.340

ตาราง 24 (ต่อ)

จำนวน	ปริมาณ ปูนซีเมนต์ (%)	ปริมาณ เถ้าลอย (%)	เวลาใน การบ่ม (วัน)	UCS (kPa)	ความเครียด ณ จุดวิบัติ (%)	$E^{50}$ (kPa)	หน่วย น้ำหนักแห้ง ( $\text{kN/m}^3$ )
103	0	10	90	78.437	0.00770	19736.707	15.672
104	0	15	90	197.693	0.00535	65811.742	15.645
105	0	20	90	169.133	0.00407	58913.063	15.473
106	3	0	90	213.085	0.00346	92007.893	15.215
107	3	5	90	310.106	0.00243	134798.912	15.301
108	3	10	90	616.168	0.00494	158747.068	16.339
109	3	15	90	672.490	0.00447	162208.965	16.790
110	3	20	90	626.489	0.00419	135412.028	16.757
111	5	0	90	525.720	0.00330	215640.248	15.291
112	5	5	90	744.350	0.00424	292979.229	16.776
113	5	10	90	869.430	0.00406	334875.536	16.916
114	5	15	90	920.408	0.00549	349073.742	16.702
115	5	20	90	776.782	0.00473	302869.069	16.260
116	7	0	90	910.294	0.00346	384175.963	15.249
117	7	5	90	1119.713	0.00506	454680.826	16.349
118	7	10	90	1410.531	0.00360	495040.094	16.522
119	7	15	90	1541.528	0.00420	512660.190	16.278
120	7	20	90	1212.724	0.00381	463304.633	16.351
121	10	0	90	1555.747	0.00499	486771.439	15.325
122	10	5	90	1986.364	0.00443	570607.424	16.775
123	10	10	90	2232.822	0.00463	657208.440	16.309
124	10	15	90	2278.040	0.00499	670284.248	16.216
125	10	20	90	1788.477	0.00425	568115.979	15.835
126	0	0	120	0.000	0.00000	0.000	0.000
127	0	5	120	72.574	0.00599	6565.504	16.456
128	0	10	120	123.259	0.00555	34965.356	15.996
129	0	15	120	274.247	0.00483	93152.522	16.121
130	0	20	120	202.971	0.00446	77291.318	16.346
131	3	0	120	304.345	0.00310	128819.931	15.500
132	3	5	120	432.257	0.00322	147118.984	15.982
133	3	10	120	664.425	0.00395	189501.172	17.211
134	3	15	120	855.534	0.00479	206234.197	16.820
135	3	20	120	783.771	0.00429	191648.525	16.898
136	5	0	120	608.242	0.00311	231113.814	15.577
137	5	5	120	812.656	0.00265	323,534.14	17.051

ตาราง 24 (ต่อ)

จำนวน	ปริมาณ ปูนซีเมนต์ (%)	ปริมาณ เถ้าลอย (%)	เวลาใน การบ่ม (วัน)	$UCS$ (kPa)	ความเครียด ณ จุดวิบัติ (%)	$E^{50}$ (kPa)	หน่วย น้ำหนักแห้ง ( $kN/m^3$ )
138	5	10	120	936.216	0.00369	385,261.13	17.097
139	5	15	120	1039.277	0.00386	405,158.59	17.207
140	5	20	120	912.991	0.00378	381,777.19	17.55
141	7	0	120	956.714	0.00406	426,485.95	15.893
142	7	5	120	1202.796	0.00500	524,217.77	17.085
143	7	10	120	1676.725	0.00403	587,991.03	17.481
144	7	15	120	1815.535	0.00394	593,529.64	17.158
145	7	20	120	1419.339	0.00331	530,673.98	16.536
146	10	0	120	1792.839	0.00287	530,310.16	15.559
147	10	5	120	2209.276	0.00522	625,472.12	17.002
148	10	10	120	2563.19	0.00490	763,471.74	17.218
149	10	15	120	2655.006	0.00438	775,565.87	19.213
150	10	20	120	2080.941	0.00564	635,636.10	16.339

หมายเหตุ:  $UCS$  คือ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)

$E^{50}$  คือ ค่าอีลาสติคโมดูลัสที่ 50 % ของกำลังประลัย (Modulus elastic at 50% of maximum compressive strength)

ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้ง

ตาราง 25 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F0

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1831.84				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1829.14			
	น้ำหนักแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	น้ำหนักแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)	
1	1567.280	14.442	14.442	14.442	1567.670	14.295	14.295	14.295
2	1468.930	19.811	6.275	20.718	1455.650	20.419	7.146	21.440

ตาราง 26 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F5

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1898.08				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1889.14			
	น้ำหนักแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	น้ำหนักแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)	
1	1636.680	13.772	13.772	13.772	1641.520	13.538	13.538	13.538
2	1586.090	16.437	3.091	16.863	1612.650	15.116	1.759	15.296

