



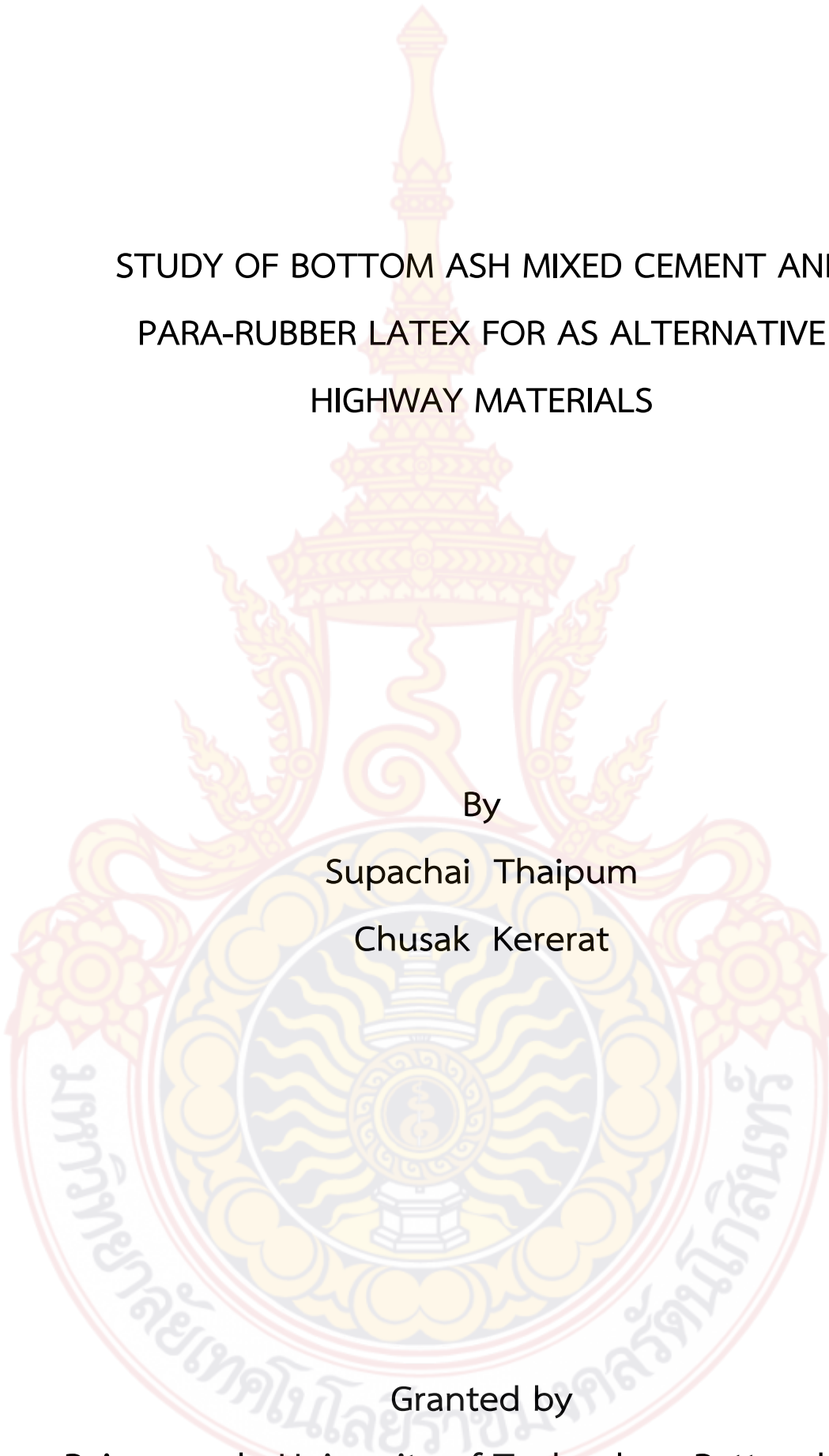
การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเก้าอี้เก้าอี้เตา  
ผสมปูนซีเมนต์และน้ำยาพาราเพื่อใช้เป็น  
วัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง

โดย

ศุภชัย ไทยพุ่ม

ชูศักดิ์ ศีรีรัตน์

สนับสนุนงบประมาณโดย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2562



STUDY OF BOTTOM ASH MIXED CEMENT AND  
PARA-RUBBER LATEX FOR AS ALTERNATIVE  
HIGHWAY MATERIALS

By

Supachai Thaipum

Chusak Kererat

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2019

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้เงินสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสิ้นไปได้ด้วยดี

ศุภชัย ไทยพุ่ม และคณะ  
สิงหาคม 2562



## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : C5/2562

ชื่อโครงการ : การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเก้าอี้กันเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำ  
ยางพาราเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง

ชื่อนักวิจัย : นายศุภชัย ไทยพุ่ม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ศิริรัตน์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของเก้าอี้กันเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง เก้าอี้กันเตาที่ใช้ในการศึกษามีขนาดคละแตกต่างกัน 3 กลุ่ม ได้แก่ เก้าอี้กันเตาผสมตามขนาดคละ เก้าอี้กันเตาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และเก้าอี้กันเตาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว โดยแต่ละกลุ่มจะถูกนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ร่วมกับน้ำยางพาราร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของเก้าอี้กันเตา สำหรับเกณฑ์การคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวเท่ากับ 1,724 กิโลปาสคาล และ 2,413 กิโลปาสคาล สำหรับปริมาณการจรรยาจรน้อย และปริมาณการจรรยาจรมากตามลำดับ ผลจากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานพบว่าปริมาณน้ำยางพาราที่เหมาะสมที่สุด 2 อันดับแรกคือ ร้อยละ 6 และร้อยละ 8 สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมซึ่งพิจารณาจากผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวคือ ร้อยละ 5 สำหรับถนนที่มีปริมาณการจรรยาจรน้อย และร้อยละ 7 สำหรับถนนที่มีปริมาณการจรรยาจรมาก ซึ่งสรุปได้ว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมได้แก่ B95%C5%R6% และ B93%C7%R6% โดยเมื่อนำไปใช้เตรียมคั้วอย่างสำหรับทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. พบว่าค่า ซี.บี.อาร์. ของตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 วัน มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้บ่ม ประมาณ 3 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลของการแช่น้ำมีผลทำให้กำลังของเก้าอี้กันเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราลดลงประมาณร้อยละ 5 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความต้านทานต่อการไถลในสภาพเปียกพบว่าอยู่เกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ในถนนสาธารณะในทางตรงที่มีความลาดชันน้อย รัศมีความโค้งไม่มากนัก และมีบริเวณแยกน้อย

คำสำคัญ: เก้าอี้กันเตา ปูนซีเมนต์ น้ำยางพารา วัสดุงานทาง

---

E-mail Address : supachai.tha@rmutr.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม พ.ศ. 2561 – กันยายน พ.ศ. 2562

## Abstract

**Code of Project** : C5/2562  
**Project Name** : Study of Bottom Ash mixed Cement and Para-Rubber Latex  
for as Alternative Highway Materials  
**Researcher Name** : Mr.Supachai Thaipum and Asst.Prof.Dr.Chusak Kererat

This research investigates the appropriated mixture of bottom ash mixed with Portland cement and Para-Rubber latex as the alternative highway materials. Bottom ash used in this research was divided into 3 categories as follows: (1) well-graded bottom ash, (2) bottom ash passing #4 sieve, and (3) bottom ash passing 3/8 in sieve. Each category was mixed with Portland cement of 0%, 2%, 4%, 6%, 8% and 10%, and Para-Rubber latex of 0%, 5%, 10% and 15% by weight of bottom ash, respectively. The appropriated mixtures were selected by considering according to the unconfined compressive strength of 1,724 kPa and 2,412 kPa for light traffic and heavy traffic, respectively. Results from modified compaction test revealed that the appropriated contents of Para-Rubber latex in two orders were 6% and 8%. The appropriated contents of Portland cement from unconfined compression test were 5% for light traffic and 7% for heavy traffic. It can be summarize the appropriated mixtures of bottom ash mixed with Portland cement and Para-Rubber latex were B95%C5%R6% and B93%C7%R6%. According these mixtures, the C.B.R. of the samples with 7 curing days was greater than that of samples without curing approximately 3 times. Moreover, this study shown the strength of soaked samples was lower than that of unsoaked samples about 5%. The results from skidding resistance test indicated these mixtures can be used for the straight road, with easy gradients and curves, without junction.

**Keywords:** Bottom ash, Portland cement, Para-Rubber latex, Highway materials

---

**E-mail Address** : supachai.tha@rmutr.ac.th  
**Period of Project** : October 2018 – September 2019

## สารบัญ

	หน้า	
กิตติกรรมประกาศ	ก	
บทคัดย่อภาษาไทย	ข	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค	
สารบัญ	ง	
สารบัญตาราง	ฉ	
สารบัญภาพ	ช	
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
	1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	2. วัตถุประสงค์	2
	3. ขอบเขตของการวิจัย	2
	4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
	1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
	2. การทดสอบที่เกี่ยวข้อง	9
	3. มาตรฐานของวัสดุที่นำมาใช้งานทาง	19
	4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
<b>บทที่ 3</b>	<b>ระเบียบวิธีการวิจัย</b>	<b>26</b>
	1. ขั้นตอนการดำเนินงาน	26
	2. เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	28
	3. การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน	35
	4. การทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม	50

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการวิจัยและผลการวิเคราะห์</b> 73
	1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ 73
	2. ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของขนาดโมลต่อเส้นกราฟการบดอัด 75
	3. ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน 75
	4. ผลการทดสอบการหาค่าแรงอัดแกนเดียว 84
	5. ผลการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. 90
	6. ผลการทดสอบการลื่นไถลในสภาพเปียก 92
	7. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยาล้างพารา กับมาตรฐานงานทาง 93
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุป และข้อเสนอแนะ</b> 95
	1. สรุปผลการศึกษา 95
	2. การนำไปใช้ประโยชน์ 96
	3. ข้อเสนอแนะ 97
<b>บรรณานุกรม</b>	98
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	101

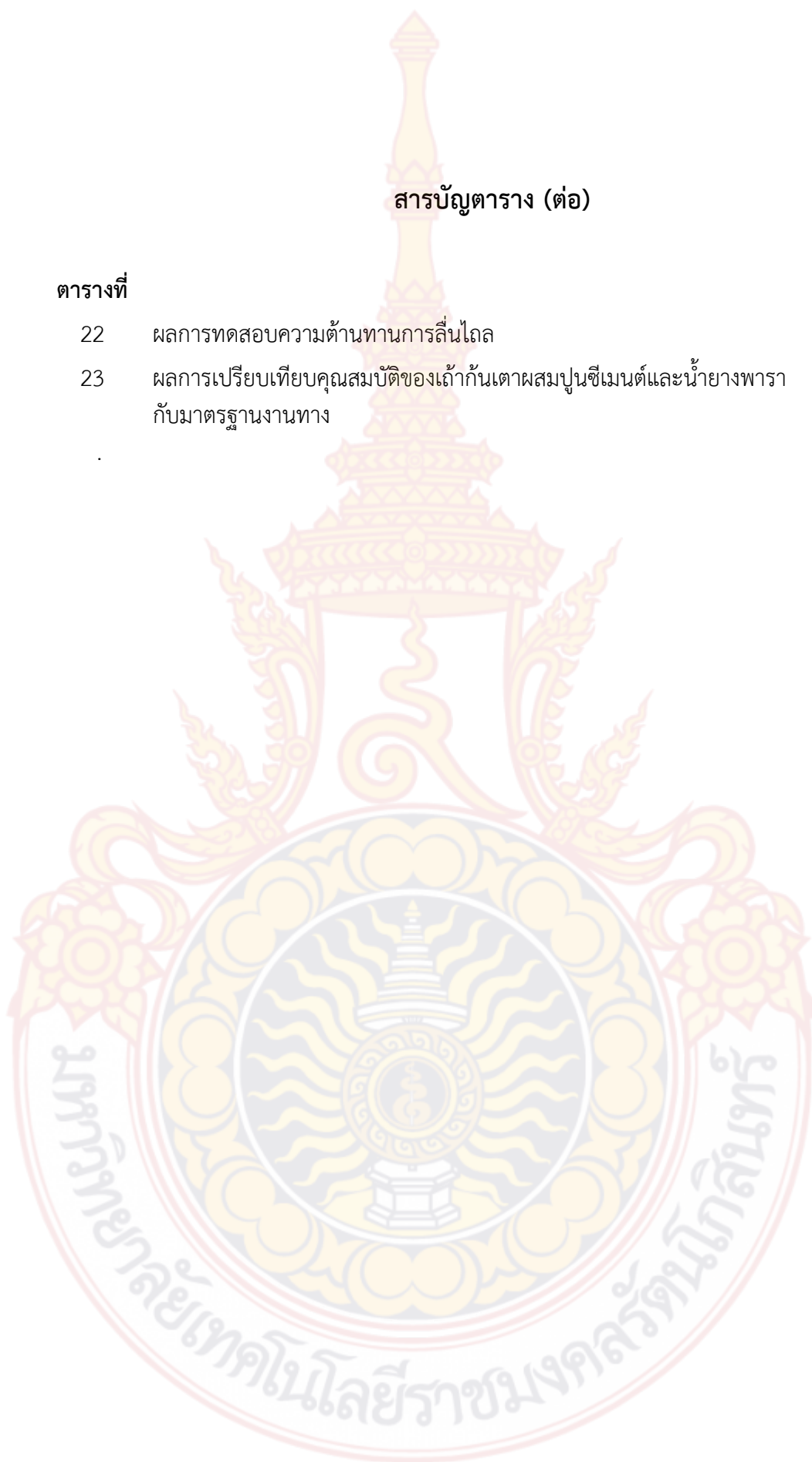
## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติทั่วไปของเก้าอี้กันเตา	5
2	องค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบระหว่างเก้าอี้กันเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและเก้าอี้กันเตาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี	5
3	สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	8
4	วิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน	12
5	วิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	13
6	ค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของหินคลุกบดอัดแน่นที่ระยะจมนต่างๆ	17
7	ประเภทและลักษณะของถนนต่าง ๆ รวม 4 ประเภท	19
8	ขนาดผลของชั้นรองพื้นทางวัสดุมวลรวม	20
9	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนวัสดุทดสอบ	27
10	ขนาดผลของตัวอย่างเก้าอี้ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดด้วยโมลเล็ก	56
11	การเปรียบเทียบขนาดผลของเก้าอี้กันเตากับวัสดุชั้นรองพื้นทางเกรด E และหินคลุก	69
12	ข้อมูลสำหรับใช้ในการจำแนกชนิดของเก้าอี้กันเตา	70
13	พารามิเตอร์การบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	72
14	พารามิเตอร์การบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	73
15	พารามิเตอร์การบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	74
16	พารามิเตอร์การบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	75
17	พารามิเตอร์การบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	77
18	พารามิเตอร์การบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	77
19	การเปรียบเทียบหน่วยแรงอัดแกนเดียวของแต่ละอัตราส่วนผสม	84
20	อิทธิพลของการแช่น้ำต่อค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียว	86
21	ผลการทดสอบหาค่าซี.พี.อาร์.ของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ	87



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
22	ผลการทดสอบความต้านทานการลื่นไถล	88
23	ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเก้าอี้กันเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพารา กับมาตรฐานงานทาง	90



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เก้าอี้กันเตา	4
2	ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน	15
3	เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ	16
4	เครื่องมือทดสอบ British Pendulum Tester (BPT)	18
5	อัตราส่วนผสมระหว่างเก้าอี้กันเตาผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำยารักษา	27
6	ชุดทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุ	29
7	ชุดทดสอบหาขนาดของวัสดุโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง	30
8	ชุดทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลว	31
9	ชุดทดสอบการบดอัดแบบใช้โมลมาตรฐาน (4 นิ้ว)	32
10	ชุดทดสอบการบดอัดแบบใช้โมลเล็ก (1.48 นิ้ว)	32
11	ชุดทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงดันข้าง	33
12	วัสดุเก้าอี้กันเตา	34
13	น้ำยารักษา	34
14	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	35
15	การทำความสะอาดขวดพลาสติก	36
16	การนำขวดพลาสติกพร้อมน้ำไปต้ม	36
17	การแต่งขอบน้ำให้อยู่ที่ขีดบอกปริมาตร	37
18	การหาน้ำหนักขวดพลาสติกพร้อมกับน้ำ	37
19	การนำดินใส่ในขวดแก้วพลาสติก	38
20	การนำไปต้มเพื่อไล่ฟองอากาศ	39
21	การเติมน้ำให้ระดับท้องน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิลิตร	39
22	การชั่งขวดพลาสติกที่มีตัวอย่างเก้าอี้กันเตา	40
23	การเทน้ำและดินลงในภาชนะ	40
24	การนำเก้าอี้กันเตาในภาชนะไปชั่ง	41
25	การเตรียมวัสดุทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลว	42
26	การหมุนทดสอบระยะตกกระทบของถ้วยทองเหลือง	42
27	การใส่ตัวอย่างในถ้วยทองเหลือง	43

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	การบากตัวอย่างในงานด้วยเครื่องมือปาตร่อง	44
29	การหมุนทดสอบหาขีดจำกัดเหลว	44
30	การบากเอ้ากันเตาเพื่อเก็บตัวอย่าง	45
31	การนำตัวอย่างเอ้ากันเตาเข้าตู้อบ	46
32	การปั่นก้อนตัวอย่าง	46
33	การคลึงตัวอย่างบนแผ่นกระจก	47
34	การนำส่วนผสมมาชั่งน้ำหนัก	48
35	การชั่งน้ำหนักตะแกรง	48
36	การจัดตะแกรงมาตรฐาน	49
37	การนำตัวอย่างเอ้ากันเตาที่เตรียมไว้เทใส่ลงบนตะแกรง	50
38	การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของโมล	51
39	การผสมตัวอย่างกับน้ำ	51
40	การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	52
41	การปาดเอ้ากันเตา	53
42	การดันตัวอย่างเอ้ากันเตาออกจากโมล	53
43	การทุบตัวอย่างที่เหลือให้แยกออกจากกันจนร่วน	54
44	การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของโมล	56
45	การผสมวัสดุให้เข้ากัน	57
46	การผสมตัวอย่างกับน้ำให้เข้ากัน	57
47	การทดสอบการบดอัดโดยใช้โมลเล็ก	58
48	การปาดผิวหน้า	59
49	การเก็บตัวอย่างเพื่อใช้หาค่าปริมาณความชื้น	59
50	ตัวอย่างทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง	61
51	การวางตัวอย่างบนแท่นกด	61
52	การปรับมาตรวัดให้เท่ากับศูนย์	62
53	การหมุนทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง	63
54	ตัวอย่างลักษณะการเกิดรอยเฉือน หลังการทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง	63

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
55	การชั่งน้ำหนักโมล ซี.บี.อาร์.	64
56	การผสมวัสดุที่เตรียมไว้กับน้ำ	65
57	การบดอัดวัสดุเตรียมตัวอย่างทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์.	65
58	การปาดตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอขอบโมล ซี.บี.อาร์.	66
59	การตั้งขาของมาตรวัดการยุบตัวของตัวอย่าง	67
60	การวางแผนน้ำหนักมากดทับลงบนผิวหน้าตัวอย่าง	68
61	การปรับเข็มของวงแหวนวัดแรง	69
62	เตรียมโมล ทดสอบการลื่นไถล	70
63	อัดเก้าอี้กันเตา ในโมลทดสอบลื่นไถล	70
64	ลักษณะก่อนตัวอย่าง	71
65	ปรับระดับน้ำเครื่องทดสอบ Portable Skid Resistance Tester	72
66	การอ่านค่าจากเครื่องทดสอบการลื่นไถล	72
67	กราฟการกระจายตัวของขนาดเก้าอี้กันเตาเปรียบเทียบกับวัสดุรองพื้นทาง และหินคลุก	74
68	ผลการทดสอบบดอัดเก้าอี้กันเตาของโมลขนาดมาตรฐานและโมลขนาดเล็ก	75
69	เส้นกราฟการบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	76
70	เส้นกราฟการบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	77
71	เส้นกราฟการบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	78
72	เส้นกราฟการบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	79
73	เส้นกราฟการบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	80
74	เส้นกราฟการบดอัดของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 10 และ ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	82
75	กราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งสูงสุดสำหรับอัตราส่วนผสมต่างๆ	83
76	กราฟเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับอัตราส่วนผสมต่างๆ	83

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
77	ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับปริมาณการจราจรน้อยและปริมาณการจราจรมาก จากผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว	84
78	ผลการทดสอบหาค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่ใช้เหล็กเส้นเตากำหนดขนาดคละ	85
79	ผลการทดสอบหาค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่ใช้เหล็กเส้นเตาผ่านตะแกรงเบอร์ 4	86
80	ผลการทดสอบหาค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่ใช้เหล็กเส้นเตาผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว	87
81	ผลการทดสอบหาค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างเนื่องจากอิทธิพลของการแช่น้ำ	89
82	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดแกนเดียวและค่า ซี.บี.อาร์.	92
83	การเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลในสภาพถนนเปียก	93

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กากของเสียและวัสดุผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมเช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า โรงโม่หิน โรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น ซึ่งนับวันจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ตามการพัฒนาของประเทศ ก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบการจัดเก็บและการกำจัดกากของเสียและวัสดุผลพลอยได้เหล่านั้นโดยเฉพาะในพื้นที่มาบตาพุดซึ่งเป็นฐานอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง กากเชื้อเพลิงที่เหลือเป็นถ่านหินแยกเป็น 2 ส่วนคือ เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นถ่านหินที่เบาลอยฟุ้งกระจายในอากาศได้ กับ เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) เป็นถ่านหินที่หนักกว่าจะจมลงที่ก้นถังเก็บ โดยที่เถ้าลอย (Fly Ash) สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ เช่น เป็นสารทดแทนปูนซีเมนต์ เป็นต้น ส่วนเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ (สำเร็จ รักซ้อน, 2551), (จอมปวีร์ จันทรศิริ, 2556) ประกอบกับในปัจจุบันเกิดปัญหาวิกฤตราคายางพาราที่ตกต่ำ โดยมีราคาอยู่ที่ 3 กิโลกรัมต่อ 100 บาท ทั้งที่ในช่วงปี 2554 ราคาของผลผลิตยางพาราทุกประเภทได้อยู่ในระดับสูงเป็นประวัติการณ์ ทำให้ราคายางในท้องตลาดขณะนั้นดึงดูดเกษตรกรโดยน้ำยางสดราคา 152 บาท ต่อกิโลกรัม (ตารางราคายางแห่งประเทศไทย, 2554) ทำให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูกยางพารา ไม่เพียงแต่ภาคใต้ที่มีพื้นที่การปลูกยางพาราเป็นหลัก แม้แต่เกษตรกรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือหลายจังหวัดและในภูมิภาคอื่น ๆ ยังได้รับการส่งเสริมการปลูกยางพาราอย่างจริงจัง เพราะราคาดีกว่าพืชผลทางการเกษตรที่เคยปลูกอยู่ดั้งเดิม ในหลายปีที่ผ่านมาปริมาณน้ำยางที่ออกสู่ตลาดจึงมีปริมาณมากส่งผลให้เกิดภาวะราคายางเริ่มลดต่ำลง อันเป็นผลสืบเนื่องจากปริมาณยางพาราที่เกินความต้องการของตลาด ดังนั้นการแปรรูปและการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการเพิ่มรายได้ที่ยั่งยืนให้เกษตรกร

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นทำให้มีนักวิจัยรวมถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมโยธาสนใจ และพยายามนำวัสดุที่เป็นกากของเสียและวัสดุผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตต่างๆมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโยธา หรือแม้แต่ว่ารัฐบาลเองก็พยายามส่งเสริมการเพิ่มมูลค่าของน้ำยางพารา ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมามักเป็นการมุ่งเน้นการนำน้ำยางพารามาผสมกับดิน (ฉัตรพงศ์ หล่อพิศาลชัย, 2556) หรือผสมกับแอสฟัลต์เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับงานทาง (วิชิต สุวรรณปรีชา, 2548) จึงเป็นแรงจูงใจให้คณะผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาศักยภาพของการนำเถ้าก้นเตา ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ผสมกับน้ำยางพาราเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาคูณสมบัติในห้องปฏิบัติการ โดยนำวัสดุไปทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นการบริหารจัดการและใช้ประโยชน์ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า อีกทั้งเป็นการพัฒนาวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา ช่วยลดปัญหาการกองเก็บ การกำจัด และผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อม รวมถึงอาจสามารถเป็นวัสดุทดแทนได้ด้วย เพื่อเป็นการส่งเสริมทางเลือกให้กับเกษตรกรชาวสวนยาง และยังสามารถนำผลวิจัยไปเผยแพร่แก่ วิศวกรโยธา นายช่างท้องถิ่น รวมถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรม

## 2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพารา
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังของเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและการทดสอบการลื่นไถลของเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ
4. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำยางพารา สำหรับปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาสำหรับใช้เป็นวัสดุงานทาง
5. เพื่อสรุปแนวทางการนำวัสดุเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์ ไปใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง

## 3. ขอบเขต

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ซึ่งนำมาจากโรงไฟฟ้า บีแอลซีพี (BLCP) เพาเวอร์จำกัด นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง น้ำยางพารา (Para Rubber Latex) จากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I)
2. ศึกษาคุณสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน การวิเคราะห์หาขนาดโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง การทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน การทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้างและ การทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์.

