



การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมหินฝุ่น
และปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในการงานวิศวกรรมธรณีสิ่งแวดล้อม



โดย
ชูศักดิ์ ศีรีรัตน์

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประจำปีงบประมาณ 2556

ENGINEERING PROPERTIES OF BOTTOM ASH ADMIXED
WITH DUST STONE AND PORTLAND CEMENT FOR
GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING

By

Chusak Kererat



Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2013

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ขอขอบคุณ นายศุภชัย ไทยพุ่ม ซึ่งเป็นผู้ช่วยวิจัย โรงไฟฟ้าบีแอลซีพี (BLPC) เพาเวอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเก็บกักแก๊ส และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้เงินสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสิ้นไปด้วยดี

ชูศักดิ์ ศิริรัตน์

ตุลาคม 2556



บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : Social 036/2556

ชื่อโครงการ : การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเหล็กกันเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์
เพื่อใช้ในงานวิศวกรรมธรณีสิ่งแวดล้อม

ชื่อนักวิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ ศิริรัตน์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเหล็กกันเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพื่อนำไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา โดยการนำหินฝุ่นและปูนซีเมนต์มาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม ซึ่งกำหนดอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของเหล็กกันเตา คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ศึกษา ได้แก่ การกระจายตัวของเม็ดดิน ชิดจำกัดความชื้นเหลือ ความถ่วงจำเพาะ ค่าแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง ค่า ซี.บี.อาร์. และการซึมผ่านได้ของน้ำ

จากผลการศึกษาพบว่า วัสดุผสมเพิ่มที่นำมาผสมกับเหล็กกันเตาไม่ได้ช่วยให้วัสดุทดสอบมีขนาดคละและความเหนียวดีขึ้น เมื่อนำเหล็กกันเตามาผสมกับวัสดุผสมเพิ่มค่าความถ่วงจำเพาะยังคงมีค่าต่ำกว่า 2 จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างพบว่าวัสดุผสม B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 ที่มีปริมาณของวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 8 และ 10 เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งาน สำหรับค่า ซี.บี.อาร์. ของเหล็กกันเตาในสภาพไม่แช่น้ำให้ค่ามากกว่าในสภาพแช่น้ำ แต่ค่า ซี.บี.อาร์. ของเหล็กกันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มในสภาพแช่น้ำให้ค่ามากกว่าในสภาพไม่แช่น้ำ โดยค่า ซี.บี.อาร์. จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม และค่าการซึมผ่านได้ของน้ำของเหล็กกันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม

คำสำคัญ: เหล็กกันเตา, หินฝุ่น, ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1, วัสดุผสมเพิ่ม

E-mail Address : Chusak.k@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม พ.ศ. 2555 – กันยายน พ.ศ. 2556

Abstract

Code of Project : Social 036/2556
Project Name : Engineering Properties of Bottom Ash admixed with Dust Stone and Portland Cement for Geoenvironmental Engineering
Researcher Name : Asst.Prof.Chusak Kererat

This research is to study the engineering properties of bottom ash admixed with dust stone and Portland cement type I for using in civil engineering projects. Quantities of the admixture (dust stone and Portland cement) used in this study were 0, 2, 4, 6, 8 and 10 percent by weight of bottom ash. The engineering properties determination were grain size analysis, consistency limits, specific gravity, unconfined compressive strength, California bearing ratio (C.B.R.) and coefficient of permeability.

Results from this study show that the admixtures cannot improve grain size distribution, plasticity and specific gravity of testing materials. The B_LD50_C50, B_SD50_C50 and B_C100 with the admixtures of 8 and 10% were the appropriated materials for unconfined compressive strength. The unsoaked C.B.R. of bottom ash was more than the soaked C.B.R., while the soaked C.B.R. of bottom ash with admixtures was more than the unsoaked C.B.R., moreover, both soaked and unsoaked C.B.R. was increased with more quantities of admixtures in all cases. The permeability of water was decreased with more quantities of admixtures in all cases.

Keywords: Bottom Ash, Dust Stone, Portland Cement type I, Admixtures

E-mail Address : Chusak.k@rmutr.ac.th
Period of Project : October 2012 – September 2013

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สัญลักษณ์และคำย่อ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
2. วัตถุประสงค์	1
3. กรอบแนวคิดการวิจัย	2
4. ขอบเขตของการวิจัย	2
5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
1. วัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	4
2. การทดสอบทางด้านปฐพีกลศาสตร์	8
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	21
1. ขั้นตอนการดำเนินการ	21
2. เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	21
3. วิธีการทดสอบ	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์	39
1. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม	39
2. ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงต้านข้างของเถ้าก้นเตาและ เถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม	40
3. ผลการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม	56
4. ผลการทดสอบหาค่าการซึมผ่านได้ของน้ำ (Hydraulic Conductivity) ของ เถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม	59
บทที่ 5 สรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ	60
1. สรุปผล	60
2. อภิปรายผล	60
3. ข้อเสนอแนะ	61
4. การนำไปใช้ประโยชน์	62
บรรณานุกรม	63
ประวัติผู้วิจัย	65



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	7
2	อัตราส่วนวัสดุผสมเพิ่มสำหรับเตรียมตัวอย่างเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ (สำหรับการทดสอบการบดอัดดิน)	30
3	อัตราส่วนวัสดุผสมเพิ่มสำหรับเตรียมตัวอย่างเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ (การทดสอบ ซี.บี.อาร์)	32
4	อัตราส่วนวัสดุผสมเพิ่มสำหรับเตรียมตัวอย่างเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ (การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ)	35
5	อัตราส่วนวัสดุผสมเพิ่มสำหรับเตรียมตัวอย่างเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ (การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง)	37
6	ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของเก้าอี้เก้าอี้เตาและเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน และ 14 วัน	41
7	ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของเก้าอี้เก้าอี้เตาและเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 90 วัน	43



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กรอบแนวคิดการวิจัย	3
2 แผนภูมิกำลังอัดเทียบกับจำนวนที่เติมสารผสมเพิ่ม	7
3 หลักการหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน	8
4 หลักการหาการกระจายตัวของเม็ดดิน	9
5 พฤติกรรมสถานะภาพของดิน	11
6 พฤติกรรมของดินระหว่างการบดอัดดิน	12
7 พฤติกรรมการเสียรูปขณะทำทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์.ของดิน	13
8 พฤติกรรมการยุบตัวคายน้ำด้วยแบบจำลองสปริง	14
9 การเขียนวงกลมมอร์จาการทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง	15
10 ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	22
11 ชุดทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง	22
12 ชุดทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน	23
13 ชุดทดสอบการบดอัดดิน	23
14 ชุดทดสอบการหาค่า ซี.บี.อาร์.	24
15 ชุดทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ	24
16 ชุดทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง	25
17 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	25
18 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน	27
19 ขั้นตอนการทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง	28
20 ขั้นตอนการทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน	29
21 ขั้นตอนการทดสอบการบดอัดดิน	31
22 ขั้นตอนการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์.	34
23 ขั้นตอนการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ	36
24 ขั้นตอนการทดสอบแรงอัดปราศจากแรงด้านข้าง	38
25 แผนภูมิการกระจายตัวของเถ้ากันเตา หินฝุ่น และเถ้ากันเตาผสม วัสดุผสมเพิ่ม	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
26 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน	46
27 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน	47
28 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	48
29 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน	49
30 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 2	51
31 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 4	52
32 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 6	53
33 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 8	54
34 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 10	55
35 แผนภูมิค่า % CBR ของเอ้ากันเตาและเอ้ากันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ	58
36 แผนภูมิค่าการซึมผ่านได้ของน้ำของเอ้ากันเตาและเอ้ากันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม	59

สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
q_u	ความเค้นสูงสุด หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
C_u	สัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ
C_c	สัมประสิทธิ์ของความโค้ง
k	ความซึมผ่านได้ของน้ำ หน่วย เซนติเมตรต่อวินาที
B	ถ้ำก้นเตา (Bottom Ash)
D	หินฝุ่น (Dust Stone)
C	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I)
LD	หินฝุ่นเบอร์ใหญ่ (ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ค้างเบอร์ 60)
SD	หินฝุ่นเบอร์เล็ก (ผ่านตะแกรงเบอร์ 60)
B_LD100 (2%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่ร้อยละ 2
B_SD100 (2%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กร้อยละ 2
B_LD50_C50 (2%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่ร้อยละ 1 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 1
B_SD50_C50 (2%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กร้อยละ 1 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 1
B_C100 (2%)	ถ้ำก้นเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 2
B_LD100 (4%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่ร้อยละ 4
B_SD100 (4%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กร้อยละ 4
B_LD50_C50 (4%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่ร้อยละ 2 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 2
B_SD50_C50 (4%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กร้อยละ 2 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 2
B_C100 (4%)	ถ้ำก้นเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 4
B_LD100 (6%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่ร้อยละ 6
B_SD100 (6%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กร้อยละ 6
B_LD50_C50 (6%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่ร้อยละ 3 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 3
B_SD50_C50 (6%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กร้อยละ 3 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 3
B_C100 (6%)	ถ้ำก้นเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 6
B_LD100 (8%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่ร้อยละ 8
B_SD100 (8%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กร้อยละ 8
B_LD50_C50 (8%)	ถ้ำก้นเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่ร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 4

สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
B_SD50_C50 (8%)	เท่ากับเตาผสมหินปูนเบอร์เล็กร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 4
B_C100 (8%)	เท่ากับเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 8
B_LD100 (10%)	เท่ากับเตาผสมหินปูนเบอร์ใหญ่ร้อยละ 10
B_SD100 (10%)	เท่ากับเตาผสมหินปูนเบอร์เล็กร้อยละ 10
B_LD50_C50 (10%)	เท่ากับเตาผสมหินปูนเบอร์ใหญ่ร้อยละ 5 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 5
B_SD50_C50 (10%)	เท่ากับเตาผสมหินปูนเบอร์เล็กร้อยละ 5 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 5
B_C100 (10%)	เท่ากับเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 10



บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กากของเสียและวัสดุผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า โรงโม่หิน โรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น ซึ่งนับวันจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ตามการพัฒนาของประเทศ ก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบการจัดเก็บและการกำจัดกากของเสียและวัสดุผลพลอยได้เหล่านั้น ยกตัวอย่างเช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง กากเชื้อเพลิงที่เหลือเป็นเถ้าถ่านหินแยกเป็น 2 ส่วนคือ เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าถ่านที่เบาลอยฟุ้งกระจายในอากาศได้ กับ เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) เป็นเถ้าถ่านที่หนักกว่าจะจมลงที่ก้นถังเก็บ เป็นวัสดุผลพลอยได้ โรงโม่หินที่เปิดดำเนินการจำนวน 439 ราย มีกำลังการผลิตรวม 334 ล้านตันต่อปี [1] ทำให้มีปริมาณหินฝุ่นที่เหลือทิ้งจากกระบวนการโม่บด และย่อยหินอยู่ในปริมาณที่สูงมาก หินฝุ่น เป็นเศษของหินปูนมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) มีฤทธิ์ไม่เป็นด่าง แต่ผลเสียของหินฝุ่นก็คือ มีลักษณะเบาทำให้ฟุ้งกระจาย ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ อีกทั้งก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีผู้ที่มีความสนใจรวมถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ได้ทำการศึกษาและพยายามนำวัสดุที่เป็นกากของเสียและวัสดุผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโยธา ซึ่งเป็นแรงจูงใจให้มีความสนใจที่จะนำเถ้าก้นเตาและหินฝุ่นมาศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นวัสดุเพื่อป้องกันการชะล้างของหน้าดิน ลดการซึมผ่านของน้ำหรือสารปนเปื้อนสำหรับใช้ในบ่อฝังกลบขยะ ทั้งนี้เพื่อเป็นการใช้วัสดุทางธรรมชาติให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม (หินฝุ่นและปูนซีเมนต์)
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการซึมผ่านของน้ำของเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ ที่มีต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม
4. เพื่อสรุปแนวทางการนำวัสดุที่มีส่วนผสมระหว่างเถ้าก้นเตา หินฝุ่น และปูนซีเมนต์ ไปใช้ใน งานวิศวกรรมโยธา

3. กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบแนวคิดการวิจัยสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1 คือ ทำการรวบรวมข้อมูล ศักยภาพวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับถ้ำกั้นเตา จากนั้นทำการคัดเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทดสอบต้องเป็น วัสดุเหลือใช้ ประหยัด ราคาถูก ได้แก่ ถ้ำกั้นเตา นำมาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด จ.ระยอง หินฝุ่น นำมาจากโรงโม่หิน อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราอินทรีเพชร เมื่อได้วัสดุที่จะนำมาทดสอบแล้ว ทำการออกแบบอัตราส่วนผสมระหว่าง ถ้ำกั้นเตากับวัสดุผสมเพิ่ม (หินฝุ่นและปูนซีเมนต์) ในอัตราส่วนผสมนี้ ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 เมื่อออกแบบอัตราส่วนผสมแล้ว ทำการเตรียมตัวอย่าง แล้วจึงทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติ ทางด้านวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน การทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธี ร่อนผ่านตะแกรง การทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน การบดอัดดิน การทดสอบหาค่าซี.พี. อาร์. การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง แล้วนำ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาสรุปผล และเสนอแนะเพื่อนำไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่อไป

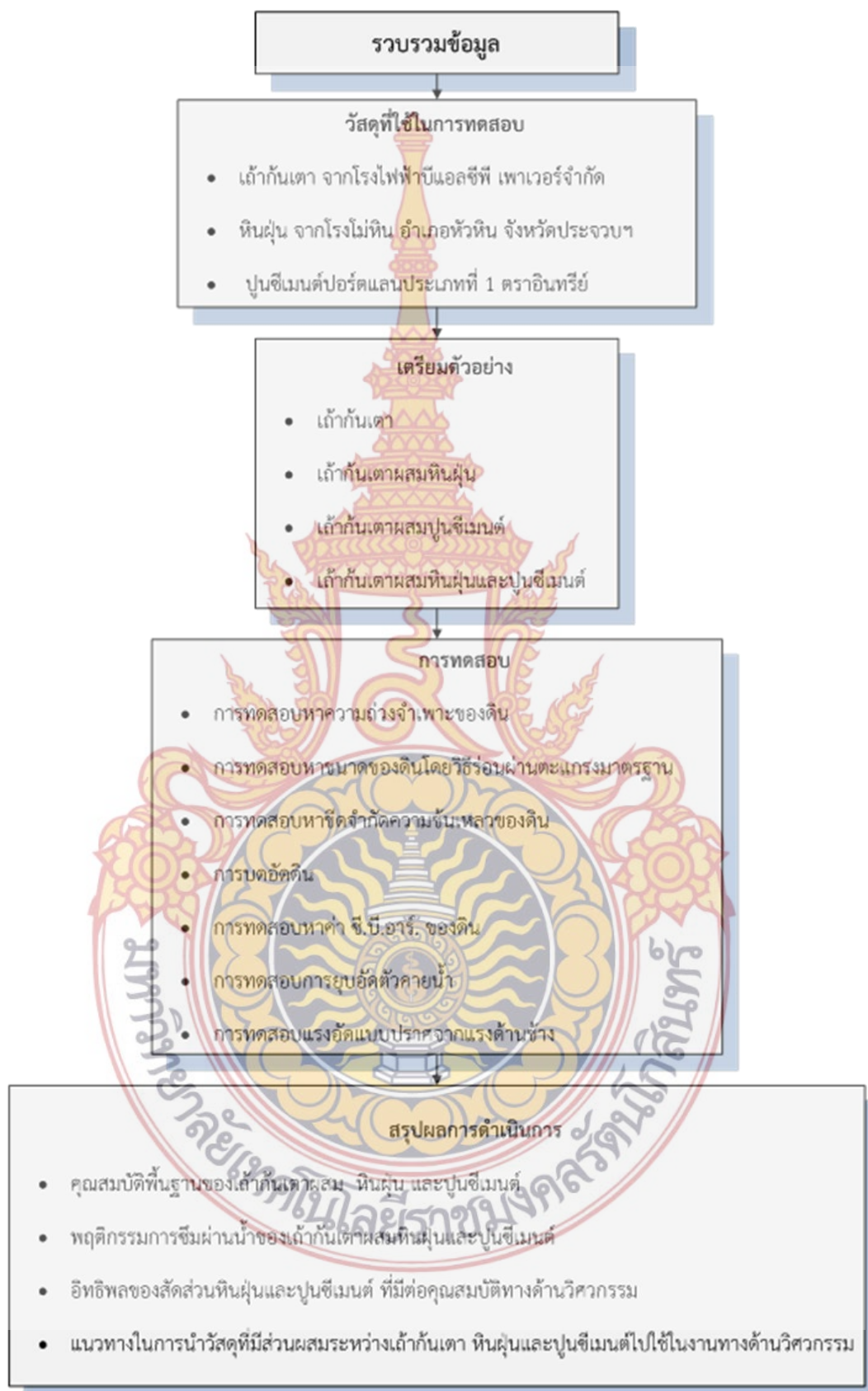
4. ขอบเขตการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ ได้แก่ ถ้ำกั้นเตา (Bottom Ash, B) นำมาจากโรงไฟฟ้า บีแอล ซีพี (BLCP) เพาเวอร์จำกัด จังหวัดระยอง หินฝุ่น (Dust Stone, D) นำมาจากโรงโม่หิน อำเภอหัว หิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I, C) ตราอินทรีเพชร (มอก.15-2547)

2. คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่ศึกษา ได้แก่ การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน การ ทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง การทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน การบด อัดดิน การทดสอบหาค่า ซี.พี.อาร์. การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบแรงอัดแบบ ปราศจากแรงด้านข้าง

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบคุณสมบัติพื้นฐานของถ้ำกั้นเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ ถ้ำกั้นเตาผสมซีเมนต์ หิน ฝุ่นผสมซีเมนต์
2. ทราบถึงพฤติกรรมการซึมผ่านของน้ำของถ้ำกั้นเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์
3. ทราบถึงอิทธิพลของสัดส่วนหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ ที่มีต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม
4. ทราบแนวทางในการนำวัสดุที่มีส่วนผสมระหว่างถ้ำกั้นเตา หินฝุ่น และปูนซีเมนต์ ไปใช้ใน งานวิศวกรรมโยธา



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของ ถ่านหินเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ โดยคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่ศึกษา ได้แก่ การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน การทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง การทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน การบดอัดดิน การทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.1 ถ่านหินเตา [2]

1.1.1 กระบวนการผลิต

โรงไฟฟ้าบีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด (BLCP) ตั้งอยู่ที่ เลขที่ 9 ถนน ไอ 8 นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง กำลังการผลิต 1,434 เมกะวัตต์ โดยใช้ถ่านหินบิทูมินัส คุณภาพดีเป็นเชื้อเพลิง จากประเทศออสเตรเลียและอินโดนีเซีย มีค่าความร้อนสูง แต่ปริมาณกำมะถันต่ำ มีหม้อไอน้ำชนิด Pulverize Coal Fire Boiler (PC) เป็นต้นกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในการเดินเครื่องการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เต็มกำลังการผลิตนั้น ใช้ถ่านหินบิทูมินัสประมาณ 3.6 ล้านตันต่อปี ถ่านหินที่ใช้มีปริมาณกำมะถันไม่เกินร้อยละ 0.7 และมีค่าเฉลี่ยทั้งปีไม่เกินร้อยละ 0.45 จะเกิดเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุพลอยได้ ประมาณ 0.36 ล้านตันต่อปี เถ้าถ่านหินที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือเถ้าลอย มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนักและเถ้าหนัก (Furnace Ash or Bottom Ash) อีกประมาณร้อยละ 10

1.1.2 การเกิดเถ้าถ่านหิน

การใช้เถ้าถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น เป็นการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำจนน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ ที่มีอุณหภูมิความดันสูง ไอน้ำดังกล่าวจะไปหมุนกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป เถ้าถ่าน (Coal Ash) เป็นวัสดุพลอยได้ (By Product) จากการผลิตกระแสไฟฟ้า ที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง เถ้าถ่านหินคือวัสดุอินทรีย์ที่ตกตะกอนทับถมและเจือปนอยู่ในเนื้อถ่านหินเมื่อเผาถ่านหินให้ลุกไหม้ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิที่สูง แร่ธาตุในเถ้าถ่านหินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นออกไซด์หลายชนิด โดยมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 เถ้าถ่าน

หินที่เกิดขึ้นแบ่งเป็นสองส่วนคือ เถ้าลอย ร้อยละ 90 และเถ้าหนัก อีกร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปริมาณเถ้าถ่านหินทั้งหมด

ในการเผาไหม้ถ่านหินในห้องเผาไหม้ มีผงเถ้าถ่านหินส่วนใหญ่ ประมาณร้อยละ 90 จะถูกหลอมจนมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเล็กๆ เถ้าถ่านหินส่วนนี้จะถูกลมร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้ พัดเอาเถ้าถ่านหินเล็กๆนี้ ลอยออกไปทางด้านบนของห้องเผาไหม้ แล้วลมร้อนจะถูกทำให้เย็นลงอย่างกะทันหัน ผงเถ้าถ่านหินส่วนที่มากพร้อมกับลมร้อนนี้จะแข็งตัว เป็นผงละเอียดเล็กๆ เราเรียกเถ้าถ่านหินส่วนนี้ว่าเถ้าลอย มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา มีขนาดประมาณ 1 ไมครอน (1/1000 เซนติเมตร) จนถึง 150 ไมครอน เมื่อนำไปส่องขยายดูด้วยกล้องกำลังขยายสูง จะพบว่าเถ้าลอยมีรูปร่างกลม เถ้าลอยที่มีขนาดที่เล็กละเอียดนี้ สามารถทำปฏิกิริยากับต่างได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ กล่าวคือ มีความแข็งแรงและเกาะยึดกันได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