ตาราง 27 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F10

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1882.22				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1842.06			
	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสีย	ร้อยละการ สูญเสียในแต่ ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสียสะสม	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสีย	ร้อยละการ สูญเสียใน แต่ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสีย สะสม
(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)	
1	1659.730	11.821	11.821	11.821	1633.660	11.313	11.313	11.313
2	1643.950	12.659	0.951	12.771	1624.910	11.788	0.536	11.849
3	1636.560	13.052	0.450	13.221	1617.340	12.199	0.466	12.315
4	1595.760	15.219	2.493	15.714	1570.710	14.731	2.883	15.198
5	1584.380	15.824	0.713	16.427	1561.130	15.251	0.610	15.808
6	-	-	-	-	1552.380	15.726	0.560	16.368

ตาราง 28 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F15

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1877.00				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1866.56			
	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสีย	ร้อยละการ สูญเสียในแต่ ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสียสะสม	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสีย	ร้อยละการ สูญเสียใน แต่ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสีย สะสม
(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)	
1	1667.510	11.161	11.161	11.161	1666.660	10.710	10.710	10.710

ตาราง 29 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C3F20

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1811.79				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1873.37			
	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสีย	ร้อยละการ สูญเสียในแต่ ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสียสะสม	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสีย	ร้อยละการ สูญเสียใน แต่ละ วัฏจักร	ร้อยละการ สูญเสีย สะสม
(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)	
1	1626.150	10.246	10.246	10.246	1689.040	9.839	9.839	9.839

ตาราง 30 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F0

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1887.47				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1826.34			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1640.690	13.075	13.075	13.075	1600.420	12.370	12.370	12.370
2	1612.650	14.560	1.709	14.784	1571.580	13.949	1.802	14.172
3	1592.300	15.638	1.262	16.046	1550.180	15.121	1.362	15.534
4	1575.390	16.534	1.062	17.108	1532.270	16.102	1.155	16.689
5	1546.340	18.073	1.844	18.952	1504.280	17.634	1.827	18.516
6	1536.040	18.619	0.666	19.618	-	-	-	-
7	1515.910	19.686	1.311	20.928	-	-	-	-
8	1512.680	19.857	0.213	21.141	-	-	-	-
9	1490.700	21.021	1.453	22.594	-	-	-	-

ตาราง 31 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F5

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1941.89				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1943.57			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1728.690	10.979	10.979	10.979	1736.570	10.651	10.651	10.651
2	1720.560	11.398	0.470	11.449	1707.610	12.141	1.668	12.318
3	1680.730	13.449	2.315	13.764	1695.890	12.744	0.686	13.004
4	1679.880	13.493	0.051	13.815	1693.800	12.851	0.123	13.128
5	1675.480	13.719	0.262	14.077	1686.040	13.250	0.458	13.586
6	1660.640	14.483	0.886	14.962	1677.800	13.674	0.489	14.075
7	1639.230	15.586	1.289	16.252	1671.060	14.021	0.402	14.476
8	1626.100	16.262	0.801	17.053	1668.020	14.178	0.182	14.658
9	1617.990	16.680	0.499	17.551	1659.290	14.627	0.523	15.182
10	1605.770	17.309	0.755	18.307	1650.390	15.085	0.536	15.718
11	1590.790	18.080	0.933	19.240	1636.590	15.795	0.836	16.554
12	1577.510	18.764	0.835	20.074	1634.260	15.915	0.142	16.697

ตาราง 32 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F10

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1857.56				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1860.37			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1684.560	9.313	9.313	9.313	1700.350	8.602	8.602	8.602
2	1659.550	10.660	1.485	10.798	1674.320	10.001	1.531	10.132
3	1640.120	11.706	1.171	11.969	1664.330	10.538	0.597	10.729
4	1634.440	12.011	0.346	12.315	1659.320	10.807	0.301	11.030
5	1630.220	12.239	0.258	12.573	1651.120	11.248	0.494	11.524
6	1623.640	12.593	0.404	12.977	1648.370	11.396	0.167	11.691
7	1619.950	12.792	0.227	13.204	1637.920	11.957	0.634	12.325
8	1602.280	13.743	1.091	14.295	1630.640	12.349	0.444	12.769
9	1598.430	13.950	0.240	14.535	1624.810	12.662	0.358	13.127
10	1578.370	15.030	1.255	15.790	1620.630	12.887	0.257	13.384
11	1554.320	16.325	1.524	17.314	1614.480	13.217	0.379	13.763
12	1531.910	17.531	1.442	18.756	1604.720	13.742	0.605	14.368