## 4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพารา
2. ทราบคุณสมบัติทางด้านกำลังของเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราเมื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ
3. ทราบคุณสมบัติทางกายภาพและการทดสอบการลื่นไถลของเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ
4. ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราไว้สำหรับปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาสำหรับใช้เป็นวัสดุงานทาง
5. ทราบแนวทางการนำวัสดุเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์ นำไปใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยในครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับศักยภาพของเถ้าถ่านเตาเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง โดยศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการบดอัดของเถ้าถ่านเตาผสมน้ำยาพาราและปูนซีเมนต์ ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ ศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการได้แก่ การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดิน การวิเคราะห์หาขนาดโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง การทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน การบดอัดดิน การทดสอบหาค่า ซี.พี.อาร์. การทดสอบแรงอัดปราศจากแรงด้านข้าง และการทดสอบการลื่นไถล จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

### 1, ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 1.1 เถ้าถ่านเตา (จอมปวีร์ จันทรศิริ, 2556)

เถ้าถ่านเตาได้มาจากการเผาไหม้ของเถ้าถ่านหินซึ่งบางส่วนจับตัวกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ด จนใหญ่ขึ้น และทำให้มีน้ำหนักมากจึงตกลงสู่ก้นเตาหรือบางครั้งก็เรียกกันว่า เถ้าหนัก เถ้าถ่านเตาสามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตบางงาน ทำอิฐ ใช้เป็นฐานในการทำถนน บางครั้งเถ้าหนักสามารถใช้แทนที่ได้หากมีผลวิเคราะห์ได้ว่าเป็นของเสียที่ไม่เป็นอันตราย (Non-Hazardous Waste)

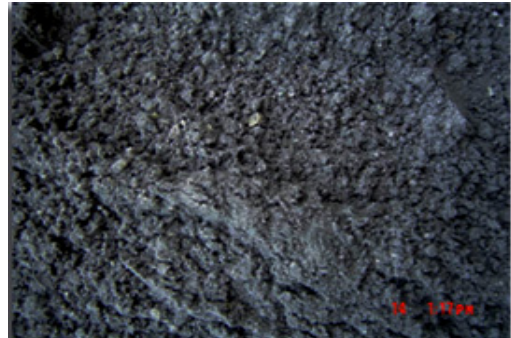
##### 1.1.1 กระบวนการผลิต

โรงไฟฟ้าบีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด ตั้งอยู่ที่ เลขที่ 9 ถนน ไร่ 8 นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง กำลังการผลิต 1,434 เมกะวัตต์ ใช้ถ่านหินบิทูมินัส คุณภาพดีเป็นเชื้อเพลิง จากประเทศออสเตรเลียและอินโดนีเซีย มีค่าความร้อนสูงแต่ปริมาณกำมะถันต่ำ มีหม้อไอน้ำชนิด Pulverize Coal Fire Boiler เป็นต้นกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในการเดินเครื่องการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เต็มกำลังการผลิตนั้น ใช้ถ่านหินบิทูมินัสประมาณ 3.6 ล้านตันต่อปี ถ่านหินที่ใช้มีปริมาณกำมะถันไม่เกินร้อยละ 0.7 และมีค่าเฉลี่ยทั้งปีไม่เกินร้อยละ 0.45 จะเกิดเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุพลอยได้ ประมาณ 0.36 ล้านตันต่อปี เถ้าถ่านหินที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ เถ้าลอย มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก และเถ้าหนัก (Furnace Ash or Bottom Ash) อีกประมาณร้อยละ 10 ซึ่งเถ้าหนักนั้นจะเป็นวัสดุที่ค่อนข้างแข็งมีน้ำหนักจะถูกนำไปกำจัดทิ้งต่อไป แต่ในปัจจุบันเมื่อนำเถ้าถ่านเตาไปปรับปรุงคุณภาพ โดยการบดเป็นผงละเอียดดังแสดงในภาพที่ 1 สามารถทำปฏิกิริยากับต่างได้ สารประกอบที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ซึ่งเช่นเดียวกันกับเถ้าลอย





(ก) ถ้ำก้นเตาหยาบ



(ข) ถ้ำก้นเตาละเอียด

### ภาพที่ 1 ถ้ำก้นเตา

#### 1.1.2 การเกิดถ้ำก้นหิน

การใช้ถ้ำก้นหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น เป็นการเผาไหม้ถ้ำก้นหินเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำจนน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ ที่มีอุณหภูมิความดันสูง ไอน้ำดังกล่าว จะไปหมุนกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

ถ้ำก้น (Coal Ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ้ำก้นหินเป็นเชื้อเพลิง ถ้ำก้นหินคือวัสดุอินทรีย์ที่ตกตะกอน ทับถมและเจือปนอยู่ในเนื้อถ้ำก้นหิน เมื่อเผาถ้ำก้นหินให้ลุกไหม้ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิที่สูง แร่ธาตุในถ้ำก้นหินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นออกไซด์หลายชนิด ถ้ำก้นหินที่เกิดขึ้นแบ่งเป็นสองส่วนคือ ถ้ำลอยร้อยละ 90 และถ้ำหนักอีกร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปริมาณถ้ำก้นหินทั้งหมด

ในการเผาไหม้ถ้ำก้นหินในห้องเผาไหม้ มีผงถ้ำก้นหินส่วนใหญ่ ประมาณร้อยละ 90 จะถูกหลอมจนมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเล็ก ๆ ถ้ำก้นหินส่วนนี้จะถูกลมร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้พัดเอาถ้ำก้นหินเล็ก ๆ นี้ ลอยออกไปทางด้านบนของห้องเผาไหม้ แล้วลมร้อนจะถูกทำให้เย็นลงอย่างกะทันหัน ผงถ้ำก้นหินส่วนที่มากพร้อมกับลมร้อนนี้จะแข็งตัว เป็นผงละเอียดเล็ก ๆ เราเรียกถ้ำก้นหินส่วนนี้ว่าถ้ำลอย มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา มีขนาดประมาณ 1 ไมครอน จนถึง 150 ไมครอน เมื่อนำไปส่องขยายดูด้วยกล้องกำลังขยายสูง จะพบว่าถ้ำลอยมีรูปร่างกลม ถ้ำลอยที่มีขนาดเล็กละเอียดนี้ สามารถทำปฏิกิริยากับต่างได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ กล่าวคือ มีความแข็งแรงและเกาะยึดกันได้ดี ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ผงถ้ำก้นหินอีกส่วนหนึ่งประมาณร้อยละ 10 จะถูกหลอมและรวมตัวกันเป็นก้อนโตขึ้น แล้วตกลงสู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ เราเรียกถ้ำก้นหินขนาดใหญ่จากถ้ำก้นเตานี้ว่า ถ้ำหนัก จะเป็นวัสดุที่ค่อนข้างแข็ง มีน้ำหนัก จะถูกนำออกจากด้านล่างของห้องเผาไหม้และส่งไปเก็บไว้ในที่จัดเก็บ (Silo) เพื่อนำไปกำจัดทิ้งต่อไป

จากการศึกษาของมนตรี และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของถ้ำหนักเพื่อใช้ในการงานพบว่าถ้ำก้นเตาเมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพแล้วจะจัดอยู่ในหมวดของกรวดปนตะกอนทรายที่มีขนาดเม็ดเดียวกันหรือ ทรายปนตะกอนทรายที่มีเม็ดขนาดเดียวกันมีคุณสมบัติรับแรงแบกทานได้ดีและมีการนำไปใช้ในการงานกันซึม โดยจะมีคุณสมบัติทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 1 และ

องค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบระหว่างถ้ำก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและถ้ำก้นเตาจากโรงไฟฟ้าปีแอลซีพี ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทั่วไปของถ้ำก้นเตา (มนตรี เดชาสกุลสม, 2551)

ร้อยละการผ่านตะแกรง					ค่าความเหนียว	ทดสอบการบดอัด		ทดสอบซี.บี.อาร์.	
9.5 มม.	#4	#10	#40	#200		OMC (ร้อยละ)	MDD (ตัน/ลบ.ม.)	CBR (ร้อยละ)	Swell (มม.)
100	92.2	77.1	56.7	26.7	ไม่มี	32.4	1.169	26.5	0

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบระหว่างถ้ำก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและถ้ำก้นเตาจากโรงไฟฟ้าปีแอลซีพี (จอมปวีร์ จันทรศิริ, 2556)

องค์ประกอบทางเคมี	ถ้ำก้นเตาจากถ่านหินบิทูบีนัส	
	โรงไฟฟ้าแม่เมาะ (ร้อยละ)	โรงไฟฟ้าปีแอลซีพี (ร้อยละ)
ซิลิกอนไดออกไซด์	73.15	55.92
อลูมิเนียมออกไซด์	18.34	22.74
เฟอร์ริกออกไซด์	4.15	11.88
แคลเซียมดรอกไซด์	1.35	2.27
แมกนีเซียมออกไซด์	0.65	0.82
ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์	0.04	0.05
โซเดียมออกไซด์	0.21	0.97
โพแทสเซียมออกไซด์	1.00	1.18
ไทเทเนียมไดออกไซด์	0.89	2.15
ฟอสฟอรัสเพนโทไซด์	0.19	0.39
แมงกานีสไดออกไซด์	-	0.18
LOI	2.95	-

## 1.2 น้ำยางพารา (ธิติพงศ์ หล่อพิศาลชัย, 2556)

สำหรับน้ำยางพาราต้นยางพาราโดยทั่วไปเปิดกรีดได้เมื่ออายุประมาณ 6 ปี หรือมีเส้นรอบวงมากกว่า 50 เซนติเมตร หลังจากได้น้ำยางพาราแล้ว น้ำยางพาราจะถูกนำมาผลิตเป็นน้ำยางดิบใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง 2 ประเภทหลักคือ น้ำยางข้น (Concentrated Latex) และยางแห้ง (Dry Rubber) ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet) และยางเครพสีขาว (White

Crepe) หากต้องการทำน้ำยางชั้นต้องเติมแอมโมเนียเตตราเมทิลไทแรมไดซัลไฟด์ และซิงค์ออกไซด์ รักษาสภาพน้ำยาง จากนั้นจึงเติมไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟสทำให้แมกนีเซียมตกลงกันถึง นำเข้าเครื่องปั่นแยกน้ำยางชั้นร้อยละ 60 ออกมา รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียความเข้มข้นร้อยละ 0.2 - 0.7 ร่วมกับสารเตตราเมทิลไทแรมไดซัลไฟด์ ซิงค์ออกไซด์ และน้ำยางชั้นจะถูกนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรมมากมายโดยหลักๆ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ยางจุ่มขึ้นรูป ถังมือเอนกประสงค์ต่างๆ ถังมือแพทย์ชนิดต่างๆ ถังยางอนามัยและลูกโป่ง ผลิตภัณฑ์โฟมต่างๆด้วย เช่น ที่นอน เบาะรองกันกระแทก เป็นต้น และผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เช่น เส้นด้ายยางยืด เป็นต้น ทั้งยังสามารถใช้เป็นตัวยึดติดในผลิตภัณฑ์โพลิเมอร์เร็ว เครื่องหนัง ในการแพร่กระจายของโรคเอดส์ เป็นผลทำให้ความต้องการน้ำยางชั้นเพื่อนำไปผลิตถังยางอนามัยเพิ่มขึ้นกว่าร้อยละ 60 มากกว่าร้อยละ 90 ของน้ำยางชั้นถูกผลิตจากกระบวนการปั่น (Centrifuged)

### 1.2.1 วิธีการผลิตยางน้ำชั้นของไทย

ส่วนที่เป็นยางนี้มีอยู่ในปริมาณที่ไม่แน่นอนมีตั้งแต่ร้อยละ 22 จนถึง 48 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์อายุ ระบบกรีด และฤดูกาล ดังนั้นในการซื้อจากน้ำหนักรหรือปริมาณจากน้ำยางโดยตรงจะต้องใช้น้ำหนักของส่วนที่เป็นยางเรียกว่า Dry Rubber Content แต่เพียงอย่างเดียวโดยทั่วไปแล้วน้ำยางสดจะมีส่วนที่เป็นยาง เฉลี่ยประมาณร้อยละ 35

### 1.2.2 น้ำยางสด

น้ำยางสดที่ได้จากการกรีด (Tapping) ต้นยางออกมาใหม่ๆจะอยู่ในสภาพที่เรียกว่า Colloids ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1) ส่วนที่เป็นน้ำ (Watery) ส่วนนี้ทำหน้าที่เป็นตัวกลางของคอลลอยด์ (Colloids) มีอยู่ประมาณร้อยละ 60 ของน้ำยางบริสุทธิ์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1

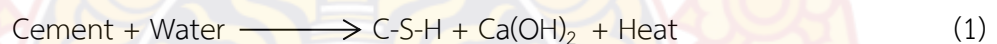
2) ส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่ยาง (Non-Rubber Solid) โปรีตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเกลืออนินทรีย์ มีอยู่ทั้งสิ้น ประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำยางมีทั้งที่อยู่ในรูปสารละลายและสารแขวนลอย องค์ประกอบเหล่านี้ทำให้ส่วนที่เป็นน้ำกลายเป็นน้ำที่ไม่บริสุทธิ์ น้ำยางที่รวมเอาส่วนนี้เข้าไปด้วยเรียกว่า เซรัม (Serum) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.02

3) ส่วนที่เป็นยาง (Rubber Hydrocarbon) เป็นส่วนที่มนุษย์เรานำไปใช้ประโยชน์พวกยางแผ่น ยางแท่ง หรือยางทุกรูปแบบที่ซื้อขายกันในตลาดได้ไปจากส่วนนี้ทั้งสิ้น น้ำยางที่ยังสดอยู่ส่วนนี้จะอยู่กันเป็นเม็ดๆเรียกว่า อนุภาคยาง (Rubber Particles) ซึ่งแขวนลอยอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวและมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ อนุภาคยางมีความถ่วงจำเพาะ 0.92 ซึ่งเบากว่าส่วนที่เป็นตัวกลางซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 1.02 แต่ที่อนุภาคยางไม่ลอยฟ่องอยู่บนผิวของตัวกลางเพราะว่าแรงผลักรันซึ่งกันและกันอันเนื่องมาจากการมีประจุไฟฟ้าที่เหมือนกันทำให้อนุภาคยางเคลื่อนที่ไปมาแบบไร้อิสระเสมอ อนุภาคยางจะหยุดการเคลื่อนที่เมื่อประจุไฟฟ้ารวมของน้ำยางเป็นศูนย์ (Isoelectric Point) จากนั้นก็จะจับตัวกันเป็นก้อนลอยฟ่องบนผิวของเซรัม (Serum) การทำยางแผ่น ยางแท่ง ที่เราเติมกรดลงไปก็เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าวนี้ในทางตรงกันข้ามเวลาในการถนอมน้ำยางเราจะเติมแอมโมเนีย (Ammonia) ลงไปก็เพื่อให้ประจุลบที่เกิดจาก ไปครอบอนุภาคยางเอาไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นด่าน

ป้องกันประจุบวกใดๆที่จะเข้าไปทำให้ประจุลบบนอนุภาคยางเป็นศูนย์นั่นเอง ส่วนที่เป็นยางนี้มีอยู่ในน้ำยางในปริมาณไม่แน่นอนมีตั้งแต่ร้อยละ 22 จนถึงร้อยละ 48 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ ระบบกรีต และฤดูกาล ดังนั้นในการซื้อจากน้ำหนักหรือปริมาณของน้ำยางโดยตรงได้ จะต้องใช้น้ำหนักของส่วนที่เป็นยางเรียกว่า Dry Rubber Content แต่เพียงอย่างเดียว โดยทั่วไปแล้วน้ำยางสดจะมีส่วนที่เป็นยางเฉลี่ยประมาณร้อยละ 35 ก็สามารถเก็บไว้ใช้ประโยชน์ได้ เพียงแต่เติมแอมโมเนีย (Ammonia) เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคจับตัวกันก็ใช้ได้แต่การทำเช่นนี้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ เพราะน้ำยางมีน้ำมากเกินไปดังนั้นจึงมีการทำให้ส่วนที่เป็นน้ำพร่องออกเสียก่อนแล้วค่อยเติมสารกันบูด (Preservative) เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางจับตัวแข็งในภายหลัง น้ำยางที่ได้นี้จึงเรียกกันว่า น้ำยางข้น (Concentrated Latex)

### 1.3 ปูนซีเมนต์ (บริษัท ทีพีไอ, 2551)

ตามที่ทราบแล้วว่าปูนซีเมนต์เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญตัวหนึ่งในคอนกรีตเมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำจะเป็นของเหลวที่มีความหนืดเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจะทำหน้าที่เสมือนกาวประสานมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน เมื่ออายุมากขึ้นจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นกึ่งเหลวกึ่งแข็งและในเวลาต่อมาก็จะกลายเป็นของแข็งในที่สุด ซึ่งจะสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้นเรื่อย ๆ ตามอายุที่เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงเวลาหนึ่งความสามารถด้านรับกำลังอัดจะเริ่มคงที่ การที่ปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำแล้วเกิดการก่อตัว และแข็งตัวของปูนซีเมนต์นั้นเราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า “การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน” ซึ่งเกิดจากสารประกอบในซีเมนต์ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเราจึงรู้สึกว่าร้อนขึ้นเมื่อสัมผัสกับปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เราสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ง่าย ๆ ได้ดังนี้



คำอธิบาย

Cement	=	แทนสารประกอบต่างๆ ในปูนซีเมนต์
Water	=	แทนน้ำ
C-S-H	=	แทนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) เป็นองค์ประกอบที่ให้กำลังกับคอนกรีต
Ca (OH) <sub>2</sub>	=	เป็นผลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก PH ประมาณ 12.5 ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ดีมาก
Heat	=	เป็นความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

#### 1.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

วัตถุดิบนี้พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ ประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็ยังมีเฟอร์ริกออกไซด์ และโครโกลไมต์ เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในบ้านเรานิยมใช้ทั่วไป

(ตราเสือ, ตราช้าง, ตรางูเห่า) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (Greenish Gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียมซิลิกอน, อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในเม็ดปูนมีลักษณะรูปผลึกที่ละเอียดมาก รายละเอียดสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (บริษัท ทีพีโอ, 2551)

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	3 CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	2 CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต	3 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
เตตราแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์	4 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

- C<sub>3</sub>S      ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็วภายใน 14 วัน
- C<sub>2</sub>S      ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้ช้า ความร้อนเกิดขึ้นน้อย
- C<sub>3</sub>A      ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาแข็งตัวเกิดความร้อนสูง มีกำลังรับแรงเร็ว
- C<sub>4</sub>AF      มีผลน้อย ทำให้ความแข็งแรงเล็กน้อยเติมเข้าไปเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น

### 1.3.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถจำแนกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (General-Purpose or Ordinary or Normal Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดมาตรฐานที่มีการใช้แพร่หลายมากที่สุดมีคุณสมบัติ เชื่อมประสานและรับแรงอัดได้ดีนิยมนำมาใช้เป็นคอนกรีต สำหรับงานก่อสร้างปกติทั่ว ๆ ไป เช่น อาคารสะพานถนน และสนามบิน เป็นต้น

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เมื่อผสมกับน้ำเพื่อใช้งานจะมีคุณสมบัติให้ความร้อนต่ำกว่าปูนชนิดที่ 1 เหมาะกับการใช้งานเทคอนกรีตจำนวนมาก เช่น งานสร้างเขื่อนที่ไม่ใหญ่มากนัก กำแพงกันดินหนาๆ การหล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ และแท่งต่อม่อสะพาน เป็นต้น

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนำมาใช้ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการทำเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง และพื้นผิวสำเร็จรูป

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เหมาะสำหรับงานหล่อคอนกรีตในปริมาณมาก เช่น เขื่อนหรือโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่ มักนิยมเลือกใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เพราะมีความร้อนต่ำในขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

5) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resistance Portland Cement) เหมาะสำหรับงานก่อสร้างในทะเล, ริมทะเล หรือบริเวณที่ดินเค็ม เช่น งานฐานราก, ท่าเทียบเรือ, งานท่อระบายน้ำโสโครก, คลองส่งน้ำ และอาคารระบายน้ำเพื่อชลประทาน เป็นต้น

#### 1.4 สารลดแรงดึงผิวชนิดไม่มีประจุ (สิทธิชัย ศิริพันธุ์, 2547)

ยางพาราผสมคอนกรีตการนำน้ำยางธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีต ซึ่งยางธรรมชาติจะมีคุณสมบัติคล้ายกาวเหมือนซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) มีความยืดหยุ่นและเหนียว ดังนั้นเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานเชิงวิศวกรรมถือว่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้ยางพาราของไทย

สิทธิชัย ศิริพันธุ์ และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาการใช้ยางธรรมชาติเพื่อพัฒนางานคอนกรีต โดยการศึกษาหาเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการผสมน้ำยางในคอนกรีต ซึ่งได้ศึกษาความสามารถ (Workability) ของน้ำยางที่ผสมกับคอนกรีต หลังจากนั้นนำมาหล่อแบบแล้วอัดกำลัง (Compressive Strength) และค่ากำลังดัด สัดส่วนของน้ำยางพาราต่อคอนกรีต วิธีการผสมน้ำยางกับคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วยางกับคอนกรีตจะเข้ากันได้ยากจึงต้องมีการผสมสารลดแรงดึงผิว สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สารลดแรงดึงผิวชนิดไม่มีประจุ คือ Lutensol XL 80 ในสัดส่วนร้อยละ 4 ของน้ำหนักซีเมนต์ เมื่อผสมคอนกรีตตามสูตร ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมน้ำยางจะมีกำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 60 และเมื่อปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น การรับกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง สำหรับค่ากำลังดัด พบว่า ลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่อสัดส่วนยางพาราต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาระยะเวลาการบ่มแห้งในอากาศเพิ่มเป็น 14 และ 28 วัน ที่สัดส่วนยางพาราต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.15 และ 0.20 พบว่า คอนกรีตผสมน้ำยางพาราจะมีค่ากำลังดัดสูงกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากอนุภาคเนื้อยางเกาะตัวกันเป็นชั้นฟิล์มที่แข็งแรงขึ้น ทางผู้วิจัยรายงานว่าการใช้งานคอนกรีตผสมน้ำยาง ยังไม่เหมาะกับการก่อสร้างที่ต้องรับแรงอัดมาก แต่อาจเหมาะกับการซ่อมแซม หรือเหมาะกับการคอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนังที่ไม่รับแรงอัดมาก ซึ่งการยืดเหนียวของน้ำยางจะมีประโยชน์ในการเป็นตัวประสานกับคอนกรีต อย่างไรก็ตามการขจัดฟองอากาศและการก่อตัวซ้ำในคอนกรีตยังเป็นปัญหาสำคัญที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลังอัดและการก่อตัวใกล้เคียงคอนกรีตปกติเพื่อให้สามารถนำมาใช้งานโครงสร้างอื่นได้ต่อไป

## 2. การทดสอบที่เกี่ยวข้อง (ชูศักดิ์ ศิริรัตน์, 2554)

### 2.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของดิน

ดินตามธรรมชาติ (Natural Soil) ประกอบด้วย อากาศ น้ำ และเม็ดดิน ซึ่งเม็ดดินเกิดจากการรวมตัวกันของแร่ธาตุที่แตกต่ากันออกไป ดังนั้นจึงเป็นผลให้ดินในแต่ละพื้นที่มีความถ่วงจำเพาะต่างกันในขณะที่มีน้ำมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันแต่ก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ

ความถ่วงจำเพาะของดิน คือ อัตราส่วนของน้ำหนักดินต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับดิน ณ อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่แสดงให้ทราบถึงลักษณะทั่วไปของดินได้ และยังสามารถคุณสมบัตินี้ไปใช้ในการคำนวณค่าคุณสมบัติอื่น ๆ ได้ เช่น ความพรุน (Porosity) อัตราส่วนช่องว่าง

(Void Ratio) ของดิน ระดับความอิ่มตัว (Saturation) ความหนาแน่น (Density) เป็นต้น ทั้งยังสามารถนำค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินไปใช้สำหรับวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์แบบ 151 H ได้ด้วยโดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของดินมีค่าอยู่ในช่วง 2.60 - 2.80 ถ้าค่าต่ำกว่านี้ก็อาจมีพวกอินทรีย์สารหรือพวกธาตุเบาต่าง ๆ ปะปนอยู่ และถ้าค่าสูงกว่านี้ก็อาจมีธาตุหนักปะปนอยู่

## 2.2 การทดสอบหาขนาดของดินโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรง

การก่อสร้างทั่วไปดินมักจะเป็นส่วนประกอบทางวิศวกรรมอย่างหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นการสร้างเขื่อนสนามบิน ถนน แม้แต่ฐานรากอาคารขนาดใหญ่ แต่ดินที่ใช้ในงานก่อสร้างได้ดินนั้นจะต้องมีขนาดคละที่เหมาะสม ซึ่งในการหาว่าดินมีขนาดความคละกันอย่างไรนั้นจะต้องทำการหาขนาดของเม็ดดินโดยดินเม็ดหยาบใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน และนำขนาดคละของดินมาใช้ในการจำแนกประเภทของดินต่อไป