ผงเถ้าถ่านหินอีกส่วนหนึ่งประมาณร้อยละ 10 จะถูกหลอมและรวมตัวกันเป็นก้อนโตขึ้น แล้วตกลงสู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ เราเรียกเถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จากกันเดานี้ว่า เถ้าหนัก จะเป็นวัสดุที่ค่อนข้างแข็ง มีน้ำหนัก จะถูกนำออกจากด้านล่างของห้องเผาไหม้และส่งไปเก็บไว้ใน Silo เพื่อนำไปกำจัดทิ้งต่อไป

1.2 หินฝุ่นในการก่อสร้าง [1]

การขยายตัวของภาคก่อสร้างทั่วประเทศในปี 2547 ส่งผลให้มีความต้องการใช้หินรวม 140 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2546 ร้อยละ 7.9 โดยภาคก่อสร้างใช้หินปูนสูงถึงร้อยละ 80 รองลงมาเป็นหินแกรนิต หินบะซอลต์ หินทรายและหินชนิดอื่นๆ โดยผ่านกระบวนการโม่บด และย่อยหินจากโรงโม่หินที่เปิดดำเนินการจำนวน 439 ราย มีกำลังการผลิตรวม 334 ล้านตันต่อปี และมีปริมาณหินสำรองสำหรับการก่อสร้าง (ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินทราย และหินชนิดอื่นๆ) ซึ่งเป็นวัตถุดิบของโรงโม่หินสูงถึง 4,726.8 ล้านตัน จากแหล่งหินในเขตประทานบัตร 402 แปลง ทั่วประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในเขตภาคกลางและภาคเหนือ

ในปี 2548 ความต้องการใช้หินเพื่อการก่อสร้างยังมีอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากนโยบายหลักของภาครัฐที่มุ่งเน้นก่อสร้างโครงการสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ และการก่อสร้างภาคเอกชนยังคงเติบโต ทั้งนี้มูลค่าการลงทุนภาคก่อสร้างทั่วประเทศในช่วงไตรมาสแรกของปี 2548 ขยายตัวสูงถึงร้อยละ 20.2 คาดว่ามูลค่าการก่อสร้างรวมทั้งปีจะขยายตัวประมาณร้อยละ 15 ซึ่งจะมีผลให้เกิดความต้องการใช้หินรวมสูงถึง 155 ล้านตัน หรือเพิ่มขึ้นจากปี 2547 ร้อยละ 10.8 ซึ่งจากตัวเลขดังกล่าวจะเห็นได้ว่าปริมาณหินฝุ่นที่เหลือทิ้งจากกระบวนการโม่บด และย่อยหินก็ต้องมีอยู่ในปริมาณที่สูงมากเช่นเดียวกัน

1.3 ปูนซีเมนต์ (Cement) [3]

1.3.1 การทำงานของปูนซีเมนต์

เราทราบแล้วว่าปูนซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญตัวหนึ่งในคอนกรีตเมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะเป็นของเหลวมีความหนืดเรียกว่า “เพสต์” เพสต์จะทำหน้าที่เสมือนกาวยประสานมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน เมื่ออายุมากขึ้นเพสต์ก็จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นกึ่งเหลว กึ่งแข็งและในเวลาต่อมาก็จะกลายเป็นของแข็งในที่สุด ซึ่งจะสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุที่เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงเวลาหนึ่งความสามารถรับกำลังอัดก็จะเริ่มคงที่ การที่ปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำแล้วเกิดการก่อตัวและแข็งตัวของปูนซีเมนต์ขึ้น เราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า “การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน” ซึ่งเกิดจากสารประกอบในซีเมนต์ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเราจึงรู้สึกว่าร้อนขึ้นเมื่อสัมผัสกับปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เราสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ง่ายๆ ได้ดังนี้



คำอธิบาย

Cement = แทนสารประกอบต่าง ๆ ในปูนซีเมนต์

Water = แทนน้ำ

C-S-H = แทนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium SilicateHydrate)

เป็นองค์ประกอบที่ทำให้กำลังกับคอนกรีต

Ca(OH)₂ = เป็นผลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์

มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก pH ประมาณ 12.5 ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดี

มาก Heat = เป็นความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

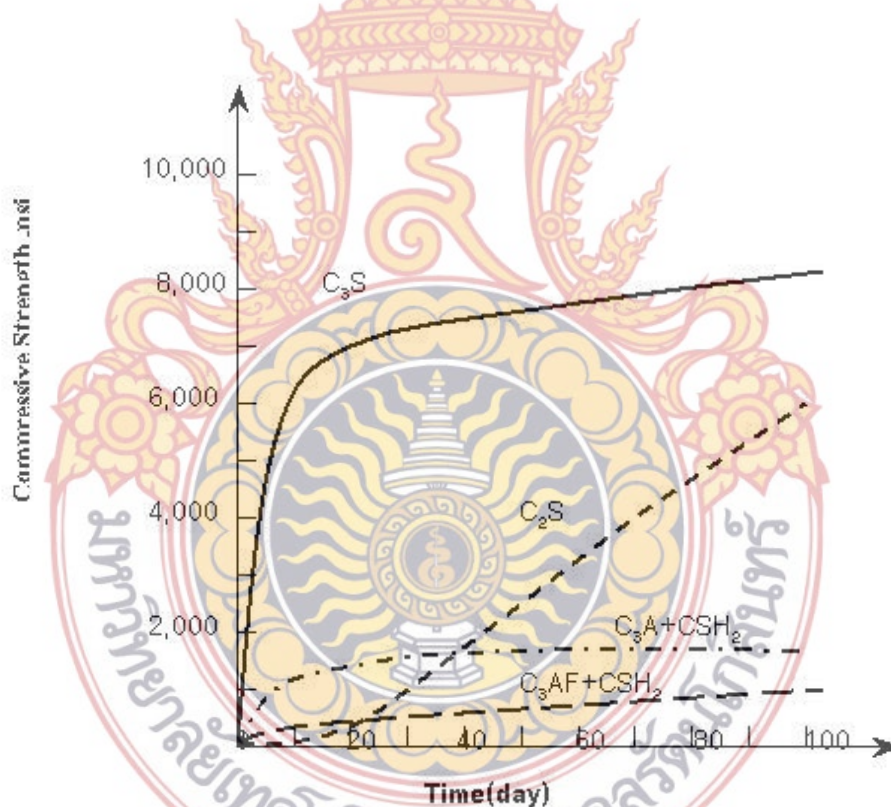
1.3.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

วัตถุดิบนี้พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และ โคโลไมต์ (MgCo₃) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในบ้านเราที่ใช้กันทั่วไป (ตราเสือ ตราช้าง ตรางูเห่า) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (Greenish Gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ ของธาตุแคลเซียมซิลิกอน อลูมิเนียม และ เหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ด ในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก

ตารางที่ 1 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

- C_3S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็วภายใน 14 วัน
- C_2S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้ช้า ความร้อนเกิดขึ้นน้อย
- C_3A ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาเริ่มแข็งตัวเกิดความร้อนสูง มีกำลังรับแรงเร็ว
- C_4AF มีผลน้อย ให้ความแข็งแรงเล็กน้อยเติมเข้าไปเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น



Compressive strength of pure-cement compound pastes as function of curing time. Note that CSH_2 is the abbreviated formula for $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

ภาพที่ 2 แผนภูมิกำลังอัดเทียบกับจำนวนที่เติมสารผสมเพิ่ม [3]

จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ เป็นต้น

2. การทดสอบทางด้านปฐพีกลศาสตร์

การทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของวัสดุและส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยจะเน้นการทดสอบทางด้านปฐพีกลศาสตร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน

ดินตามธรรมชาติ (Natural Soil) จะประกอบด้วย อากาศ น้ำ และเม็ดดิน โดยเม็ดดินจะเกิดจากการรวมตัวกันของแร่ธาตุที่แตกต่างกันออกไปดังนั้นจึงเป็นผลให้ดินในแต่ละพื้นที่ที่มีความถ่วงจำเพาะต่างกัน ในขณะที่น้ำจะมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันแต่ก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

ความถ่วงจำเพาะของดิน คืออัตราส่วนของน้ำหนักดินต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับดินในอุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แสดงให้ทราบถึงลักษณะทั่วไปของดินได้ และยังสามารถที่จะนำคุณสมบัตินี้ไปใช้ในการคำนวณค่าคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความพรุน (Porosity) อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ของดิน ระดับความอิ่มตัว (Saturation) ความหนาแน่น (Density) เป็นต้น ทั้งยังสามารถนำค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินไปใช้สำหรับวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์แบบ 151 H ได้ด้วย โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของดินจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.6 ถึง 2.8 ถ้าค่าต่ำกว่านี้ก็อาจจะมีพวกอินทรีย์สารหรือพวกธาตุเบาต่างๆปะปนอยู่ และถ้าค่าสูงกว่านี้ก็อาจมีธาตุหนักปะปนอยู่ โดยมีหลักการหาความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิใดๆ ดังแสดงในภาพที่ 3

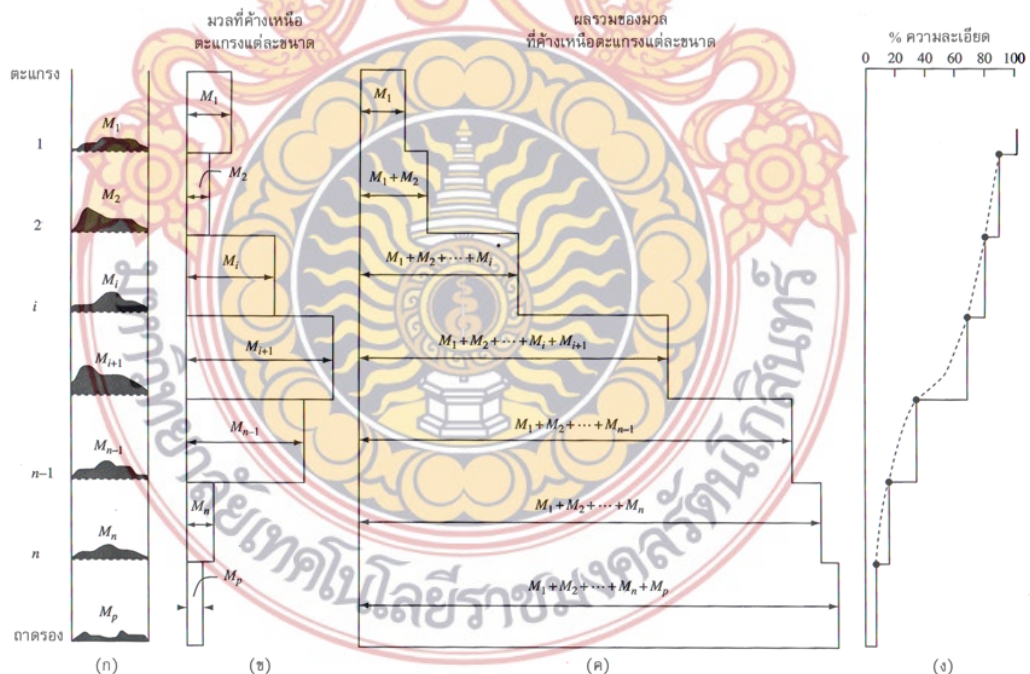


ภาพที่ 3 หลักการหาความถ่วงจำเพาะของดิน [4]

2.2 การทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร้อนผ่านตะแกรง

การก่อสร้างทั่วไปดินมักจะเป็นส่วนประกอบทางวิศวกรรมอย่างหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นการสร้างเขื่อน สนามบิน ถนน แม้แต่ฐานรากอาคารขนาดใหญ่ แต่ดินที่ใช้ในงานก่อสร้างได้ดินนั้นจะต้องมีขนาดคละที่เหมาะสม ซึ่งในการหาว่าดินมีขนาดคละกันอย่างไรนั้นจะต้องทำการหาขนาดของเม็ดดิน โดยดินเม็ดหยาบใช้วิธีการร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน และนำขนาดคละของดิน มาใช้ในการจำแนกประเภทของดินต่อไป

การหาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีการร้อนผ่านตะแกรงจะใช้ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันออกไป สำหรับเบอร์ตะแกรงที่นิยมใช้กันก็คือขนาด 3/8 นิ้ว เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 โดยเบอร์ตะแกรงที่จะขาดไม่ได้ก็คือ เบอร์ 4, 100, 200 ซึ่งตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่ที่สุดจะอยู่บนและไล่ตามลำดับลงมา ดินหรือหินที่เล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะหล่นลงมาในชั้นต่อไป ดินที่ใหญ่กว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะค้างอยู่บนตะแกรง แต่ก็ไม่แน่นอนเสมอไปเพราะว่าตะแกรงนั้นไม่สามารถแบ่งแยกความแบน ความยาวได้ บางครั้งหินหรือดินเม็ดเล็กแต่มีความยาวกว่าขนาดของตะแกรงก็สามารถค้างอยู่บนตะแกรงนั้นได้ โดยมีหลักการหาการกระจายตัวของเม็ดดิน ดังแสดงในภาพที่ 4



$$\text{หาเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงลำดับที่ } i \text{ จาก } \frac{\Sigma M - M_1 + M_2 + \dots + M_i}{\Sigma M} \times 100\%$$

ภาพที่ 4 หลักการหาการกระจายตัวของเม็ดดิน [4]

2.3 การทดสอบหาขีดจำกัดสถานะภาพของดิน

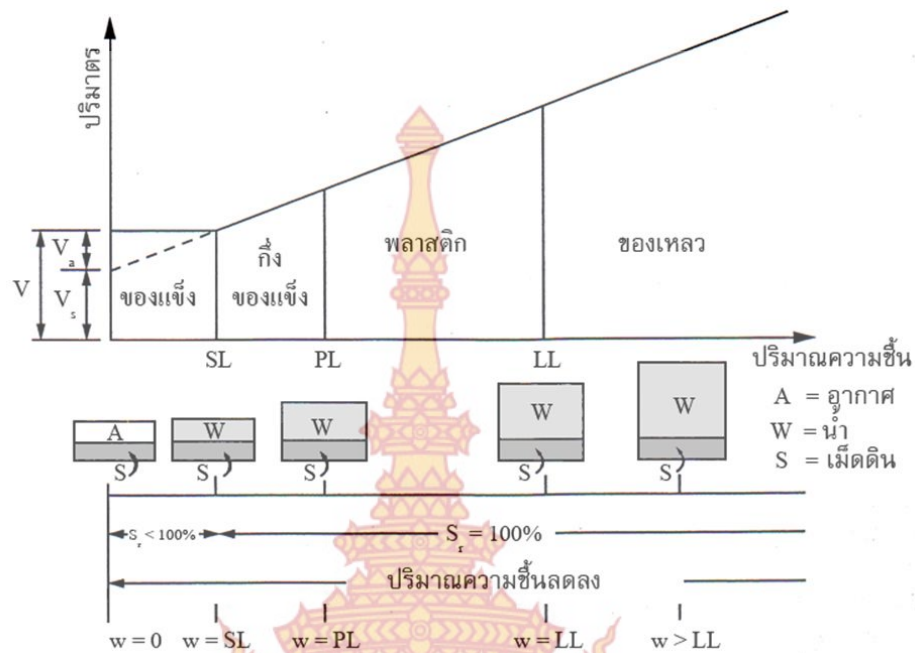
ขีดจำกัดอัตรเตอร์เบอร์ก (Atterberg Limits) หรือ ขีดจำกัดความชื้นเหลว (Consistency Limit) หมายถึงปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้สภาพความเหนียวตัวของมวลดินเปลี่ยนแปลงไป สถานะภาพของมวลดินแบ่งออกเป็น 5 สถานะภาพ โดยจุดแบ่งแต่ละสถานะภาพเรียกว่า ขีดจำกัด (Limit) ดังนี้

ก. Cohesion Limit คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้เศษดินเริ่มมีการยึดเกาะเข้าด้วยกัน
 ข. Sticky Limit คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้มวลดินเริ่มมีการยึดเกาะกับผิวของโลหะ
 ค. ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.) หมายถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินสามารถไหลตัวได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองหรือถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงสถานะภาพของดินก็จะ เป็นขีดจำกัด ที่เปลี่ยนจากของเหลว เป็น พลาสติก สามารถหาค่าได้กับดินที่มีความชื้นแน่น

ง. ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) หมายถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินมีสภาพเหนียวเหนียวมากขึ้น จะมีปริมาณความชื้นในดิน น้อยกว่าขีดจำกัดเหลวหรือถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงสถานะภาพของดินก็คือขีดที่ดินเปลี่ยนจากสภาพพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง

จ. ขีดจำกัดการหดตัว (Shrinkage Limit, S.L.) หมายถึง ปริมาณน้ำมากที่สุดในมวลดินที่ไม่ทำให้ปริมาตรทั้งหมดของมวลดินเปลี่ยนแปลง ในที่นี้ก็คือ ปริมาตรของดินแห้งซึ่งเม็ดดินจะอยู่ชิดกัน แม้จะลดปริมาณน้ำจากขีดจำกัดการหดตัวและสูญเสียความชื้นไปอีกก็ตาม ก็ไม่ทำให้ปริมาตรมวลดินเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ดินเริ่มมีความแข็งแรงขึ้น ซึ่งความชื้นในดินนี้จะน้อยกว่าขีดจำกัดพลาสติก หรือถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงสถานะภาพของดิน ก็จะเป็นขีดจำกัดที่ดินเปลี่ยนจาก สภาพกึ่งของแข็งเป็นของแข็ง ค่าขีดจำกัดหดตัวนี้เป็นค่าที่บอกถึงสภาพการหดตัวหลังจากดินสูญเสียความชื้นไปว่ามีการหดตัวมากน้อยเพียงใด

ต่อมาได้มีการนำค่าขีดจำกัดมาประยุกต์ ซึ่งในปัจจุบันทางด้านวิศวกรรมโยธา จะใช้กันอยู่ 3 ขีดจำกัด คือ ขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก และขีดจำกัดการหดตัว ซึ่งค่าขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดการอ่อนตัว จะใช้พิจารณาในการจำแนกดิน (Soils Classification) สภาพกำลังของดิน ประมาณการทรุดตัวของดินแบบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) และประมาณความหนาแน่นสูงสุดจากการบดอัดดินได้ ส่วนค่าขีดจำกัดการหดตัวจะใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินที่มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยพฤติกรรมของสถานะภาพของดิน ดังแสดงในภาพที่ 5

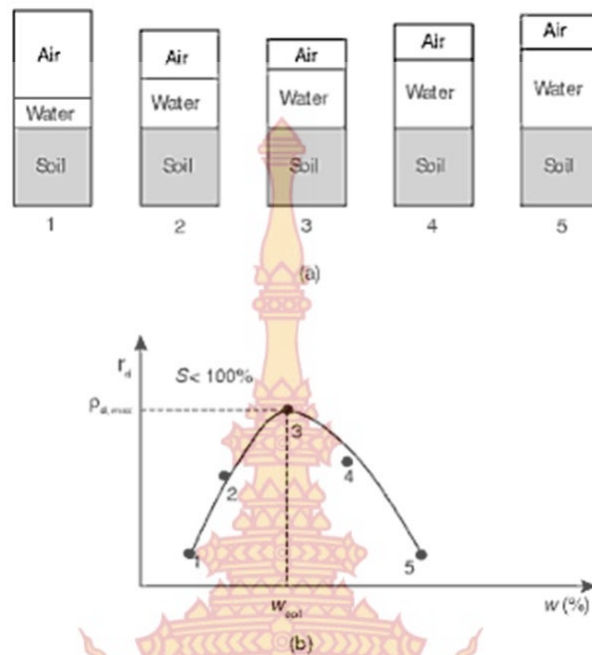


ภาพที่ 5 พฤติกรรมสถานะภาพของดิน [4]

2.4 การทดสอบการบดอัดดิน

การบดอัดดินคือ การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการประยุกต์ใช้พลังงานเชิงกล ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินปริมาณความชื้นที่มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesion less Soil) จะปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบดอัดโดยอาศัยการสั่นสะเทือนและสำหรับดินเหนียว (Cohesive Soil) สามารถทดสอบการบดอัดได้ในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีของ Proctor แต่ถ้าเป็นในสนามสามารถเลือกใช้เครื่องจักรบดอัดชนิดต่างๆกัน โดยพิจารณาความเหมาะสมตามชนิดของดิน

พื้นฐานการบดอัดดินที่มีความเชื่อมแน่น ได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R. Proctor ในปี 1930 โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering News-Record (Proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test (Compaction Test) ซึ่งมีวิธีการทดสอบ 2 แบบคือ การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) โดยพฤติกรรมของดินระหว่างการบดอัดดินดังแสดงในภาพที่ 6

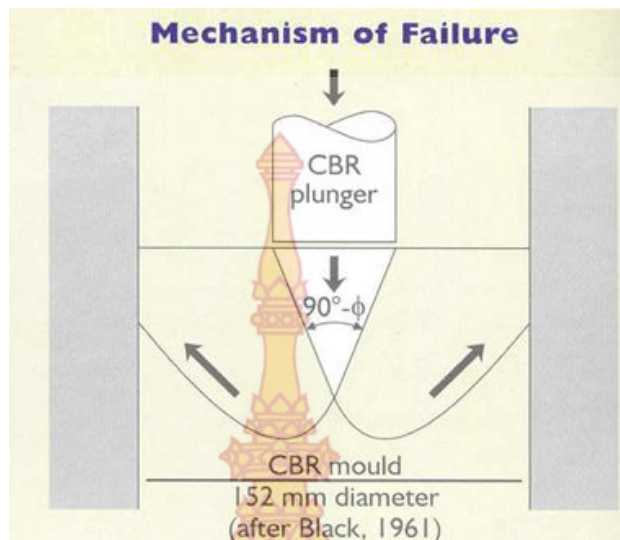


ภาพที่ 6 พฤติกรรมของดินระหว่างการบดอัดดิน [5]