ตาราง 33 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F15

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1898.37				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1876.12			
	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร (g)	ร้อยละการ สูญเสีย (%)	ร้อยละการ สูญเสียในแต่ละ วัฏจักร (%)	ร้อยละการ สูญเสียสะสม (%)	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร (g)	ร้อยละการ สูญเสีย (%)	ร้อยละการ สูญเสียในแต่ละ วัฏจักร (%)	ร้อยละการ สูญเสีย สะสม (%)
1	1737.980	8.449	8.449	8.449	1727.170	7.939	7.939	7.939
2	1727.860	8.982	0.582	9.031	1714.610	8.609	0.727	8.666
3	1709.710	9.938	1.050	10.082	1709.380	8.887	0.305	8.971
4	1709.340	9.957	0.022	10.103	1698.710	9.456	0.624	9.596
5	1702.410	10.323	0.405	10.509	1677.210	10.602	1.266	10.861
6	1690.160	10.968	0.720	11.228	1676.840	10.622	0.022	10.883
7	1680.450	11.479	0.575	11.803	1669.690	11.003	0.426	11.310
8	1672.470	11.900	0.475	12.278	1658.830	11.582	0.650	11.960
9	1665.350	12.275	0.426	12.703	1650.720	12.014	0.489	12.449
10	1648.210	13.178	1.029	13.732	1645.320	12.302	0.327	12.776
11	1622.570	14.528	1.556	15.288	1640.820	12.542	0.274	13.050
12	1614.450	14.956	0.500	15.789	1634.590	12.874	0.380	13.429

ตาราง 34 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C5F20

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1799.93				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1821.10			
	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร (g)	ร้อยละการ สูญเสีย (%)	ร้อยละการ สูญเสียในแต่ละ วัฏจักร (%)	ร้อยละการ สูญเสียสะสม (%)	น้ำหนักแต่ละ วัฏจักร (g)	ร้อยละการ สูญเสีย (%)	ร้อยละการ สูญเสียในแต่ละ วัฏจักร (%)	ร้อยละการ สูญเสีย สะสม (%)
1	1658.780	7.842	7.842	7.842	1685.220	7.461	7.461	7.461
2	1605.390	10.808	3.219	11.061	1653.280	9.215	1.895	9.357

ตาราง 35 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F0

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1914.98				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1889.40			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1688.660	11.818	11.818	11.818	1676.440	11.271	11.271	11.271
2	1668.100	12.892	1.218	13.036	1658.710	12.210	1.058	12.329
3	1659.220	13.356	0.532	13.568	1653.820	12.469	0.295	12.624
4	1649.350	13.871	0.595	14.163	1648.120	12.770	0.345	12.968
5	1643.590	14.172	0.349	14.512	1641.170	13.138	0.422	13.390
6	1642.690	14.219	0.055	14.567	1633.250	13.557	0.483	13.873
7	1638.150	14.456	0.276	14.843	1625.440	13.971	0.478	14.351
8	1631.490	14.804	0.407	15.250	1620.420	14.236	0.309	14.660
9	1623.100	15.242	0.514	15.764	1618.390	14.344	0.125	14.785
10	1619.550	15.427	0.219	15.983	1617.850	14.372	0.033	14.818
11	1616.780	15.572	0.171	16.154	1616.750	14.431	0.068	14.886
12	1613.710	15.732	0.190	16.344	1616.470	14.445	0.017	14.904

ตาราง 36 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F5

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1921.55				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1903.64			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1717.220	10.634	10.634	10.634	1713.490	9.989	9.989	9.989
2	1713.270	10.839	0.230	10.864	1708.230	10.265	0.307	10.296
3	1708.080	11.109	0.303	11.167	1702.440	10.569	0.339	10.635
4	1701.730	11.440	0.372	11.538	1700.520	10.670	0.113	10.747
5	1697.850	11.642	0.228	11.766	1696.800	10.865	0.219	10.966
6	1691.330	11.981	0.384	12.150	1693.180	11.056	0.213	11.180
7	1684.620	12.330	0.397	12.547	1690.570	11.193	0.154	11.334
8	1679.690	12.587	0.293	12.840	1682.280	11.628	0.490	11.824
9	1670.210	13.080	0.564	13.404	1677.660	11.871	0.275	12.099
10	1668.880	13.149	0.080	13.484	1677.660	11.871	0.000	12.099
11	1654.410	13.902	0.867	14.351	1665.110	12.530	0.748	12.847
12	1649.710	14.147	0.284	14.635	1662.340	12.676	0.166	13.013

ตาราง 37 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F10

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1872.17				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1857.19			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1713.130	8.495	8.495	8.495	1712.900	7.769	7.769	7.769
2	1707.430	8.799	0.333	8.828	1708.870	7.986	0.235	8.005
3	1690.850	9.685	0.971	9.799	1701.580	8.379	0.427	8.431
4	1686.560	9.914	0.254	10.052	1694.160	8.778	0.436	8.867
5	1668.130	10.899	1.093	11.145	1683.700	9.342	0.617	9.485
6	1662.460	11.201	0.340	11.485	1681.310	9.470	0.142	9.627
7	1652.270	11.746	0.613	12.098	1677.540	9.673	0.224	9.851
8	1647.290	12.012	0.301	12.399	1675.970	9.758	0.094	9.944
9	1642.670	12.259	0.280	12.680	1662.800	10.467	0.786	10.730
10	1639.400	12.433	0.199	12.879	1649.810	11.166	0.781	11.511
11	1636.320	12.598	0.188	13.067	1644.160	11.471	0.342	11.854
12	1634.630	12.688	0.103	13.170	1641.470	11.615	0.164	12.017