การหาขนาดของเม็ดดินโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงจะใช้ตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิดแตกต่างกันออกไปสำหรับเบอร์ตะแกรงที่นิยมใช้กันก็คือขนาด 3/8 นิ้ว เบอร์ 4, 10, 20, 40, 100 และ 200 โดยเบอร์ตะแกรงที่จะขาดไม่ได้ก็คือ เบอร์ 4, 10 และ 200 ซึ่งตะแกรงที่มีช่องเปิดใหญ่ที่สุดจะอยู่บนและไล่ตามลำดับลงมา ดินหรือหินที่เล็กกว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะหล่นลงมาในชั้นต่อไป ดินที่ใหญ่กว่าช่องเปิดของตะแกรงก็จะค้างอยู่บนตะแกรง แต่ก็ไม่แน่นอนเสมอไป เพราะว่าตะแกรงนั้นไม่สามารถแบ่งแยกความแบน ความยาวได้ บางครั้ง หินหรือดินเม็ดเล็กแต่มีความยาวกว่าขนาดของตะแกรงก็สามารถค้างอยู่บนตะแกรงนั้นได้

## 2.3 การทดสอบหาขีดจำกัดสถานะภาพของดิน

ขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก (Atterberg's Limits) หรือ ขีดจำกัดความชื้นเหลว (Consistency Limits) หมายถึงปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้สภาพความเหนียวตัวของมวลดินเปลี่ยนแปลงไป สถานะภาพของมวลดินแบ่งออกเป็น 5 สถานะภาพ โดยจุดแบ่งแต่ละสถานะภาพเรียกว่า ขีดจำกัด (Limit) ดังนี้

1) ขีดจำกัดยึดเกาะ (Cohesion Limit) คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้เศษดินเริ่มมีการยึดเกาะเข้าด้วยกัน

2) ขีดจำกัดเหนียว (Sticky Limit) คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้มวลดินเริ่มมีการยึดเกาะกับผิวของโลหะ

3) ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.) หมายถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินสามารถไหลตัวได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง หรือถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงสถานะภาพของดินก็จะเป็นขีดจำกัด ที่เปลี่ยนจากของเหลว เป็น พลาสติก สามารถหาค่าได้กับดินที่มีความเชื่อมั่น

4) ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) หมายถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินมีสภาพเหนียวหนืดมากขึ้น จะมีปริมาณความชื้นในดิน น้อยกว่าขีดจำกัดเหลวหรือถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงสถานะภาพของดินก็คือ ขีดที่ดินเปลี่ยนจากสภาพพลาสติก เป็นกึ่งของแข็ง

5) ชีตจำกัดการหดตัว (Shrinkage Limit, S.L.) หมายถึง ปริมาณน้ำมากที่สุดในมวลดินที่ไม่ทำให้ปริมาตรทั้งหมดของมวลดินเปลี่ยนแปลงในที่นี้ก็คือ ปริมาตรของดินแห้งซึ่งเม็ดดินจะอยู่ชิดกัน แม้จะลดปริมาณน้ำจากชีตจำกัดการหดตัว และสูญเสียความชื้นไปอีกก็ตาม ก็ไม่ทำให้ปริมาตรมวลดินเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ดินเริ่มมีความแข็งแรงขึ้น ซึ่งความชื้นในดินนี้จะน้อยกว่าชีตจำกัดพลาสติก หรือถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงสถานะภาพของดิน ก็จะเป็นชีตจำกัดที่ดินเปลี่ยนจากสภาพกึ่งของแข็ง เป็นของแข็ง ค่าชีตจำกัดหดตัวนี้เป็นค่าที่บอกถึงสภาพการหดตัวหลังจากดินสูญเสียความชื้นไปว่ามีการหดตัวมากน้อยเพียงใด

ต่อมาได้มีการนำค่าชีตจำกัดมาประยุกต์ ซึ่งในปัจจุบันทางด้านวิศวกรรมโยธาจะใช้กันอยู่ 3 ชีตจำกัด คือ ชีตจำกัดการไหลตัว (Liquid Limit) ชีตจำกัดพลาสติก (Plastic Limit) และชีตจำกัดการหดตัว (Shrinkage Limit) ซึ่งค่าชีตจำกัดเหลวและชีตจำกัดการอ่อนตัว จะใช้พิจารณาในการจำแนกดิน (Soils Classification) สภาพกำลังของดินประมาณการหดตัวของดินแบบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) และประมาณความหนาแน่นสูงสุดจากการบดอัดดินได้ (Compaction) ส่วนค่าชีตจำกัดการหดตัวจะใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินที่มีการเปลี่ยนแปลงไป

#### 2.4 การทดสอบการบดอัดดิน

การบดอัดดิน คือ การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการประยุกต์ใช้พลังงานเชิงกลซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินปริมาณความชื้นที่มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless Soil) จะปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบดอัดโดยอาศัยการสั่นสะเทือนและสำหรับดินเม็ดละเอียด (Cohesive Soil) สามารถทดสอบการบดอัดได้ในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีของ Proctor แต่ถ้าเป็นในสนามสามารถเลือกใช้เครื่องจักรบดอัดชนิดต่าง ๆ กัน โดยพิจารณาความเหมาะสมตามชนิดของดิน จุดประสงค์ของการบดอัดดินก็เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของมวลดิน ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์หลายข้อดังนี้ ลดการทรุดตัวของดิน (Settlement) เพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน และปรับปรุงเสถียรภาพความลาดชัน (Slope Stability) ปรับปรุงกำลังต้านทานน้ำหนัก (Bearing Capacity) ของพื้นทาง ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร เช่น สาเหตุจากการบวมตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinkage) ของดิน ลดการกระจายตัวของดิน (Dispersion) ลดการซึมผ่านของน้ำในดิน (Permeability) ลดการแปลงสถานะเป็นของเหลวของดินทรายเนื่องจากความดันน้ำสูง (Liquefaction) พื้นฐานการบดอัดดินที่มีความเชื่อมแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R. Proctor ในปี 1930 โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test (Compaction Test) ซึ่งมีวิธีการทดสอบ 2 แบบคือ การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) ดังแสดงในตารางที่ 4 และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่ง Proctor ได้กล่าวไว้ว่าในการบดอัดดินมักจะมีตัวแปรควบคุมอยู่ 4 ตัว คือ ความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ปริมาณความชื้น (Water Content), พลังงานในการบดอัด (Compaction Energy) และชนิดของดิน (Soil Type) สำหรับพื้นที่จริงพลังงานที่ใช้ในการบดอัดเปรียบได้กับจำนวนครั้งที่เครื่องจักรบดอัดวิ่ง



ผ่าน แต่สำหรับในท้องปฏิบัติการทดลองจะถูกเปลี่ยนมาเป็นการกระทุ้งตามวิธีการทดลองของ Proctor โดยค่าพลังงานในการบดอัดนั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของค้อนกระทุ้ง (Hammer) ความสูงของระยะปล่อยตก (Height) จำนวนชั้น ของการบดอัด (Layers) จำนวนครั้งที่กระทุ้งต่อชั้น (Blows) และปริมาตรของโมล (Mold) หรือเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2

$$\text{พลังงานในการบดอัด} = \frac{\text{น้ำหนักค้อน} \times \text{ระยะยก} \times \text{จำนวนครั้ง} \times \text{จำนวนชั้น}}{\text{ปริมาตรของโมล}} \quad (2)$$

สำหรับการทดสอบการบดอัดดินในแบบอื่น ๆ การหาค่าพลังงานการบดอัดจะมีลักษณะเดียวกันกับสมการที่ 2 การทดสอบการบดอัดสำหรับดินเชื่อมแน่นสามารถกระทำได้ตามวิธีการทดสอบของ Proctor โดยทั่วไปแล้วในการทดสอบใช้ดินชนิดเดียวกัน แต่ทดสอบในปริมาณความชื้นต่างกัน การทดสอบสามารถหาความหนาแน่นเปียก (Wet Density) และปริมาณความชื้น (Water Content) ของแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบได้ สำหรับค่าความหนาแน่นแห้งของดินแต่ละตัวอย่างการทดสอบนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\rho = \frac{\rho}{1 + w} \quad (3)$$

ตารางที่ 4 วิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (ชูศักดิ์ คีรีรัตน์, 2554)

ลำดับที่	วิธีการ		
	A	B	C
1. ขนาดของโมล	4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร)	4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร)	6 นิ้ว (152.4 มิลลิเมตร)
2. ความสูงของโมล	4.584 นิ้ว (116.43 มิลลิเมตร)	4.584 นิ้ว (116.43 มิลลิเมตร)	4.584 นิ้ว (116.43 มิลลิเมตร)
3. ปริมาตรของโมล	0.0333 ลูกบาศก์ฟุต (944 ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	0.0333 ลูกบาศก์ฟุต (944 ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	0.075 ลูกบาศก์ฟุต (2124 ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
4. น้ำหนักของค้อน	5.5 ปอนด์ (2.5 กิโลกรัม)	5.5 ปอนด์ (2.5 กิโลกรัม)	5.5 ปอนด์ (2.5 กิโลกรัม)
5. ระยะยก	12.0 นิ้ว (304.8 มิลลิเมตร)	12.0 นิ้ว (304.8 มิลลิเมตร)	12.0 นิ้ว (304.8 มิลลิเมตร)
6. จำนวนชั้น	3	3	3

ตารางที่ 4 วิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (ต่อ)

ลำดับที่	วิธีการ		
	A	B	C
7. จำนวนครั้งที่กระทัน/ ชั้น	25	25	56
8. พลังงานในการบดอัด	12375 ฟุต-ปอนด์/ ลูกบาศก์ฟุต (600 กิโลกรัม- เมตร/ลูกบาศก์ม.)	12375 ฟุต-ปอนด์/ ลูกบาศก์ฟุต (600 กิโลกรัม- เมตร/ลูกบาศก์ม.)	12375 ฟุต-ปอนด์/ ลูกบาศก์ฟุต (600 กิโลกรัม- เมตร/ลูกบาศก์ม.)
9. วัสดุดิน	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) อาจใช้กับดินที่ค้ำ ตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ 20	ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว (9.5 มิลลิเมตร) อาจ ใช้กับดินที่ค้ำ ตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่าร้อยละ 20 และดินค้ำตะแกรง ขนาด 3/8 นิ้ว น้อย กว่าหรือเท่ากับร้อย ละ 20	ผ่านตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว (19 มิลลิเมตร) อาจ ใช้กับดินที่ค้ำ ตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว มากกว่าร้อยละ 20 และดินค้ำ ตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว น้อยกว่าร้อยละ 30

ตารางที่ 5 วิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ซุคักดี คีร์รัตน์, 2554)

ลำดับที่	วิธีการ		
	A	B	C
1. ขนาดของโมล	4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร)	4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร)	6 นิ้ว (152.4 มิลลิเมตร)
2. ความสูงของโมล	4.584 นิ้ว (116.43 มิลลิเมตร)	4.584 นิ้ว (116.43 มิลลิเมตร)	4.584 นิ้ว (116.43 มิลลิเมตร)
3. ปริมาตรของโมล	0.0333 ลูกบาศก์ฟุต (944 ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	0.0333 ลูกบาศก์ฟุต (944 ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	0.075 ลูกบาศก์ฟุต (2124 ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
4. น้ำหนักของค้อน	10 ปอนด์ (4.54 กิโลกรัม)	10 ปอนด์ (4.54 กิโลกรัม)	10 ปอนด์ (4.54 กิโลกรัม)
5. ระยะยก	18.0 นิ้ว (457.2 มิลลิเมตร)	18.0 นิ้ว (457.2 มิลลิเมตร)	18.0 นิ้ว (457.2 มิลลิเมตร)
6. จำนวนชั้น	5	5	5

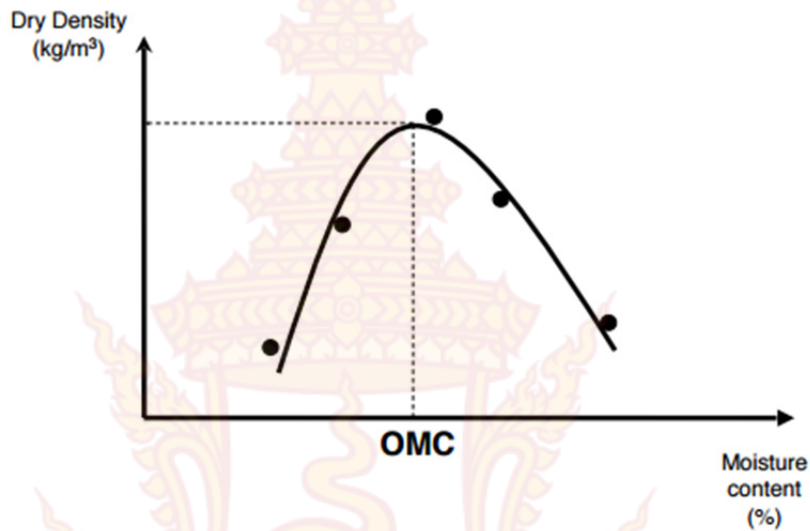
ตารางที่ 5 วิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ต่อ)

ลำดับที่	วิธีการ		
	A	B	C
7. จำนวนครั้งที่กระทุ้ง/ชั้น	25	25	56
8. พลังงานในการบดอัด	56250 ฟุต-ปอนด์/ ลูกบาศก์ฟุต (2700 กน-เมตร/ ลูกบาศก์ม.)	56250 ฟุต-ปอนด์/ ลูกบาศก์ฟุต (2700 กน-เมตร/ ลูกบาศก์ม.)	56250 ฟุต-ปอนด์/ ลูกบาศก์ฟุต (2700 กน-เมตร/ ลูกบาศก์ม.)
9. วัสดุดิน	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) อาจใช้กับดินที่ค้ำ ตะแกรงเบอร์ 4 น้อยกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ 20	ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว (9.5 มิลลิเมตร) อาจใช้กับ ดินที่ค้ำตะแกรง เบอร์ 4 มากกว่าร้อยละ 20 และดินค้ำ ตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว น้อยกว่าหรือ เท่ากับร้อยละ 20	ผ่านตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว (19 มิลลิเมตร) อาจใช้กับ ดินที่ค้ำตะแกรง ขนาด 3/8 นิ้ว มากกว่าร้อยละ 20 และดินค้ำตะแกรง ขนาด 3/4 นิ้ว น้อย กว่าร้อยละ 30

จากทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (ชูศักดิ์ คีรีรัตน์, 2554) ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R. Proctor โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering New-Record แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test

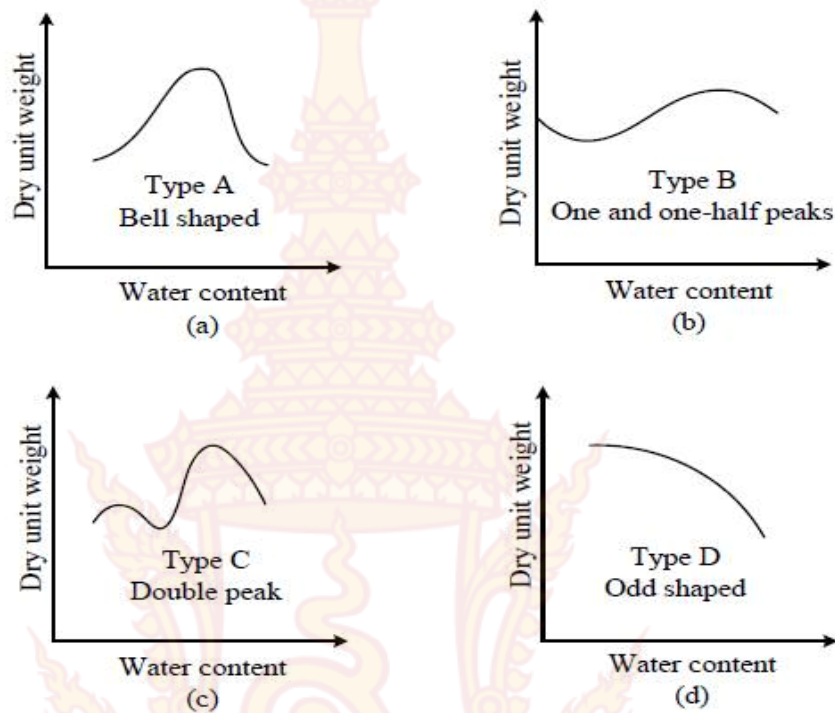
Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัด ดังแสดงในภาพที่ 2 ไว้ว่าประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้านคือ ด้านแห้ง และด้านเปียกสำหรับการบดอัดดินที่แห้งมาก ๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมาก เนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary Moisture) เป็นผลให้การบดอัดดิน ทำได้ยากแต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมาก ๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารีและเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อยๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้วน้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่จนถึงปริมาณน้ำที่เติมช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) หลังจากจุดนี้เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดินทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมากพบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัวซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีก

ต่อไป และเนื่องจากชนิดของดินเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อการบดอัดดินชนิดของดินในที่นี้ครอบคลุมถึงการกระจายของเม็ดดินรูปร่างของเม็ดดินความถ่วงจำเพาะของดินและชนิดของแร่ดินเหนียว



ภาพที่ 2 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (โกลคินท์ร์ ข้าเกตุ, 2554)

Lee and Suedkamp (1972) ศึกษากราฟการบดอัดดินของดินที่แตกต่างกัน 35 ชนิดและพบว่ากราฟเหล่านั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก ดังแสดงในภาพที่ 3 ชนิด A เป็นกราฟที่มีจุดยอดเพียงจุดเดียว โดยทั่วไปมักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวประมาณร้อยละ 30-70 ชนิด B คือกราฟที่มี 1 จุดยอดและครึ่งจุดยอด ชนิด C คือกราฟที่มีสองจุดยอด กราฟชนิด B และ C มักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวน้อยกว่าร้อยละ 30 ชนิด D คือกราฟที่ไม่แสดงจุดยอดที่ชัดเจนดินที่มีขีดจำกัดเหลวมากกว่าร้อยละ 70 อาจแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบชนิด C หรือ D ซึ่งเป็นลักษณะกราฟที่ไม่ค่อยพบเห็นสำหรับการบดอัดดินเหนียว แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟการบดอัดแปรผันอย่างมากกับขีดจำกัดเหลวขีดจำกัดเหลวยิ่งมากหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดยังมีค่าน้อยลงในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมยังมีค่ามากขึ้นซึ่งแสดงผลทดสอบการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) การที่ขีดจำกัดเหลวมีอิทธิพลต่อเส้นกราฟการบดอัดเนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของแร่ดินเหนียว และของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน



ภาพที่ 3 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่าง ๆ (โกลคินท์ร์ ข้าเกตุ, 2554)

## 2.5 การทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ของดิน

การทดสอบ California Bearing Ratio หรือเรียกสั้น ๆ ว่า การทดสอบ ซี.บี.อาร์. เป็นการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่บดอัดแล้วสำหรับชั้นคันทาง (Subgrade) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และชั้นพื้นทาง (Base) โดยในแบบก่อสร้างทั่วไปจะกำหนดความหนาแน่นของชั้นดินที่จะบดอัดในแต่ละชั้นเป็น ซี.บี.อาร์. ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ โดยถ้าค่า ซี.บี.อาร์. ที่ถูกกำหนดมีค่ามากเท่าใด ก็แสดงว่าชั้นดินนั้นต้องบดอัดให้แน่นมากขึ้นตามไปด้วย การทดสอบ ซี.บี.อาร์. เป็นการหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินหรือหินคลุกที่บดอัดแล้ว โดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปของหน่วยแรงต้านทานของตัวอย่างดินทดสอบที่บดอัด (Test Unit Load) ต่อหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของหินคลุกบดอัด (Standard Unit Load) ในระดับความลึกหรือระยะจมของแท่งกด (Penetration Piston) ที่เท่ากัน แล้วเปรียบเทียบออกมาเป็นร้อยละ

การทดสอบ ซี.บี.อาร์. เป็นวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินบดอัดแน่นด้วยการใช้แท่งกดขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนตัวอย่างดินด้วยความเร็ว 0.05 นิ้วต่อนาที (1.25 มิลลิเมตรต่อนาที) แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ได้จากการทดสอบกับวัสดุหินคลุกบดอัดแน่นบนพื้นฐานการทดสอบที่เหมือนกัน โดยค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐานได้ถูกกำหนดเป็นค่ามาตรฐานโดย California Division of Highway ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของหินคลุกบดอัดแน่นที่ระยะจมน้ำต่างๆ (ชูศักดิ์ ศิริรัตน์, 2554)

ระยะจมน้ำ		หน่วยแรงเค้นมาตรฐาน	
มิลลิเมตร	นิ้ว	เมกะพาสคาล	ปอนด์/ตารางนิ้ว
2.50	0.10	6.90	1,000
5.00	0.20	10.30	1,500
7.50	0.30	13.00	1,900
10.00	0.40	16.00	2,300
12.70	0.50	18.00	2,600

## 2.6 การทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง

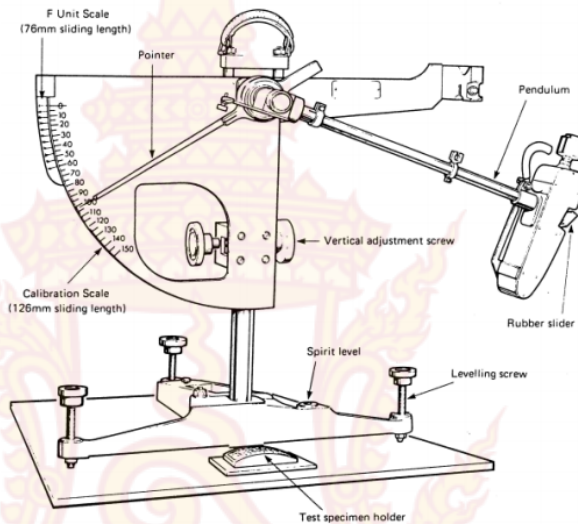
การทดสอบแท่งตัวอย่างดินเหนียว (Cohesive Soil) โดยปราศจากแรงด้านข้างที่กระทำต่อแท่งตัวอย่างดินโดยใช้เครื่องทดสอบแบบธรรมดา (Compression Machine) ได้ถูกนำมาทดสอบนานแล้ว และต่อมาก็เป็นที่ยอมรับกันว่าการที่นำแท่งตัวอย่างดินมาทดสอบแบบนี้สามารถที่จะหาความต้านทานต่อแรงเฉือนของดินได้

การทดสอบแรงเฉือนของดินแบบไม่มีแรงด้านข้าง (Unconfined Compression Test) เป็นการหาค่ากำลังต้านทานต่อแรงกดสูงสุดของเนื้อดิน ที่สามารถทดสอบได้รวดเร็ว และค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ซึ่งในการทดสอบจะกระทำโดยให้แรงกดทับแท่งตัวอย่างดิน จนกระทั่งแท่งตัวอย่างดินวิบัติแล้ว นำค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าความเค้นสูงสุด ซึ่งความเค้นที่ได้นี้จะเรียกว่า Unconfined Compression Strength ( $q_u$ ) ซึ่งตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบจะต้องเป็นตัวอย่างดินที่มีความเหนียวที่สามารถปั้นเป็นรูปได้ การรับแรงของดินแบบมีความเหนียวจะเป็นไปในลักษณะใช้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) ในการรับแรงเป็นส่วนใหญ่ ถ้าดินมีความเหนือน้อยถึงปานกลาง เช่นพวก Sandy Silt, Sandy Clay หรือ Silt เป็นต้น การรับแรงจะเป็นในลักษณะใช้ทั้งแรงยึดเหนี่ยวและแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างเม็ดดินช่วยกันรับแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นและถ้าดินมีความเหนียวมาก เช่น ดินเหนียวก็ใช้แรงยึดเหนี่ยวในการรับแรงไว้ทั้งหมด ซึ่งแรงต่างๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเรียกรวมกันว่า กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear Strength) และการทดสอบนี้จะไม่มีการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินก่อนการทดสอบเสร็จ จึงเป็นการทดสอบดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Test) และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้เป็นแบบแรงรวม (Total Stress)

## 2.7 การทดสอบด้านการลื่นไถล (ชยันต์ เจริญพร, 2542)

พื้นผิวทางในสภาพเปียกเป็นสภาพที่วัดค่าความต้านทานการลื่นไถลได้น้อยกว่าสภาพพื้นผิวทางแห้ง ดังนั้นการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลโดยทั่วไปจึงทดสอบในสภาพพื้นผิวทางเปียก เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่อง Portable Skid Resistance Tester เครื่องทดสอบการต้านทานการลื่นไถลแบบพกพา เครื่องมือชนิดนี้นิยมใช้งานกันแพร่หลายสำหรับการหาค่าความเสียดทานเฉพาะจุด (Spot

Check) คือ British Pendulum Tester (BPT) ดังภาพที่ 4 ตามที่ระบุใน ASTM E303 ใช้วัดค่าความฝืดระหว่างยางที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายของแขนแกว่ง (Pendulum Arm) ข้อดีของเครื่องมือแบบนี้คือสามารถทดสอบได้รวดเร็วทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ ค่าที่ได้สามารถอ่านได้โดยตรง สามารถทดลองได้แม้ในพื้นที่ลาดเอียง



ภาพที่ 4 เครื่องมือทดสอบ British Pendulum Tester (BPT)