2.5 การทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ของดิน

การทดสอบ California Bearing Ratio หรือเรียกสั้นๆ ว่า การทดสอบ ซี.บี.อาร์. เป็นการทดสอบ เพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่บดอัดแล้ว สำหรับชั้นคันทาง (Subgrade) ชั้นรองพื้นทาง และชั้นพื้นทาง (Base) โดยในแบบก่อสร้างทั่วไปจะกำหนดความหนาแน่นของชั้นดิน ที่จะบดอัดในแต่ละชั้นเป็นร้อยละ ซี.บี.อาร์. โดยถ้าร้อยละ ซี.บี.อาร์. ที่ถูกกำหนดมีค่ามากเท่าใด ก็แสดงว่าชั้นดินนั้นต้องบดอัดให้แน่นมากขึ้นตามไปด้วยการทดสอบ ซี.บี.อาร์. เป็นการหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินหรือหินคลุกที่บดอัดแล้ว โดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปของหน่วยแรงต้านทานของตัวอย่างดินทดสอบที่บดอัด (Test Unit Load) ต่อหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของหินคลุกบดอัด (Standard Unit Load) ในระดับความลึกหรือระยะจมนของแท่งกด (Penetration Piston) ที่เท่ากันแล้วเปรียบเทียบกับออกมาเป็นร้อยละ

การทดสอบ ซี.บี.อาร์. เป็นวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินบดอัดแน่น ด้วยการใช้แท่งกด ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนตัวอย่างดินด้วยความเร็ว 0.05 นิ้วต่ออนาที (1.25 มิลลิเมตรต่ออนาที) แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ได้จากการทดสอบกับวัสดุหินคลุกบดอัดแน่น บนพื้นฐานการทดสอบที่เหมือนกัน โดยค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐาน (Standard Unit Load) ได้ถูกกำหนดเป็นค่ามาตรฐานโดย California Division of Highway สำหรับพฤติกรรมของการเสียรูปในขณะที่ทำการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 พฤติกรรมของการเสียรูปในขณะที่ทำการทดสอบ ซี.บี.อาร์.ของดิน [6]

2.6 การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ

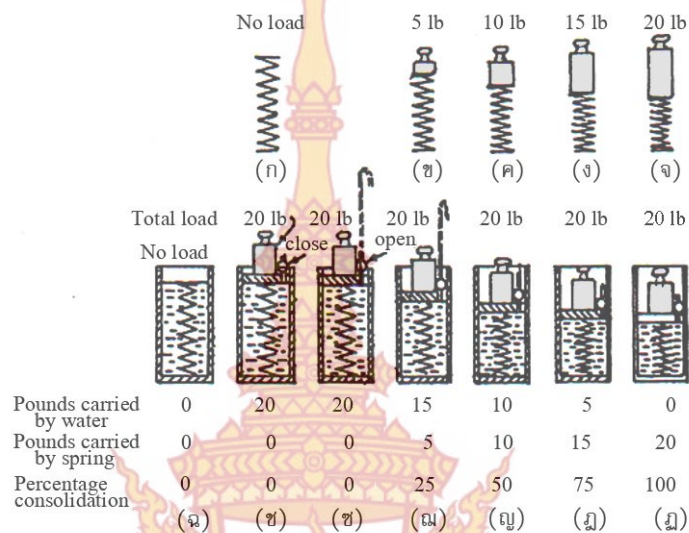
การยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) เป็นลักษณะการทรุดตัวของดินแบบหนึ่งเมื่อมีแรงกดหรือน้ำหนักมากกระทำ จะเกิดขึ้นกับดินที่มีความเชื่อมแน่น เช่น ดินเหนียว ซึ่งเป็นการยุบตัวแบบช้าๆ และใช้ระยะเวลานาน ในหลักของการทดสอบ จะนำน้ำหนักมากกดทับบนตัวอย่างดิน แล้วทิ้งไว้และวัดระยะเวลาการยุบตัวของตัวอย่างดินตามระยะเวลาที่กำหนด แล้วนำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบไปเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ต่อไป ส่วนค่าหรือผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบนี้สามารถนำไปประมาณค่าการทรุดตัวได้ถูกต้องมากขึ้นเพียงใดก็จะขึ้นอยู่กับสภาพตัวอย่างดิน ความละเอียดในการทดสอบ และการพิจารณาต่อผลที่ได้ก่อนนำไปใช้ เป็นต้น เนื่องจากสภาพการทดสอบของตัวอย่างดินจะไม่เหมือนกับสภาพชั้นดินที่อยู่ในธรรมชาติจริง และอุปกรณ์ทดสอบก็มีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง ที่ไม่อาจเลียนแบบสภาพชั้นดินจริงในธรรมชาติได้จึงต้องมีการพิจารณาผลที่ได้ตัวอย่างรอบคอบก่อนนำไปใช้ต่อไป

การยุบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) เป็นลักษณะที่ดินเมื่ออยู่ภายใต้แรงกดที่เพิ่มขึ้นจำนวนหนึ่งแรงกดที่เพิ่มขึ้นนี้ น้ำที่อยู่ในเนื้อดิน (Pores) จะรับไว้ทั้งหมดในช่วงระยะเวลาแรก และระยะเวลาต่อมา น้ำจะเริ่มไหลออกจากดินทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อดิน และเนื้อดินจะรับแรงกดแทนน้ำที่ไหลออกไป เนื้อดินจึงเคลื่อนตัวชิดกัน จึงทำให้ดินยุบตัวลง จากสมมุติฐานการยุบอัดตัว อาจแบ่งสภาพการยุบอัดตัว ออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

ก. Primary Consolidation เป็นการยุบตัวเนื่องจากน้ำในดินไหลออกไป ทำให้ดินรับแรงกดแทนน้ำจึงทำให้เนื้อดินเคลื่อนตัวชิดกันแทนช่องว่างที่น้ำไหลออก การยุบตัวลักษณะนี้จะเป็นแบบ Plastic Deformation

ข. Secondary Compression จะเกิดหลัง Primary Consolidation อาจเกิดขึ้นจากเนื้อดินจัดเรียงตัวกันเองให้แน่นขึ้น จึงทำให้ดินเกิดการยุบตัวลงอีกครั้ง

พฤติกรรมการยุบตัวของน้ำสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสปริง ดังแสดงในภาพที่ 8



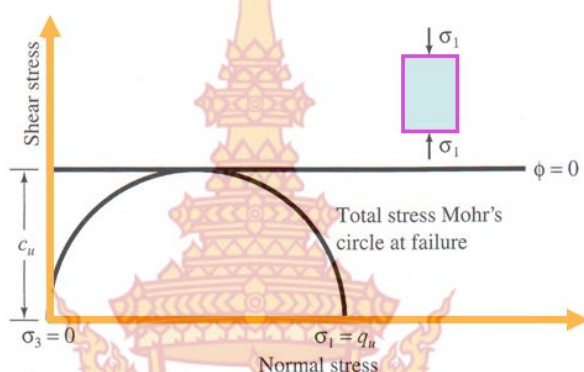
ภาพที่ 8 พฤติกรรมการยุบตัวของน้ำด้วยแบบจำลองสปริง [4]

2.7 การทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง

การทดสอบแท่งตัวอย่างดินชนิดที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) โดยปราศจากแรงดันด้านข้างที่กระทำต่อแท่งตัวอย่างดิน โดยใช้เครื่องทดสอบแบบธรรมดา (Compression Machine) ได้ถูกมาทดสอบมานานแล้วและต่อมาก็เป็นที่ยอมรับกันว่า การที่นำแท่งตัวอย่างดินมาทดสอบแบบนี้สามารถที่จะหาความต้านทานต่อแรงเฉือนของดินได้

การทดสอบแรงเฉือนของดินแบบไม่มีแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test) เป็นการหาค่ากำลังต้านทานต่อแรงกดสูงสุดของเนื้อดิน ที่สามารถทดสอบได้รวดเร็วและค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ซึ่งในการทดสอบจะกระทำโดยให้แรงกดกับแท่งตัวอย่างดิน จนกระทั่งแท่งตัวอย่างดินวิบัติ แล้วนำค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าความเค้นสูงสุด ซึ่งความเค้นที่ได้นี้จะเรียกว่า Unconfined Compression Strength (q_u) ซึ่งตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบจะต้องเป็นตัวอย่างดินที่มีความเชื่อมแน่นที่สามารถปั้นเป็นรูปได้ การรับแรงของดินแบบมีความเชื่อมแน่น จะเป็นไปในลักษณะใช้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ในการรับแรงเป็นส่วนใหญ่ ถ้าดินมีความเชื่อมแน่นน้อยถึงปานกลาง เช่น ทรายหยาบ ทรายละเอียด กรวด เป็นต้น การรับแรงจะเป็นในลักษณะใช้ทั้งแรงยึดเหนี่ยวและแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างเม็ดช่วยกันรับแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้น และถ้าดินมีความเชื่อมแน่นมาก เช่น Clay ก็จะใช้แรงยึดเหนี่ยวในการรับแรงไว้ทั้งหมด ซึ่ง

แรงต่างๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเรียกรวมกันว่า กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength) และตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบนี้ จะไม่มีการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินทดสอบเสร็จก่อนที่ตัวอย่างดินจะระบายน้ำออกได้ทันจึงเป็นการทดสอบดินแบบ Undrained และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้เป็นแบบแรงรวม (Total Stress) โดยผลการทดสอบสามารถนำไปเขียนวงกลมมอร์และหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำได้ ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การเขียนวงกลมมอร์จากการทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง [7]

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิเศษ แจ่มจิตร และประทีป ดวงเดือน [8] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ ใ้ก้านเตา เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังผสมใ้ก้านเตา ซึ่งได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปริมาณของใ้ก้านเตาและอายุของการบ่ม โดยแบ่งเป็นสองเกรด ได้แก่ เกรด B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยโดยเกรด B ผสมใ้ก้านเตากับดินในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 และเกรด D ผสมใ้ก้านเตากับดินในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักของดินแห้ง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณใ้ก้านเตาเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความเหนียวและความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าสูงขึ้น ค่าการทดสอบ ซี.บี.อาร์. แบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) และ การทดสอบ ซี.บี.อาร์. แบบแช่น้ำ (Soaked C.B.R.) ให้ค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 และ 25 ของดินลูกรังเกรด B และ D ตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

รัฐพล สมณา และประชุม คำพูน [1] ได้ทำการศึกษาการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ที่ใช้หินฝุ่น เป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย ได้กำหนดอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด เท่ากับ 1: 2.75 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 โดยนำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำสะอาด 27 วัน ก่อนนำมาแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก จากผล

การทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียดมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่ามอร์ตาร์ปกติ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์ไม่สามารถเพิ่มความทนทานต่อการถูกกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกได้ เพียงแต่จะช่วยชะลอการสูญเสียน้ำหนักจากการถูกกัดกร่อนจากกรดเท่านั้น

ธีระพล ลดาลลิตสกุล และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาถึงการนำเอาเถ้าลอยมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่เหมาะสม ก่อนนำไปผสมกับงานในชั้นทางเดิมเพื่อให้สามารถรับแรงอัดได้ตามมาตรฐานงานเพสเมนต์รีไซเคิล พบว่าเถ้าลอยสามารถนำไปใช้ได้กับงานจริง โดยทำการศึกษาทางสาย 1190 บรรจบทางหลวงหมายเลข 1126 จากการศึกษาพบว่าสัดส่วนผสมของซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 3.1 ของน้ำหนักชั้นทางเดิม โดยได้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 22.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7 วัน เมื่อนำเถ้าลอยมาแทนที่ซีเมนต์ที่ร้อยละ 8 พบว่าค่าแรงอัดสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ เท่ากับ 25.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7 วัน

สมัชชา แสนสุวรรณศรี และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบ ขอนแก่น โดยใช้สารผสมเพิ่ม เพื่อใช้ในงานพื้นทาง สารผสมเพิ่มประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าก้นเตา ที่เป็นส่วนที่เหลือจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นำมาทำการบดด้วยเครื่องบด Ball Mill ซึ่งเถ้าก้นเตาที่ผ่านการบดจะต้องมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดขอบเขตของตัวอย่างดินที่ใช้สารผสมเพิ่มร้อยละ 5 โดยเปลี่ยนสัดส่วนของเถ้าก้นเตาในสารผสมเพิ่มพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างซีเมนต์ต่อเถ้าก้นเตาเป็น 6 ต่อ 4 และโดยการทดสอบความแข็งแรงแบบแคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซ พบว่าใช้สารผสมเพิ่มประมาณร้อยละ 2 ที่อายุ 28 วัน ทำให้ดินลมหอบ ขอนแก่นที่มีความแข็งแรงเท่ากับหินคลุก และสภาพแช่น้ำไม่ได้ทำให้ดินที่ได้รับการปรับปรุงแล้วลดความแข็งแรงลงนอกจากนี้ได้ทดสอบพฤติกรรมในการรับน้ำหนักโดยทำแบบจำลองขนาด 4x4x0.3 เมตร ให้น้ำหนักบรรทุกโดยแผ่นเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.7 เมตร แล้ววัดความดันที่จะกระจายลงไปได้แบบจำลองอีกด้วย

ทรงลักษณ์ วิโรจน์รัตน์ และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของเพสต์ผสมเถ้าก้นเตาละเอียด โดยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่าย เถ้าก้นเตาที่นำมาทำการวิจัยนี้ได้มาจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะมาบดให้มีขนาด 24 ไมโครเมตร จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อหล่อซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาละเอียด จากนั้นนำไปถ่ายภาพขยายกำลังสูง โดยใช้เทคนิค Back-Scatter แล้วใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อหาระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน จากผลการทดลองพบว่า

ระดับการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์และอายุทดสอบ โดยหากมีปริมาณปูนซีเมนต์มากก็จะเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย และเมื่ออายุทดสอบเพิ่มขึ้นระดับการเกิดปฏิกิริยาจะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

สุชาติ ภาคภูมิเกียรติคุณ และ อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ [12] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมผงหินปูน โดยศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีของผงหินปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปคือ ความถ่วงจำเพาะ ระยะเวลาการก่อตัว การไหลแผ่ ปริมาณฟองอากาศ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง และการหดตัว โดยจะเปรียบเทียบกับคุณสมบัติที่ได้จากปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ในอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อผงหินปูนเท่ากับ 100: 0, 95: 5, 90: 10, 85: 15, 80: 20, และ 75: 25 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 28 และ 60 วัน และใช้สารผสมเพิ่มชนิดลดการใช้น้ำปริมาณมากประเภท F ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ทำการหล่อตัวอย่างอัตราส่วนละ 3 ตัวอย่าง ผลจากการวิจัยพบว่า การนำผงหินปูนมาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ จะส่งผลทำให้การหดตัวและร้อยละการไหลแผ่จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น ในส่วนคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง จะลดลงตามปริมาณผงหินปูนที่เพิ่มขึ้นในการแทนที่ปูนซีเมนต์ และพบว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นกำลังรับแรงอัด, แรงดัด และแรงดึง ที่ร้อยละผงหินปูน 5 และ 10 จะมีการพัฒนากำลังเข้าใกล้กำลังรับแรงของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ที่ร้อยละผงหินปูน 15, 20 และ 25 จะมีการพัฒนากำลังต่ำกว่ากำลังรับแรงของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อผงหินปูนที่เหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละ 90: 10 โดยน้ำหนัก

มนตรี เดชาสกุลสม และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตา เพื่อใช้ใน งานทาง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าก้นเตาโดยการทดสอบ การทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง (Unconfined Compressive Strength) ซึ่งได้นำ เถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 แล้วทำการบดอัดลงในแบบหล่อ (Mold Proctors) แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน และทำการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าก้นเตาโดยเฉพาะค่า ซี.บี.อาร์. ทำการทดสอบโดยผสมผงปูนขาวกับเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7, และ 9 แล้วทำการบดอัดลงในแบบหล่อ ซี.บี.อาร์. แบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ความชื้นตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในน้ำไว้ 4 วัน แล้วทำการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ผลการทดสอบพบว่า การทดสอบคุณสมบัติของเถ้าก้นเตา โดยการทดสอบแรงอัดของดิน โดยปราศจากแรงด้านข้าง เมื่อมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 2 ทำให้เถ้าก้นเตา มีค่าแรงกระทำด้านข้าง 9.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถนำมาพิจารณาใช้เป็นวัสดุคั่นทางชั้น (Selected Materials) หรือ ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ได้ และการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าก้นเตา

โดยเฉพาะ ซี.บี.อาร์. ที่ไม่ได้ผสมปูนขามมีค่า ซี.บี.อาร์. ร้อยละ 26.5 เมื่อพิจารณาแล้วสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลเบาใช้ในงานทางได้

รุ่งลาวลย์ ราชัน และ สุขสันต์ หอพิบูลย์สุข [13] ได้ทำการศึกษาการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์ การศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวซีเมนต์ และการทำนายกราฟการอัดตัวคายน้ำ ในส่วนแรกดินเหนียวที่นำมาทำการทดสอบมาจาก ดินเหนียวกรุงเทพ และดินเหนียวอะริอะเคะ โดยดินทั้งสองจะมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติประมาณร้อยละ 76 ถึง 84 และร้อยละ 110 ถึง 140 ตามลำดับ ปริมาณความชื้นของดินจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยการเติมน้ำและผึ่งอากาศให้ได้ดัชนีสภาพเหลวระหว่าง 1.0 ถึง 3.0 หลังจากได้ปริมาณความชื้นตามต้องการแล้ว ผสมดินเหนียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยปริมาณซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 3 ถึง 15 เก็บในห้องความชื้นที่ อุณหภูมิ 21 องศา อายุการบ่มที่ 28 วัน และทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ ดินเหนียวซีเมนต์ลักษณะการอัดตัวที่สภาวะหลังจุดครากถูกควบคุมโดยปริมาณซีเมนต์ ไม่แปรผันตามปริมาณความชื้นในดิน พันธะเชื่อมประสานมีอิทธิพลต่อการซึมผ่านน้ำของดิน ซีเมนต์ที่อัตราส่วนโพรงเท่ากัน ดินเหนียวซีเมนต์จะมีค่าการซึมผ่านต่ำกว่าดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน เส้นการอัดตัวทั่วไปสร้างขึ้นจากข้อมูลการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน

จุฑาทิพย์ เขียวแจ่ม และประทีป ดวงเดือน [14] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกและทรายโดยใช้เถ้าก้นเตา ได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดินปริมาณเถ้าก้นเตาและอายุการบ่ม โดยตัวอย่างหินคลุกทรายและเถ้าก้นเตาที่ได้นำมาทดสอบนั้นมาจากจังหวัดชลบุรี นครสวรรค์ และ ระยอง ตามลำดับ นำมาทำการทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพ และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม ของหินคลุกและทรายโดยผสมกับเถ้าก้นเตาที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดจากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง ผสมกับเถ้าก้นเตากับหินคลุก ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้งและผสมกับทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้งจากการศึกษาพบว่า หินคลุกที่ผสมกับเถ้าก้นเตาจะมีค่าดัชนีความเหนียวลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของหินคลุกและทรายที่ผสมเถ้าก้นเตาต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุด มีแนวโน้มลดลง ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่า ซี.บี.อาร์ แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่อายุการบ่ม

ธีรวุฒิ มุอำห่มัด และ สุรินทร์ มายูร [15] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยปาล์มน้ำมันจากแหล่งต่างๆ ต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ได้นำเถ้าปาล์มน้ำมันจาก 4 แห่งมาทำการศึกษา ได้แก่ บริษัทชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจำกัดมหาชน (มหาชน OP1), ห้างหุ้นส่วนจำกัดมิตรเจริญปาล์มออย (OP2), บริษัท ทักษิณปาล์ม (OP3), บริษัท วิจิตรภัณฑ์สวนปาล์มจำกัด (OP4) และทรายจากคลองท่าแซะ จังหวัดชุมพร ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และ

ค้ำตะแกรงเบอร์ 30 โดยได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของ
ถ่านน้ำมันปาล์ม ที่มีความละเอียดในระดับค้ำบนตะแกรง 325 ร้อยละ 5 โดยถ่านน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็น
ถ่านลอย ใช้ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 50 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ผลการทดลองพบว่า
ถ่านปาล์มน้ำมันจาก 2 ใน 4 แหล่ง จะมีอนุภาคกลมผิวเรียบ เมื่อนำมาใช้ผสมแทนปูนซีเมนต์จึงช่วย
ให้มอร์ต้าร์มีการไหลแผ่ที่ดีขึ้น และทำให้ความต้องการปริมาณน้ำในการผสมน้อยลง เมื่อพิจารณา
ผลการทดสอบการรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ พบว่าถ่านปาล์มน้ำมันจาก 3 ใน 4 แหล่ง ทำให้มอร์ต้าร์
มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด และจะมีค่าสูงกว่ามอร์ต้าร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ล้วน ดังนั้นการนำ
ถ่านปาล์มน้ำมันมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์สามารถทำได้ แต่ต้องพิจารณาเลือกแหล่งที่มา และทดสอบหา
ปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสม



บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการดำเนินการ รวมถึงการทดสอบหาคคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเหล็กกล้า คานเหล็ก และปูนซีเมนต์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการดำเนินการ

การศึกษาครั้งนี้ มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษารวบรวมข้อมูลเนื้อหา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจากเอกสาร ตำราทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ รวมทั้งมาตรฐานในการทดสอบต่างๆ (ASTM)
2. ออกแบบอัตราส่วนผสม ระหว่างเหล็กกล้ากับวัสดุผสมเพิ่ม (หินปูนและปูนซีเมนต์) โดยกำหนดปริมาณของวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10
3. ดำเนินการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเหล็กกล้า คานเหล็กและปูนซีเมนต์ตามอัตราส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้แล้ว โดยการทดสอบในครั้งนี้ได้แก่ การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน การทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง การทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน การบดอัดดิน การซึมผ่านของน้ำ การทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. การทดสอบการยุบตัวของตัวคาน้ำ และการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง
4. อธิบายผลการทดสอบ โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่างอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันของเหล็กกล้ากับวัสดุผสมเพิ่ม
5. สรุปผลการทดสอบ โดยพิจารณาจากอิทธิพลของอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมเพิ่มที่มีต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม รวมถึงแนวทางในการนำวัสดุที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างเหล็กกล้ากับวัสดุผสมเพิ่ม ไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา

2. เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่

1. ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในภาพที่ 10
2. ชุดทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง ดังแสดงในภาพที่ 11
3. ชุดทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน ดังแสดงในภาพที่ 12

4. ชุดทดสอบการบดอัดดิน ดังแสดงในภาพที่ 13
5. ชุดทดสอบการหาค่า ซี.พี.อาร์. ดังแสดงในภาพที่ 14
6. ชุดทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 15
7. ชุดทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 10 ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ



ภาพที่ 11 ชุดทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร้อนผ่านตะแกรง



ภาพที่ 12 ชุดทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน



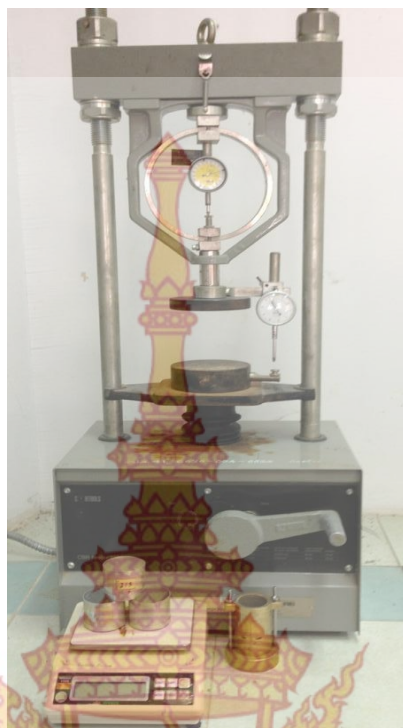
ภาพที่ 13 ชุดทดสอบการบดอัดดิน



ภาพที่ 14 ชุดทดสอบการหาค่า ซี.บี.อาร์.