ตาราง 38 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F15

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1877.38				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1858.47			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1741.990	7.212	7.212	7.212	1727.820	7.030	7.030	7.030
2	1739.840	7.326	0.123	7.335	1727.740	7.034	0.005	7.035
3	1728.920	7.908	0.628	7.963	1709.860	7.996	1.035	8.069
4	1720.350	8.364	0.496	8.458	1708.850	8.051	0.059	8.129
5	1711.700	8.825	0.503	8.961	1708.310	8.080	0.032	8.160
6	1708.870	8.976	0.165	9.127	1707.110	8.144	0.070	8.230
7	1707.240	9.063	0.095	9.222	1696.200	8.731	0.639	8.869
8	1699.400	9.480	0.459	9.681	1688.140	9.165	0.475	9.345
9	1698.820	9.511	0.034	9.715	1682.610	9.463	0.328	9.672
10	1685.020	10.246	0.812	10.528	1670.770	10.100	0.704	10.376
11	1683.640	10.320	0.082	10.609	1669.250	10.181	0.091	10.467
12	1680.220	10.502	0.203	10.813	1666.390	10.335	0.171	10.638

ตาราง 39 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C7F20

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1843.07				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1852.62			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1716.380	6.874	6.874	6.874	1734.050	6.400	6.400	6.400
2	1709.590	7.242	0.396	7.269	1728.880	6.679	0.298	6.698
3	1697.500	7.898	0.707	7.977	1717.650	7.285	0.650	7.348
4	1696.040	7.977	0.086	8.063	1715.670	7.392	0.115	7.463
5	1676.400	9.043	1.158	9.221	1707.780	7.818	0.460	7.923
6	1675.830	9.074	0.034	9.255	1704.320	8.005	0.203	8.126
7	1675.350	9.100	0.029	9.283	1698.940	8.295	0.316	8.441
8	1669.480	9.419	0.350	9.634	1692.290	8.654	0.391	8.833
9	1664.150	9.708	0.319	9.953	1688.130	8.879	0.246	9.078
10	1646.360	10.673	1.069	11.022	1674.540	9.612	0.805	9.884
11	1643.220	10.843	0.191	11.213	1672.730	9.710	0.108	9.992
12	1640.350	10.999	0.175	11.387	1670.880	9.810	0.111	10.102

ตาราง 40 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F0

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขี้ดลี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1926.11				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1848.82			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1721.920	10.601	10.601	10.601	1661.830	10.114	10.114	10.114
2	1718.970	10.754	0.171	10.772	1658.390	10.300	0.207	10.321
3	1714.720	10.975	0.247	11.020	1655.520	10.455	0.173	10.494
4	1709.430	11.250	0.309	11.328	1652.800	10.602	0.164	10.658
5	1707.200	11.365	0.130	11.459	1649.660	10.772	0.190	10.848
6	1702.530	11.608	0.274	11.732	1647.130	10.909	0.153	11.002
7	1698.850	11.799	0.216	11.948	1644.180	11.069	0.179	11.181
8	1692.610	12.123	0.367	12.316	1641.100	11.235	0.187	11.368
9	1687.080	12.410	0.327	12.642	1638.030	11.401	0.187	11.555
10	1681.190	12.716	0.349	12.992	1635.430	11.542	0.159	11.714
11	1675.120	13.031	0.361	13.353	1632.800	11.684	0.161	11.875
12	1661.930	13.716	0.787	14.140	1629.810	11.846	0.183	12.058

ตาราง 41 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F5

วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1899.98				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1896.36			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1727.290	9.089	9.089	9.089	1735.290	8.494	8.494	8.494
2	1724.990	9.210	0.133	9.222	1732.600	8.635	0.155	8.649
3	1723.830	9.271	0.067	9.289	1729.900	8.778	0.156	8.804
4	1722.880	9.321	0.055	9.345	1723.260	9.128	0.384	9.188
5	1717.730	9.592	0.299	9.643	1720.300	9.284	0.172	9.360
6	1717.110	9.625	0.036	9.680	1718.220	9.394	0.121	9.481
7	1710.440	9.976	0.388	10.068	1715.340	9.546	0.168	9.649
8	1708.670	10.069	0.103	10.171	1714.870	9.570	0.027	9.676
9	1705.030	10.261	0.213	10.385	1713.480	9.644	0.081	9.757
10	1698.180	10.621	0.402	10.786	1712.790	9.680	0.040	9.797
11	1690.920	11.003	0.428	11.214	1708.890	9.886	0.228	10.025
12	1686.550	11.233	0.258	11.472	1705.760	10.051	0.183	10.208