ส่วนประกอบของเครื่อง BPT ตัวเครื่องประกอบด้วยฐานรองรับรูปตัว T ปลายแต่ละด้านของฐานมีสกรูปรับให้สูง-ต่ำได้ โดยใช้ระดับน้ำซึ่งติดอยู่ที่โคนของเครื่องเป็นตัวตรวจสอบระดับของเครื่อง เพื่อให้เครื่องตั้งอยู่ในแนวตั้งขณะทำการทดลอง แกนในแนวตั้งเป็นแกนกลมมีรางเลื่อนให้แขนแกว่งและแผ่นดัชนีเลื่อนขึ้น-ลงได้ในแนวตั้ง แขนแกว่งประกอบด้วยก้านอูมิเนียมและลูกตุ้มที่ปลายแขน ภายในลูกตุ้มเป็นแผ่นยางติดกับก้านสปริงมีคั่นยกก้านสปริงเพื่อให้แผ่นยางยกขึ้น เหนือพื้นผิวทางได้เมื่อแกว่งกลับ แขนแกว่งถูกยึดติดด้วยโกล้อยู่ที่สามารถจับ-ปล่อยแขนแกว่งได้ เมื่อกดไกแขนแกว่งจะตกลงจากตำแหน่งที่ถูกยึดไว้แบบอิสระและผิวหน้าแผ่นยางจะปาดสัมผัสไปบนพื้นผิวทางที่ต้องการทดสอบ ขณะเดียวกันแขนแกว่งจะพาเอาเข็มชี้ไปที่ขีดแบ่งบนดัชนีอูมิเนียม น้ำหนักยางรวมแผ่นโลหะหนัก 22 กรัม แผ่นยางทำมุม 20 องศา กับพื้นผิวที่ทดสอบ หลักการออกแบบเครื่องมือนี้คือ ใช้เครื่องมือจำลองสภาพล้อรถที่วิ่งไปบนผิวทางโดยแผ่นยาง มีความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งเปรียบเทียบกับค่าความเร็วที่ 48 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่าความต้านทานการลื่นไถลที่อ่านได้จากเครื่อง BPT จะให้ค่า 100 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

ค่าความต้านทานการลื่นไถลของล้อยานพาหนะบนถนนมีความสำคัญ ต่อความปลอดภัย ความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวถนนใช้ประกอบการ ตัดสินใจในการบำรุงรักษาสภาพของพื้นผิวถนน ให้สภาพพื้นผิวถนนมีความต้านทานการลื่นไถลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามประเภท ความสำคัญของ ทาง ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้งานสามารถเดินทางได้อย่างปลอดภัย

โดยทั่วไปมาตรฐานความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skidding Resistance Value, SRV) ต่ำสุดถูกกำหนดขึ้น เพื่อเป็นขีดจำกัดให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ขับขี่รถยนต์เป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังใช้เป็นประโยชน์ในการพิจารณาประเมินระยะเวลาเพื่อซ่อมบำรุงพื้นผิวจราจรได้ด้วย Bunnag, et al, 1975 ได้เสนอแนะค่าความต้านทานการลื่นไถลในสภาพพื้นผิวทางเปียกของถนนประเภทต่าง ๆ ดังแสดงตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ประเภทและลักษณะของถนนต่าง ๆ รวม 4 ประเภท

ประเภท	ลักษณะของถนน	ค่า SRV
A	ถนนตามจุดอันตราย (Most Difficult Sites) – วงเวียน – ถนนโค้งที่มีรัศมีความโค้งน้อยกว่า 500 ฟุต – ทางลาดชันมากกว่า 1 : 2 และระยะความลาดชันมากกว่า 300 ฟุต – บริเวณแยกใกล้ไฟสัญญาณ	มากกว่า 65
B	ถนนสาธารณะโดยทั่วไปที่ไม่ได้จัดอยู่ในประเภท A และ C (General Requirements)	มากกว่า 55
C	ถนนสาธารณะในทางตรงที่มีความลาดชันน้อย รัศมีความโค้งไม่มากนัก และมีบริเวณแยกน้อย (Easy Sites)	มากกว่า 45
D	ถนนสาธารณะโดยทั่วไปที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่า 0.40 (Proved Sites)	ถ้าต่ำกว่า 45 จะเกิดการลื่นไถล

### 3. มาตรฐานของวัสดุที่นำมาใช้งานทาง

กรมโยธาธิการและผังเมือง (กองวิเคราะห์วิจัยและทดสอบวัสดุ, 2557) ได้กำหนดมาตรฐานของวัสดุที่นำมาใช้ในงานทางแต่ละชั้นไว้ดังนี้

#### 3.1 มาตรฐานวัสดุถมคันทาง (Embankment Material)

วัสดุถมคันทาง (Embankment Material) หมายถึง วัสดุที่ได้จากบ่อขุดข้างทางถนน หรือที่อื่นๆ แล้วนำมาใช้ก่อสร้างคันทางโดยวัสดุถมคันทางต้องมีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่ปราศจากรากไม้ใบไม้ หรือวัสดุอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารผูกพันอยู่กันอาจจะทำให้เกิดการยุบตัวเสียหายในอนาคต มีขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร และมีส่วนละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก มีค่า ซี.บี.อาร์.จากห้องทดลองไม่น้อยกว่าร้อยละ 8 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Density)



### 3.2 มาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง (Subbase)

วัสดุรองพื้นทาง (Subbase) หมายถึงวัสดุลูกรัง หรือวัสดุรวมรวมดิน (Soil Aggregate) ซึ่งนำมาเสริมบนชั้นคันทาง หรือใช้เป็นชั้นพื้นทางของถนนชนิดที่มีผิวจราจรเป็นลูกรัง โดยวัสดุรองพื้นทางนั้นต้องมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประกอบด้วย เม็ดแข็งทนทาน และมีวัสดุเชื้อประสานที่ตีผสมอยู่โดยปราศจากก้อนดินเหนียว รากไม้ หรือวัชพืชอื่น ๆ โดยขนาดวัสดุใหญ่สุดไม่โตกว่า 5 เซนติเมตรตามอัตราส่วนมวลคละผ่านตะแกรง ดังตารางที่ 8 มีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 35 มีค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) ไม่มากกว่าร้อยละ 11 ค่า ซี.บี.อาร์. จากห้องทดลอง (Lab C.B.R.) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Density)

ตารางที่ 8 ขนาดคละของชั้นรองพื้นทางวัสดุรวมรวม (กองวิเคราะห์วิจัยและทดสอบวัสดุ, 2557)

ขนาดและ ตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ				
	ชนิด ก	ชนิด ข	ชนิด ค	ชนิด ง	ชนิด จ
2"	100	100	-	-	-
1"	-	75-95	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-
เบอร์ 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100
เบอร์ 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
เบอร์ 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
เบอร์ 200	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

### 3.3 มาตรฐานวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed Rock Soil Aggregate Type Base)

วัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (Crushed Rock Soil Aggregate Type Base) หมายถึง วัสดุซึ่งมีขนาดคละกันสม่ำเสมอจากขนาดใหญ่ไปหาขนาดเล็ก นำมาเสริมบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นคันทาง ต้องเป็นวัสดุปราศจากก้อนดินเหนียว (Clay Lump) รากไม้ วัชพืช และเศษขยะต่างๆ อัตราส่วนคละสม่ำเสมอประกอบด้วยส่วนหยาบ และส่วนละเอียด ดังตารางที่ 9 โดยที่ส่วนหยาบต้องเป็นหินไม่ ส่วนละเอียดเป็นวัสดุชนิดเดียวกับส่วนหยาบหากมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโยธาธิการและผังเมืองก่อน มีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 25 ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) ไม่มากกว่าร้อยละ 6 มีค่า ซี.บี.อาร์. จากห้องทดลอง (Lab C.B.R.) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุด แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Density)

ตารางที่ 9 แสดงขนาดคละของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (กองวิเคราะห์วิจัยและทดสอบวัสดุ, 2557)

ขนาดและตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ		
	ชนิด ก	ชนิด ข	ชนิด ค
2”	100	100	-
1”	-	75-95	100
3/8”	30-65	40-75	50-85
เบอร์ 4	25-55	30-60	35-65
เบอร์ 10	15-40	20-45	25-50
เบอร์ 40	8-20	15-30	15-30
เบอร์ 200	2-8	5-20	5-15

กรมทางหลวง (2557) ได้กำหนดมาตรฐานของวัสดุที่นำมาใช้งานทางของปริมาณจราจรน้อยและปริมาณจราจรมากไว้ดังนี้

3.4 มาตรฐานพื้นทางสำหรับปริมาณจราจรน้อย (Light Traffic) (กรมทางหลวง, 2556)

จะใช้มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 204/2556) ซึ่งเป็นการก่อสร้างพื้นทางที่ใช้ดินผสมกับปูนซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์และน้ำ โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นไปบนชั้นรองพื้นทาง ต้องเป็นวัสดุปราศจากหน้าดิน รากไม้ วัชพืช หรือสารอื่น ๆ มีขนาดคละที่ดีต้องมีขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร มีส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ไม่เกินร้อยละ 70 และส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกินร้อยละ 25 มีค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 40 ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) ไม่มากกว่าร้อยละ 15 ในส่วนการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์เพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่จะผสมกับดินและน้ำให้ถือเอาค่าแรงอัดดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง (Unconfined Compressive Strength) ซึ่งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1724 กิโลปาสคาล (250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

3.5 มาตรฐานพื้นทางสำหรับปริมาณจราจรมาก (Heavy Traffic) (กรมทางหลวง, 2556)

จะใช้มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 203/2556) ซึ่งเป็นการก่อสร้างพื้นทางที่ใช้หินคลุกผสมกับปูนซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์และน้ำ โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นไปบนชั้นรองพื้นทาง ต้องเป็นวัสดุหินไม่มวลรวมที่มีเนื้อแข็ง เหนียว สะอาด ไม่ฝุ่น และปราศจากวัสดุเจือปน ในส่วนมวลรวมละเอียดต้องผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่มากกว่าสองในสามของส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีค่าขีดเหลว (Liquid Limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 25 ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity Index) ไม่มากกว่าร้อยละ 6 ในส่วนการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์เพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่จะผสมกับหินคลุกและน้ำให้ถือเอาค่าแรงอัดดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง

(Unconfined Compressive Strength) ซึ่งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2413 กิโลปาสกาล (350 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว)

#### 4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธิติพงษ์ หล่อพิศาลชัย และ คณะ (2556) การศึกษานี้เกี่ยวกับการเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำยางพาราโดยทำการทดสอบกับตัวอย่างดินลูกรังที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ น้ำและน้ำยาง จำนวน 3 อัตราส่วน ประกอบด้วย (1) 6 : 1 : 0.7 (2) 5.5 : 1.5 : 0.7 and (3) 5 : 2 : 0.7 โดยใช้ปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 12.5 ของปริมาณน้ำโดยปริมาตรระยะเวลาในการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน และทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดกำลังรับแรงดัดกำลังรับแรงดึงตามลำดับ บ่มแห้งอากาศที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ และการทดสอบการดูดซึมน้ำของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา เท่ากับ 5 : 2 : 0.7 และปริมาณน้ำยางร้อยละ 5 ให้ค่าที่ดีที่สุดที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งได้กำลังรับแรงอัด 150 ksc กำลังรับแรงดัด 6 ksc กำลังรับแรงดึง 21 ksc การดูดซึมน้ำร้อยละ 6 ตามลำดับดังนั้นการปรับปรุงดินซีเมนต์และน้ำยางพารา เท่ากับ 5 : 2 : 0.7 และปริมาณน้ำยางร้อยละ 5 จะให้ค่าที่สูงที่สุด

มนตรี เดชาสกุลสม และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในในงานทาง โดยทำการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าก้นเตาโดยการทดสอบ การทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง (Unconfined Compressive Strength) ซึ่งได้นำเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 ดังนั้นจึงทำการบดอัดลงในแบบหล่อ (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. แบบสูงกว่ามาตรฐานที่ความชื้นตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในน้ำไว้ 4 วันแล้วทำการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ผลการทดสอบพบว่า การทดสอบคุณสมบัติของเถ้าก้นเตา โดยการทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้างเมื่อมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 2 ทำให้เถ้าก้นเตามีค่าแรงกระทำด้านข้าง 9.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถนำมาพิจารณาใช้เป็นวัสดุชั้นทางชั้น (Selected Materials) หรือ ชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ได้ และการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าก้นเตา โดยเฉพาะ ซี.บี.อาร์. ที่ไม่ได้ผสมปูนขาวมีค่า ซี.บี.อาร์. ร้อยละ 26.5 เมื่อพิจารณาแล้วสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลเบาใช้ในในงานทางได้

สิทธิชัย ศิริพันธุ์ และคณะ (2547) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ได้ทำการศึกษากาการใช้ยางธรรมชาติเพื่อพัฒนางานคอนกรีต โดยการศึกษาหาเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการผสมน้ำยางในคอนกรีต ซึ่งได้ศึกษาความสามารถ (Workability) ของน้ำยางที่ผสมกับคอนกรีต หลังจากนั้นนำมาหล่อแบบแล้วอัดกำลัง (Compressive Strength) และค่ากำลังดัด (Flexural Strength) สัดส่วนของน้ำยางพาราต่อคอนกรีต วิธีการผสมน้ำยางกับคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วยางกับคอนกรีตจะเข้ากันได้ยากจึงต้องมีการผสมสารลดแรงตึงผิว สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ( Nonionic Surfactants ) คือ Lutensol XL 80 ในสัดส่วนร้อยละ 4 ของน้ำหนัก

ซีเมนต์ เมื่อผสมคอนกรีตตามสูตร ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตผสมน้ำยางจะมีกำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 60 และเมื่อปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น การรับกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงสำหรับค่ากำลังอัด พบว่า ลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่อสัดส่วนยางพาราต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาระยะเวลาการบ่มแห้งในอากาศเพิ่มเป็น 14 และ 28 วัน ที่สัดส่วนยางพาราต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.15 และ 0.20 พบว่า คอนกรีตผสมน้ำยางพาราจะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากอนุภาคเนื้อยางเกาะตัวกันเป็นชั้นฟิล์ม ที่แข็งแรงขึ้นทางผู้วิจัยรายงานว่า การใช้งานคอนกรีตผสมน้ำยาง ยังไม่เหมาะกับงานโครงสร้างที่ต้องรับแรงอัดมาก แต่อาจเหมาะกับงานซ่อมแซม หรือเหมาะกับงานคอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนังที่ไม่รับแรงอัดมาก ซึ่งการยึดเหนี่ยวของน้ำยางจะมีประโยชน์ในการเป็นตัวประสานกับคอนกรีต อย่างไรก็ตามการขจัดฟองอากาศและการก่อตัวซ้ำในคอนกรีตยังเป็นปัญหาสำคัญที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลังอัดและการก่อตัวใกล้เคียงคอนกรีตปกติเพื่อให้สามารถนำมาใช้ในงานโครงสร้างอื่นได้ต่อไป

ชูศักดิ์ ศีรีรัตน์ (2554) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเถ้าก้นเตาผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพื่อนำไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา โดยการนำหินฝุ่นและปูนซีเมนต์มาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม ซึ่งกำหนดอัตราส่วนผสมเพิ่ม ซึ่งกำหนดอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของเถ้าก้นเตาคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ศึกษา ได้แก่ การกระจายตัวของเม็ดดิน ชีตจำกัดความชื้นเหลว ความถ่วงจำเพาะ ค่าแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงดันข้าง ค่า ซี.บี.อาร์. และการซึมผ่านได้ของน้ำ ผลการศึกษาพบว่าวัสดุผสมเพิ่มที่นำมาผสมกับเถ้าก้นเตาไม่ได้ช่วยให้วัสดุทดสอบมีขนาดคละและเหนียวดีขึ้น เมื่อนำเถ้าก้นเตาผสมกับวัสดุผสมเพิ่มค่าความถ่วงจำเพาะยังคงมีค่าต่ำกว่า 2 จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงดันข้างพบว่า วัสดุผสมมี B\_LD50\_C50, B\_SD50\_C50 และ B\_C100 ที่มีปริมาณของวัสดุผสมเพิ่มคือหินฝุ่นและปูนซีเมนต์ ร้อยละ 8 และ 10 เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งาน สำหรับค่า ซี.บี.อาร์. ของเถ้าก้นเตาในสภาพไม่แช่น้ำให้ค่ามากกว่าในสภาพแช่น้ำ แต่ค่า ซี.บี.อาร์. ของเถ้าก้นเตาผสมวัสดุเพิ่มในสภาพแช่น้ำให้ค่ามากกว่าในสภาพไม่แช่น้ำ โดยค่า ซี.บี.อาร์. จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม และค่าการซึมผ่านได้ของน้ำของเถ้าก้นเตาผสมวัสดุผสมเพิ่ม พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม

วิเศษ แจ่มจิตร และประทีป ดวงเดือน 2552 ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ เถ้าก้นเตาเพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาซึ่งได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปริมาณของเถ้าก้นเตาและอายุของการบ่ม โดยแบ่งเป็นสองเกรด ได้แก่ เกรด B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทยโดยเกรด B ผสมเถ้าก้นเตากับดินในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 และเกรด D ผสมเถ้าก้นเตากับดินในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักของดินแห้ง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้นค่าดัชนีความเหนียวและความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าสูงขึ้น ค่าการทดสอบ ซี.บี.อาร์. แบบไม่แช่น้ำ (Un Soaked) และ การทดสอบ ซี.บี.อาร์. แบบแช่น้ำ (Soaked C.B.R.) ให้ค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 10 และ 25 ของดินลูกรังเกรด B และ D ตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

ประชุม คำพุ่ม (2550) ได้ศึกษาการนำน้ำยางพาราธรรมชาติมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังและการเป็นฉนวนกันความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบมี

ฟองอากาศ -อบไอน้ำ ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ : ทรายบดละเอียดเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนักปริมาณผงอะลูมิเนียมเท่ากับร้อยละ 0.3 ของส่วนผสมทั้งหมดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก (ไม่รวมน้ำหนักของน้ำในน้ำยารักษา) ปริมาณปูนขาวเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์และปริมาณยิปซัมเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ในการเตรียมน้ำยารักษาใช้สารแอมโมเนียเหลวเข้มข้นร้อยละ 15 ในสัดส่วนร้อยละ 3 ของน้ำหนักน้ำยารักษา คอนกรีตต้องผสมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุให้ได้ในปริมาณร้อยละ 4 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ใช้อัตราส่วนน้ำยารักษาต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0, 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ตามลำดับทำการผสมและอบไอน้ำตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 นำมาทดสอบหาความหนาแน่นของค่ากำลังอัดและค่ากำลังดัด ที่อายุ 3, 7, 14, และ 28 ค่าการดูดกลืนน้ำที่อายุ 7 และ 28 วัน ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวและค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อนผลการวิจัยพบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาจะแปรผกผันกับอัตราส่วนของน้ำยารักษาต่อปูนซีเมนต์ ในขณะที่ค่ากำลังดัดของคอนกรีตจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนของน้ำยารักษาต่อปูนซีเมนต์โดยเมื่อผสมน้ำยารักษาเพิ่มขึ้นค่ากำลังอัดจะลดลงแต่ค่ากำลังดัดจะเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นจะแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำยารักษาต่อปูนซีเมนต์ค่าการดูดกลืนน้ำจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนน้ำยารักษาต่อปูนซีเมนต์ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว (ร้อยละการหดตัว) มีค่าไม่แน่นอนในแต่ละอัตราส่วนน้ำยารักษาต่อปูนซีเมนต์และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมากกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบปกติอยู่เล็กน้อยโดยปริมาณน้ำยารักษาที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ การใช้อัตราส่วนน้ำยารักษาต่อปูนซีเมนต์ 0.10 เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วน้ำยารักษาสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบปานกลางที่สามารถรับกำลังได้สูงและเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี

สมัชชา แสตนสุวรรณศรี และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบขอนแก่นโดยใช้สารผสมเพิ่มเพื่อใช้ในงานพื้นทาง สารผสมเพิ่มประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าก้นเตา ที่เป็นส่วนที่เหลือจากการเผาลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง นำมาทำการบดอัดด้วยเครื่องบด ซึ่งเถ้าก้นเตาที่ผ่านการบดจะต้องมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดขอบเขตของตัวอย่างดินที่ใช้สารผสมเพิ่มร้อยละ 5 โดยเปลี่ยนสัดส่วนของเถ้าก้นเตาในสารผสมเพิ่มพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าก้นเตาเป็น 6 ต่อ 4 และได้ทำการทดสอบความแข็งแรงโดยวิธีแคลิฟอร์เนียแบร์ริงเรโซ พบว่าใช้สารผสมเพิ่มประมาณร้อยละ 2 ที่อายุ 28 วัน ทำให้ดินลมหอบขอนแก่นที่มีความแข็งแรงเท่ากับหินคลุก และสภาพแช่น้ำไม่ได้ทำให้ดินที่ได้รับการปรับปรุงแล้วลดความแข็งแรงลง นอกจากนี้ได้ทดสอบพฤติกรรมในการรับน้ำหนักโดยทำแบบจำลองขนาด 4x4x0.3 เมตร ให้น้ำหนักบรรทุกโดยแผ่นเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.7 เมตร แล้วจึงวัดความดันที่จะกระจายตัวลงไปใต้แบบจำลองอีกด้วย

ทรงลักษณ์ วิจารณ์ และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของเพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด โดยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่าย เถ้าก้นเตาที่นำมาทำการวิจัยนี้ได้มาจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะมาบดให้มีขนาด 24 ไมครอนเมตร จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยให้น้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อหล่อซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด จากนั้นนำไปถ่ายภาพขยายกำลังสูง

โดยใช้เทคนิค Back-Scatter แล้วใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อหาระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 60 วัน จากผลการทดลองพบว่าระดับการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนซีเมนต์และอายุทดสอบ โดยหากมีปริมาณปูนซีเมนต์มากก็จะเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย และเมื่ออายุทดสอบเพิ่มขึ้นระดับการเกิดปฏิกิริยาจะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

จุฑาทิพย์ เขียวแจ่ม และประทีป ดวงเดือน (2552) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกและทรายโดยใช้เถ้าก้นเตา ได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดินปริมาณเถ้าก้นเตาและอายุการบ่ม โดยตัวอย่างหินคลุกทรายและเถ้าก้นเตาที่ได้นำมาทดสอบนั้นมาจากจังหวัดชลบุรี นครสวรรค์ และ ระยอง ตามลำดับ นำมาทำการทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพ และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม ของหินคลุกและทรายโดยผสมกับเถ้าก้นเตาที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดจากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง ผสมกับเถ้าก้นเตากับหินคลุก ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้งและผสมกับทรายในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง จากการศึกษาพบว่า หินคลุกที่ผสมกับเถ้าก้นเตาจะมีค่าดัชนีความเหนียวลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ หินคลุกและทรายที่ผสมเถ้าก้นเตาต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดแนวโน้มลดลงปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มแนวโน้มลดลงปริมาณความชื้น

สืบสกุล ดวงเดือน และคณะ (2551) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าก้นเตาโดยการใช้เปลือกไข่บด เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านการบดอัดของเถ้าก้นเตา ได้แก่ ปริมาณของเปลือกไข่ และอายุการบ่ม ศึกษาหาสัดส่วนของสารผสมที่เหมาะสมระหว่างเถ้าก้นเตาและเปลือกไข่บดตามอัตราส่วน 95:5, 90:10, 80:20 และ 70:30 โดยน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำสารผสมตามสัดส่วนที่เหมาะสมไปทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านการบดอัดและ CBR จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของสารผสมที่เหมาะสมคือ 90:10 โดยน้ำหนักแห้ง เมื่อนำมาทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านการบดอัด พบว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงเล็กน้อย และค่า CBR แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ มีค่าสูงสุดที่สัดส่วน 90:10 ของน้ำหนักแห้งและมีค่าสูงสุดที่อายุการบ่ม 14 วัน และอัตราส่วนผสมที่สามารถนำไปใช้ในวัสดุในชั้นพื้นทางได้นั้นอยู่ที่อัตราส่วน 95:5 ซึ่งจะให้ค่า CBR ผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนดของวัสดุชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง

ชนิศร์ โพธิ์ดง และคณะ (2556) ศึกษาค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางลาดยางขณะที่เปียกน้ำยางพาราจากปัญหาของการขนส่ง ทำให้ยานพาหนะที่สัญจรเกิดอุบัติเหตุ กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 101 แพร่-น่าน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทราบถึงตัวแปรต่างๆ และวิธีการแก้ปัญหาได้อย่างเหมาะสม ถูกต้อง และประหยัดงบประมาณมากที่สุด และจากการทดลองสามารถหาตัวแปรอื่นๆ ไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต และสามารถตรวจสอบว่าค่าความต้านทานการลื่นไถลสูงกว่าค่ามาตรฐาน ที่กำหนดสำหรับถนนทั่วไป คือ 45 จึงถือว่าปลอดภัย โดยการวัดด้วยเครื่องมือ Portable Skid Resistance Tester โดยทำการทดสอบ พื้นผิวถนนจำลองที่เปียกน้ำยางพารา แล้วใช้ตัวแปร 4 ประเภทในการแก้ไข คือ น้ำเปล่า น้ำยาล้างจาน น้ำส้มคว้นไม้ น้ำหมักชีวภาพ และทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถล

### บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

บทนี้เป็นการอธิบายถึงวิธีการดำเนินการ รวมถึงการทดสอบที่เกี่ยวข้องในการหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเหล็กกล้าเตาผสมน้ำยาพาราและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. ขั้นตอนการดำเนินงาน

##### 1.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลเนื้อหา

ดำเนินการศึกษารวบรวมข้อมูลเนื้อหา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจากเอกสาร ตำราทั้งภาษาไทย และภาษาอังกฤษ งานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องรวมทั้งมาตรฐานในการทดสอบต่าง ๆ (ASTM)

##### 1.2 การเตรียมวัสดุเพื่อใช้ในการทดสอบ

การเตรียมวัสดุเพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัตินั้น จะใช้เหล็กกล้าเตาขนาดคละ เหล็กกล้าร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) และเหล็กกล้าร้อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8 โดยที่เหล็กกล้าเตาขนาดคละคือนำเหล็กกล้าเตาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ,10 ,40 ,100 ,200 ตามลำดับ จากนั้นทำการผสมเหล็กกล้าเตาตามร้อยละที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง จะได้สัดส่วนของเหล็กกล้าที่มีขนาดคละ โดยเหล็กกล้านั้นจะต้องอบแห้งที่อุณหภูมิ  $60 \pm 5$  องศาเซลเซียสก่อนที่จะนำมาทดสอบ และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายอินทรีเพชรสำหรับงานโครงสร้าง มาเป็นวัสดุผสมระหว่างเหล็กกล้าเตาและน้ำยาพารา โดยอัตราส่วนของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 5 และสัญลักษณ์ที่ใช้แทนวัสดุทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 9

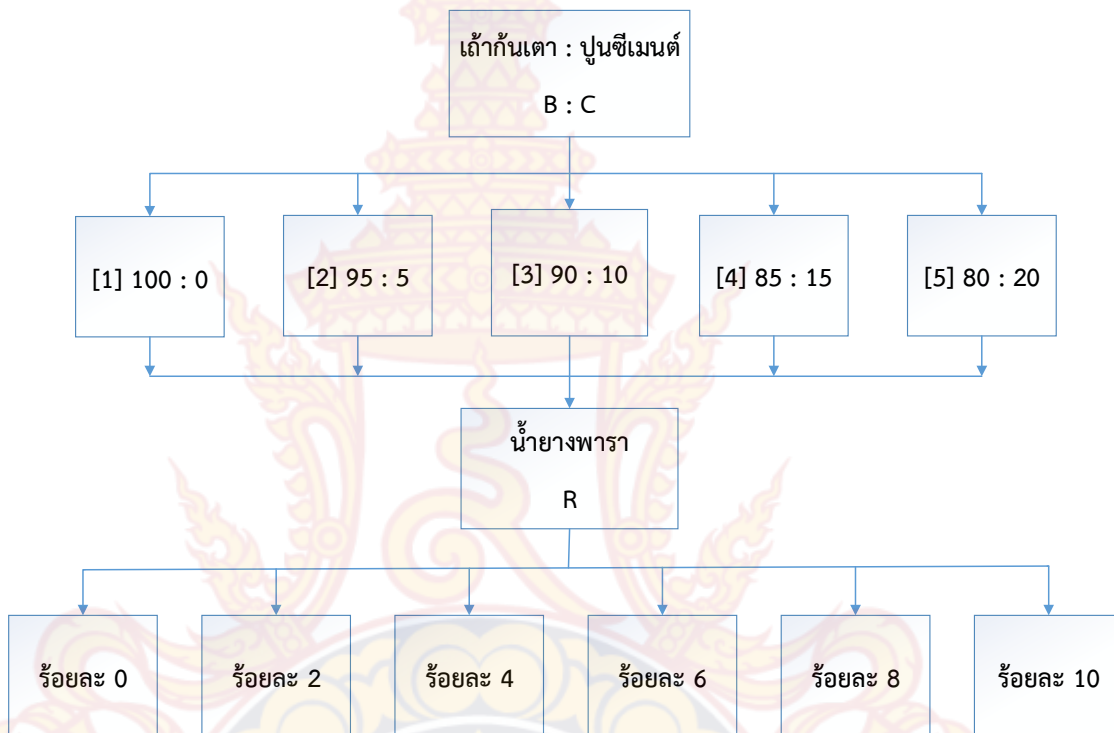
##### 1.3 ดำเนินการทดสอบหาค่าคุณสมบัติพื้นฐาน

ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ได้เตรียมตัวอย่างไว้แล้ว โดยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน การวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดดินด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน และการทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดิน

##### 1.4 ดำเนินการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการ

ทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของตัวอย่างวัสดุ โดยเน้นการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับงานถนน ได้แก่ การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการของเหล็กกล้าเตาผสมน้ำยาพาราและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะประกอบไปด้วย การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

การทดสอบแรงอัดของดินโดยปราศจากแรงด้านข้าง การทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์ และการทดสอบการลื่นไถล



ภาพที่ 5 อัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำยางพารา

ตารางที่ 9 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนวัสดุทดสอบ

สัญลักษณ์	ความหมาย
B	เถ้าก้นเตา
R0	เถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก รวมของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์
R2	เถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก รวมของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์
R4	เถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก รวมของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์
R6	เถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก รวมของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์
R8	เถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก รวมของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์
R10	เถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก รวมของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์
C0%	ไม่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
C5%	ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
C10%	ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



## ตารางที่ 9 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนวัสดุทดสอบ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
C15%	ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
C20%	ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าก้นเตาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

### 1.5 อภิปรายผลการทดสอบ

เมื่อได้ผลการทดสอบจึงทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ที่แตกต่างกันระหว่างอัตราส่วนผสมของเถ้าก้นเตาผสมน้ำยารักษาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทาง

### 1.6 สรุปผลการทดสอบ

โดยพิจารณาจากอิทธิพลของอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์เพิ่มที่มีผลต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่ดีที่สุด รวมถึงแนวทางในการนำวัสดุที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าก้นเตาผสมน้ำยารักษาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไปใช้เป็นทางเลือกในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา เพื่อใช้เป็นวัสดุการทางเลือกสำหรับงานทาง

## 2. เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

### 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ

#### 2.1.1 ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ชุดทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 6 ประกอบด้วย

1. ขวดแก้วฟลาส (Volumetric Flask) ขนาดความจุ 500 มิลลิลิตร
2. เทอร์โมมิเตอร์ 0 - 100 องศาเซลเซียส อ่านได้ละเอียด 0.1 - 0.5 องศาเซลเซียส
3. หลอดใช้ดูดน้ำออก หรือเติมน้ำในขวดแก้วฟลาส
4. เตาบุนเส้น หรือเตาแผ่นร้อน (Hot Plate)
5. ตู้อบ (Drying Oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส
6. เครื่องชั่ง (Balance) ที่มีความละเอียด 0.01 กรัม
7. น้ำกลั่น



ภาพที่ 6 ชุดทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

#### 2.1.2 ชุดทดสอบหาขนาดของวัสดุโดยวิธีร้อนผ่านตะแกรง

ชุดทดสอบหาขนาดของวัสดุโดยวิธีร้อนผ่านตะแกรง ดังแสดงในภาพที่ 7 ประกอบด้วย

1. เครื่องเขย่าตะแกรง (Sieve Shaker)
2. ตะแกรงมาตรฐานพร้อมถาดรอง (Sieve and Pan)
3. ถาดใส่ตัวอย่าง
4. ค้อนยาง
5. เครื่องชั่ง ขนาด 2 กิโลกรัม อ่านละเอียด 0.1 กรัม
6. แปรงทำความสะอาดตะแกรง
7. ตู้อบ (Drying Oven) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส



ภาพที่ 7 ชุดทดสอบหาขนาดของวัสดุโดยวิธีร้อนผ่านตะแกรง

#### 2.1.3 ชุดทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของวัสดุ

- 1) ชุดจำกัดชั้นเหลว (Liquid Limit) ดังแสดงในภาพที่ 8 ประกอบด้วย
  1. เครื่องทดสอบหาขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit Device)
  2. เครื่องมือปาดร่องดิน (Grooving Tool)
  3. มีดปาดดิน ขนาดกว้างประมาณ 3/4 นิ้ว และยาวประมาณ 3 นิ้ว
  4. ชามกระเบื้องเคลือบ (Coat Dish)
- 2) ชุดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)
  1. แผ่นกระจกทดสอบ (Glass Plate)
  2. ชามกระเบื้องเคลือบ (Coat Dish)



ภาพที่ 8 ชุดทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลว

## 2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการ

### 2.2.1 ชุดทดสอบการบดอัดของแบบใช้โมลมาตรฐาน

ชุดทดสอบการบดอัดของแบบใช้โมลมาตรฐาน (4 นิ้ว) ดังแสดงในภาพที่ 9 ประกอบด้วย

1. โมลทดสอบการบดอัด (Compaction Mold) มีสองขนาดให้เลือกใช้คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว ความสูง 4.584 นิ้ว และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6 นิ้ว ความสูง 4.584 นิ้ว พร้อมด้วยปลอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเดียวกัน (Collar) และแผ่นฐานรอง (Base Plate) สูง 50 มิลลิเมตร (มีปริมาตร 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร)
2. ค้อนบดอัดแบบมาตรฐาน (Compaction Hammer)หนัก 5.5 ปอนด์ ระยะยก 12 นิ้ว ค้อนบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ ระยะยก 18 นิ้ว
3. แม่แรงสำหรับดันตัวอย่างดินออกจากแบบหล่อ
4. เหล็กปาดดินสันตรง (Straight Edge) ขนาด 30 เซนติเมตร
5. ตะแกรงร่อนดิน (Sieve) ขนาด 3/4 นิ้ว และ เบอร์ 4



ภาพที่ 9 ชุดทดสอบการบดอัดแบบใช้โมลมาตรฐาน (4 นิ้ว)

2.2.2 ชุดทดสอบการบดอัดแบบใช้โมลมาตรฐาน (1.48 นิ้ว)

ชุดทดสอบการบดอัดแบบใช้โมลมาตรฐาน (1.48 นิ้ว) ดังแสดงในภาพที่ 10

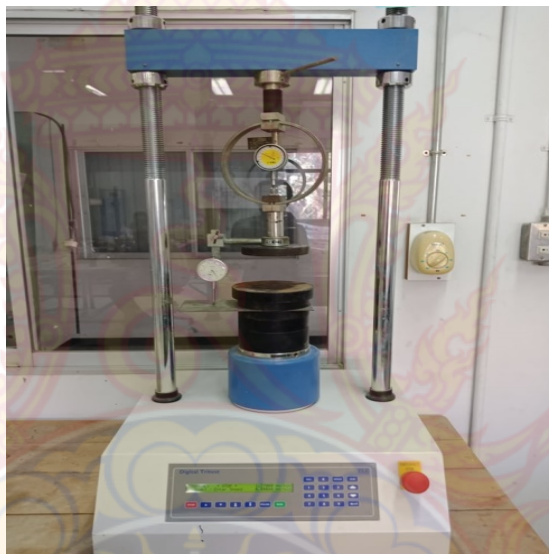


ภาพที่ 10 ชุดทดสอบการบดอัดแบบใช้โมลเล็ก (1.48 นิ้ว)

## 2.2.2 ชุดทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

ชุดทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 11 ประกอบด้วย

1. เครื่องทดสอบการอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง พร้อมด้วยมาตรวัดการยุบตัว (Dial Gauge) ที่อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร
2. เวอร์เนียร์ ใช้วัดขนาดแท่งตัวอย่างโดยวัดละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร
3. อุปกรณ์ตัดแต่งดิน (Trimmer)



ภาพที่ 11 ชุดทดสอบแรงอัดแบบปราศจากแรงด้านข้าง

## 2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. แก้วกันเตา นำมาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี เพาเวอร์จำกัด นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) เพื่อให้มีขนาดใกล้เคียงกับมวลรวม และอบแห้งที่อุณหภูมิ  $60 \pm 5$  องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 วัสดุเถ้าก้นเตา

2. น้ำยางพารา นำมาจากชาวสวนที่มีอาชีพขายน้ำยางพาราในอำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ นำมาหาค่าความถ่วงจำเพาะ เพื่อใช้เป็นส่วนผสมสำหรับเถ้าก้นเตาเพื่อช่วยในการยึดเกาะกันของอนุภาคเถ้าก้นเตา ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 น้ำยางพารา

3. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา อินทรีเพชร สำหรับงานโครงสร้างเพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานให้กับเหล็กกันตะ และน้ำยาฆ่าเชื้อ ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

### 3. การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐาน

การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเหล็กกันตะผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะดำเนินการภายใต้การทดสอบดังต่อไปนี้

#### 3.1 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของเหล็กกันตะ

##### 3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างเหล็กกันตะผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ประมาณ 50 กรัม

##### 3.1.2 ขั้นตอนการสอบเทียบ

1. ทำความสะอาดขวดพลาสติกที่จะทำการทดลอง แล้วเติมน้ำในขวดประมาณ 3/4 ของขวด ดังแสดงในภาพที่ 15





ภาพที่ 15 การทำความสะอาดขวดพลาสติก

2. นำขวดพลาสติกพร้อมน้ำไปต้มให้เดือดเพื่อไล่อากาศในน้ำ โดยวางขวดพลาสติกไว้ในภาชนะที่มีน้ำก่อน แล้วจึงไปวางบนเตาบันเส้น ประมาณ 10 นาที นำขวดพลาสติกลงจากเตาบันเส้นปล่อยน้ำในขวดให้เย็นลงจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส ตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำในขวด ดังแสดงในภาพที่ 16



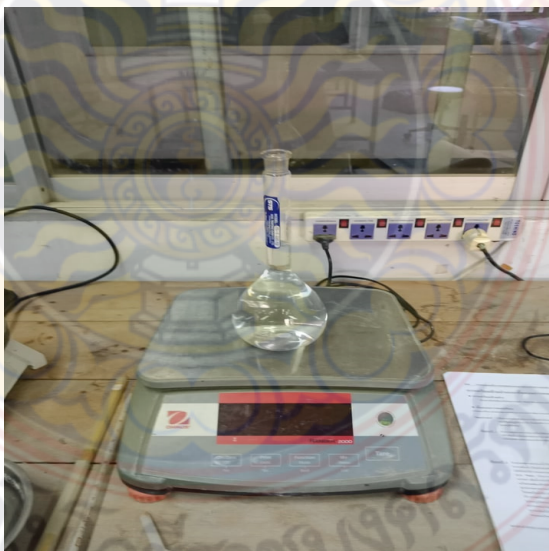
ภาพที่ 16 การนำขวดพลาสติกพร้อมน้ำไปต้ม

3. แต่งขอบน้ำให้อยู่ที่ขีดบอกปริมาตร 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร สังเกตขอบล่างของโค้งผิวน้ำ  
ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การแต่งขอบน้ำให้อยู่ที่ขีดบอกปริมาตร

4. นำขวดพลาสติกบรรจบน้ำขึ้นชั่งและวัดอุณหภูมิน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การหาน้ำหนักขวดพลาสติกบรรจบน้ำ

5. ทำการทดลองในขั้นตอนที่ 4 และ 5 อีก 3-4 ครั้ง ในช่วงอุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้อง

### 3.1.3 ขั้นตอนการหาค่าความถ่วงจำเพาะของแก้วกันเตา

1. นำแก้วกันเตาใส่ในขวดพลาสติกและใส่น้ำลงไปประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของปริมาตรขวด ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การนำดินใส่ในขวดแก้วพลาสติก

2. นำไปต้มเพื่อไล่ฟองอากาศอย่างน้อย 10 นาที และคอยสังเกตว่ามีฟองอากาศเกิดขึ้นหรือไม่ ทำจนกระทั่งฟองอากาศหมด ดังแสดงในภาพที่ 20



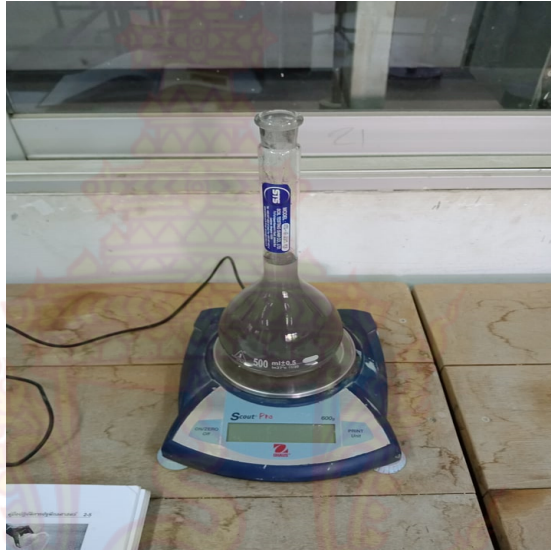
ภาพที่ 20 การนำไปต้มเพื่อไล่ฟองอากาศ

3. เติมน้ำในขวดพลาสติกให้ระดับท่อน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิลิตร พอดีแล้วตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง หากมีฟองอากาศทำการคลึงไปมา คอยสังเกตว่าฟองอากาศหมดหรือยังเมื่อไม่มีฟองอากาศแล้วจึงเติมน้ำไปให้ท่อน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิลิตร พอดีกับขีดปริมาตร ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การเติมน้ำให้ระดับท่อน้ำอยู่ที่ขีด 500 มิลลิลิตร

4. นำขวดพลาสติกที่มีตัวอย่างแก้วกันเตาไปซึ่ง จดการบันทึกค่าอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การชั่งขวดพลาสติกที่มีตัวอย่างแก้วกันเตา

5. หลังจากนั้นนำไปเทใส่ภาชนะ โดยต้องเทแก้วกันเตาในขวดพลาสติกออกให้หมด ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การเทน้ำและดินลงในภาชนะ

6. นำเก้าอี้เตาในภาชนะไปชั่ง แล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส จนกระทั่งดินแห้งหลังจากนั้นนำดินที่อบแห้งแล้วไปชั่งแล้วบันทึกค่า ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การนำเก้าอี้เตาในภาชนะไปชั่ง

### 3.2 วิธีการทดสอบหาขีดจำกัดความชื้นเหลว

ค่าขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติก นำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทางวิศวกรรม ใช้เป็นค่ากำหนดคุณสมบัติของการจำแนกดิน

#### 3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำส่วนผสมที่ร้อนเตรียมไว้แล้วมาทำการตากแห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำตัวอย่างมาทุบให้แยกตัวด้วยค้อนยาง แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 แล้วนำมาแบ่งการทดสอบขีดจำกัดเหลว ประมาณ 150 กรัม และการทดสอบขีดจำกัดพลาสติกประมาณ 50 กรัม ทำการทดสอบ ดังนี้

#### 3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบขีดจำกัดเหลว

1. นำตัวอย่างเก้าอี้เตาที่เตรียมไว้ในถ้วยเคลือบ หลังจากนั้นใส่น้ำประมาณ 15-20 มิลลิลิตร หรือปริมาณที่ไม่เหนียวจนเกินไปผสมให้เข้ากัน ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การเตรียมวัสดุทดสอบซีตจำกัดความชื้นเหลว

2. เตรียมอุปกรณ์ชุดทดสอบโดยให้ความสูงของก้นถ้วยทองเหลืองอยู่สูงกว่าพื้นรอง พร้อมทั้ง  $1 \pm 0.2$  เซนติเมตร โดยใช้ด้ามของเครื่องมือปาดร่องดินที่ก้นถ้วยทองเหลืองแล้วลองหมุนด้วยมือ และสังเกตการตกระทบของถ้วยทองเหลืองจากนั้นทำการปรับระยะตกระทบให้ได้ตามมาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การหมุนทดสอบระยะตกระทบของถ้วยทองเหลือง

3. ใช้มีดปาดตัวอย่างตักตัวอย่างเล็กน้อยที่เตรียมไว้ข้างต้นใส่ในถ้วยทองเหลืองแล้วปาดให้เรียบ โดยให้ความหนาของตัวอย่างตรงกลาง ประมาณ 1 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การใส่ตัวอย่างในถ้วยทองเหลือง

4. ทำการบากตัวอย่างดินในถ้วยทองเหลืองด้วยเครื่องมือปาดร่องตัวอย่าง ให้เป็นร่องในครั้งเดียวกันจนเห็นพื้นของถ้วยทองเหลืองในทันที โดยให้แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ข้าง เท่า ๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 28





ภาพที่ 28 การบดตัวอย่างในงานด้วยเครื่องมือปาดร่อง

5. ทำการหมุนให้เข้ากันเตาตกกระทบกับฐานรอง ด้วยความเร็วในการหมุนประมาณ 2 ครั้งต่อ 1 วินาที โดยนับจำนวนครั้งไว้ด้วย ทำการหมุนจนกระทั่งดินที่บดไว้ไหลเข้ามาชนกัน เป็นระยะทาง 1/2 นิ้ว (12.7 มิลลิเมตร) ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 การหมุนทดสอบหาขีดจำกัดเหลว

6. ใช้มีดปาดตัวอย่างตัดตัวอย่างเอ้ากันเตาโดยเฉพาะตรงที่ไหลมาชนกัน โดยการปาดขนานกันให้ระยะห่างพอดีกับระยะที่ตัวอย่างเอ้ากันเตาไหลมาชนกันตัดหัวท้ายในแนวตั้งฉาก ดำเนินการทดสอบอีก 3-4 ครั้ง โดยการเพิ่มน้ำตามข้อที่ 3 ถึง 6 ดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 การบากเอ้ากันเตาเพื่อเก็บตัวอย่าง

7. นำตัวอย่างเอ้ากันเตาที่ถูกตัดตัดใส่กระป๋อง ในแต่ละครั้งการทดสอบไปอบเพื่อหาค่าปริมาณความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 การนำตัวอย่างเถ้าก้นเตาเข้าสู่ตู้อบ

### 3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบซีตจำกัดพลาสติก

1. นำตัวอย่างเถ้าก้นเตาที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 20 กรัม ผสมกับน้ำให้เข้ากัน พยายามให้มากที่สุด ปั้นเป็นก้อนกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 การปั้นก้อนตัวอย่าง

2. นำตัวอย่างเอ้ากันเตาไปคลึงบนแผ่นกระจกในอัตรา 80–90 ครั้งต่อนาที จนกระทั่งเป็นเส้นกลมยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง  $1/8$  นิ้ว (3.2 มิลลิเมตร) แล้วเกิดรอยแตกเล็ก ๆ ทั่วผิวดิน นำตัวอย่างที่มีรอยแตกใส่ในกระป๋อง แล้วนำไปอบเพื่อหาปริมาณความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 33



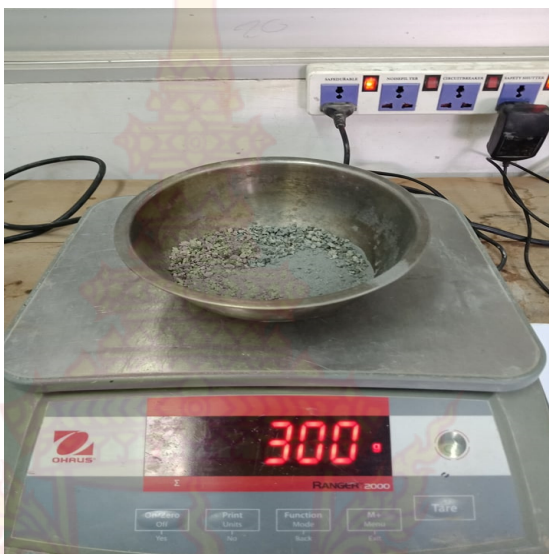
ภาพที่ 33 การคลึงตัวอย่างบนแผ่นกระจก

### 3.3 การทดสอบหาขนาดของเอ้ากันเตาโดยวิธีร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

การวิเคราะห์หาขนาดของเอ้ากันเตาก็คือ ความพยายามที่จะหาความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนของเอ้ากันเตาขนาดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในมวลเอ้ากันเตานั้น ๆ การเก็บตัวอย่างเอ้ากันเตามาทดสอบจะต้องเก็บคละกันเพื่อให้เป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้ว่าเป็นตัวแทนของมวลเอ้ากันเตาได้ ในความเป็นจริงแล้วไม่มีการทดสอบที่สามารถหาขนาดของเอ้ากันเตาแต่ละเม็ดได้ แต่ในการทดสอบเพียงแต่หาการกระจายขนาดของเอ้ากันเตาโดยการนำมาร้อนผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดแตกต่างกัน

#### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

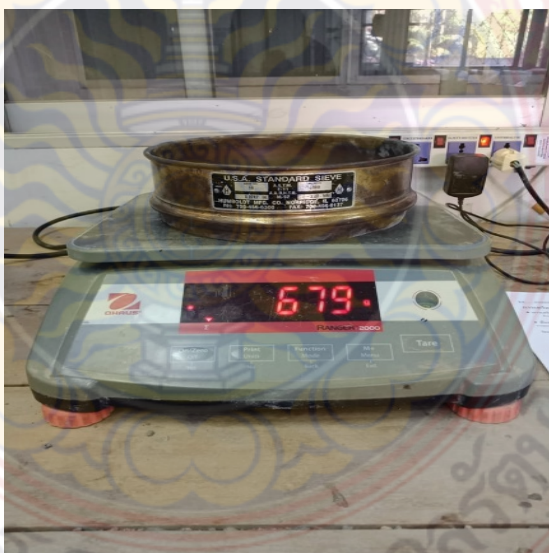
นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ผึ่งให้แห้งโดยอากาศ ถ้ายังจับตัวเป็นก้อนให้ใช้ค้อนยางทุบให้แตกเสียก่อน แล้วนำตัวอย่างมาคลุกเคล้าให้เข้ากันบนผืนผ้าใบหรือบนพื้นเรียบแล้วนำส่วนผสมมาชั่งน้ำหนักดังแสดงในภาพที่ 34 ต่อจากนั้นนำส่วนผสมร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4 เบอร์ 10 เบอร์ 40 เบอร์ 100 และเบอร์ 200 แล้วนำส่วนผสมที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดใส่แยกไว้ในภาชนะ หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดมาคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นชนิดของดินตัวอย่างสำหรับการทดสอบ