ภาพที่ 15 ชุดทดสอบการยุบตัวของคาน้ำ



ภาพที่ 16 ชุดทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง

2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 17 มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. แก้วกันเตา นำมาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด (BLCP) นิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด จังหวัดระยอง
2. หินฝุ่น นำมาจาก โรงโม่หิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
3. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราอินทรีเพชร (มอก.15-2547)



ภาพที่ 17 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3. วิธีการทดสอบ

การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเก้าอี้กันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม จะดำเนินการภายใต้การทดสอบดังต่อไปนี้

3.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำเก้าอี้กันเตาและหินฝุ่นมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ให้ได้ปริมาณ 50 กรัม สำหรับตัวอย่างเก้าอี้กันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ต้องทำการบดให้ละเอียดก่อนแล้วจึงนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ให้ได้ปริมาณ 50 กรัม

3.1.2 การสอบเทียบ

เติมน้ำกลั่นลงในขวดประมาณ $3/4$ ของคอขวด จึงทำการไล่ฟองอากาศด้วยการต้ม เติมน้ำกลั่นที่ต้มไล่ฟองอากาศแล้วเทลงในขวดฟลาคซ์ให้เต็มด้วยวิธีลึกลงน้ำตรวจสอบว่าอุณหภูมิของน้ำในขวดฟลาคซ์เท่ากันทุกระดับหรือไม่ ถ้าไม่เท่ากันคลึงขวดเอียงไปมาหรือใช้หลอดแก้วคน แต่งขอบให้อยู่ที่ขีดบอกปริมาตร 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำขวดฟลาคซ์และน้ำขึ้นชั่ง และวัดอุณหภูมิน้ำทำการทดสอบซ้ำสัก 4-5 ครั้ง เพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบน้ำหนักน้ำ และขวดฟลาคซ์ตามอุณหภูมิ

3.1.3 ขั้นตอนการทดสอบ

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ ใส่ขวดฟลาคซ์และใส่น้ำลงไปประมาณ $3/4$ ส่วนของปริมาตรขวด โดยให้ดินทรายจมอยู่ใต้น้ำทั้งหมดและอย่าให้เก้าอี้กันเตาติดอยู่ข้างๆขวด ทำการไล่ฟองอากาศโดยการนำน้ำไปต้มอย่างน้อย 10 นาที พร้อมกับคลึงขวดไปมาหลายรอบทำเช่นนี้สลับกันไปเรื่อยๆ และคอยสังเกตว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นอีกหรือไม่ ทำจนกระทั่งไล่ฟองอากาศหมดไป หลังจากนั้นทำการเติมน้ำกลั่น ให้มีระดับท้องน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิลิตรพอดีแล้วตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำในขวดฟลาคซ์เท่ากับอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่ต้องการและคอยสังเกตว่าถ้าระดับน้ำในขวดฟลาคซ์ต่ำกว่าขีด 500 มิลลิลิตร ให้เติมน้ำกลั่นให้ท้องน้ำพอดีกับขีดอยู่เสมอหลังจากนั้นนำขวดฟลาคซ์ไปชั่ง จะได้น้ำหนักของขวดฟลาคซ์+น้ำ+ตัวอย่าง ทำการวัดอุณหภูมิแล้วบันทึกค่าอุณหภูมินี้ไว้ แล้วนำไปเทใส่ภาชนะ โดยต้องเทตัวอย่างออกให้หมดจากขวดฟลาคซ์ แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่อบแห้งแล้วไปชั่งแล้วบันทึกค่า เพื่อนำไปหาค่าความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

3.2 การทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำเถ้ากั้นเตาและหินฝุ่นมาชั่งน้ำหนักในปริมาณ 800 กรัม

3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

หาขนาดคละของตัวอย่าง โดยทำความสะอาดตะแกรงแล้วนำตะแกรงไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า หลังจากนั้นนำตะแกรงมาเรียงซ้อนกันโดยให้ตะแกรงที่มีขนาดใหญ่อยู่บนแล้วเรียงขนาดเล็กลงมาตามลำดับจนถึงถาดรอง ดังนี้ No. 4, 10, 60, 100, 140, 200 และ ถาดรองนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ 800 กรัม เทใส่ลงบนตะแกรงชั้นบนสุด ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องเขย่าใช้เวลาการเขย่า 10 นาที แล้วจึงนำตะแกรงพร้อมตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 19 และนำไปหาเปอร์เซ็นต์ผ่านของตะแกรงแต่ละเบอร์ แล้วนำไปเขียนกราฟแสดงการกระจายตัวของตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 19 ขั้นตอนการทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง

3.3 การทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน

3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำแฉักันเตาที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 แล้วมาผสมกับวัสดุผสมเพิ่ม (หินฝุ่นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และปูนซีเมนต์) ในปริมาณร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักแห้งของแฉักันเตา

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบขีดจำกัดเหลว เตรียมตัวอย่างโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 100 กรัม ใส่ในถ้วยเคลือบแล้วใส่น้ำประมาณ 15-20 มิลลิลิตร หรือปริมาณที่ไม่เหนียวจนเกินไปผสมให้เข้ากัน เตรียมอุปกรณ์ชุดทดสอบให้ความสูงของกันจานอยู่สูงกว่าพื้นรอง 1 ± 0.2 เซนติเมตร โดยใช้ด้ามของเครื่องมือปาดรองดิน จากนั้นวัดทำการปรับป้อนเลื่อนต่างๆ ให้แน่นแล้วใช้

มีดปาดตัวอย่างตัดตัวอย่างใส่ในงานปาดให้เรียบ ให้มีความหนาของตัวอย่างตรงกลาง ประมาณ 1 เซนติเมตร ทำการบดตัวอย่างในงานด้วยเครื่องมือปาดร่องตัวอย่าง ให้เป็นร่องในครั้งเดียวกันจนเห็นพื้นของถ้วยทองเหลืองในทันที ซึ่งใช้ความเร็วในการหมุน ประมาณ 2 ครั้งต่อ 1 วินาที โดยนับจำนวนครั้งไว้ด้วย ทำการหมุนจนกระทั่งดินที่บดไว้ได้ไหลเข้ามาชนกัน เป็นระยะทาง 1/2 นิ้ว (12.7 มิลลิเมตร) แล้วทำการตัดตัวอย่างโดยเฉพาะตรงที่ไหลมาชนกัน โดยใช้มีดปาดดินปาดขนานกันให้ระยะห่างพอดีกับระยะที่ตัวอย่างไหลมาชนกันตัดหัวท้ายในแนวตั้งฉาก นำตัวอย่างที่ถูกตัดใส่ใส่กระป๋อง แล้วนำไปอบเพื่อหาค่าปริมาณความชื้น

การทดสอบขีดจำกัดพลาสติก นำตัวอย่างร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 20 กรัม ผสมกับน้ำให้เข้ากันพยายามให้หมาดที่สุด ปั้นเป็นก้อนกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร นำไปคลึงบนแผ่นกระจกในอัตรา 80-90 ครั้งต่อนาที จนกระทั่งเป็นเส้นกลมยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว (3.2 มิลลิเมตร) แล้วให้เกิดรอยแตกเล็กๆ ทั่วไป นำตัวอย่างที่ได้ใส่ในกระป๋อง แล้วนำไปอบเพื่อหาปริมาณความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน

3.4 การทดสอบการบดอัดดิน

3.4.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำเอากันเตาผสมกับวัสดุผสมเพิ่มตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 2 แล้วนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ให้ได้ปริมาณ 3 กิโลกรัม สำหรับการทดสอบโดยใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ทดสอบแบบมาตรฐาน (Standard Proctor)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนวัสดุผสมเพิ่มสำหรับเตรียมตัวอย่างเอากันเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์

อัตราส่วนผสมระหว่าง เอากันเตากับวัสดุผสมเพิ่ม	LD (สำหรับหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรง เบอร์#10 และ ค้ำตะแกรงเบอร์ #60)	SD (สำหรับหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรง เบอร์#60)
B	100	100
ร้อยละ 2 D : C	100 : 0 50 : 50 0 :100	100 : 0 50 : 50 0 :100
ร้อยละ 4 D : C	100 : 0 50 : 50 0 :100	100 : 0 50 : 50 0 :100
ร้อยละ 6 D : C	100 : 0 50 : 50 0 :100	100 : 0 50 : 50 0 :100
ร้อยละ 8 D : C	100 : 0 50 : 50 0 :100	100 : 0 50 : 50 0 :100
ร้อยละ 10 D : C	100 : 0 50 : 50 0 :100	100 : 0 50 : 50 0 :100

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบการบดอัดดิน นำตัวอย่างดินที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 2 มาเทลงในภาตผสมดิน พิจารณาเม็ดดินเพื่อเลือกใช้แบบหล่อ ให้เหมาะสมกับขนาดของเม็ดดิน แล้วประมาณปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เริ่มทำการทดสอบโดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบหล่อ เพื่อหาปริมาตรของดินในแบบหล่อ จากนั้นทำการประกอบแบบหล่อ และแผ่นฐาน พร้อมชั่งน้ำหนัก (ไม่ต้องชั่งปลอก) นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้มาทำการทดสอบโดยเริ่มผสมน้ำให้มีความชื้น ตามค่าที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน ตักดินใส่แบบหล่อที่ประกอบไว้แล้ว โดยกะปริมาณให้ความสูงในแต่ละชั้นเท่าๆ กัน โดยมีจำนวน 3 ชั้น เมื่อบดอัดครบจำนวนชั้นแล้วให้ดินพื้นขอบแบบหล่อขึ้นไปประมาณ 1-2 เซนติเมตร โดยใช้ค้อนบดอัดดินในแบบหล่อแต่ละชั้นให้ทั่วทั้งแบบหล่อบดอัดชั้นละ 25 ครั้ง โดยให้แบบหล่อบวางอยู่บนพื้นคอนกรีตเรียบถอดปลอกออกแล้วใช้เหล็กปาดดิน ปาดดินที่เกินขอบแบบหล่อออก และแต่งผิวดินให้เรียบ ใช้แปรงขนอ่อนปัดเศษดินที่ค้างอยู่อกให้หมดแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ดันแท่งตัวอย่างดินออกจากแบบหล่อแล้วผ่ากลางตามแนวตั้งเพื่อเก็บตัวอย่างตามแนวผ่า ประมาณ 100 กรัม ไปอบเพื่อหาค่าปริมาณความชื้น ใช้ค้อนยางทุบก้อนดินที่เหลือให้แตกออกจนร่วน แล้วจึงผสมน้ำเพิ่มขึ้นอีกตามที่ได้ออกแบบไว้ คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วทำทดสอบซ้ำเช่นเดิมจนกระทั่งน้ำหนักดินเริ่มลดลง แล้วทดสอบเพิ่มอีกครั้ง เพื่อให้ได้กราฟทางด้านเปียก ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ขั้นตอนการทดสอบการบดอัดดิน

3.5 การทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์.

3.5.1 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างดังตารางที่ 3 โดยนำมาผสมกับน้ำในปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดินให้เข้ากันทั่วถึง

ตารางที่ 3 อัตราส่วนวัสดุผสมเพิ่มสำหรับเตรียมตัวอย่างเก้าอี้เตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์

อัตราส่วนผสมระหว่าง เก้าอี้เตากับวัสดุผสมเพิ่ม	LD (สำหรับหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรง เบอร์#10 และ ค้ำตะแกรงเบอร์ #60)	SD (สำหรับหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรง เบอร์#60)
B	100	100
ร้อยละ 2 D : C	50 : 50	50 : 50
ร้อยละ 4 D : C	50 : 50	50 : 50
ร้อยละ 6 D : C	50 : 50	50 : 50
ร้อยละ 8 D : C	50 : 50	50 : 50
ร้อยละ 10 D : C	50 : 50	50 : 50

3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ของตัวอย่างโดยทดสอบกับตัวอย่างที่ไม่แช่น้ำเตรียมตัวอย่างที่ต้องการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการบดอัดดิน เริ่มทำการทดสอบโดยทำการชั่งน้ำหนักของแบบหล่อ ซี.บี.อาร์. แล้วยัด แบบหล่อ ซี.บี.อาร์. กับแผ่นฐานให้แน่นพอสมควร และนำแผ่นรองมาใส่ลงในแบบหล่อ ซี.บี.อาร์. หมุนเอาหูหิ้วของแผ่นรองออก นำเอากระดาษกรองมารองบนแผ่นรองเพื่อป้องกันตัวอย่างทดสอบติดกับแผ่นรองพร้อมประกอบปลอกให้เรียบร้อย แล้วทำการบดอัดตัวอย่างจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 56 ครั้ง ถอดปลอกออก ปาดตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอขอบแบบหล่อ ซี.บี.อาร์. แล้วยกออกจากฐานรองนำไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักเฉพาะของตัวอย่างทดสอบใน

แบบหล่อ ซี.บี.อาร์. แล้วพลิกกลับเอาด้านที่มีตัวอย่างทดสอบเสมอขอบของ แบบหล่อ ซี.บี.อาร์. มาวางลงบนฐานรองซึ่งรองด้วยกระดาษกรองไว้ก่อนแล้ว ทำการยึดแบบหล่อ ซี.บี.อาร์. กับฐานรองให้แน่น หลังจากเตรียมตัวอย่างทดสอบเสร็จแล้วให้นำตัวอย่างทดสอบที่เหลือจากการบดอัดไปหาค่าปริมาณความชื้นทันที นำตัวอย่างทดสอบที่เตรียมไว้มาทดสอบโดยการวางแผ่นน้ำหนักที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกันหรือเท่ากับน้ำหนักของวัสดุที่กดลงบนชั้นพื้นดินจริงให้กดทับลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบเสร็จเรียบร้อยแล้วให้นำไปวางในเครื่องทดสอบ ทำการปรับแต่งกด โดยให้ผ่านรูตรงกลางของแผ่นน้ำหนัก และให้แท่งกดสัมผัสกับผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบพอดี โดยค่อยๆ ปรับและคอยสังเกตเข็มของมาตรวัดน้ำหนักกระทำ เริ่มขยับขึ้นจึงหยุดปรับ เสร็จแล้วทำการติดตั้งมาตรวัดระยะการทรุดตัว เพื่ออ่านค่าระยะจมของแท่งกด แล้วทำการปรับมาตรวัดทั้งสองให้เข็มอยู่ในตำแหน่งเลขศูนย์ เริ่มกดแท่งกดลงบนตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราการกด 0.05 นิ้ว (1.27 มิลลิเมตร) ต่อนาที ต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอ และอ่านค่าน้ำหนักกดจากมาตรวัดน้ำหนักกระทำ ที่ระยะจม 0.025 นิ้ว (0.64 มิลลิเมตร), 0.050 นิ้ว (3.81 มิลลิเมตร), 0.075 นิ้ว (1.91 มิลลิเมตร), 0.100 นิ้ว (2.54 มิลลิเมตร), 0.125 นิ้ว (3.18 มิลลิเมตร), 0.150 นิ้ว (3.81 มิลลิเมตร), 0.175 นิ้ว (4.45 มิลลิเมตร), 0.200 นิ้ว (5.08 มิลลิเมตร), 0.250 นิ้ว (6.35 มิลลิเมตร), 0.300 นิ้ว (7.62 มิลลิเมตร), 0.350 นิ้ว (8.98 มิลลิเมตร), 0.400 นิ้ว (10.16 มิลลิเมตร), 0.450 นิ้ว (11.43 มิลลิเมตร) และ 0.500 นิ้ว (12.7 มิลลิเมตร) ตามลำดับ แล้วทำการถอดแท่งกดกลับดังเดิม โดยหมุนให้เข็มของมาตรวัดระยะการทรุดตัวกลับคืนจนสุด แล้วจึงนำชุดซี.บี.อาร์. ออกจากเครื่องทดสอบ นำตัวอย่างทดสอบส่วนหนึ่งไปหาค่าปริมาณความชื้น การเก็บตัวอย่างทดสอบเพื่อไปหาค่าปริมาณความชื้นนั้นควรเก็บบริเวณตรงกลางของตัวอย่างทดสอบ

ในการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ของตัวอย่างโดยทดสอบกับตัวอย่างที่แช่น้ำเตรียมตัวอย่างที่ต้องการทดสอบให้เหมือนกับการทดสอบการบดอัดดิน เริ่มทำการทดสอบโดยทำการชั่งน้ำหนักของแบบหล่อ ซี.บี.อาร์. แล้วยึด แบบหล่อ ซี.บี.อาร์. กับแผ่นฐานให้แน่นพอสมควร และนำแผ่นรองมาใส่ลงในแบบหล่อ ซี.บี.อาร์. หมุนเอาหูหิ้วของแผ่นรองออก นำเอากระดาษกรองมารองบนแผ่นรองเพื่อป้องกันตัวอย่างทดสอบติดกับแผ่นรองพร้อมประกอบปลอกให้เรียบร้อยแล้วทำการบดอัดตัวอย่างจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 56 ครั้ง ถอดปลอกออกปาดตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอขอบของแบบหล่อ ซี.บี.อาร์.แล้วทำการยกออกจากฐานรองนำไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักเฉพาะของตัวอย่างทดสอบในแบบหล่อ ซี.บี.อาร์.แล้วพลิกกลับเอาด้านที่มีตัวอย่างทดสอบเสมอขอบของแบบหล่อ ซี.บี.อาร์.มาวางลงบนฐานรองซึ่งรองด้วยกระดาษกรองไว้ก่อนแล้ว ทำการยึดแบบหล่อ ซี.บี.อาร์.กับฐานรองให้แน่น หลังจากเตรียมตัวอย่างทดสอบเสร็จแล้วให้นำตัวอย่างทดสอบที่เหลือจากการบดอัดไปหาค่าปริมาณความชื้นทันที จากนั้นให้วางกระดาษกรองลงบนผิวหน้าของตัวอย่าง วางแผ่นวัดการบวมตัว และวางแผ่นน้ำหนักลงตามลำดับโดยแผ่นน้ำหนัก นี้ต้องมีน้ำหนักใกล้เคียงหรือเท่ากับวัสดุที่

กดลงบนชั้นพื้นดินจริง แขนชุดทดสอบลงในถังน้ำ ให้น้ำสามารถไหลเข้าตัวอย่างทดสอบได้ทั้งด้านล่างและด้านบน ซึ่งหลังจากแช่น้ำแล้ว ควรปรับให้ระดับผิวหน้าอยู่เสมอประมาณขอบปากของแบบหล่อ ซี.บี.อาร์. พร้อมกับปรับแกนของแผ่นวัดการบวมตัว ให้สัมผัสกับขาของมาตรวัดซึ่งวางติดกับสามขาวัดการบวม แล้วจึงปรับมาตรวัดให้เป็นศูนย์ อ่านค่าการบวมตัวของตัวอย่างทดสอบทุกๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 96 ชั่วโมงหรือเมื่อตัวอย่างทดสอบหยุดการบวมตัว เสร็จแล้วนำขึ้นมาจากน้ำ และนำอุปกรณ์ที่ประกอบกรหาค่าการบวมตัวออกให้หมดแล้วคว่ำ แบบหล่อ ซี.บี.อาร์. พลั่วทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้น้ำระบายออกไปจากตัวอย่างทดสอบ ถ้ามีน้ำขังอยู่บางส่วนก็ให้ใช้กระดาษซับน้ำช่วย แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบใน แบบหล่อ ซี.บี.อาร์. จากนั้นจึงนำมาทดสอบโดยการวางแผ่นน้ำหนักที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกันหรือเท่ากับน้ำหนักของวัสดุที่กดลงบนชั้นพื้นดินจริง ให้กดทับลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบและในกรณีที่เป็นตัวอย่างทดสอบแบบแช่น้ำ น้ำหนักของแผ่นน้ำหนักนี้จะต้องเท่ากับน้ำหนักที่กดเดิมขณะที่ตัวอย่างทดสอบแช่อยู่ในน้ำ เสร็จแล้วนำไปวางในเครื่องทดสอบแรงกด แล้วทำการปรับแต่งกด โดยให้ผ่านรูตรงกลางของแผ่นน้ำหนัก และให้แท่งกดสัมผัสกับผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบพอดี โดยค่อยๆปรับและคอยสังเกตเข็มของมาตรวัด น้ำหนักกระทำเริ่มขยับขึ้นจึงหยุดปรับ เสร็จแล้วทำการติดตั้งมาตรวัดระยะการทรุดตัว เพื่ออ่านค่าระยะจมของแท่งกด แล้วทำการปรับมาตรวัดทั้งสองให้เข็มอยู่ในตำแหน่งเลขศูนย์ เริ่มกดแท่งกดลงบนตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราการกด 0.05 นิ้ว (1.27 มิลลิเมตร) ต่อนาที ต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอ และอ่านค่าน้ำหนักกดจากมาตรวัด น้ำหนักกระทำที่ระยะการทรุดตัว 0.025 นิ้ว (0.64 มิลลิเมตร), 0.050 นิ้ว (3.81 มิลลิเมตร), 0.075 นิ้ว (1.91 มิลลิเมตร), 0.100 นิ้ว (2.54 มิลลิเมตร), 0.125 นิ้ว (3.18 มิลลิเมตร), 0.150 นิ้ว (3.81 มิลลิเมตร), 0.175 นิ้ว (4.45 มิลลิเมตร), 0.200 นิ้ว (5.08 มิลลิเมตร), 0.250 นิ้ว (6.35 มิลลิเมตร), 0.300 นิ้ว (7.62 มิลลิเมตร), 0.350 นิ้ว (8.98 มิลลิเมตร), 0.400 นิ้ว (10.16 มิลลิเมตร), 0.450 นิ้ว (11.43 มิลลิเมตร) และ 0.500 นิ้ว (12.7 มิลลิเมตร) ตามลำดับ แล้วทำการถอดแท่งกดกลับตั้งเดิม โดยหมุนให้เข็มของมาตรวัดการทรุดตัวกลับคืนจนสุด แล้วจึงนำชุดแบบหล่อ ซี.บี.อาร์. ออกจากเครื่องทดสอบ นำตัวอย่างทดสอบส่วนหนึ่งไปหาค่าปริมาณความชื้น แล้วเก็บตัวอย่างทดสอบเพื่อไปหาค่าปริมาณความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ขั้นตอนการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์.