ตาราง 42 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F10

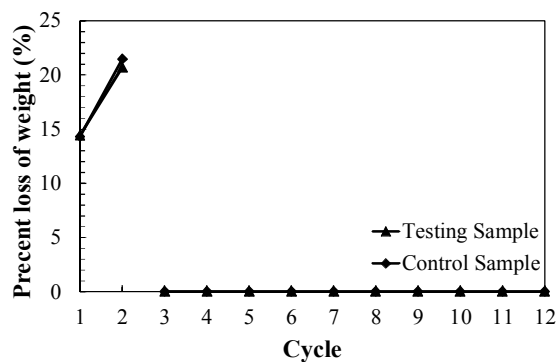
วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1888.62				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1865.39			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1735.830	8.090	8.090	8.090	1729.120	7.305	7.305	7.305
2	1733.440	8.217	0.138	8.228	1727.680	7.382	0.083	7.388
3	1732.180	8.283	0.073	8.300	1723.880	7.586	0.220	7.608
4	1731.310	8.329	0.050	8.351	1718.820	7.857	0.294	7.902
5	1726.120	8.604	0.300	8.650	1715.390	8.041	0.200	8.101
6	1724.360	8.697	0.102	8.752	1713.220	8.158	0.127	8.228
7	1720.060	8.925	0.249	9.002	1709.550	8.354	0.214	8.442
8	1717.140	9.080	0.170	9.171	1707.090	8.486	0.144	8.586
9	1713.670	9.263	0.202	9.374	1705.460	8.574	0.095	8.682
10	1707.880	9.570	0.338	9.711	1700.440	8.843	0.294	8.976
11	1700.910	9.939	0.408	10.120	1697.890	8.979	0.150	9.126
12	1694.360	10.286	0.385	10.505	1694.040	9.186	0.227	9.353

ตาราง 43 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F15

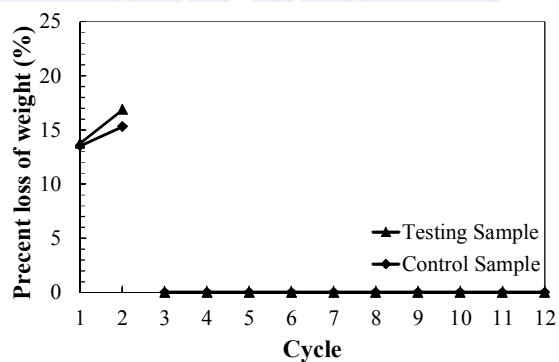
วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1852.92				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1835.17			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1720.770	7.132	7.132	7.132	1719.330	6.312	6.312	6.312
2	1716.200	7.379	0.266	7.398	1713.140	6.650	0.360	6.672
3	1712.560	7.575	0.212	7.610	1711.320	6.749	0.106	6.778
4	1711.090	7.654	0.086	7.695	1709.190	6.865	0.124	6.903
5	1706.330	7.911	0.278	7.974	1704.380	7.127	0.281	7.184
6	1702.620	8.112	0.217	8.191	1699.450	7.396	0.289	7.474
7	1701.780	8.157	0.049	8.240	1697.330	7.511	0.125	7.598
8	1701.160	8.190	0.036	8.277	1696.550	7.554	0.046	7.644
9	1700.750	8.212	0.024	8.301	1692.840	7.756	0.219	7.863
10	1696.480	8.443	0.251	8.552	1683.520	8.264	0.551	8.414
11	1685.040	9.060	0.674	9.226	1681.880	8.353	0.097	8.511
12	1681.470	9.253	0.212	9.438	1680.270	8.441	0.096	8.607

ตาราง 44 ข้อมูลผลการทดสอบความคงทนด้วยวิธีเปียกและแห้งของ C10F20

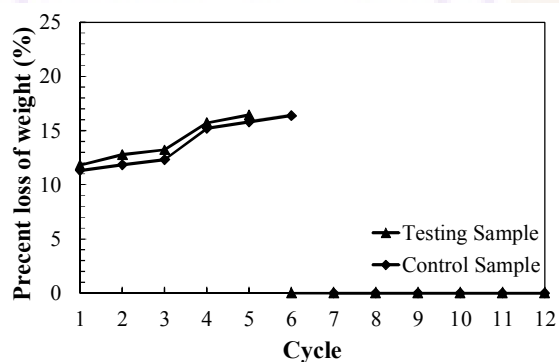
วัฏจักร	ตัวอย่างแบบขัดสี				ตัวอย่างแบบควบคุม			
	น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1848.03				น้ำหนักเริ่มต้น(g) 1815.61			
	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม	วัฏจักร	ร้อยละการสูญเสีย	ร้อยละการสูญเสียในแต่ละวัฏจักร	ร้อยละการสูญเสียสะสม
	(g)	(%)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(%)
1	1728.460	6.470	6.470	6.470	1708.730	5.887	5.887	5.887
2	1725.220	6.645	0.187	6.658	1704.440	6.123	0.251	6.138
3	1721.770	6.832	0.200	6.858	1702.280	6.242	0.127	6.265
4	1719.290	6.966	0.144	7.002	1701.530	6.283	0.044	6.309
5	1713.720	7.268	0.324	7.326	1697.280	6.517	0.250	6.558
6	1711.260	7.401	0.144	7.469	1689.400	6.951	0.464	7.023
7	1710.330	7.451	0.054	7.523	1686.370	7.118	0.179	7.202
8	1709.630	7.489	0.041	7.564	1685.220	7.182	0.068	7.270
9	1708.690	7.540	0.055	7.619	1684.810	7.204	0.024	7.295
10	1702.470	7.876	0.364	7.983	1683.250	7.290	0.093	7.387
11	1696.730	8.187	0.337	8.321	1682.430	7.335	0.049	7.436
12	1692.430	8.420	0.253	8.574	1681.760	7.372	0.040	7.476