ภาพที่ 34 การนำส่วนผสมมาชั่งน้ำหนัก

### 3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบแบบไม่ล้างน้ำ

1. ทำความสะอาดตะแกรง แล้วทำการชั่งน้ำหนักของตะแกรงแต่ละขนาดรวมทั้งถาดรอง และบันทึกค่า ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การชั่งน้ำหนักตะแกรง

2. นำตะแกรงมาเรียงซ้อนกันโดยให้ตะแกรงที่มีขนาดช่องใหญ่สุดอยู่บน แล้วเรียงขนาดเล็กลงมาตามลำดับจนถึงตะแกรงขนาดเล็กสุดและภาครอบดั่งนี้ เบอร์ 4 เบอร์ 10 เบอร์ 40 เบอร์ 100 และเบอร์ 200 และภาครอบ ดั่งแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 การจัดตะแกรงมาตรฐาน

3. นำตัวอย่างแฉักันเตาที่เตรียมไว้เทใส่ลงบนตะแกรงบนสุด ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่องเขย่าใช้เวลาในการเขย่าอย่างน้อย 10 นาที เสร็จแล้วนำตะแกรงรวมตัวอย่างแฉักันเตาไปชั่งน้ำหนัก นำตัวอย่างดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงออกทิ้ง แล้วทำความสะอาดตะแกรงให้เรียบร้อย ดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 การนำตัวอย่างแก้วกันเตาที่เตรียมไว้เทใส่ลงบนตะแกรง

4. นำตัวอย่างแก้วกันเตาที่ค้ำตะแกรงแต่ละเบอร์ ไปจำแนกลงในกระสอบที่ได้จัดเตรียมไว้ เพื่อสะดวกต่อการนำไปใช้ในการทดสอบ

#### 4. การทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

4.1 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยใช้โมลมาตรฐานขนาด 4 นิ้ว

##### 4.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

1. นำตัวอย่างแก้วกันเตาไปทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำแก้วกันเตาที่แห้งแล้วมาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด เบอร์ 4 เบอร์ 40 เบอร์ 100 และ เบอร์ 200 แล้วนำแก้วที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดใส่แยกไว้ในภาชนะ หลังจากนั้นเตรียมตัวอย่างแก้ว โดยนำแก้วที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดมาผสมแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน

##### 4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูงของโมลเพื่อหาปริมาตรของตัวอย่างดินในโมล หลังจากนั้น ประกอบโมล และแผ่นฐานรองเข้าด้วยกัน แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (ไม่ต้องชั่งปลอก) ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของโมล

2. นำตัวอย่างเถ้ากั้นเตาที่เตรียมไว้ผสมกับน้ำโดยเติมปริมาณน้ำครั้งแรกร้อยละ 10 หลังจากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากัน ดังแสดงในภาพที่ 39



ภาพที่ 39 การผสมตัวอย่างกับน้ำ



3. ตักตัวอย่างเอ้ากันเตาใส่โมลที่ประกอบไว้แล้วพร้อมปลอก โดยเฉลี่ยให้ความสูงในแต่ละชั้นเท่า ๆ กัน โดยมีจำนวน 5 ชั้น บดอัดชั้นละ 25 ครั้ง และสำหรับชั้นสุดท้ายให้ตัวอย่างดินพื้นขอบโมลเพื่อควบคุมระยะยกของค้อนบดอัดและความสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าของตัวอย่างอย่างเอ้ากันเตา ดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

4. ถอดปลอกออกแล้วใช้เหล็กปาดเอ้ากันเตาที่เกินขอบโมลออก และแต่งผิวตัวอย่างให้เรียบ ใช้แปลงขนอ่อนปิดเศษตัวอย่างที่ค้างอยู่ออกให้หมดแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 การปาดเถ้ากันเตา

5. ดันแท่งตัวอย่างเถ้ากันเตาออกจากโมลแล้วผ่ากลางตามแนวตั้ง เก็บตัวอย่างเถ้ากันเตาตามประมาณ 100 กรัม เพื่อนำไปหาปริมาณความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 การดันตัวอย่างเถ้ากันเตาออกจากโมล

6. ใช้ค้อนทุบตัวอย่างเล็กน้อยที่เหลือให้แยกออกจากกันจนร่วน ดังแสดงในภาพที่ 43 แล้วเติมน้ำอีกครั้งละร้อยละ 10 คลุกเคล้าเล็กน้อยให้เข้ากัน ทำการทดสอบซ้ำตามข้อ 3-5 จนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างลดลง แล้วทดสอบซ้ำอีกครั้งหนึ่ง



ภาพที่ 43 การทุบตัวอย่างที่เหลือให้แยกออกจากกันจนร่วน

#### 4.2 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยใช้โมลเล็กขนาด 1.48 นิ้ว

##### 4.2.1 การเตรียมพลังงานที่ใช้ในการบดอัด

เนื่องจากพลังงานในการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าพลังงานเท่ากับ 2,700 กิโลนิวตันเมตร ต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักของค้อน กระทุ้ง ความสูงของระยะยกของค้อน จำนวนชั้นดิน จำนวนครั้งที่กระทุ้งและปริมาตรของโมล ดังสมการที่ (3) ดังนั้นการบดอัดที่ใช้โมลขนาดเล็กกลางจำเป็นจะต้องคำนวณหาจำนวนครั้งในการกระทุ้งใหม่โดยอ้างอิงสมการที่ (4)

$$\text{พลังงานที่ใช้บดอัด} = \frac{\text{น้ำหนักค้อน} \times \text{ระยะยก} \times \text{จำนวนครั้ง} \times \text{จำนวนชั้น}}{\text{ปริมาตรของโมล}} \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ น้ำหนักค้อน} = 0.0140283 \text{ กิโลนิวตัน}$$

$$\text{ระยะยกของค้อน} = 0.347 \text{ เมตร}$$

$$\text{จำนวนชั้น} = 5 \text{ ชั้น}$$

ปริมาตรของโมล =  $8.38325 \times 10^{-7}$  ลูกบาศก์เมตร  
ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{จำนวนครั้ง} &= \frac{2700 \times 8.38325 \times 10^{-7}}{0.0140283 \times 0.347 \times 5} \\ &= 9.5 \text{ ครั้ง ใช้ } 10 \text{ ครั้ง} \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อเลือกใช้ค่าจำนวนครั้งในการกระทำทั้ง 10 ครั้ง จะได้ค่าพลังงานการบดอัด 2903 กิโลนิวตัน-เมตร/ลูกบาศก์เมตร ที่มีค่ามากกว่ามาตรฐาน

#### 4.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

1. นำตัวอย่างเข้ากันเตาไปทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำเข้ากันเตามาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดเบอร์ 4, เบอร์ 10, เบอร์ 40, เบอร์ 100 และเบอร์ 200 นำเข้าที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดใส่แยกไว้ในภาชนะ นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งตามอัตราส่วน หลังจากนั้นเตรียมตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดมาคละรวมกัน
3. นำเข้ากันเตามาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดเบอร์ 4 แล้วนำเข้ากันเตามาร้อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 4, เบอร์ 10, เบอร์ 40, เบอร์ 100 และเบอร์ 200 นำเข้าที่ผ่านตะแกรงแล้วใส่แยกไว้ในภาชนะ นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งตามอัตราส่วน หลังจากนั้นเตรียมตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดมาคละรวมกัน
4. นำเข้ากันเตาแล้วมาร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 3/8 แล้วนำเข้ากันเตามาร้อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 4, เบอร์ 10, เบอร์ 40, เบอร์ 100 และเบอร์ 200 นำเข้าที่ผ่านตะแกรงแล้วใส่แยกไว้ในภาชนะ นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งตามอัตราส่วน หลังจากนั้นเตรียมตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดมาคละรวมกัน ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ขนาดคละของตัวอย่างเถ้าที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดด้วยโมลเล็ก

ค้ำ ตะแกรง	ผ่าน ตะแกรง	ร้อยละผ่านตะแกรง (กรัม)				
		B100%	B95%	B90%	B85%	B80%
เบอร์ 10	เบอร์ 4	42.76	40.62	38.48	36.34	34.20
เบอร์ 40	เบอร์ 10	47.39	45.02	42.65	40.28	37.91
เบอร์ 100	เบอร์ 40	21.73	20.65	19.56	18.47	17.39
เบอร์ 200	เบอร์ 100	21.38	20.31	19.24	18.17	17.10
ถาดรอง	เบอร์ 200	16.75	15.91	15.07	14.23	13.40
		C0%	C5%	C10%	C15%	C20%
ปริมาณปูนซีเมนต์ (กรัม)		0	7.5	15	22.5	30
รวม (กรัม)		150	150	150	150	150

#### 4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1. วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูงของโมล เพื่อหาปริมาตรของตัวอย่างเถ้าในโมล หลังจากนั้นประกอบโมลและแผ่นฐานรอง พร้อมชั่งน้ำหนัก (ไม่ต้องชั่งปลอก) ดังแสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 44 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของโมล

2. นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมให้เข้ากัน 5 นาที ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 การผสมวัสดุให้เข้ากัน

3. นำตัวอย่างเล็กน้อยที่ผสมเข้ากันแล้วเตรียมไว้ผสมกับน้ำ โดยใช้ปริมาณน้ำครั้งแรกร้อยละ 10 หลังจากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากัน ดังแสดงในภาพที่ 46



ภาพที่ 46 การผสมตัวอย่างกับน้ำให้เข้ากัน

4. วางโมลที่ประกอบไว้แล้วพร้อมปลอกบนพื้นคอนกรีตเรียบ ตักตัวอย่างแก้วกันเตาโดยให้ความสูงในแต่ละชั้นเท่า ๆ กัน โดยมีจำนวน 5 ชั้น บดอัดชั้นละ 10 ครั้ง โดยวางโมล บนพื้นคอนกรีตเรียบ และสำหรับชั้นสุดท้ายให้ใส่ตัวอย่างดินพื้นขอบโมล ขึ้นไปประมาณ 1 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 47



ภาพที่ 47 การทดสอบการบดอัดโดยใช้โมลเล็ก

5. ถอดปลอกออกแล้วใช้เหล็กปาด ปาดแก้วกันเตาที่เกินขอบโมลออกและแต่งผิวตัวอย่างให้เรียบ ใช้แปรงขนอ่อนปัดเศษตัวอย่างที่ค้างอยู่ออกให้หมดแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 48 การปาดผิวหน้า

6. ดันแท่งตัวอย่างเข้ากันเตาออกจากโม่แล้วผ่ากลางตามแนวตั้ง และเก็บตัวอย่างดินตามแนวผ่าประมาณ 30 กรัม เพื่อหาปริมาณความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 49



ภาพที่ 49 การเก็บตัวอย่างเพื่อใช้หาค่าปริมาณความชื้น



7. ใช้ค้อนทุบตัวอย่างเอ้ากันเตาที่เหลือให้แยกออกจนร่วน แล้วเติมน้ำอีกครั้งละร้อยละ 10 คลุกเคล้าเอ้ากันเตาให้เข้ากัน ทำการทดสอบซ้ำตามข้อ 3 ถึง 6 จนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างเอ้ากันเตาลดลง แล้วทดสอบซ้ำอีกครั้ง

8. นำผลการทดสอบไปเขียนเส้นกราฟการบดอัด เพื่อหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างแต่ละชนิดที่ได้กล่าวมาข้างต้น

#### 4.3 การทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

##### 4.3.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1. นำวัสดุส่วนผสมไปทำให้แห้ง โดยการอบดินที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำเอ้ากันเตาผสมกันตามขนาดคละ (B100%) ผสมปูนซีเมนต์ (C0%, C5%, C10% , C15% และ C20%) เตรียมตัวอย่างตามวิธีการบดอัดเพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม สำหรับปริมาณการจราจรน้อย (Light Traffic) และปริมาณการจราจรมาก (Heavy Traffic)

3. นำส่วนผสมของเอ้ากันเตาและเอ้ากันเตาผสมน้ำยางพารา (B100%R0%, B100%R6% และ B100%R8%) จากสามลำดับที่ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ผสมกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ได้จากข้อ 2 มาเตรียมตัวอย่างโดยพิจารณาอิทธิพลของขนาดเอ้ากันเตา 3 กรณี ได้แก่ เอ้ากันเตาผสมตามขนาดคละ เอ้ากันเตาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และเอ้ากันเตาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 3/8

4. นำท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว สูง 3 นิ้ว เป็นแบบสำหรับเตรียมตัวอย่าง ผสมเอ้ากันเตาและน้ำยางพารารวมกับปูนซีเมนต์ตามอัตราส่วนผสมตามข้อ 3 บดอัดตามวิธีการบดอัด ดังที่กล่าวไว้แล้ว จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 36 ตัวอย่าง บ่มในอากาศ 7 วัน และจำนวนตัวอย่างที่นำไปแช่น้ำ 4 ตัวอย่าง บ่มในอากาศ 7 วัน และบ่มในน้ำ 4 วัน ดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 ตัวอย่างทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

#### 4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำตัวอย่างวางบนฐานแท่นกด แล้วปรับแป้นกดของเครื่องให้สัมผัสกับผิวบน และล่างของตัวอย่างพอดี โดยการหมุนมือจับที่เครื่องทดสอบ แล้วสังเกตให้เข็มมาตรวัดในวงแหวนวัดแรงกระดิก ดังภาพที่ 51



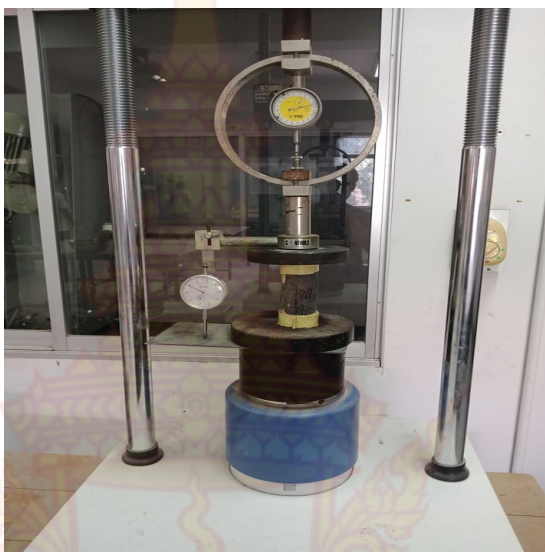
ภาพที่ 51 การวางตัวอย่างบนแท่นกด

2. ปรับมาตรวัดการยุบตัว สำหรับวัดการหดตัวและวัดแรง (ในวงแหวนวัดแรง) ให้มีค่าเริ่มต้นอยู่ที่ศูนย์ ดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 การปรับมาตรวัดให้เท่ากับศูนย์

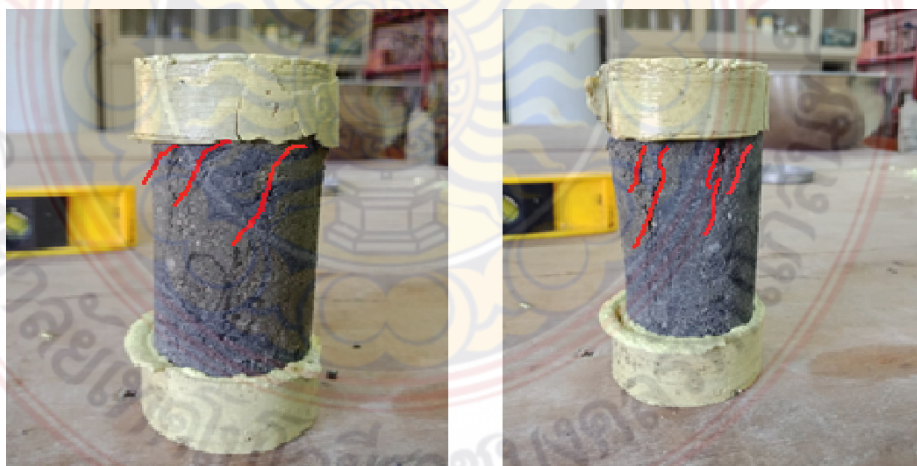
3. เริ่มการกดตัวอย่างโดยให้อัตราการกดคงที่ (การเคลื่อนที่แนวตั้งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 นิ้วต่อนาที) ตามความเหมาะสมในช่วงการอ่านต่าง ๆ กัน บันทึกข้อมูลจากวงแหวนวัดแรงทุก ๆ การหดตัว 0.005 นิ้ว ของตัวอย่าง (อาจใช้ 0.02 นิ้วในกรณีตัวอย่างเปราะ) ดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 การหมุนทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

4. เมื่อแรงในวงแหวนวัดแรงเพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้ว จึงเริ่มลดลง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดิน ให้ยังอ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉือน (Failure Plane) บนตัวอย่างได้ชัดเจน ในบางกรณีที่ไม่มีรอยเฉือนปรากฏชัด เช่น ตัวอย่างเถ้าก้นเตาเปลี่ยนสภาพ ให้ทดสอบจนการหดตัวถึงประมาณร้อยละ 20 ของความสูงตัวอย่าง

5. วาดรูปลักษณะการเกิดรอยเฉือน และนำตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบเสร็จแล้วนำไปชั่ง และเข้าเตาอบเพื่อหาปริมาณความชื้น ดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 ตัวอย่างลักษณะการเกิดรอยเฉือน หลังการทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

#### 4.4 การทดสอบหาค่า ซี.พี.อาร์.

การทดสอบหาค่า ซี.พี.อาร์. จะพิจารณา 3 เงื่อนไข ได้แก่ ทดสอบทันทีหลังเตรียมตัวอย่างเสร็จ แบบไม่แช่น้ำ ทดสอบหลังจากบ่มตัวอย่างทดสอบ 7 วันแบบไม่แช่น้ำ และทดสอบหลังจากบ่มอากาศ 7 วัน แล้วนำไปแช่น้ำ 4 วัน

##### 4.4.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ แบบไม่แช่น้ำ

1. นำวัสดุส่วนผสมไปทำให้แห้ง โดยการอบดินที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

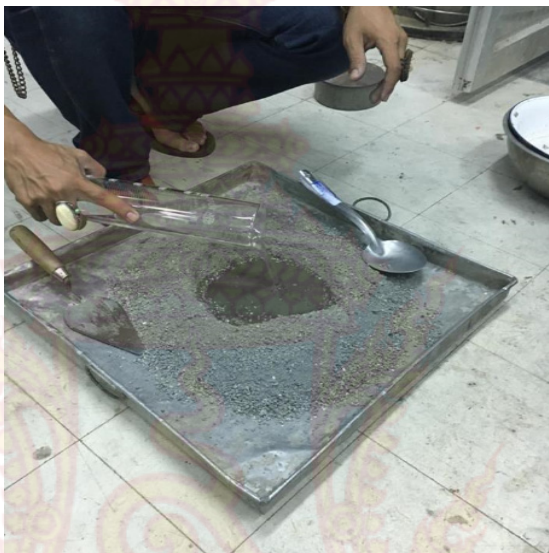
2. นำเอ้ากันเตาผสมกันตามขนาดคละน้ำยารพารา 8 % (B100%R8%) ผสมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และร้อยละ 7 (C5% และ C7%) ตามปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับปริมาณการจราจรน้อย และนำเอ้ากันเตาขนาดคละน้ำยารพารา 6 % (B100%R6%) ผสมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 และร้อยละ 9 (C7% และ C9%) ตามปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับปริมาณการจราจรมาก

3. วัดขนาด และชั่งน้ำหนักโมล ซี.พี.อาร์. ดังแสดงในภาพที่ 55 แล้วยึด โมลกับแผ่นฐานรองให้แน่นพอสมควร นำแผ่นเหล็กกรอง (Spacer Disc) มาใส่ลงในโมล ซี.พี.อาร์. หมุนเอาหูหิ้ว (Handle) ออก นำเอากระดาษกรองมารองบนแผ่นรอง เพื่อป้องกันตัวอย่างทดสอบติดกับแผ่นรอง พร้อมประกอบปลอก (Collar) ให้เรียบร้อย



ภาพที่ 55 การชั่งน้ำหนักโมล ซี.พี.อาร์.

4. นำตัวอย่างวัสดุที่เตรียมไว้แล้วมาผสมกับน้ำโดยใช้ปริมาณความชื้นเหมาะสม ซึ่งได้จากการทดสอบการบดอัด หลังจากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากัน ดังภาพที่ 56



ภาพที่ 56 การผสมวัสดุที่เตรียมไว้กับน้ำ

5. ดำเนินการตามขั้นตอนการบดอัดดินด้วยเครื่องบดอัดแบบอัตโนมัติ ดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 การบดอัดวัสดุเตรียมตัวอย่างทดสอบหาค่า ซี.พี.อาร์.

6. ถอดปลอกออก ปาดตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอขอบโมล ซี.พี.อาร์. ดังภาพที่ 58 แล้วยกออกจากแผ่นฐานรอง นำไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักของตัวอย่างดินในโมล ซี.พี.อาร์. แล้วพลิกกลับเอาด้านที่มีตัวอย่างดินเสมอขอบโมลมาวางลงบนแผ่นฐานรอง ซึ่งรองด้วยกระดาษกรองไว้ก่อนแล้ว ยึดโมลกับแผ่นฐานรองให้แน่น



ภาพที่ 58 การปาดตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอขอบโมล ซี.พี.อาร์.