3.6 การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ

3.6.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำเอาก้อนเตาผสมกับวัสดุผสมเพิ่มตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 4 แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้ปริมาณน้ำในการผสมรวมกันเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดิน เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วนำมาบรรจุลงในวงแหวนเตรียมตัวอย่างโดยควบคุมให้ความหนาแน่นของส่วนผสมเท่ากับความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดิน

ตารางที่ 4 อัตราส่วนวัสดุผสมเพิ่มสำหรับเตรียมตัวอย่างเอาก้อนเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์

อัตราส่วนผสมระหว่าง เอาก้อนเตากับวัสดุผสมเพิ่ม	LD (สำหรับหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรง เบอร์#10 และ ค้ำตะแกรงเบอร์ #60)	SD (สำหรับหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรง เบอร์#60)
B	100	100
ร้อยละ 10	50 : 50	50 : 50
D : C	0 : 100	0 : 100

3.6.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ทำการชั่งน้ำหนัก วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของวงแหวน นำวงแหวน ไปกดลงบนตัวอย่างที่เตรียมไว้ แล้วใช้เลื่อยมาทำการตกแต่งผิวของตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่าง ให้เรียบ และนำตัวอย่างที่เหลือไปหาค่าปริมาณความชื้น แล้วนำวงแหวน+ตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาความหนาแน่นของตัวอย่าง และอัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น นำตัวอย่างติดตั้งในกล่องเตรียมตัวอย่างดิน ซึ่งมีแผ่นหินพรุนและกระดาษรองที่เปียกน้ำโดยจะต้องไล่ฟองอากาศออกจากหินพรุนก่อนนำมาประกบเข้ากับตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่าง เพื่อให้น้ำสามารถไหลออกได้สะดวก นำกล่องเตรียมตัวอย่างดินติดตั้งในโครงถ่างน้ำหนัก (Loading Frame) แล้วติดตั้งมาตรวัดเพื่อวัดการทรุดตัวของตัวอย่าง ใส่ น้ำในกล่องเตรียมตัวอย่างดินให้ระดับน้ำอยู่เหนือระดับตัวอย่างดิน

หลังจากได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ให้เรียบร้อยแล้วจึงเตรียมน้ำหนักที่ได้จากคำนวณ เพื่อนำมาแขวนที่คานในแต่ละชั้นของการเพิ่มน้ำหนัก หมุนแล้วปรับลูกตุ้มถ่วงน้ำหนักให้มีแนวคานสมดุลและขนานกับแนวราบโดยสังเกตจากระดับน้ำฟองยาวที่ติดตั้งไว้ที่คาน จากนั้นทำการหมุนให้ไปยันกับด้านล่างของคาน วางน้ำหนักในชั้นแรกลงบนที่แขวนน้ำหนักแล้ว ตรวจสอบความพร้อมก่อนการปล่อยน้ำหนัก ให้ปลายของมาตรวัดยันกับก้านวางโหลด (Loading Stem) พร้อมปรับ

เข็มหน้าปัดของมาตรวัดให้อยู่ที่ศูนย์ หมุนที่รับคานงัดลงให้สุดพร้อมกับเริ่มจับเวลา ที่เวลาต่างๆ ดังนี้ 7, 15, 30 วินาที 1, 2, 4, 8, 15, 30 นาที 1, 2, 4 ชั่วโมง และบันทึกค่าการทรุดตัวจากมาตรวัด ตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ โดยวิธีรากที่สองของเวลา (Square Root Time) หลังจากปล่อยน้ำหนักครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการเพิ่มน้ำหนักขั้นต่อไป โดยการหมุนที่รองรับคานขึ้นมา และที่ได้คานพอดี แล้วนำน้ำหนักขั้นต่อไปมาแขวนที่แผ่นรับน้ำหนัก พร้อมกับเอาน้ำหนักเดิมออก รอจับเวลาปล่อยน้ำหนักเพื่ออ่านค่าการทรุดตัวที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อเพิ่มน้ำหนักถึงขั้นสุดท้ายแล้ว จากนั้นทำการถอนน้ำหนักออกทีละระดับโดยแต่ละระดับใช้เวลาประมาณ 6-8 ชั่วโมง แล้วบันทึกค่าการบวมตัวทุกระดับจนหมดน้ำหนัก หลังจากทดสอบตัวอย่างดินเรียบร้อยแล้ว จึงถอดกล่องเตรียมตัวอย่างดินออก เพื่อนำตัวอย่างดินที่อยู่ในวงแหวน มาชั่งน้ำหนักแล้วนำตัวอย่างดินไปอบหาความชื้น หลังการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ขั้นตอนการทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำ

3.7 การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง

3.7.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำเอากันเตาผสมกับวัสดุผสมเพิ่มตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 5 แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยใช้ปริมาณน้ำในการผสมรวมกันเท่ากับปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดิน เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วนำมาบรรจุลงในแบบหล่อเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 เซนติเมตร สูง 7.6 เซนติเมตร แล้วทำการบดอัดโดยใช้พลังงานเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการทดสอบบดอัดดินแบบมาตรฐาน

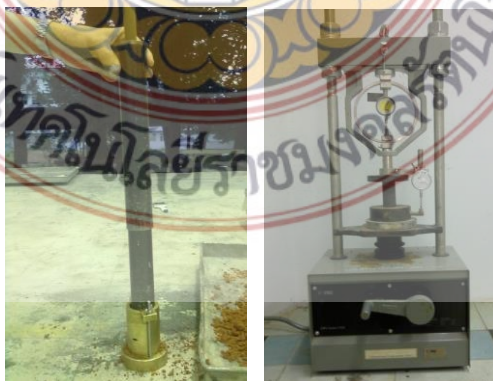
ตารางที่ 5 อัตราส่วนวัสดุผสมเพิ่มสำหรับเตรียมตัวอย่างเอ้ากันเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์

อัตราส่วนผสมระหว่าง เอ้ากันเตากับวัสดุผสมเพิ่ม	LD (สำหรับหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรง เบอร์#10 และ ค้ำตะแกรงเบอร์ #60)	SD (สำหรับหินฝุ่นที่ผ่านตะแกรง เบอร์#60)
B	100	100
ร้อยละ 2 D : C	100 : 0 50 : 50 0 : 100	100 : 0 50 : 50 0 : 100
ร้อยละ 4 D : C	100 : 0 50 : 50 0 : 100	100 : 0 50 : 50 0 : 100
ร้อยละ 6 D : C	100 : 0 50 : 50 0 : 100	100 : 0 50 : 50 0 : 100
ร้อยละ 8 D : C	100 : 0 50 : 50 0 : 100	100 : 0 50 : 50 0 : 100
ร้อยละ 10 D : C	100 : 0 50 : 50 0 : 100	100 : 0 50 : 50 0 : 100

3.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ

เตรียมตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 เซนติเมตร สูง 7.6 เซนติเมตร เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินที่เตรียมขึ้นเอง ซึ่งเป็นตัวอย่างดินที่เตรียมใหม่จากการบดอัด ให้มีความหนาแน่นและความชื้นตามต้องการ ซึ่งวิธีเตรียมก็คล้ายกับการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor, Modified AASHO) ต่างกันที่รูปร่างของแบบหล่อจะเปลี่ยนไปให้เหมาะสมกับขนาดมาตรฐานสำหรับการทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้างดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อต้นตัวอย่างออกจากแบบสำหรับบดอัดแล้วตกแต่งด้านบนและด้านล่างให้เรียบได้ระดับแล้วจึงใช้กระบอกผ่า (Split Mold) หุ้มตัวอย่างแล้วตัดส่วนล่างและส่วนบนของตัวอย่างให้ได้ความยาวตามต้องการ แล้วทำการวัดขนาดที่แน่นอนโดยใช้เวอร์เนีย ความสูงควรวัดอย่างน้อย 3 คาร์รอบตัวอย่าง เช่นเดียวกับเส้นผ่านศูนย์กลางก็ควรจะวัดตอนบน ตอนกลางและตอนล่างเพื่อนำค่าเหล่านี้มาหาค่าเฉลี่ยต่อไปจัดวางตัวอย่างลงบนเครื่องทดสอบแล้วจัดให้ได้ศูนย์กลางของแนวกดปกติก็จะมีแผ่นพลาสติกกลมประกบไว้ทั้งด้านล่างและด้านบนเพื่อลดความผิดพลาดที่ไม่ต้องการแล้วจัดมาตรวัดสำหรับวัดการหดตัวให้เข้าที่ โดยเริ่มตั้งที่เลขศูนย์เพื่อสะดวกในการอ่าน

นำตัวอย่างดินมาวางบนแท่นสำหรับทดสอบ และปรับแป้นกดของเครื่องให้สัมผัสกับผิวบนและล่างของตัวอย่างดินพอดี ปรับมาตรวัดสำหรับวัดการหดตัวและวัดแรงในวงแหวนวัดแรง ให้มีค่าเริ่มต้นอยู่ที่ศูนย์เริ่มการกดตัวอย่างโดยให้อัตราการกดคงที่ตามความเหมาะสมในช่วงการอ่าน ต่างๆ กัน ทำการบันทึกข้อมูลจากวงแหวนวัดแรงทุกๆ การหดตัว 0.005 นิ้ว ของตัวอย่าง เมื่อแรงในวงแหวนวัดแรงเพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วจึงเริ่มลดลง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดินแล้วอ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉือน (Failure Plane) บนตัวอย่างได้ชัดเจน ในบางกรณีที่ไม่มียอยเฉือนปรากฏชัด เช่น ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ ต้องทดสอบจนการหดตัวถึงประมาณ ร้อยละ 20 ของความสูงตัวอย่าง บันทึกสัญลักษณ์การเกิดรอยเฉือน และวัดมุมที่รอยเฉือนทำกับแนวราบตัวอย่างดิน ที่ทำการทดสอบเสร็จแล้วต้องนำไปชั่งและเข้าเตาอบเพื่อหาปริมาณความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ขั้นตอนการทดสอบแรงอัดปราศจากแรงด้านข้าง

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ผลการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม และผลการทดสอบหาค่าการซึมผ่านได้ของน้ำของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

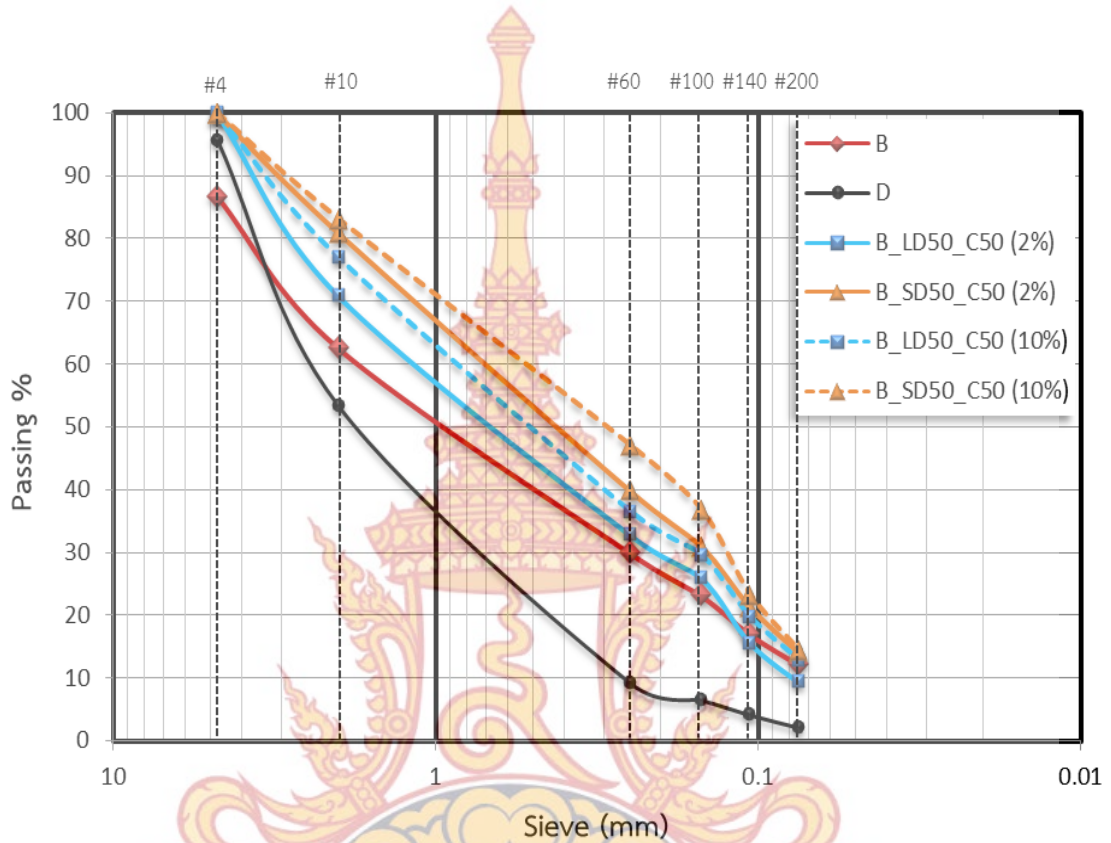
1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม

ตัวอย่างเถ้าก้นเตาและวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ในการทดสอบ ถูกนำมาจากแหล่งวัสดุต่างๆ ดังนี้ เถ้าก้นเตา (Bottom Ash, B) นำมาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี เพาเวอร์จำกัด จังหวัดระยอง หินฝุ่น (Dust Stone, D) นำมาจากโรงโม่หิน อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม ได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I, C) ตราอินทรีเพชร (มอก.15-2547) โดยผลการทดสอบหาขนาดคละด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve Analysis) ดังแสดงในภาพที่ 25 จากแผนภูมิการกระจายตัวของเม็ดวัสดุ แสดงให้เห็นว่า เถ้าก้นเตา หินฝุ่น และเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม จัดเป็นวัสดุประเภททราย โดยเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มมีขนาดคละที่ไม่ดี ($C_u > 6$, $C_c < 1$) สำหรับหินฝุ่นมีขนาดคละกัณฑ์ ($C_u > 6$, C_c อยู่ประมาณ 1-3) โดยพบว่าการใส่วัสดุผสมเพิ่มลงไปเในเถ้าก้นเตาไม่ได้ช่วยให้มีขนาดคละที่ดีขึ้น

จากผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา (B) เถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 2 (B_LD50_C50, B_SD50_C50) เถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 10 (B_LD50_C50, B_SD50_C50) และหินฝุ่น (D) พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.71, 1.15, 1.84 และ 2.67 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มมีค่าน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินทั่วไป (2.65-2.68) เป็นผลให้หน่วยน้ำหนักมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ในขณะที่หินฝุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วงของดินทั่วไป

จากผลการทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของเถ้าก้นเตา และเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 พบว่า ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.) และค่าขีดจำกัดพลาสติก

(Plastic Limit, P.L.) ไม่สามารถหาค่าได้ (Non-Plasticity, NP) แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ใช้ในการทดสอบไม่มีความเหนียว โดยผสมวัสดุผสมเพิ่มไม่ได้ช่วยให้มีความเหนียวขึ้น



ภาพที่ 25 แผนภูมิการกระจายตัวของเถ้ากั้นเตา หินฝุ่น และเถ้ากั้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม

2. ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของเถ้ากั้นเตาและเถ้ากั้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม

ผลการทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง (Unconfined Compression Test) ซึ่งจำแนกตาม ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม และระยะเวลาการบ่ม ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงต้านข้างของเก้าอี้เตาและเก้าอี้เตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน และ 14 วัน

ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม (ร้อยละ)	สัญลักษณ์	ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน				ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน			
		น้ำหนัก (กก.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความเค้น (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)	น้ำหนัก (กก.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความเค้น (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)
-	L	57.27	15.32	3.74	2,050	58.90	13.39	4.40	1,910
0	B	7.41	13.74	0.54	1,080	8.96	13.98	0.64	1,070
2	B_LD100	6.69	13.52	0.50	1,060	7.62	14.40	0.53	1,080
	B_SD100	5.77	14.19	0.41	1,070	8.13	14.21	0.57	1,100
	B_LD50_C50	19.05	13.88	1.37	1,040	26.15	14.39	1.82	1,090
	B_SD50_C50	22.34	13.82	1.62	1,100	24.40	14.40	1.69	1,070
	B_C100	32.33	13.23	2.44	1,090	38.51	14.10	2.73	1,060
4	B_LD100	7.52	13.44	0.56	1,070	6.75	14.09	0.48	1,060
	B_SD100	6.12	13.51	0.45	1,060	5.97	14.09	0.42	1,050
	B_LD50_C50	23.89	13.78	1.73	1,040	41.08	14.60	2.81	1,070
	B_SD50_C50	38.30	13.66	2.80	1,100	44.75	14.10	3.17	1,140
	B_C100	62.60	14.18	4.42	1,110	81.03	14.59	5.55	1,120

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงต้านข้างของเอ้ากันเตาและเอ้ากันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน และ 14 วัน (ต่อ)

ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม (ร้อยละ)	สัญลักษณ์	ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน				ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน			
		น้ำหนัก (กก.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความเค้น (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)	น้ำหนัก (กก.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความเค้น (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)
6	B_LD100	7.52	13.90	0.54	1,110	6.80	13.52	0.50	1,090
	B_SD100	7.06	13.88	0.51	1,110	6.80	13.53	0.50	1,100
	B_LD50_C50	54.78	14.17	3.86	1,130	39.58	13.73	2.88	1,070
	B_SD50_C50	44.48	13.44	3.31	1,100	41.17	13.11	3.14	1,100
	B_C100	73.31	13.24	5.54	1,100	76.35	12.55	6.08	1,080
8	B_LD100	6.10	13.86	0.44	1,080	4.80	12.74	0.38	1,070
	B_SD100	7.52	13.81	0.54	1,100	4.96	13.50	0.37	1,060
	B_LD50_C50	61.37	13.95	4.40	1,120	75.95	13.74	5.53	1,120
	B_SD50_C50	56.94	13.87	4.11	1,130	70.36	14.09	4.99	1,120
	B_C100	66.31	14.25	4.65	1,140	125.52	13.95	9.00	1,130
10	B_LD100	6.08	13.30	0.46	1,130	6.00	12.98	0.46	1,120
	B_SD100	6.38	13.97	0.46	1,120	5.60	13.24	0.42	1,100
	B_LD50_C50	60.65	13.86	4.37	1,130	71.56	13.24	5.40	1,110
	B_SD50_C50	70.53	13.72	5.14	1,150	79.15	13.65	5.80	1,130
	B_C100	106.67	13.65	7.81	1,150	162.30	13.31	12.20	1,130

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงต้านข้างของเสาเข็มเตาและเสาเข็มเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 90 วัน

ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม (ร้อยละ)	สัญลักษณ์	ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน				ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน			
		น้ำหนัก (กก.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความเค้น (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)	น้ำหนัก (กก.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความเค้น (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)
-	L	68.36	13.11	5.21	1,880	135.56	12.66	10.71	1,690
0	B	7.60	13.37	0.57	1,080	14.20	12.90	1.10	1,070
2	B_LD100	7.60	13.66	0.56	1,070	14.20	13.32	1.07	1,080
	B_SD100	8.00	13.88	0.58	1,080	12.91	12.91	1.00	1,060
	B_LD50_C50	28.78	13.65	2.11	1,090	36.15	12.79	2.83	1,070
	B_SD50_C50	28.78	13.51	2.13	1,080	41.31	13.52	3.06	1,060
	B_C100	53.57	13.44	3.99	1,090	85.21	13.34	6.39	1,100
4	B_LD100	6.80	13.50	0.50	1,080	12.91	12.47	1.04	1,120
	B_SD100	7.20	13.17	0.55	1,110	12.91	13.19	0.98	1,120
	B_LD50_C50	53.57	13.66	3.92	1,110	87.79	12.66	6.93	1,130
	B_SD50_C50	57.56	13.59	4.24	1,110	77.46	12.91	6.00	1,110
	B_C100	107.93	12.99	8.31	1,130	211.73	13.44	15.76	1,130

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงต้านข้างของเอ้ากันเตาและเอ้ากันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และ 90 วัน (ต่อ)

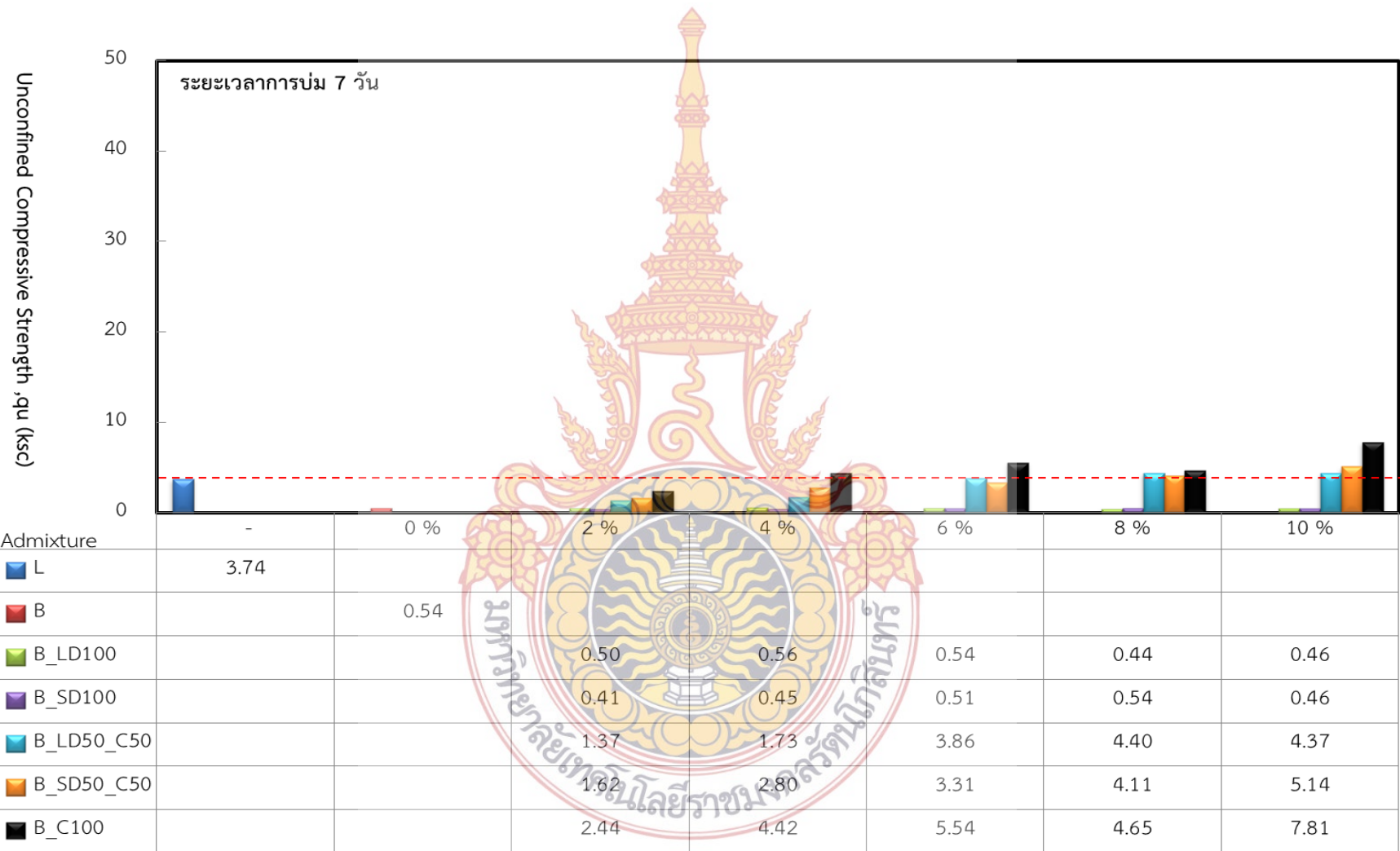
ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม (ร้อยละ)	สัญลักษณ์	ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน				ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน			
		น้ำหนัก (กก.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความเค้น (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)	น้ำหนัก (กก.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความเค้น (กก./ตร.ซม.)	ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)
6	B_LD100	5.20	12.92	0.40	1,070	12.91	12.40	1.04	1,090
	B_SD100	4.80	12.79	0.38	1,070	15.49	12.92	1.20	1,080
	B_LD50_C50	56.76	13.17	4.31	1,070	103.28	12.18	8.48	1,160
	B_SD50_C50	77.55	13.43	5.77	1,090	118.78	13.04	9.11	1,110
	B_C100	163.90	12.85	12.75	1,120	206.57	12.91	16.00	1,090
8	B_LD100	5.52	13.17	0.42	1,090	12.91	12.86	1.00	1,120
	B_SD100	5.60	13.25	0.42	1,100	12.91	12.86	1.00	1,120
	B_LD50_C50	86.35	13.65	6.33	1,110	180.75	12.97	13.93	1,160
	B_SD50_C50	103.94	14.40	7.22	1,110	187.20	13.74	13.62	1,140
	B_C100	267.83	13.52	19.82	1,130	361.49	12.87	28.08	1,120
10	B_LD100	8.00	13.52	0.59	1,140	12.91	12.98	0.99	1,120
	B_SD100	8.55	13.98	0.61	1,140	12.91	13.04	0.99	1,120
	B_LD50_C50	107.93	13.74	7.86	1,140	290.49	12.60	23.06	1,170
	B_SD50_C50	146.31	14.41	10.16	1,160	264.67	12.86	20.59	1,150
	B_C100	266.23	13.25	20.09	1,130	542.24	13.66	39.70	1,160

2.1 อิทธิพลของปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม

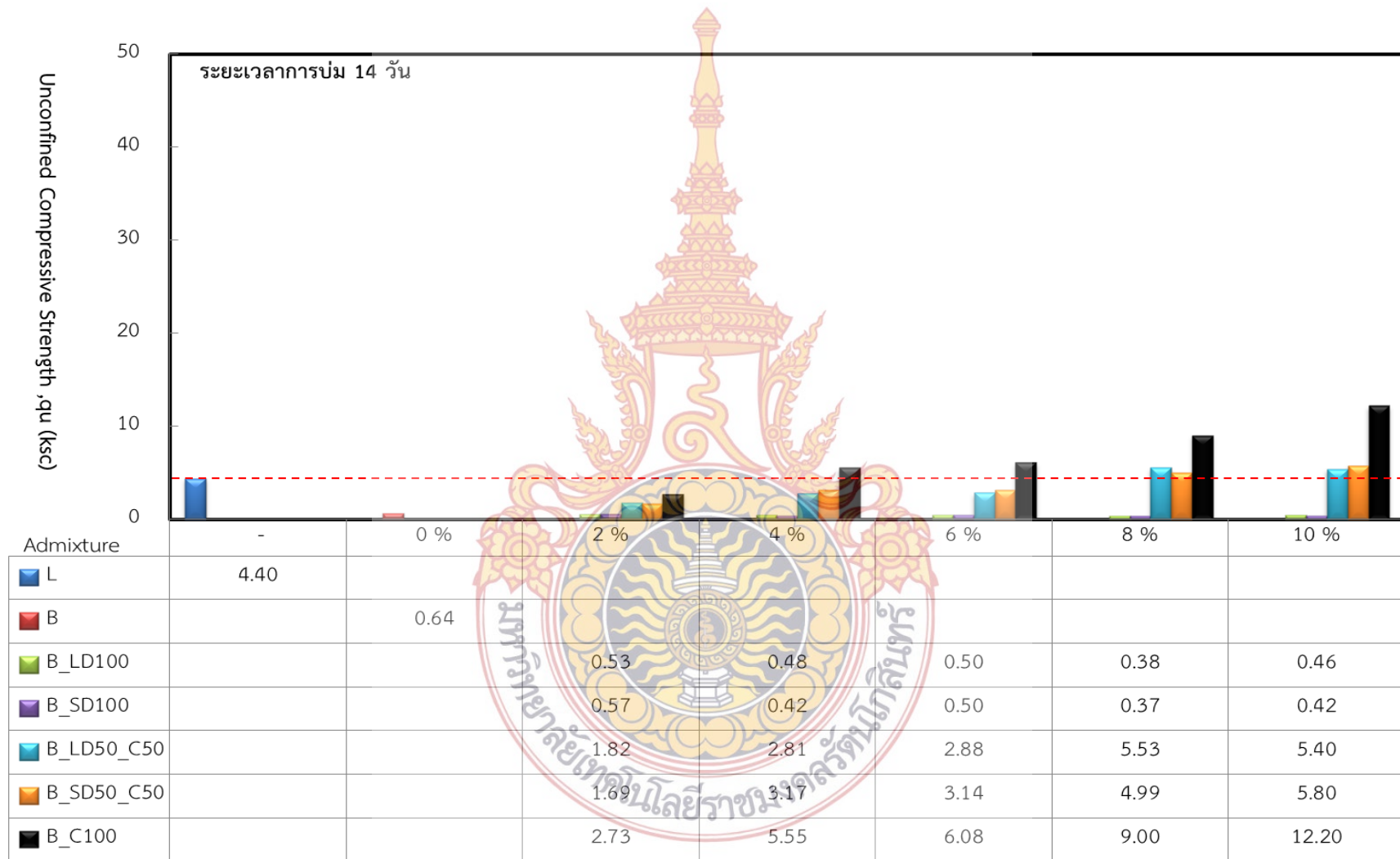
จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง เมื่อพิจารณาอัตราส่วนผสมที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วัน ดังแสดงในภาพที่ 26 ถึง 29 ซึ่งจากภาพพบว่า B (เอ้ากันเตา), B_LD100 (เอ้ากันเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่) และ B_SD100 (เอ้ากันเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็ก) ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลังในทุกอัตราส่วนผสม ส่วน B_LD50_C50 (เอ้ากันเตาผสมหินฝุ่นเบอร์ใหญ่และปูนซีเมนต์) และ B_SD50_C50 (เอ้ากันเตาผสมหินฝุ่นเบอร์เล็กและปูนซีเมนต์) ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มมีผลต่อการเพิ่มกำลังในทุกอัตราส่วนผสม โดยมีอัตราการเพิ่มกำลังใกล้เคียงกัน เนื่องจากขนาดของหินฝุ่นไม่มีผลต่อการเพิ่มกำลัง ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์แล้วอัตราการเพิ่มกำลังจึงไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับ B_C100 (เอ้ากันเตาผสมปูนซีเมนต์) ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มมีผลต่อการเพิ่มกำลังในทุกอัตราส่วนผสม และมีอัตราการเพิ่มกำลังมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ เนื่องจากอัตราส่วนผสมของปริมาณปูนซีเมนต์มากที่สุด

ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างทุกอัตราส่วนผสม นำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังของดินลูกรัง พบว่า B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 8 และ ร้อยละ 10 สามารถนำมาใช้งานแทนดินลูกรังได้ โดยปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 8 เพียงพอที่จะนำมาใช้แทนดินลูกรังเนื่องจากใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์น้อยกว่า

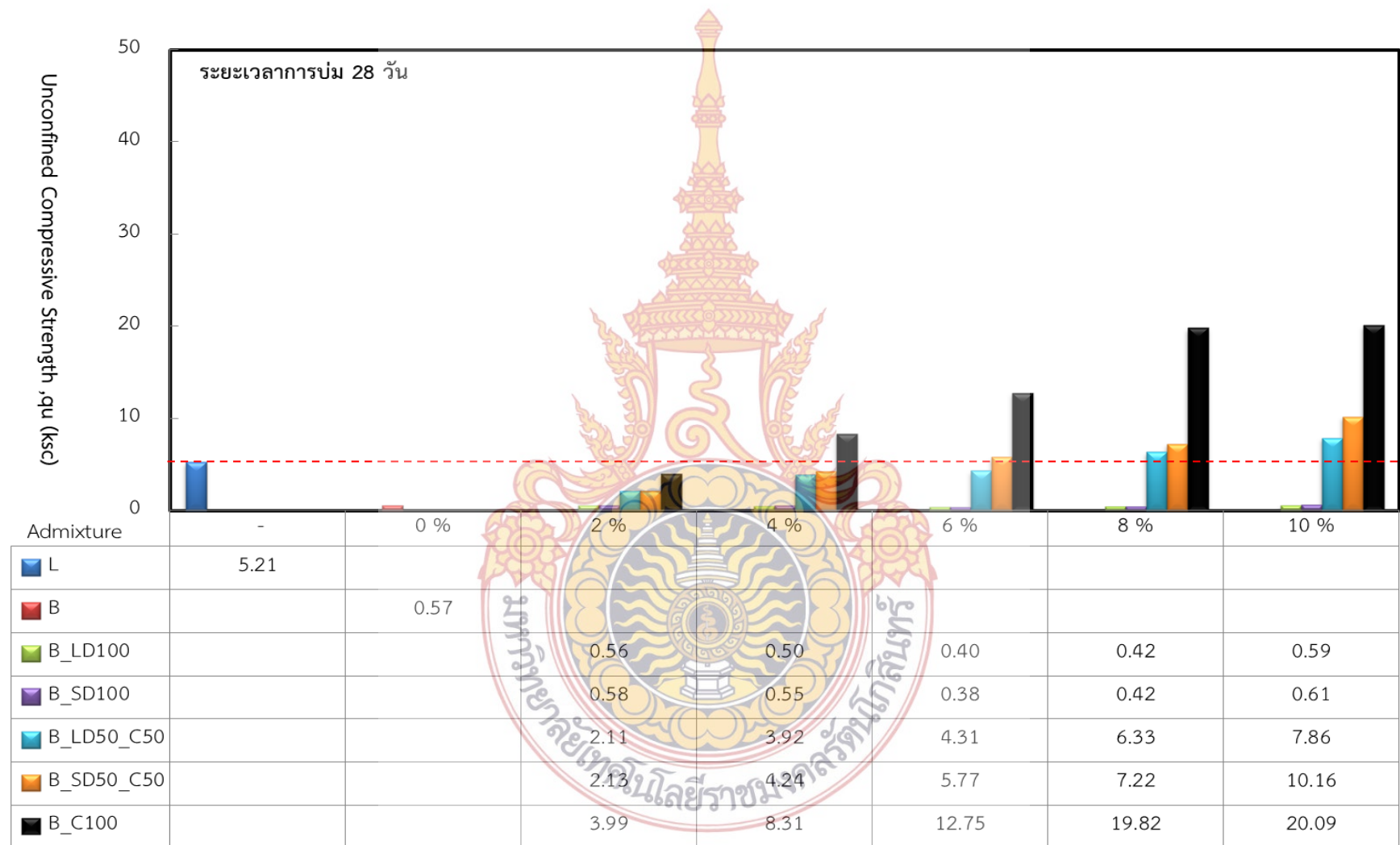




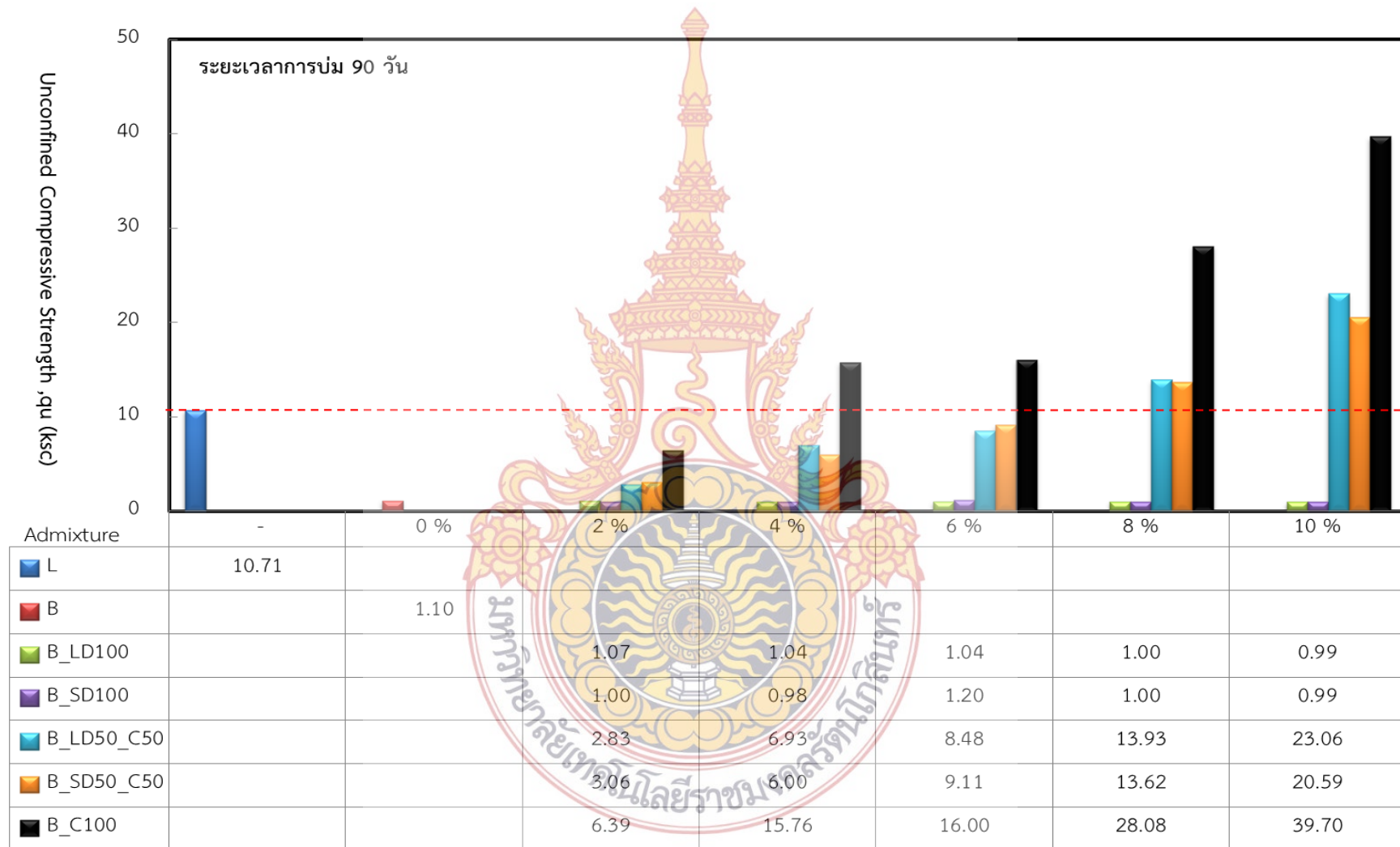
ภาพที่ 26 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 27 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน



ภาพที่ 28 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

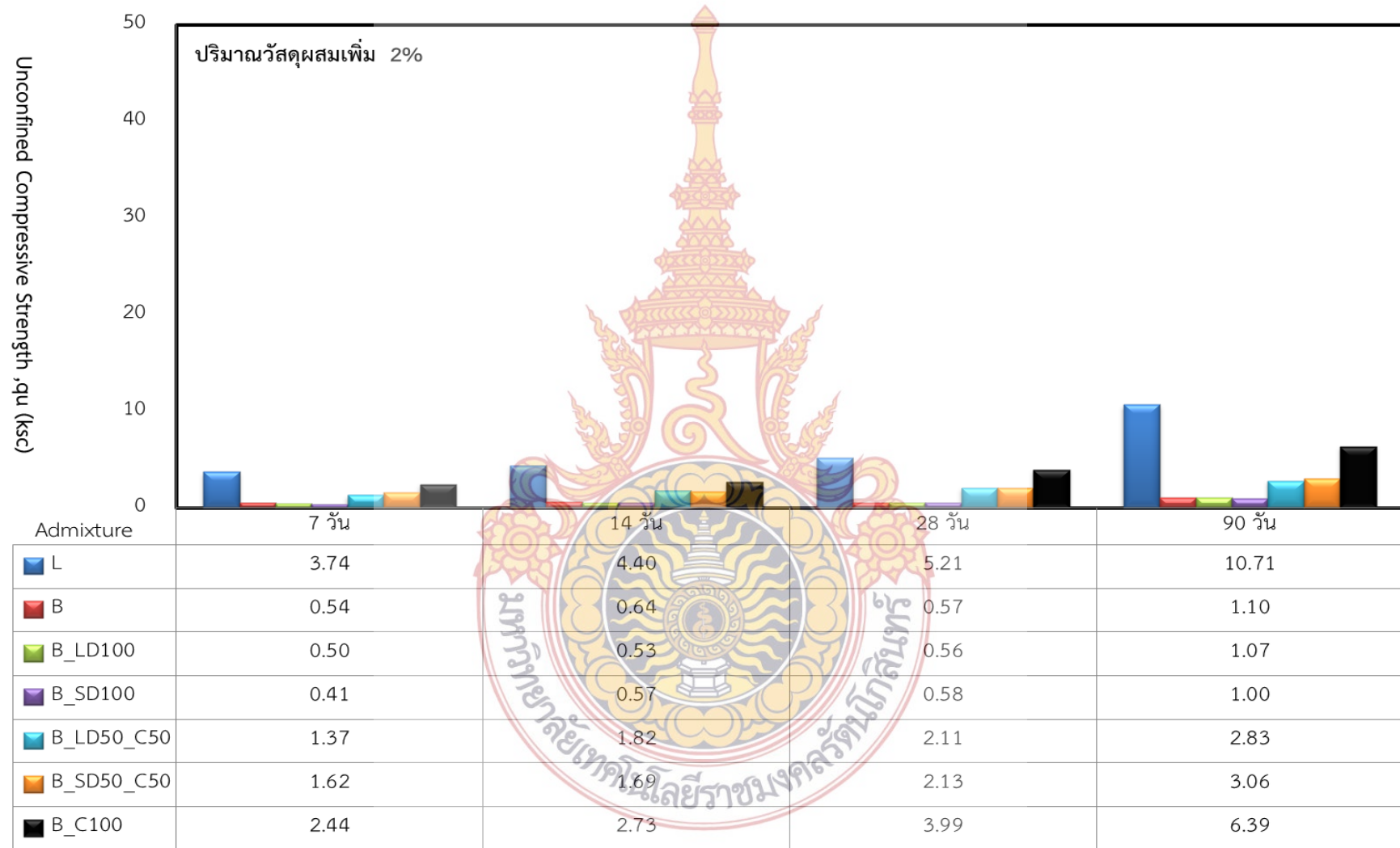


ภาพที่ 29 แผนภูมิแสดงค่ากำลังรับแรงอัดตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน

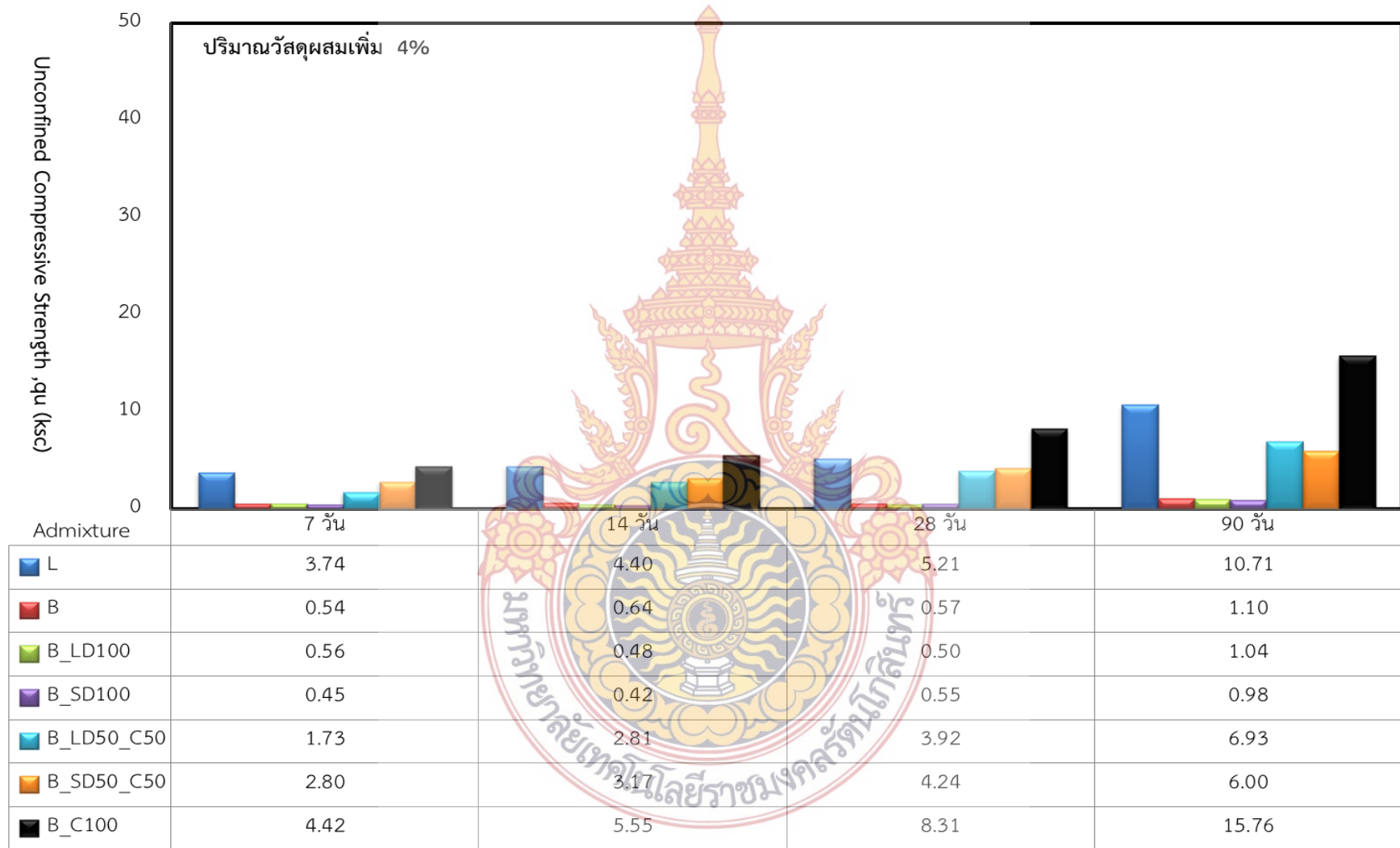
2.2 อิทธิพลของอายุการบ่ม

จากผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง พิจารณาตามอายุการบ่ม ดังแสดงในภาพที่ 30 ถึง 34 เมื่อพิจารณาที่ทุกอายุการบ่ม สำหรับอัตราส่วนผสม B, B_LD100 และ B_SD100 พบว่าอายุการบ่มไม่มีผลต่อการพัฒนากำลัง ส่วน B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 อายุการบ่มเริ่มมีผลต่อการพัฒนากำลังและมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง, q_u ตามอายุการบ่มที่เพิ่ม ขึ้น เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา ซีเมนต์ไฮเดรชัน ของอนุภาคซีเมนต์กับน้ำในก้อนตัวอย่าง ทำให้เกิดการยึดเกาะของเม็ดดินเข้าด้วยกัน เป็นผลทำให้ก้อนตัวอย่างสามารถรับกำลังอัดได้ดีขึ้น โดยเฉพาะเมื่อระยะเวลาการบ่ม 90 วัน จะเห็นการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากั้นเตา ประกอบด้วยซิลิกาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน หลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นผลทำให้ที่อายุการบ่มเพิ่มขึ้น ก้อนตัวอย่างสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

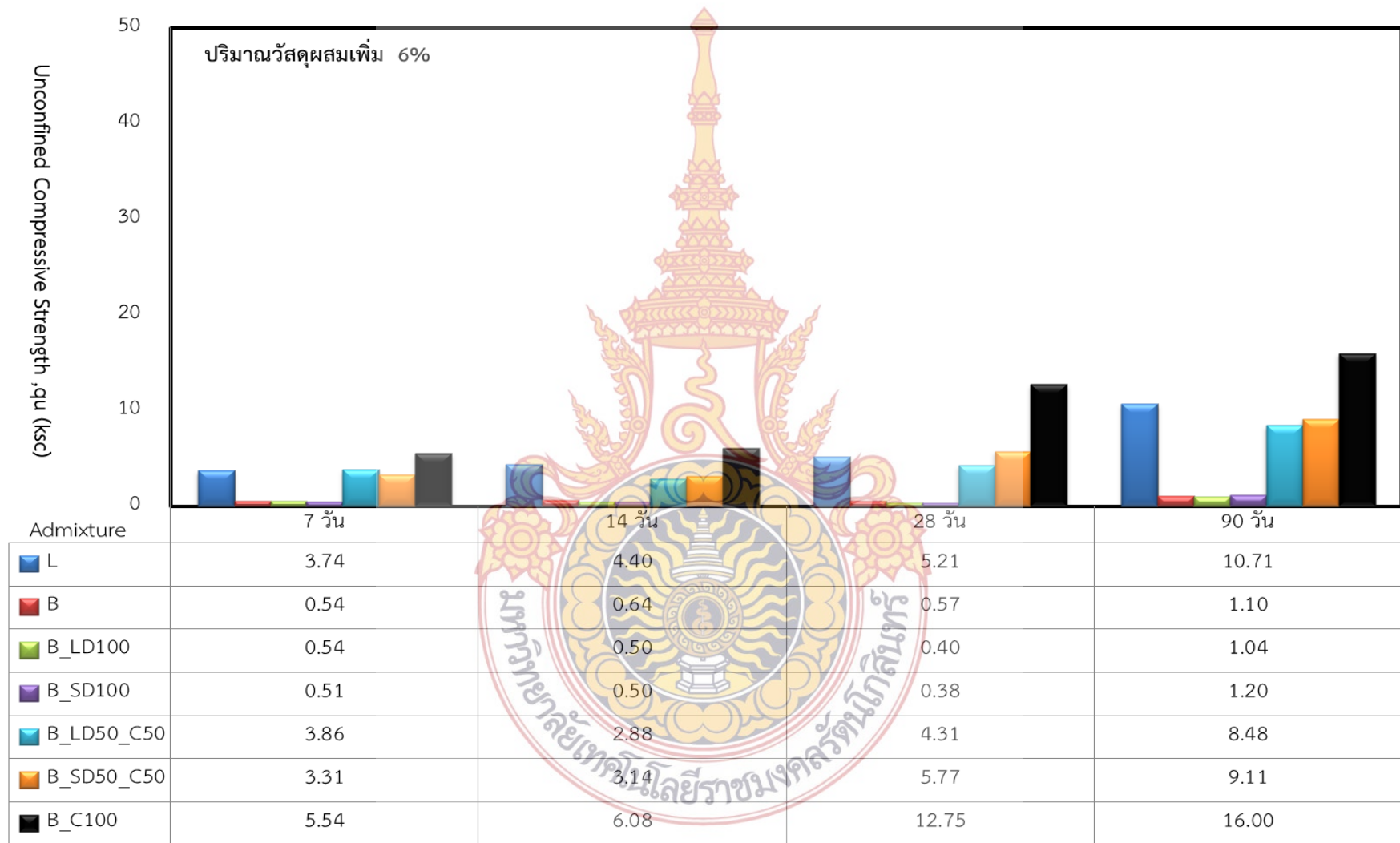




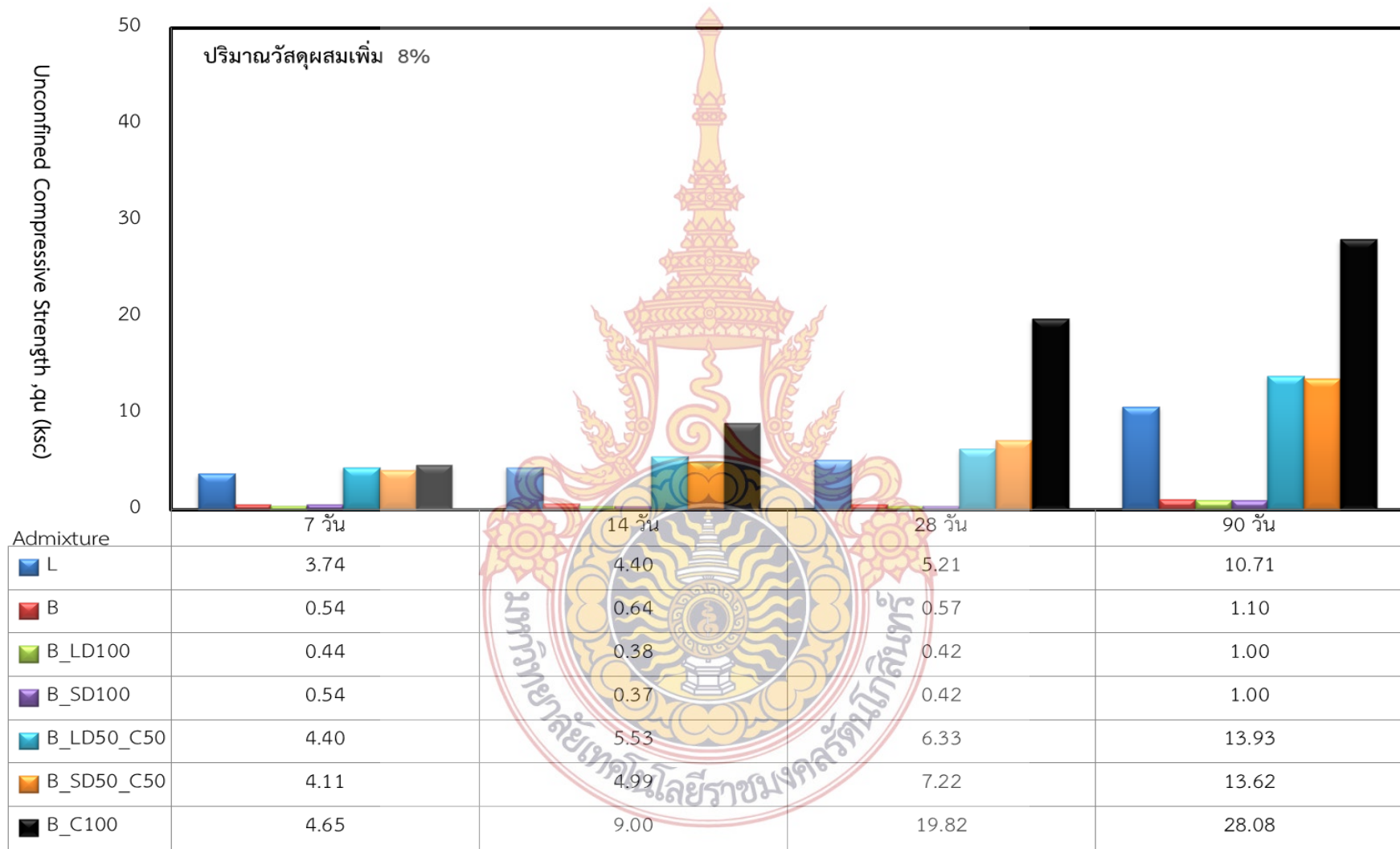
ภาพที่ 30 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 2



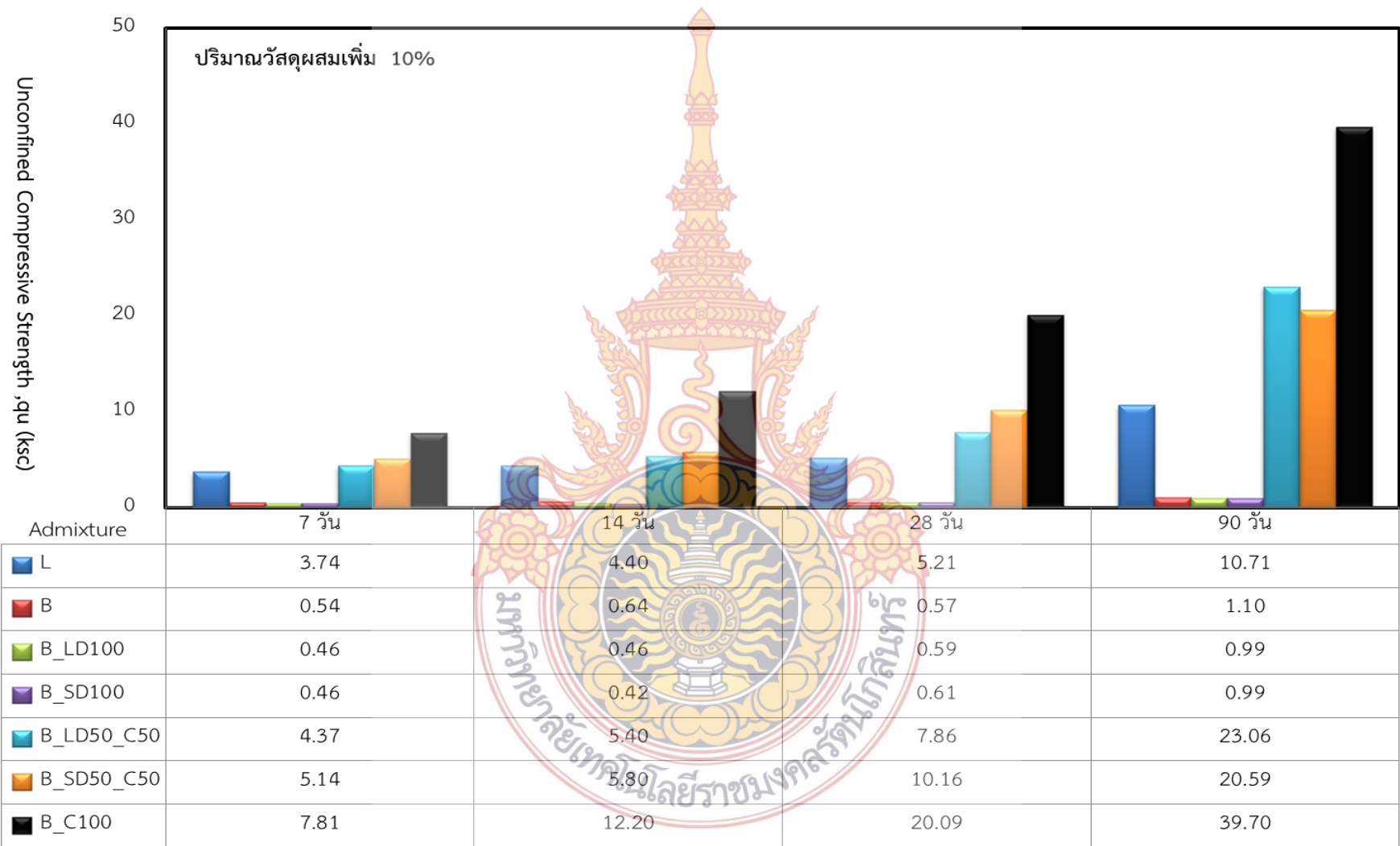
ภาพที่ 31 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 4



ภาพที่ 32 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 6



ภาพที่ 33 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 8



ภาพที่ 34 แผนภูมิค่ากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาการบ่ม ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มร้อยละ 10

3. ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์. ของเอ็กกันเตาและเอ็กกันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม

ในกรณีศึกษานี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ การทดสอบกับตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ และการทดสอบกับตัวอย่างแบบแช่น้ำ ของเอ็กกันเตา และเอ็กกันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม และจึงนำค่าการทดสอบ ซี.บี.อาร์. ระหว่างวิธีการทดสอบแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำ มาทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบและสรุปผล ดังแสดงในภาพที่ 35

จากภาพที่ 35 ผลการทดสอบ ซี.บี.อาร์. แบบไม่แช่น้ำ ที่อัตราส่วน B มีค่าเท่ากับ 46.93, B_LD50_C50 (2%) มีค่าเท่ากับ 57.6, B_SD50_C50 (2%) มีค่าเท่ากับ 61.6, B_LD50_C50 (4%) มีค่าเท่ากับ 64.53, B_SD50_C50 (4%) มีค่าเท่ากับ 72.36, B_LD50_C50 (6%) มีค่าเท่ากับ 71.38, B_SD50_C50 (6%) มีค่าเท่ากับ 78.22, B_LD50_C50 (8%) มีค่าเท่ากับ 79.2, B_SD50_C50 (8%) มีค่าเท่ากับ 82.13, B_LD50_C50 (10%) มีค่าเท่ากับ 81.16 และ B_SD50_C50 (10%) มีค่าเท่ากับ 84.09