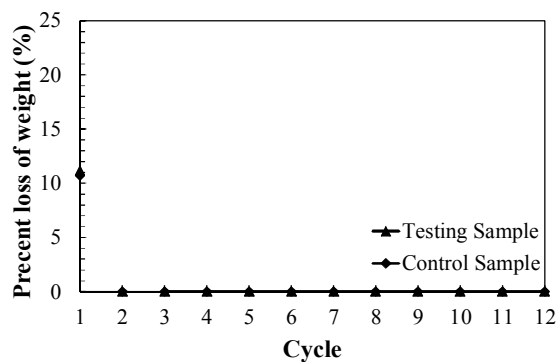
ภาพ 51 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C3F0



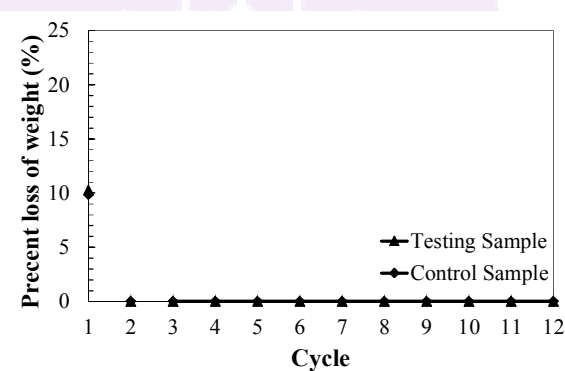
ภาพ 52 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C3F5



ภาพ 53 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C3F10

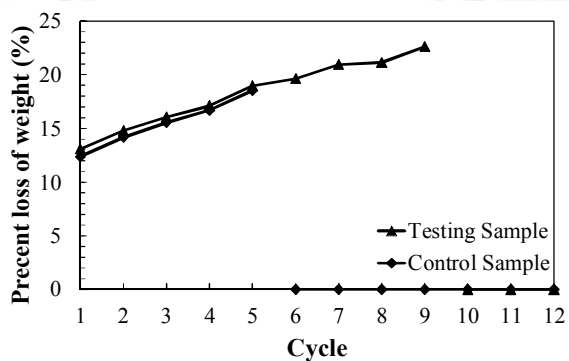


ภาพ 54 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัปดาห์ C3F15

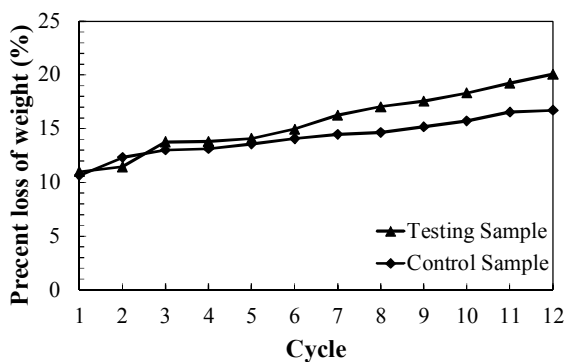


5

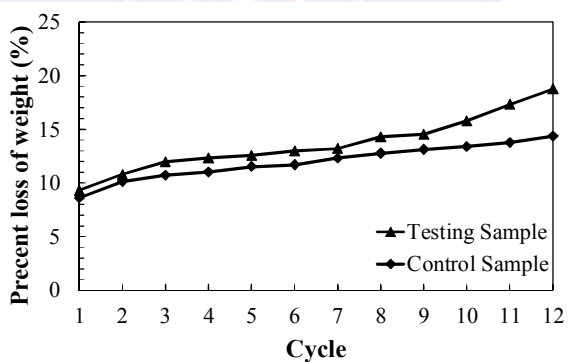
ภาพ 55 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัปดาห์ C3F20