#### 4.4.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ แบบแช่น้ำ

1. ดำเนินการเหมือนกับการเตรียมตัวอย่างทดสอบ ข้อ 1 ถึง 5 แบบไม่แช่น้ำ และตั้งทิ้งไว้เพื่อบ่มอากาศเป็นเวลา 7 วัน
2. วางแผ่นกระดาษกรองลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบในโมล ซี.พี.อาร์. แล้ววางแผ่นการวัดการบวมตัว (Swell Plate) ตามด้วยแผ่นน้ำหนัก (Surcharge Weight) ลงตามลำดับโดยแผ่นน้ำหนักต้องมีน้ำหนักใกล้เคียงหรือเท่ากับวัสดุที่กดลงบนชั้นพื้นดินจริง แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 10 ปอนด์
3. แฉ่ชุดทดสอบลงในถังน้ำ ให้น้ำสามารถไหลเข้าตัวอย่างทดสอบได้ทั้งด้านข้างและด้านบนหลังจากนั้นปรับให้ระดับผิวน้ำอยู่เสมอประมาณขอบของโมล ซี.พี.อาร์. นำสามขาพร้อมมาตรวัดการยุบตัววางบนขอบโมล แล้วจึงปรับแกนของแผ่นวัดการบวมตัวให้สัมผัสกับขาของมาตรวัดการยุบตัว และปรับเข็มให้ตรงกับตำแหน่งศูนย์ ดังภาพที่ 59



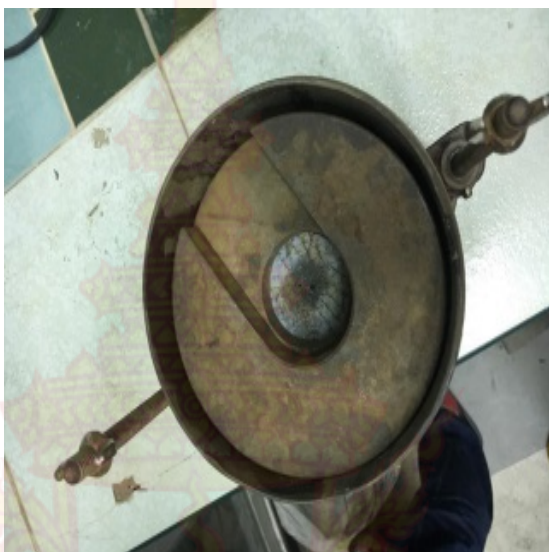
ภาพที่ 59 การตั้งขาของมาตรวัดการยุบตัวของตัวอย่าง

4. อ่านค่าการบวมตัวอย่างดินทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 96 ชั่วโมง หรือเมื่อตัวอย่างดินหยุดบวมตัว แล้วจึงนำขึ้นมาจากน้ำ และนำอุปกรณ์ที่ประกอบสำหรับการหาค่าการบวมตัวอย่างออกให้หมด ปลดปล่อยทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้ น้ำระบายออกไปจากตัวอย่างดิน ถ้ามีน้ำซึ่งอยู่บางส่วนให้ใช้กระดาษซับน้ำช่วยก็ได้ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

#### 4.4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำแผ่นน้ำหนัก (Surcharge Weight) วางลงบนชั้นพื้นดินจริง แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 10 ปอนด์ มากดทับลงบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 60





ภาพที่ 60 การวางแผ่นน้ำหนักรัดทึบลงบนผิวหน้าตัวอย่าง

2. นำวางบนฐานแท่นกด แล้วปรับแป้นกดให้สัมผัสกับผิวบนและล่างของตัวอย่างพอดี เลื่อนแท่นกดขึ้นแล้วสังเกตให้เข็มมาตรวัดในวงแหวนวัดแรงกระดิก

3. เริ่มกดแท่งกดลงบนตัวอย่างทดสอบด้วยอัตราการกด 0.05 นิ้วต่อนาที ต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอให้อ่านค่าน้ำหนักกดจากเข็มของวงแหวนวัดแรง ที่ระยะจม ดังนี้ 0.025 นิ้ว, 0.050 นิ้ว, 0.075 นิ้ว, 0.100 นิ้ว, 0.125 นิ้ว, 0.150 นิ้ว, 0.175 นิ้ว, 0.200 นิ้ว, 0.250 นิ้ว, 0.300 นิ้ว, 0.350 นิ้ว, 0.400 นิ้ว, 0.450 นิ้ว, 0.500 นิ้ว ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 61



ภาพที่ 61 การปรับเข็มของวงแหวนวัดแรง

4.ทำการถอนแท่งกดกลับดังเดิม แล้วจึงนำโมล ซี.พี.อาร์. ออกจากเครื่องทดสอบ นำตัวอย่างทดสอบส่วนหนึ่งไปหาค่าปริมาณความชื้น โดยเก็บบริเวณตรงกลางของตัวอย่างทดสอบ

#### 4.5 การทดสอบการลื่นไถล

##### 4.5.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1. นำเถ้ากั้นผสมเถ้ากั้นเตาขนาดคละประมาณ 200 กรัม แบ่งเป็น 2 ตัวอย่างคือ เถ้ากั้นเตาผสมกันตามขนาดคละน้ำยางพารา 8 % (B100%R8%) ผสมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และร้อยละ 7 นำเถ้ากั้นเตาขนาดคละน้ำยาง 6 % (B100%R6%) ผสมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 และร้อยละ 9
2. เตรียมโมล ตัวอย่างการทดสอบการลื่นไถล ทำการทาน้ำมันเครื่องบางๆ ดังภาพที่ 62



ภาพที่ 62 เตรียมโมลทดสอบการสิ้นไกล

- นำตัวอย่างแฉ่ำก้นเตาที่ผสมใส่ไปโมลตัวอย่างแล้วทำการอัดให้แน่น ดังภาพที่ 63



ภาพที่ 63 อัดแฉ่ำก้นเตา ในโมลทดสอบสิ้นไกล

4. ทำการเทเรซิน ลงไปในแบบที่ต้องการหล่อ หลังจากหล่อเสร็จควรรอจนกว่าเรซินจะแห้งถึงทำการถอดแบบได้ เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ควรระวังตัวอย่างแตกหรือหักลักษณะตัวอย่าง ดังภาพที่ 64



ภาพที่ 64 ลักษณะก้อนตัวอย่าง

5. นำเครื่อง British Portable Tester (BPT) วางบนลงฐานแล้วปรับหมุนสกรูที่ขาตั้งทั้งสามของตัวเครื่อง ปรับจนระดับน้ำที่โคนขาตั้งด้านหนึ่งอยู่ในกรอบกึ่งกลางพอดี แสดงว่าแกนเครื่องอยู่ในแนวตั้งแล้ว ดังภาพที่ 65 ปรับระดับน้ำเครื่องทดสอบ British Portable Tester (BPT)



ภาพที่ 65 ปรับระดับน้ำเครื่องทดสอบ Portable Skid Resistance Tester

6. นำตัวอย่างที่เปียกใส่ลงตรงเครื่องทดสอบจากนั้น กดไกที่ยึดแขนแกว่งไว้ให้แขนแกว่งตกลงมา แล้วแผ่นยางจะสัมผัสกับผิวของก้อนตัวอย่างที่จะหาค่า จดบันทึกค่าที่เข็มดัชนี ดังภาพที่ 66



ภาพที่ 66 การอ่านค่าจากเครื่องทดสอบการลื่นไถล

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและผลการวิเคราะห์

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของวัสดุ ซึ่งประกอบด้วยผลการวิเคราะห์การกระจายตัว ค่าขีดจำกัดความชันเหลว ค่าความถ่วงจำเพาะ พารามิเตอร์การบดอัด และค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

#### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

##### 1.1 ผลการทดสอบหาขีดจำกัดความชันเหลว

ผลการทดสอบหาขีดจำกัดความชันเหลวของเถ้าก้นเตา เถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพารา และเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์ พบว่าไม่มีความเหนียว (Non-Plasticity) เนื่องจากเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติเหมือนทรายซึ่งไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาค เมื่อนำมาผสมกับน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์ซึ่งวัสดุผสมอยู่ในสภาพเปียกชื้น ทำให้การพัฒนาแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเถ้าก้นเตาไม่เกิดขึ้น

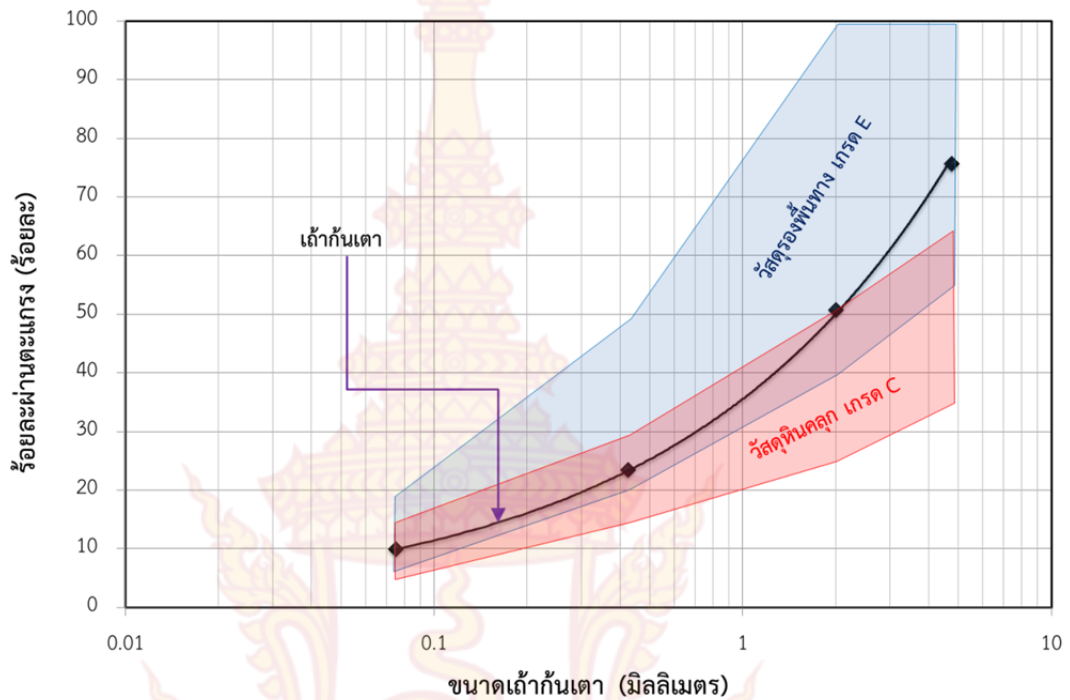
##### 1.2 ผลการทดสอบหาขนาดคละโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน

ผลการทดสอบหาขนาดคละของเถ้าก้นเตาโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน สามารถแสดงร้อยละผ่านตะแกรงแต่ละขนาด ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบขนาดคละของเถ้าก้นเตากับวัสดุชั้นรองพื้นทางเกรด E และหินคลุก

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละผ่านตะแกรง		
	เถ้าก้นเตา	วัสดุเกรด E	หินคลุกเกรด C
เบอร์ 4 (4.75)	75.72	55-100	35-65
เบอร์ 10 (2.00)	50.69	40-100	25-50
เบอร์ 40 (0.425)	23.45	20-50	15-30
เบอร์ 200 (0.075)	9.89	6-20	5-15

จากตารางที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบขนาดคละของเถ้าก้นเตากับวัสดุชั้นรองพื้นทาง พบว่าเถ้าก้นเตาจัดอยู่ในมาตรฐานชั้นรองพื้นทางเกรด E แต่ไม่อยู่ในมาตรฐานขนาดคละของหินคลุก ซึ่งสามารถแสดงเส้นกราฟการกระจายตัว (Grain Size Distribution Curve) ของเถ้าก้นเตาเปรียบเทียบกับช่วงขนาดคละของชั้นรองพื้นทางและหินคลุก ดังแสดงในภาพที่ 67



ภาพที่ 67 กราฟการกระจายตัวของขนาดเถ้าเปรียบเทียบกับวัสดุรองพื้นทางและหินคลุก

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์ขนาดผลของเถ้าสามารถแสดงข้อมูลสำหรับการจำแนกชนิดของเถ้าสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ข้อมูลสำหรับการจำแนกชนิดของเถ้า

ข้อมูลจากการวิเคราะห์ขนาดผลของเถ้า	ปริมาณ
ร้อยละการผ่านตะแกรงเบอร์ 4	75.72
ร้อยละการผ่านตะแกรงเบอร์ 200	9.89
ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ ( $C_u$ )	39.78
ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง ( $C_c$ )	1.61

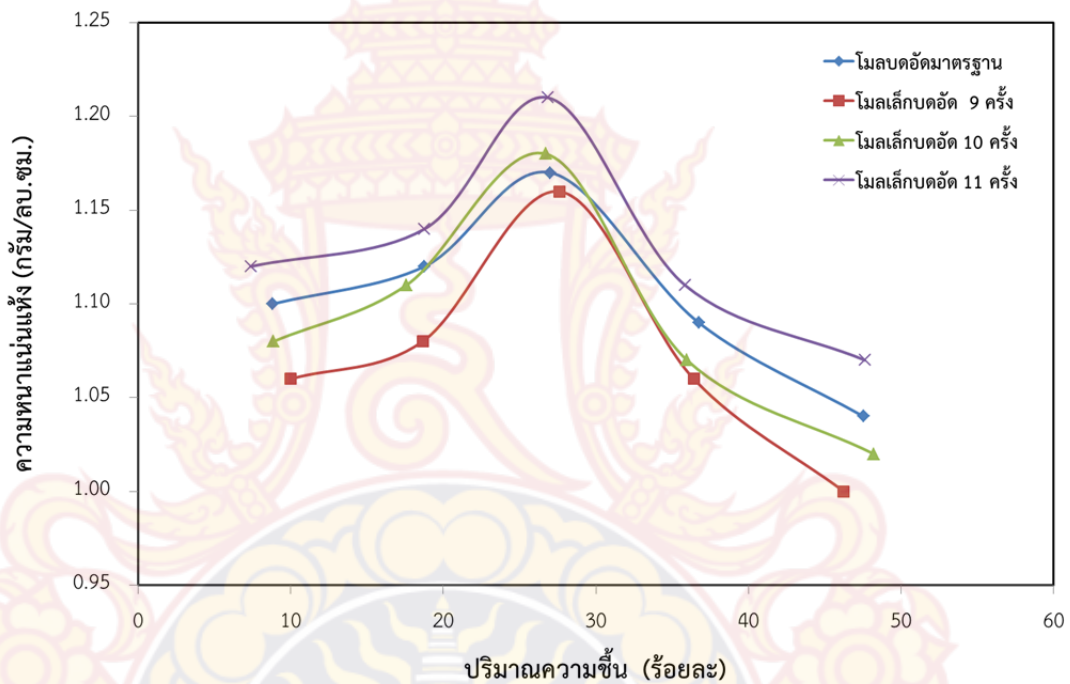
จากข้อมูลในตารางที่ 12 เมื่อนำมาใช้ในการจำแนกชนิดของเถ้าด้วยระบบการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) พบว่าเถ้าจำแนกได้เป็นทรายที่มีขนาดผลกันดีผสมกับตะกอน (SW-SM)

### 1.3 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ

ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ พบว่าเถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.66 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ ธนากร พุ่มแก้ว และคณะ (2560)

## 2. ผลการเปรียบเทียบอภิทธิพลของขนาดโมลต่อเส้นกราฟการบดอัด

ผลการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยใช้โมลมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความสูง 4.584 นิ้ว น้ำหนักค้อน 10 ปอนด์ จำนวนครั้งในการบดอัด 25 ครั้งต่อชั้น เปรียบเทียบกับการบดอัดโดยใช้โมลเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.480 นิ้ว ความสูง 2.972 นิ้ว น้ำหนักค้อน 3.14 ปอนด์ ใช้จำนวนครั้งในการบดอัดต่อชั้นเท่ากับ 9, 10 และ 11 ครั้ง สามารถแสดงเส้นกราฟการบดอัด ดังภาพที่ 68



ภาพที่ 68 ผลการทดสอบบดอัดเอ้ากันเตาของโมลขนาดมาตรฐานและโมลขนาดเล็ก

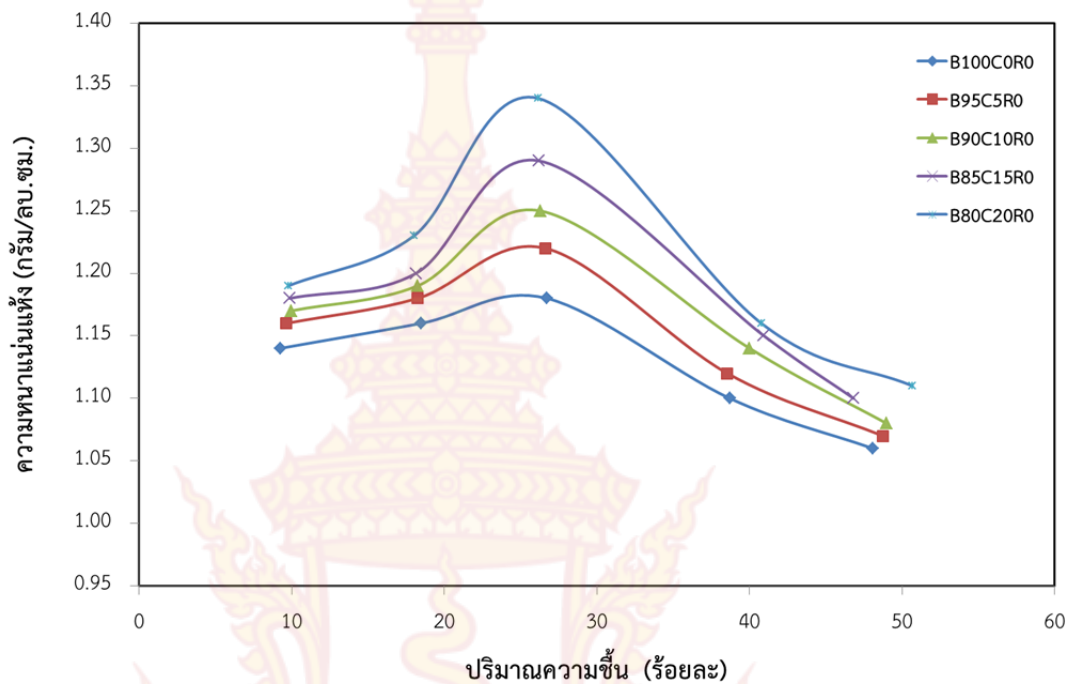
จากภาพที่ 67 พบว่าการบดอัดด้วยโมลเล็กที่ใช้จำนวนการบดอัด 10 ครั้งต่อชั้น ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ( $\rho_{d \max}$ ) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ใกล้เคียงกับการบดอัดด้วยโมลมาตรฐานมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ธนากร พุ่มแก้วและคณะ (2561) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้โมลขนาดเล็กในการทดสอบการบดอัดแทนการใช้โมลมาตรฐาน ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณวัสดุและระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

## 3. ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

### 3.1 เอ้ากันเตาผสมปูนซีเมนต์

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเอ้ากันเตาผสมปูนซีเมนต์ในสัดส่วนโดยน้ำหนัก ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 ตามลำดับ สามารถแสดงเส้นกราฟการบดอัด ดังภาพที่ 69 ซึ่งค่าพารามิเตอร์การบดอัดของแต่ละอัตราส่วนผสมแสดงดังในตารางที่ 13





ภาพที่ 69 เส้นกราฟการบดอัดของเอ้ากันเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

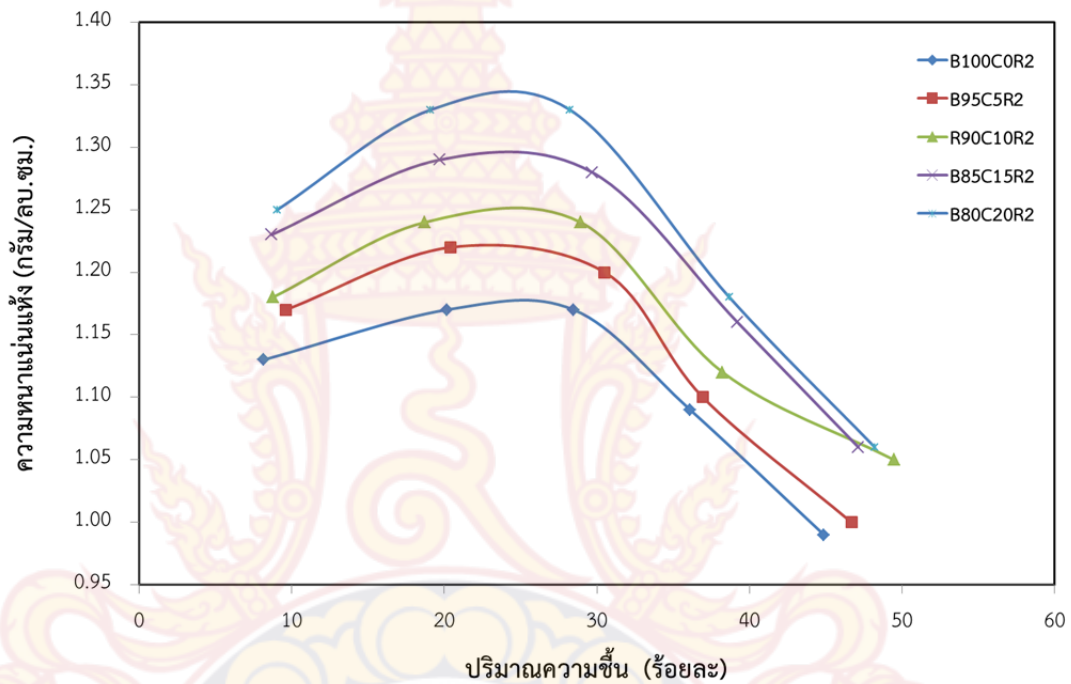
ตารางที่ 13 พารามิเตอร์การบดอัดของเอ้ากันเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

อัตราส่วนผสม	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)
B 100% : C 0% : R 0%	1.18	26.73
B 95% : C 5% : R 0%	1.22	26.64
B 90% : C 10% : R 0%	1.25	26.29
B 85% : C 15% : R 0%	1.29	26.20
B 80% : C 20% : R 0%	1.34	26.16

จากข้อมูลพารามิเตอร์การบดอัด ในตารางที่ 13 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 เป็นผลเนื่องจากน้ำปูนซีเมนต์ไปเคลือบผิวของอนุภาคเอ้ากันเตาทำให้แรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น สำหรับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น

### 3.2 แก้วกันเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราร้อยละ 2

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของแก้วกันเตา ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 ตามลำดับ สามารถแสดงเส้นกราฟการบดอัด ดังภาพที่ 70 ซึ่งค่าพารามิเตอร์การบดอัดของแต่ละอัตราส่วนผสมแสดงในตารางที่ 14



ภาพที่ 70 เส้นกราฟการบดอัดของแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 14 พารามิเตอร์การบดอัดของของแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

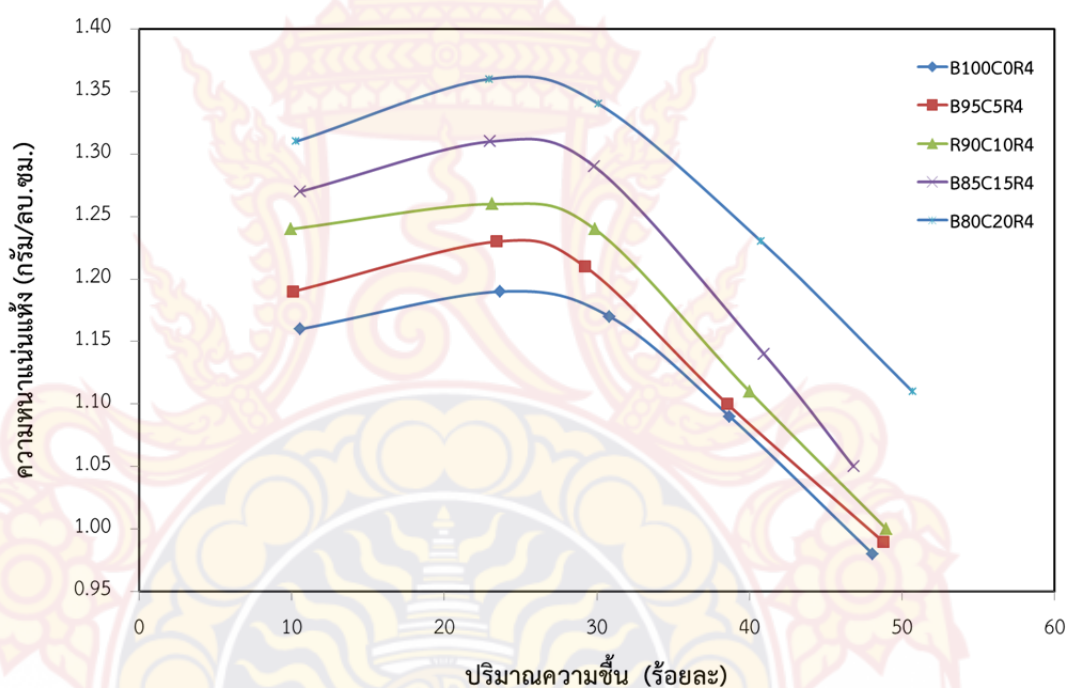
อัตราส่วนผสม	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)
B 100% : C 0% : R 2%	1.18	24.92
B 95% : C 5% : R 2%	1.23	24.77
B 90% : C 10% : R 2%	1.26	24.44
B 85% : C 15% : R 2%	1.30	24.28
B 80% : C 20% : R 2%	1.35	24.06

จากข้อมูลพารามิเตอร์การบดอัด ในตารางที่ 14 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 เป็นผลเนื่องจากน้ำปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราไปเคลือบที่ผิวของอนุภาคแก้วกันเตาทำให้แรงยึดเกาะ

ระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น สำหรับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น

### 3.3 แก้วกันเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราร้อยละ 4

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 ตามลำดับ สามารถแสดงเส้นกราฟการบดอัด ดังภาพที่ 71 ซึ่งค่าพารามิเตอร์การบดอัดของแต่ละอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 15



ภาพที่ 71 เส้นกราฟการบดอัดของแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

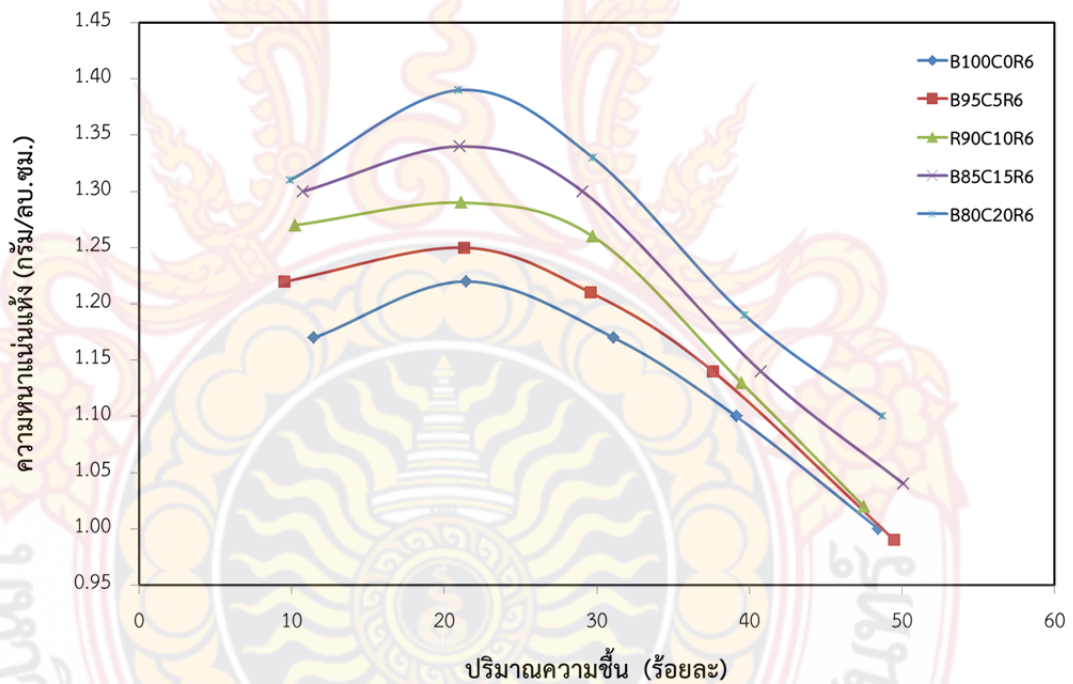
ตารางที่ 15 พารามิเตอร์การบดอัดของของแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

อัตราส่วนผสม	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)
B 100% : C 0% : R 4%	1.19	23.68
B 95% : C 5% : R 4%	1.23	23.43
B 90% : C 10% : R 4%	1.26	23.16
B 85% : C 15% : R 4%	1.31	23.02
B 80% : C 20% : R 4%	1.35	22.94