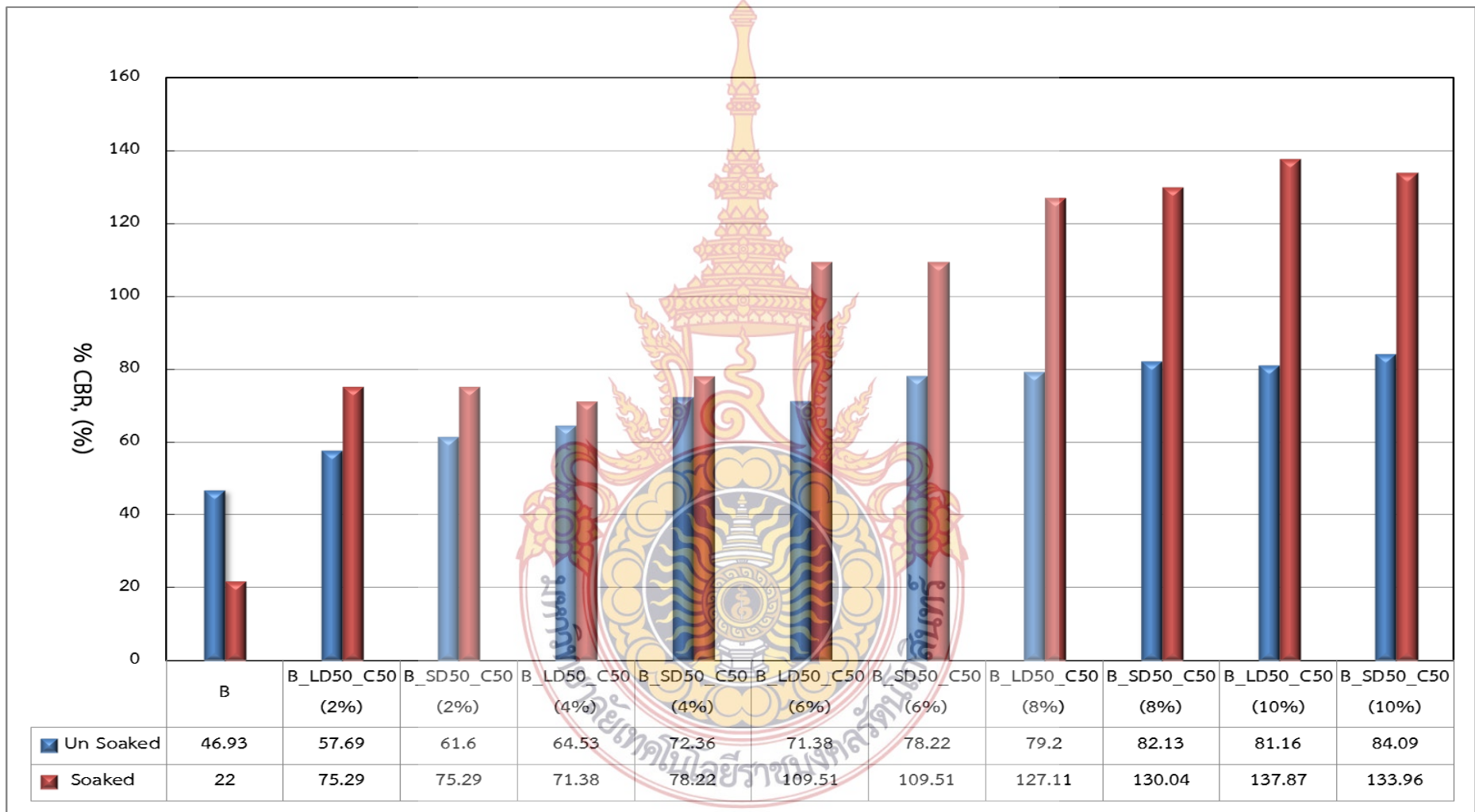
ผลการทดสอบ ซี.บี.อาร์. แบบแช่น้ำ ที่อัตราส่วน B มีค่าเท่ากับ 22, B_LD50_C50 (2%) มีค่าเท่ากับ 75.29, B_SD50_C50 (2%) มีค่าเท่ากับ 75.29, B_LD50_C50 (4%) มีค่าเท่ากับ 71.38, B_SD50_C50 (4%) มีค่าเท่ากับ 72.36, B_LD50_C50 (6%) มีค่าเท่ากับ 109.51, B_SD50_C50 (6%) มีค่าเท่ากับ 109.51, B_LD50_C50 (8%) มีค่าเท่ากับ 127.11, B_SD50_C50 (8%) มีค่าเท่ากับ 130.04, B_LD50_C50 (10%) มีค่าเท่ากับ 137.87 และ B_SD50_C50 (10%) มีค่าเท่ากับ 133.96

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบค่า ซี.บี.อาร์. ทั้งแบบไม่แช่น้ำ และแบบแช่น้ำ ดังแสดงในภาพที่ 35 พบว่า แบบไม่แช่น้ำค่า ซี.บี.อาร์. จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ที่ B_LD50_C50 (2%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 18.65, B_SD50_C50 (2%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 23.81, B_LD50_C50 (4%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 27.27, B_SD50_C50 (4%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 35.14, B_LD50_C50 (6%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 34.25, B_SD50_C50 (6%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 40.00, B_LD50_C50 (8%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 40.74, B_SD50_C50 (8%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 42.86, B_LD50_C50 (10%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 42.18 และ B_SD50_C50 (10%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 44.19

แบบแช่น้ำค่า ซี.บี.อาร์. จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่มที่ B_LD50_C50 (2%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 70.78, B_SD50_C50 (2%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 70.78, B_LD50_C50 (4%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 69.18, B_SD50_C50 (4%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 71.87, B_LD50_C50 (6%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 79.91, B_SD50_C50 (6%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 79.91, B_LD50_C50 (8%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 82.69, B_SD50_C50 (8%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 83.08, B_LD50_C50 (10%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 84.04 และ B_SD50_C50 (10%) เพิ่มขึ้นร้อยละ 83.58

เมื่อเปรียบเทียบค่า ซี.บี.อาร์. แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ พบว่า แบบแช่น้ำจะมีค่า ซี.บี.อาร์. มากกว่าแบบไม่แช่น้ำ เนื่องจากมีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม เมื่อนำไปแช่น้ำปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำจึงทำให้กำลังการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น ในกรณีของเก้าอี้กันเตา แบบไม่แช่น้ำจะมีค่า ซี.บี.อาร์. มากกว่าแบบแช่น้ำ เนื่องจากเก้าอี้กันเตามีลักษณะเหมือนทราย เมื่อนำไปแช่น้ำแล้วทำให้ไม่มีแรงดูดจึงทำให้กำลังการรับน้ำหนักได้น้อยกว่าแบบไม่แช่น้ำ

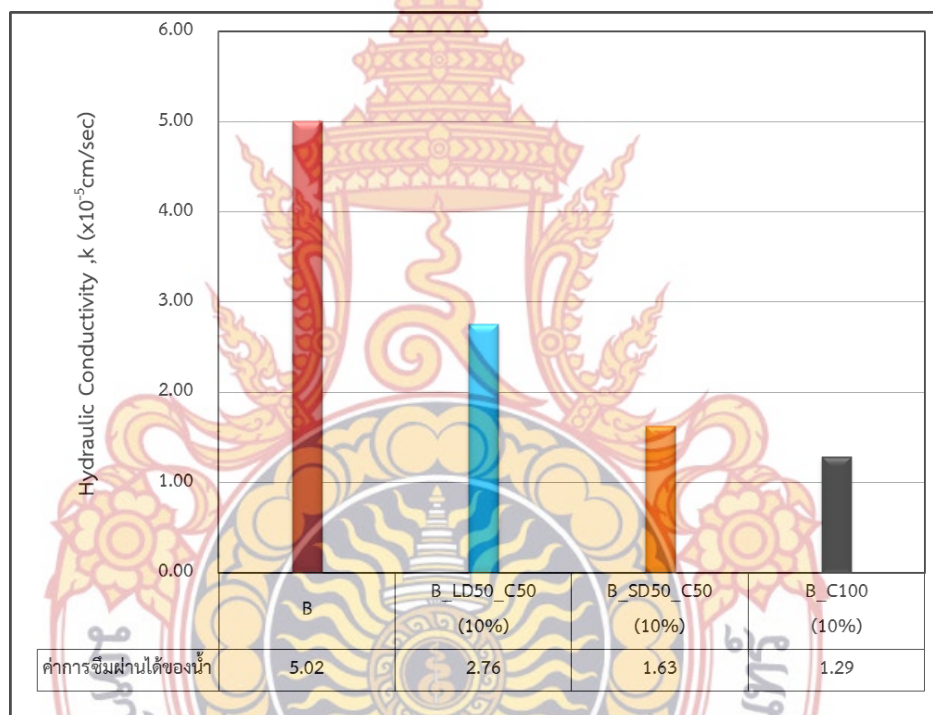




ภาพที่ 35 แผนภูมิค่า % CBR ของเก้าอี้กันเตาและเก้าอี้กันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ

4. ผลการทดสอบหาค่าการซึมผ่านได้ของน้ำ (Hydraulic Conductivity) ของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม

ผลการทดสอบหาค่าการซึมผ่านได้ของน้ำ ของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ด้วยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ซึ่งเป็นการทดสอบแบบทางอ้อม พบว่า ตัวอย่างทดสอบ B, B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 ที่อัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้เท่ากับ 5.02×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที, 2.76×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที, 1.63×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที และ 1.29×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 แผนภูมิค่าการซึมผ่านได้ของน้ำของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 36 พบว่าตัวอย่างทดสอบ B มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้มากที่สุด เนื่องจากมีลักษณะเหมือนทรายและไม่มีวัสดุผสมเพิ่ม จึงทำให้มีการซึมผ่านน้ำได้มากที่สุด ส่วน B_LD50_C50 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้มากกว่า B_SD50_C50 เนื่องจาก B_LD50_C50 มีวัสดุผสมเพิ่มของหินปูนขนาดใหญ่กว่า มีช่องว่างมาก จึงทำให้มีการซึมผ่านน้ำได้มากกว่า B_SD50_C50 ซึ่งมีวัสดุผสมเพิ่มของหินปูนขนาดเล็ก จึงทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความทึบแน่นมากกว่า และ B_C100 มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้น้อยที่สุด เนื่องจากเถ้าก้นเตามีวัสดุผสมเพิ่ม คือ ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว จึงทำให้ตัวอย่างทดสอบมีค่าความทึบแน่นได้มากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผล

1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน พบว่าเมื่อนำวัสดุผสมเพิ่มมาผสมกับเถ้าก้นเตาไม่ได้ช่วยให้ส่วนผสมมีขนาดคละที่ดีขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มมีค่าต่ำกว่า 2 แสดงให้เห็นว่าค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าน้อยกว่าดินทั่วไป อาจนำไปใช้เป็นวัสดุมวลเบาได้ วัสดุผสมเพิ่มไม่มีส่วนช่วยให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น

1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม เมื่อพิจารณาจากปริมาณวัสดุผสมเพิ่มและอายุการบ่มแล้วพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ได้แก่ B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 8 และร้อยละ 10 ซึ่งสามารถนำมาใช้งานแทนดินลูกรังได้ แต่ถ้าพิจารณาถึงความประหยัด การใช้วัสดุผสมเพิ่มในปริมาณ ร้อยละ 8 ก็เป็นการเพียงพอ

2. อภิปรายผล

2.1 ผลการพิจารณาจากเส้นกราฟการกระจายตัวของเถ้าก้นเตา หินฝุ่น และเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม พบว่าเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มมีขนาดคละที่ไม่ดี และจัดอยู่ในวัสดุประเภททราย สำหรับหินฝุ่นมีขนาดคละกั้นดี จากการทดสอบพบว่าเมื่อนำวัสดุผสมเพิ่มมาผสมกับเถ้าก้นเตาไม่ได้ช่วยให้มีขนาดคละที่ดีขึ้น จากผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตา (B) เถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 2 (B_LD50_C50, B_SD50_C50) เถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 10 (B_LD50_C50, B_SD50_C50) และหินฝุ่น (D) พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.71, 1.15, 1.84 และ 2.67 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าก้นเตาและเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่มมีค่าน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของดินทั่วไป (2.65-2.68) เป็นผลให้หน่วยน้ำหนักมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ในขณะที่หินฝุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วงของดินทั่วไป จากผลการทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของเถ้าก้นเตา และเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ ร้อยละ 10 พบว่าวัสดุที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถหาค่าได้ (Non-Plasticity, NP) แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ใช้ในการทดสอบไม่มีความเหนียว โดยเมื่อผสมวัสดุผสมเพิ่มไม่ได้ช่วยให้มีความเหนียวขึ้น

2.2 ผลการทดสอบหาค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงต้านข้างของเอ้ากันเตาและเอ้ากันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ซึ่งจำแนกตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม และระยะเวลาการบ่ม เมื่อพิจารณาที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม คือ B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 ที่ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม ร้อยละ 8 และ ร้อยละ 10 สามารถนำมาใช้งานแทนดินลูกรังได้ และเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่ม สำหรับอัตราส่วนผสม B, B_LD100 และ B_SD100 พบว่าอายุการบ่มไม่มีผลต่อการพัฒนากำลัง ส่วน B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 อายุการบ่มเริ่มมีผลต่อการพัฒนากำลังและมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ

2.3 ผลการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ของเอ้ากันเตาและเอ้ากันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ทั้งแบบไม่แช่น้ำ และแบบแช่น้ำ เอ้ากันเตาเมื่อนำมาผสมกับวัสดุผสมเพิ่มมีการพัฒนาค่า ซี.บี.อาร์. สูงขึ้นตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม และมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสม B_LD50_C50 (10%) และ B_SD50_C50 (10%) จากข้อมูลที่ได้ทำการศึกษามา ของเอ้ากันเตา และดินลูกรังเกรด B และ D [1] เอ้ากันเตาแบบแช่น้ำมีค่า ซี.บี.อาร์. เท่ากับ 35 แบบไม่แช่น้ำ เท่ากับ 45 ส่วนดินลูกรังเกรด B แบบแช่น้ำมีค่า ซี.บี.อาร์. เท่ากับ 47 แบบไม่แช่น้ำ เท่ากับ 59 และดินลูกรังเกรด D แบบแช่น้ำมีค่า ซี.บี.อาร์. เท่ากับ 29 แบบไม่แช่น้ำ เท่ากับ 48 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ทดสอบได้ของเอ้ากันเตามีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ และเอ้ากันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ที่ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และร้อยละ 10 มีค่า ซี.บี.อาร์. สูงกว่าดินลูกรัง เกรด B และ D โดยสามารถนำมาใช้แทนดินลูกรังได้

2.4 จากผลการทดสอบหาค่าการซึมผ่านได้ของน้ำ ของเอ้ากันเตาและเอ้ากันเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม ด้วยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) พบว่าตัวอย่างทดสอบ B, B_LD50_C50, B_SD50_C50 และ B_C100 ที่อัตราส่วนผสมเพิ่มร้อยละ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ เท่ากับ 5.02×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที, 2.76×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที, 1.63×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที และ 1.29×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า เอ้ากันเตาเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มความทึบน้ำได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเอ้ากันเตาปกติ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุผสมเพิ่มที่ใส่ลงไป โดยเฉพาะการเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์มีผลเป็นอย่างมากต่อการเพิ่มความทึบน้ำ

3. ข้อเสนอแนะ

3.1 การทดสอบการบดอัดดิน มีน้ำไหลซึมออกมาจากแบบหล่อ จึงควรป้องกันการไหลซึม โดยอาจนำดินน้ำมันมาอุดรอยต่อเพื่อไม่ให้น้ำไหลซึม

3.2 การทดสอบ ซี.พี.อาร์. เมื่อนำแผ่นรองออกทำให้ตัวอย่างติดออกมากับกระดาษกรอง จึงควรนำถุงพลาสติกมาใช้รองอีกชั้นบนกระดาษกรอง

3.3 การทดสอบแต่ละครั้งทำได้ช้าและไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงควรศึกษาและทำความเข้าใจในการทดสอบให้ดี

3.4 ควรศึกษาต้นทุนของวัสดุที่ใช้ผสมเพิ่มว่าคุ้มค่ากับการนำมาใช้ในงานจริง

4. การนำไปใช้ประโยชน์

4.1 สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเพื่อป้องกันการชะล้างของหน้าดิน ลดการซึมผ่านของน้ำหรือสารปนเปื้อนสำหรับใช้ในบ่อฝังกลบขยะ

4.2 สามารถนำไปใช้แทนวัสดุที่ใช้ในงานทางได้

4.3 สามารถใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาและนำไปต่อยอดในการทำวิจัยต่อไป



บรรณานุกรม

1. รัฐพล สมณา และประชุม คำพุดม. “การศึกษาการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ผสมหินฝุ่นแทนทราย.” **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11.** 20-22 เมษายน, โรงแรมเมอร์ลิน บีช รีสอร์ท ป่าตอง, จ.ภูเก็ต, 2549.
2. มนตรี เดชาสกุลสม, จอมปวีร์ จันทร์หิรัญ และหัตสนัย ถิมเจริญ. “การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ Bottom Ash เพื่อใช้ในงานทาง.” **การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบปี 2551,** กรมทางหลวง, 2551.
3. ทีพีไอ คอนกรีต. **คอนกรีตเทคโนโลยี.** กรุงเทพฯ: บริษัท ทีพีไอ คอนกรีต จำกัด, 2551.
4. ชูศักดิ์ ศิริรัตน์. **ปฐพีกลศาสตร์.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2554.
5. Sivakugan, N. and Das, B.M. **Geotechnical Engineering.** Fort Lauderdale, FL: J. Ross Publishing, 2010.
6. ELE International. **ELE Product Catalogue.** 12th ed. Leighton Buzzard, Beds: ELE International, 2009.
7. Das, B.M. **Principals of Geotechnical Engineering.** 5th ed. Toronto, Ontario: Chris Carson, 2006.
8. วิเศษ แจ้งจิตร และประทีป ดวงเดือน. “การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา.” **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14.** 13-15 พฤษภาคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จ.นครราชสีมา, 2552.
9. อีระพล ลดาลลิตสกุล, กิตติพงษ์ โสภา, ยุทธพงศ์ บุญมาทัน และ เศรษฐเวช พงศาวิภาวัฒน์. “แนวทางการใช้เถ้าลอยในงานเพสเมนต์รีไซเคิล.” **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13.** 14-16 พฤษภาคม, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา, จ.ชลบุรี, 2551.
10. สมัชชา แสนสุวรรณศรี, วชิรินทร์ กาสลัก และ ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์. “การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบขนแทนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในงานพื้นทาง.” **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11,** 20-22 เมษายน, โรงแรมเมอร์ลินบีช รีสอร์ท ป่าตอง, จ.ภูเก็ต, 2549.
11. ทรงลักษณ์ วิโรจน์รัตน์, สมชาย อินทะตา และ เรืองรุชดี ชีระโรจน์. “ระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของเพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด โดยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่าย.” **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13,** 14-16 พฤษภาคม, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา, จ.ชลบุรี.

12. สุชาติภาค ภูมิเกียรติคุณ และอิทธิพร ศิริสวัสดิ์. “คุณสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูน.” การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1, 31 สิงหาคม, โรงแรมเดอะทวิน- ทาวเวอร์, กรุงเทพฯ, 2550.
13. รุ่งลาวัลย์ ราชัน และสุขสันต์ หอพิบูลย์สุข. “การศึกษาการอัดตัวคายน้ำและการซึมผ่านน้ำของดินเหนียวซีเมนต์.” วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา. 14, 3, 2546.
14. จุฑาทิพย์ เขียวแจ่ม และประทีป ดวงเดือน. “การปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกและทรายโดยใช้เถ้าก้นเตา. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จ.นครราชสีมา, 2552.
15. อีรุฒิ มุขำหมัด และ สุรินทร์ มายูร. “การศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยปาล์มน้ำมันจากแหล่งต่างๆ ต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, 14-16 พฤษภาคม, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา, จ.ชลบุรี, 2551.





ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ ศิริรัตน์
2. ตำแหน่งปัจจุบัน รองคณบดีประจำพื้นที่วิทยาเขตวังไกลกังวล
3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110
โทรศัพท์ 032-618500 ต่อ 4042
E-mail : chusak.k@rmutr.ac.th
4. ประวัติการศึกษา
ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
 - COMPUTER PROGRAMMING (VISUAL BASIC)
 - การประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (NUMERICAL METHOD) กับงานทางด้านวิศวกรรม
 - ธรณีวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (Geo-environment Engineering)
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย
หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย
 - 1) การพัฒนาโปรแกรมคำนวณวงรอบและเส้นชั้นความสูงด้วยภาษาวิซวลเบสิก
แหล่งทุน : งบวัสดุฝึกแผนกวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2544
 - 2) โครงการวิจัยศึกษาการนำฐานข้อมูลมาประยุกต์ใช้กับการสอบทางคอมพิวเตอร์
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2545
วงเงิน : 8,000 บาท
 - 3) โครงการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิจนระยะเวลา และสารอินทรีย์ ต่อการอบดินเพื่อใช้หาค่าปริมาณความชื้นในมวลดิน
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2545
วงเงิน : 10,000 บาท
 - 4) เครื่องมือทดสอบกำลังแบกทานของดินแบบหยั่งเบา
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2549
วงเงิน : 83,000 บาท

- 5) การพัฒนาสื่อผสมร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตสำหรับการทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา
 แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550
 วงเงิน : 146,000 บาท
- 6) การสร้างสื่อผสมบนระบบอินเทอร์เน็ตร่วมกับโปรแกรมทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา
 แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2551
 วงเงิน : 50,000 บาท
- 7) การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบวัสดุก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา
 ประยุกต์ร่วมกับการใช้สื่อผสมบนระบบอินเทอร์เน็ต
 แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2552
 วงเงิน : 556,600 บาท
- 8) การศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินผสมซีเมนต์และเบนโทไนท์เพื่อการป้องกันการ
 แพร่กระจายของสารปนเปื้อนในดิน
 แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2552
 วงเงิน : 481,810 บาท
- ผู้ร่วมโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย, แหล่งทุน
- 1) โครงการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับงานปฏิบัติการทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา
 แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2547
 วงเงิน : 1,000,000 บาท
- 2) โครงการศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าการใช้ PVD และ Cement Column ในการปรับปรุง
 คุณภาพดินอ่อนเชิงเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรม
 แหล่งทุน : สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ประจำปี 2549
 วงเงิน : 250,000 บาท
- 3) การพัฒนาขึ้นรูปวัสดุแผ่นวัสดุผสมจากเส้นใยมะพร้าว-พลาสติกโพลีเอทิลีนเพื่องานวัสดุ
 ก่อสร้างและหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์
 แหล่งทุน : งบประมาณเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนล่าง ปี 2549
 วงเงิน : 400,000 บาท
- 4) การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเหล็กด้วยโปรแกรมภาษาวิซวลเบสิก 6.0
 แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550
 วงเงิน : 83,250 บาท
- 5) การพัฒนากระเบื้องยางปูพื้นจากเส้นใยมะพร้าวผสมยางธรรมชาติ
 แหล่งทุน : งบประมาณเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนล่าง ปี 2551
 วงเงิน : 320,000 บาท

- 6) การออกแบบจุดต่อโครงสร้างเหล็กโดยวิหวลเบสิก 6 V.2.1
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2551
วงเงิน : 50,000 บาท
- 7) การสร้างแบบจำลองขนาดเล็กเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนในดินผ่านกำแพงดินซีเมนต์
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2552
วงเงิน : 80,000 บาท
- 8) การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยการสร้างบ่อทดสอบในสนาม
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2553
วงเงิน : 600,000 บาท