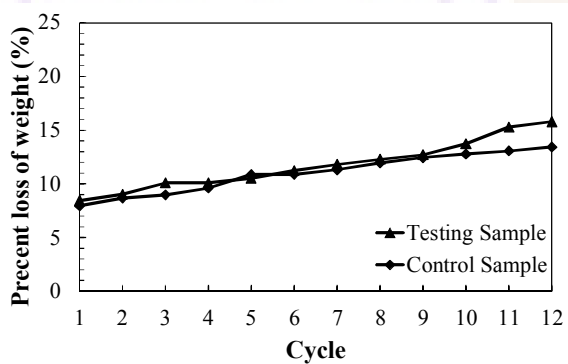
ภาพ 56 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัปดาห์ C5F0



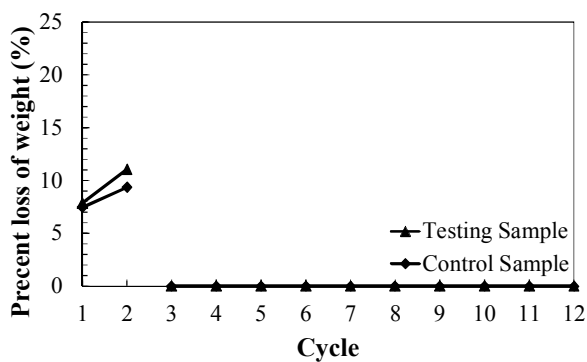
ภาพ 57 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัตส่วน C5F5



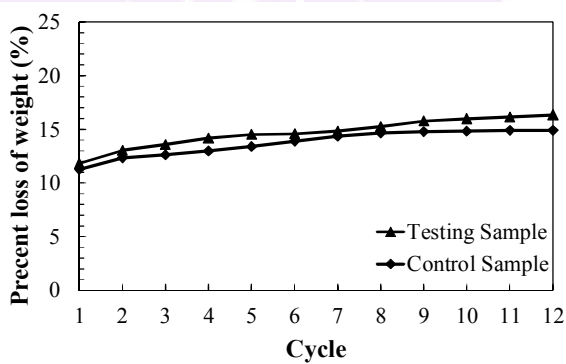
ภาพ 58 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัตส่วน C5F10



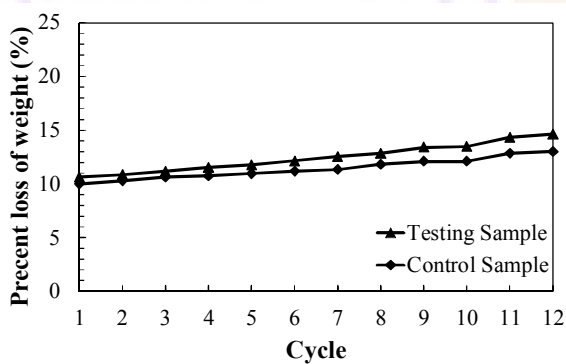
ภาพ 59 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัตส่วน C5F15



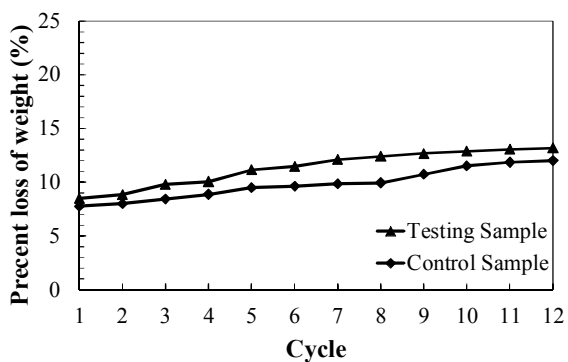
ภาพ 60 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C5F20



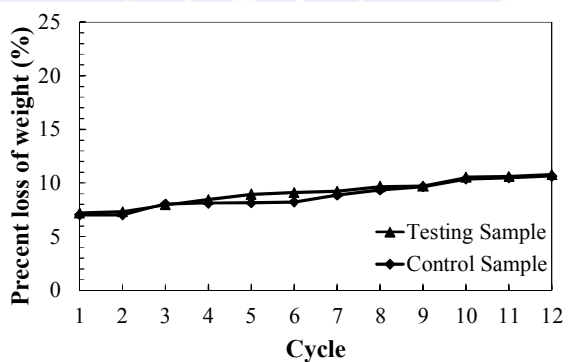
ภาพ 61 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F0



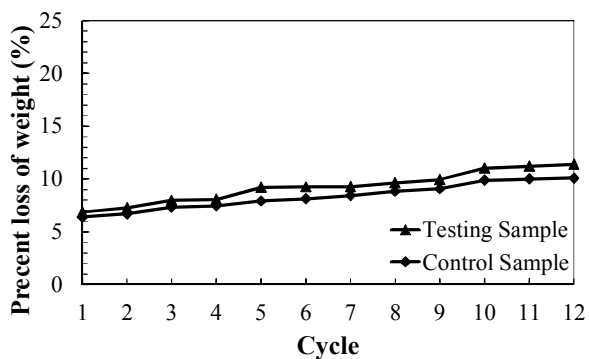
ภาพ 62 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F5



ภาพ 63 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F10

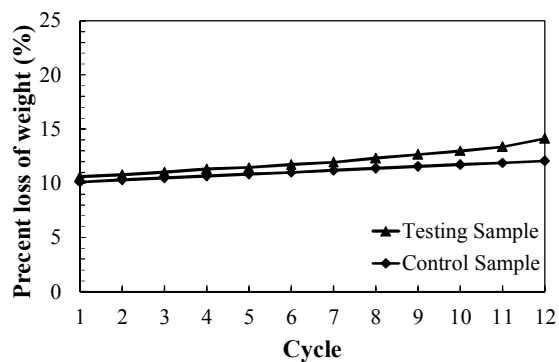


ภาพ 64 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F15

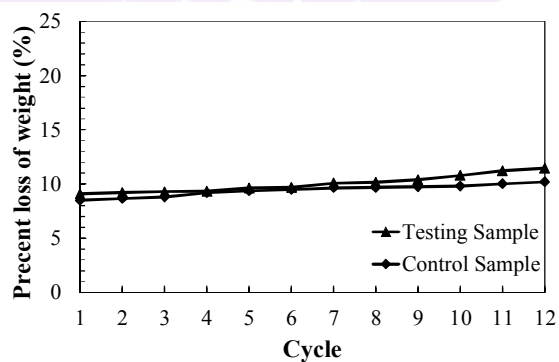


ภาพ 65 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C7F20

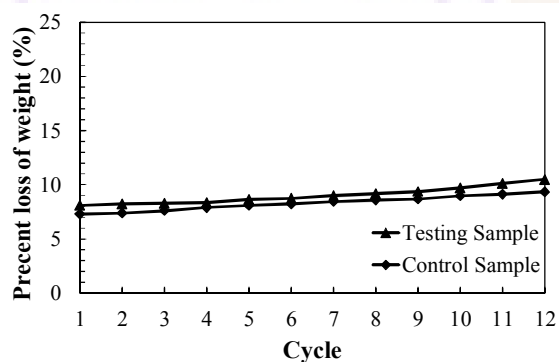




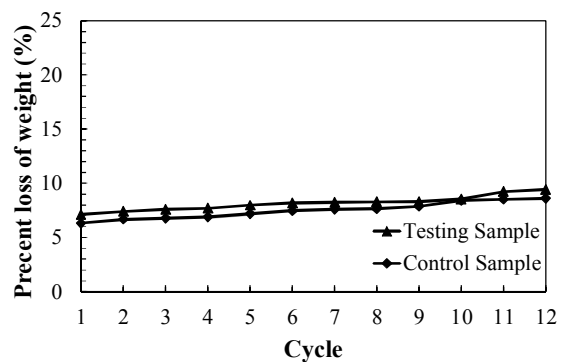
ภาพ 66 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C10F0



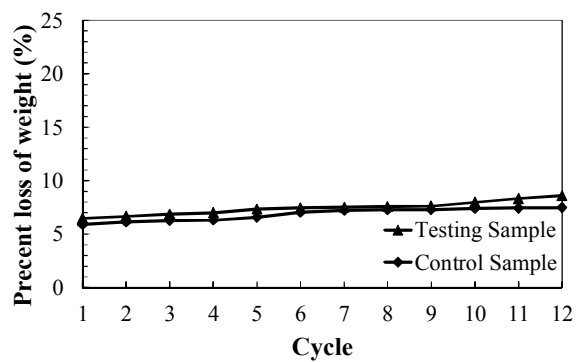
ภาพ 67 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C10F5



ภาพ 68 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C10F10



ภาพ 69 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C10F15



ภาพ 70 ปริมาณร้อยละการสูญเสียของสัดส่วน C10F20



ประวัติผู้วิจัย

## ประวัติผู้วิจัย

**ชื่อ นามสกุล** ธีชัย ใหม่อันท์  
**วัน เดือน ปี เกิด** 16 เมษายน 2534  
**ที่อยู่ปัจจุบัน** 81 หมู่ 2 ตำบลทาเหนือ อำเภอแม่อน จังหวัดเชียงใหม่  
**ที่ทำงานปัจจุบัน** -  
**ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน** -  
**ประสบการณ์การทำงาน**  
พ.ศ. 2555 ผู้ช่วยวิศวกรประจำโครงการ Prime square condo,  
จังหวัดเชียงใหม่

**ประวัติการศึกษา**  
พ.ศ. 2556 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, จังหวัดพะเยา

### ผลงานตีพิมพ์

ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

ธีชัย ใหม่อันท์ (ผู้บรรยาย), อภิชาติ บัวกล้า, ธนกร ชมภูรัตน์ และสุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. (28-30 มิถุนายน 2559). การศึกษาสมบัติด้านกำลังของดิน ตะกอนกัวนพะเยาที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย. ใน เอกสาร ประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 (หน้า 255-260). สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

ผลงานตีพิมพ์อื่นๆ -