จากข้อมูลพารามิเตอร์การบดอัด ในตารางที่ 15 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 เป็นผลเนื่องจากน้ำปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราไปเคลือบที่ผิวของอนุภาคเถ้ากันเตาทำให้แรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น สำหรับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น

### 3.4 เถ้ากันเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราร้อยละ 6

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเถ้ากันเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 ตามลำดับ น้ำยางพาราร้อยละ 6 สามารถแสดงเส้นกราฟการบดอัด ดังภาพที่ 72 ซึ่งค่าพารามิเตอร์การบดอัดของแต่ละอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 16



ภาพที่ 72 เส้นกราฟการบดอัดของเถ้ากันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 16 พารามิเตอร์การบดอัดของของเถ้ากันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

อัตราส่วนผสม	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)
B 100% : C 0% : R 6%	1.22	21.43
B 95% : C 5% : R 6%	1.25	21.31

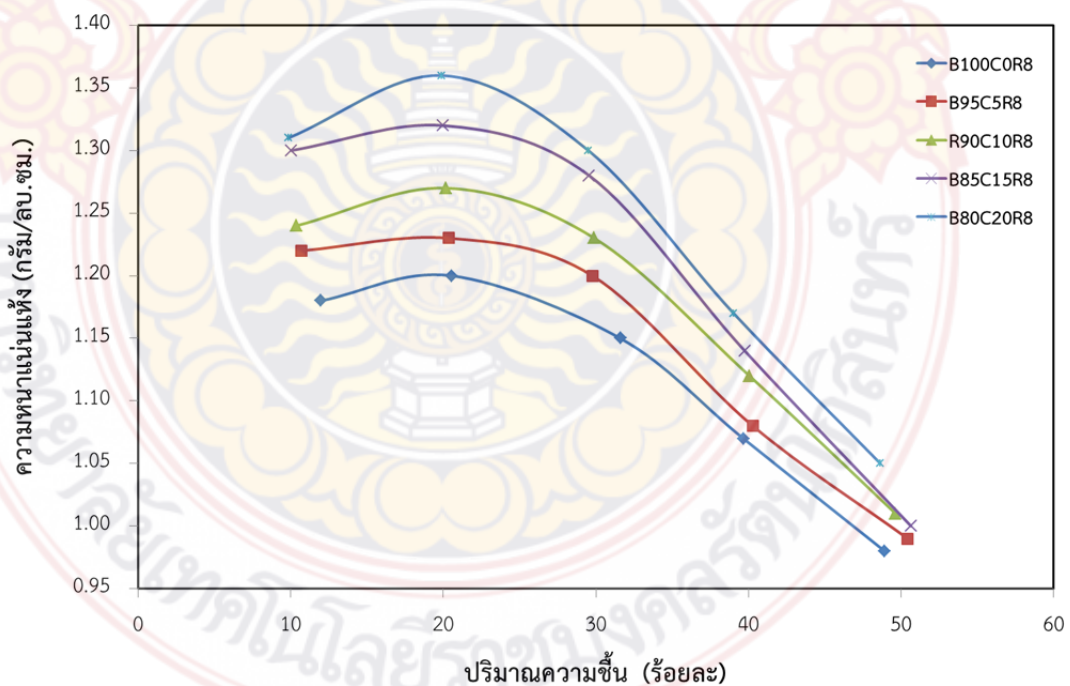
ตารางที่ 16 พารามิเตอร์การบดอัดของของแฉ่ำกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (ต่อ)

อัตราส่วนผสม	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)
B 90% : C 10% : R 6%	1.29	21.13
B 85% : C 15% : R 6%	1.34	21.01
B 80% : C 20% : R 6%	1.39	20.93

จากข้อมูลพารามิเตอร์การบดอัด ในตารางที่ 16 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 เป็นผลเนื่องจากน้ำปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราไปเคลือบที่ผิวของอนุภาคแฉ่ำกันเตาทำให้แรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น สำหรับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น

### 3.5 แฉ่ำกันเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราร้อยละ 8

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของแฉ่ำกันเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 ตามลำดับ น้ำยางพาราร้อยละ 8 สามารถแสดงเส้นกราฟการบดอัด ดังภาพที่ 73 ซึ่งค่าพารามิเตอร์การบดอัดของแต่ละอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 17



ภาพที่ 73 เส้นกราฟการบดอัดของแฉ่ำกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 17 พารามิเตอร์การบดอัดของของเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

อัตราส่วนผสม	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)
B 100% : C 0% : R 8%	1.20	20.53
B 95% : C 5% : R 8%	1.23	20.38
B 90% : C 10% : R 8%	1.27	20.19
B 85% : C 15% : R 8%	1.32	20.00
B 80% : C 20% : R 8%	1.36	19.88

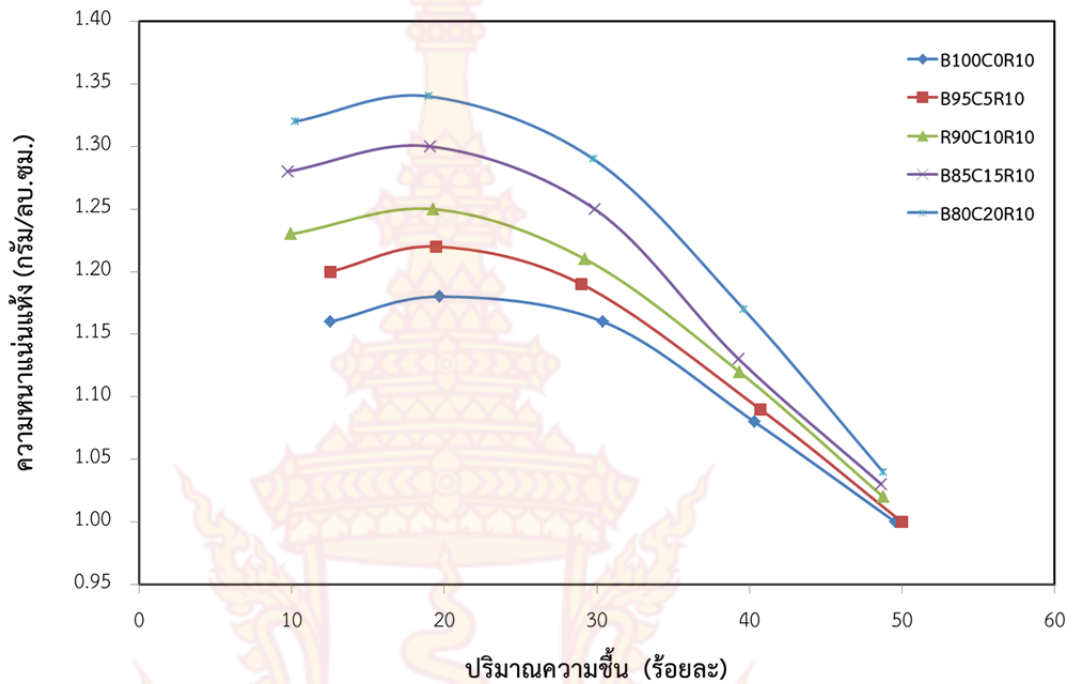
จากข้อมูลพารามิเตอร์การบดอัด ในตารางที่ 17 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 เป็นผลเนื่องจากน้ำปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราไปเคลือบที่ผิวของอนุภาคเถ้าก้นเตาทำให้แรงยึดตัวระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น สำหรับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น

### 3.6 เถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราร้อยละ 10

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 ตามลำดับ น้ำยางพาราร้อยละ 10 สามารถแสดงเส้นกราฟการบดอัด ดังภาพที่ 74 ซึ่งค่าพารามิเตอร์การบดอัดของแต่ละอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 พารามิเตอร์การบดอัดของของเถ้าก้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

อัตราส่วนผสม	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)
B 100% : C 0% : R 10%	1.18	19.69
B 95% : C 5% : R 10%	1.22	19.46
B 90% : C 10% : R 10%	1.25	19.26
B 85% : C 15% : R 10%	1.30	19.10
B 80% : C 20% : R 10%	1.34	19.00

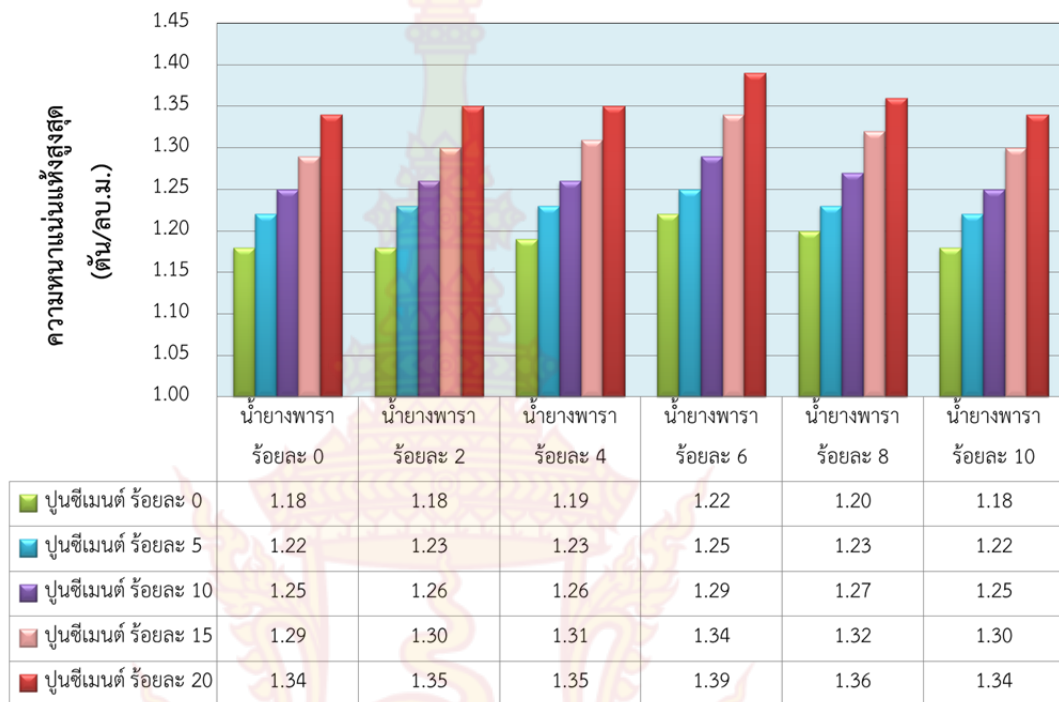


ภาพที่ 74 เส้นกราฟการบดอัดของเอ้ากันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

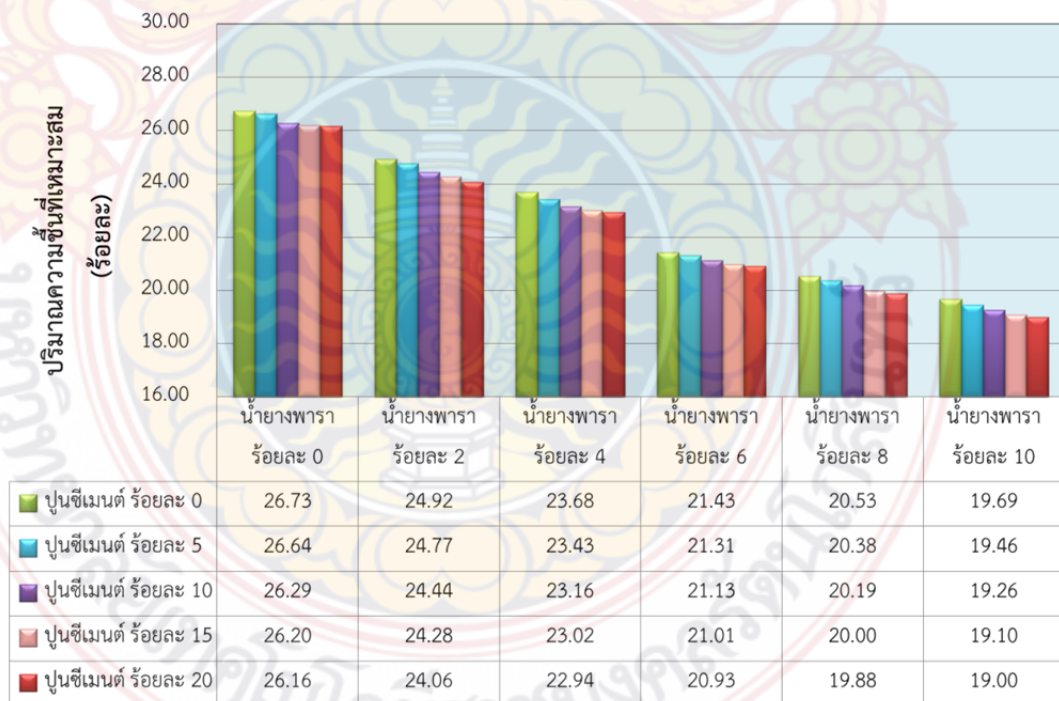
จากข้อมูลพารามิเตอร์การบดอัด ในตารางที่ 18 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 เป็นผลเนื่องจากน้ำปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราไปเคลือบผิวของอนุภาคเอ้ากันเตาทำให้แรงยึดตัวระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น สำหรับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น

### 3.7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบการบดอัดสำหรับอัตราส่วนผสมต่างๆ

ผลเปรียบเทียบการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานสำหรับเอ้ากันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 ถึง 10 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 75 และ 76 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือการผสมปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 จะให้ค่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ ซึ่งก็เป็นผลจากการที่ซีเมนต์เพสไปเคลือบผิวเม็ดเอ้ากันเตาและทำหน้าที่เหมือนกาวทำให้มีแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดีกว่าการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่า สำหรับปริมาณความชื้นจะลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์



ภาพที่ 75 กราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นแ่งสูงสุดสำหรับอัตราส่วนผสมต่างๆ



ภาพที่ 76 กราฟเปรียบเทียบปริมาณความขึ้นที่เหมาะสมสำหรับอัตราส่วนผสมต่างๆ



### 3.7 ปริมาณน้ำยางพาราที่เหมาะสม

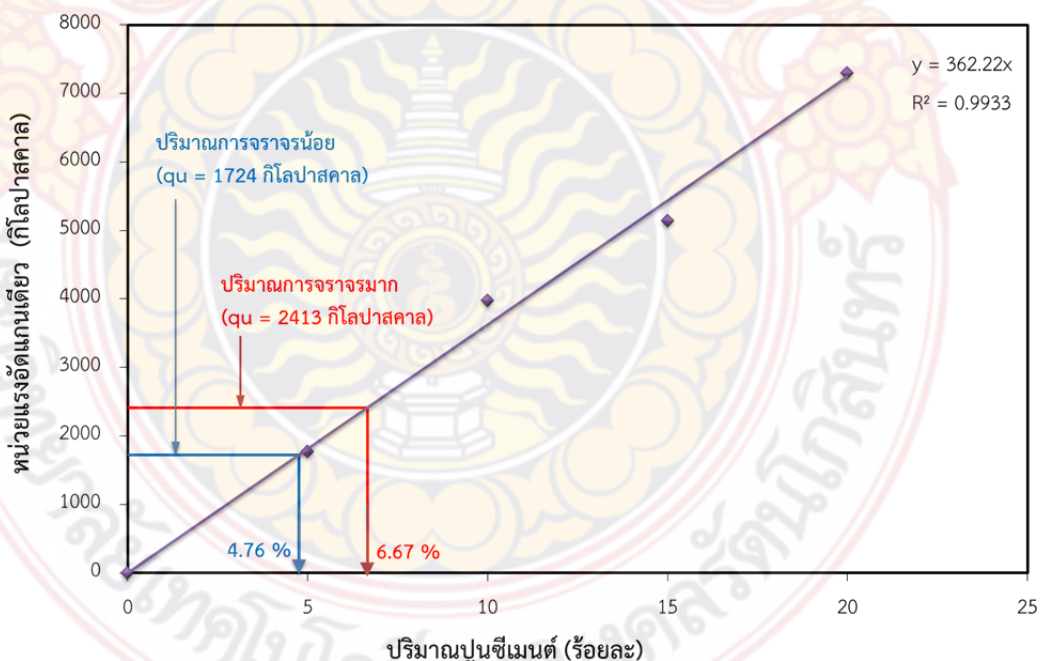
ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพารา ดังแสดงภาพที่ 74 และ 75 พบว่าค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ลดลงตามปริมาณน้ำยางพาราที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อน้ำที่อยู่ในน้ำยางพารามีปริมาณร้อยละมากขึ้นทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดลดลง และปริมาณน้ำยางพาราที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมเก้าอี้เก้าอี้เตาและปูนซีเมนต์ คือร้อยละ 6 ซึ่งทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ( $\rho_{d \max}$ ) ของเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพารามีค่ามากที่สุด เนื่องจากปริมาณน้ำยางพาราดังกล่าวทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเก้าอี้เก้าอี้เตามากที่สุด โดยไม่ทำให้เกิดแรงผลักหรือแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของเก้าอี้เก้าอี้เตา ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับ ธิติพงษ์ หล่อพิศาลชัย และคณะ

### 4. ผลการทดสอบการหาค่าแรงอัดแกนเดียว

การทดสอบการหาค่าแรงอัดแกนเดียวเป็นการดำเนินการหลังจากเตรียมตัวอย่างทดสอบและบ่มในถุงพลาสติก ระยะเวลา 7 วัน มีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 การหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับปริมาณจรรยาจร

ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างเก้าอี้เก้าอี้เตาผสมปูนซีเมนต์ (C0%, C5%, C10%, C15% และ C20%) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ และหน่วยแรงอัดแกนเดียวได้ ดังแสดงในภาพที่ 77

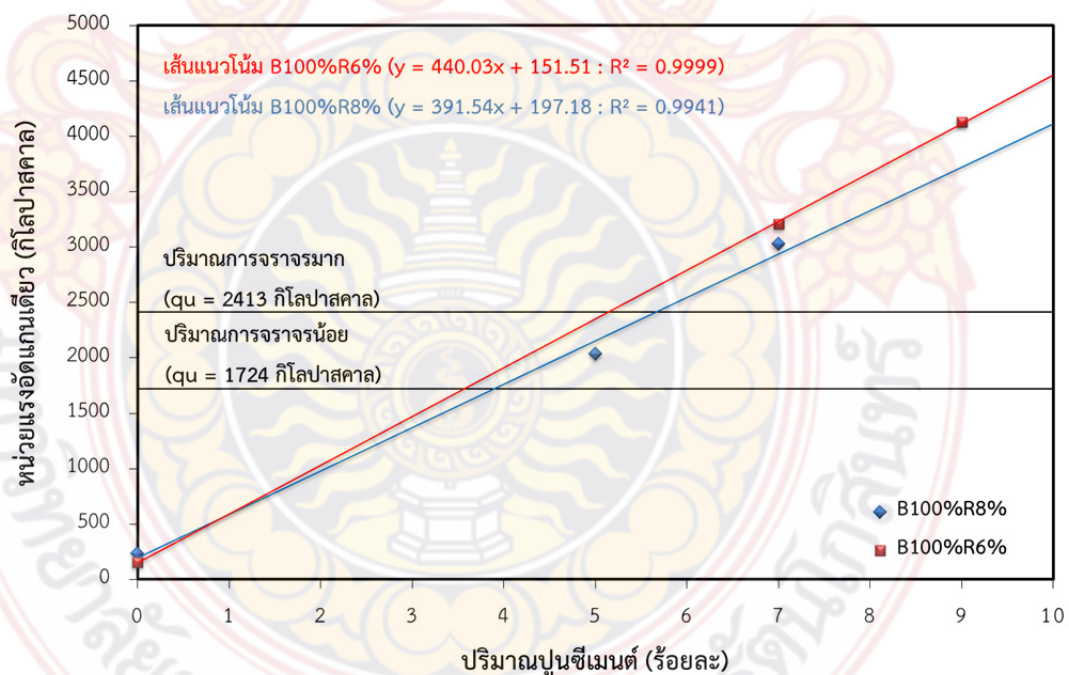


ภาพที่ 77 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับปริมาณการจรรยาจรน้อยและปริมาณการจรรยาจรมาก จากผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว

จากภาพที่ 77 พบว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม สำหรับปริมาณการจราจรน้อย เท่ากับ ร้อยละ 4.76 พิจารณาจากค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) ตามมาตรฐานดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง คือต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1724 กิโลปาสคาลและปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม สำหรับปริมาณ การจราจรมาก เท่ากับร้อยละ 6.67 พิจารณาจากค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียว ( $q_u$ ) ตามมาตรฐานพื้น ทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวงคือต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2413 กิโลปาสคาล แต่เพื่อให้ง่ายใน การใช้งานจึงกำหนดให้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 สำหรับปริมาณการจราจรน้อย และเท่ากับร้อย ละ 7 สำหรับปริมาณการจราจรมาก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ธนากร พุ่มแก้ว และคณะ ดังนั้น สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบจะใช้อัตราส่วนของเถ้ากั้นเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพารา ที่ให้ ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 2 ลำดับแรก ได้แก่ เถ้ากั้นเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราร้อยละ 6 และ 8 โดยกำหนดให้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 7 สำหรับปริมาณการจราจรน้อย และปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 และร้อยละ 9 สำหรับปริมาณการจราจรมาก

#### 4.2 อิทธิพลเนื่องจากขนาดคละของเถ้ากั้นเตา

ผลจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวกับตัวอย่างเถ้ากั้นเตาที่กำหนดขนาดคละผสมกับน้ำ ยางพาราและปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับปริมาณจราจรน้อยและปริมาณการจราจรมาก ดังแสดงใน ภาพที่ 78

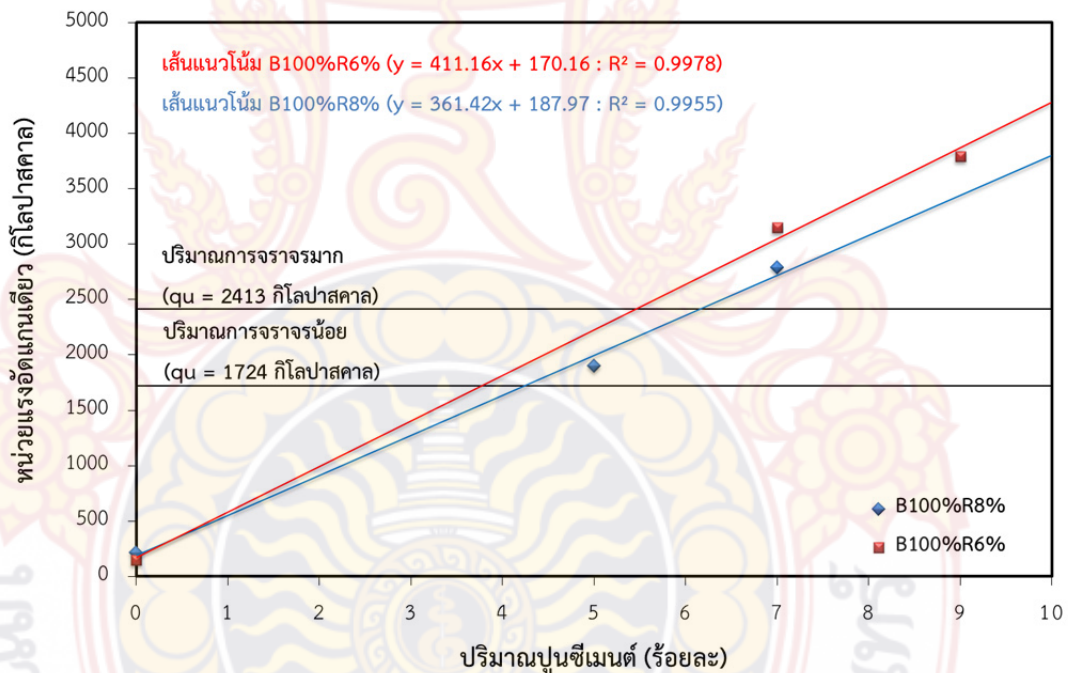


ภาพที่ 78 ผลการทดสอบหาค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่ใช้เถ้ากั้นเตากำหนดขนาดคละ

จากภาพที่ 76 พบว่าจากเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของตัวอย่างเถ้ากั้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 (B100%R6%) จะให้ค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวสูงกว่าตัวอย่างเถ้ากั้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8

(B100%R8%) ทุกๆการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน ยกเว้นตัวอย่างที่ไม่ใส่ปูนซีเมนต์ โดยค่ากำลังอัดแกนเดียวของ B100%R8% มีค่าสูงกว่า B100%R6% เล็กน้อยเนื่องจากน้ำยางพาราที่มีปริมาณมากกว่าจะไปช่วยให้เถ้ากั้นเตายึดเกาะกันดีกว่า โดยค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่าง B100%R8% เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, ร้อยละ 5 และร้อยละ 7 เท่ากับ 232, 2005 และ 3015 กิโลปาสคาล ตามลำดับ สำหรับค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่าง B100%R6% เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, ร้อยละ 7 และร้อยละ 9 เท่ากับ 157, 3212 และ 4098 กิโลปาสคาล ตามลำดับ

ผลจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวกับตัวอย่างเถ้ากั้นเตาที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ผสมกับน้ำยางพาราและปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับปริมาณจรรยาจรน้อยและปริมาณการจรรยาจรมาก ดังแสดงในภาพที่ 79

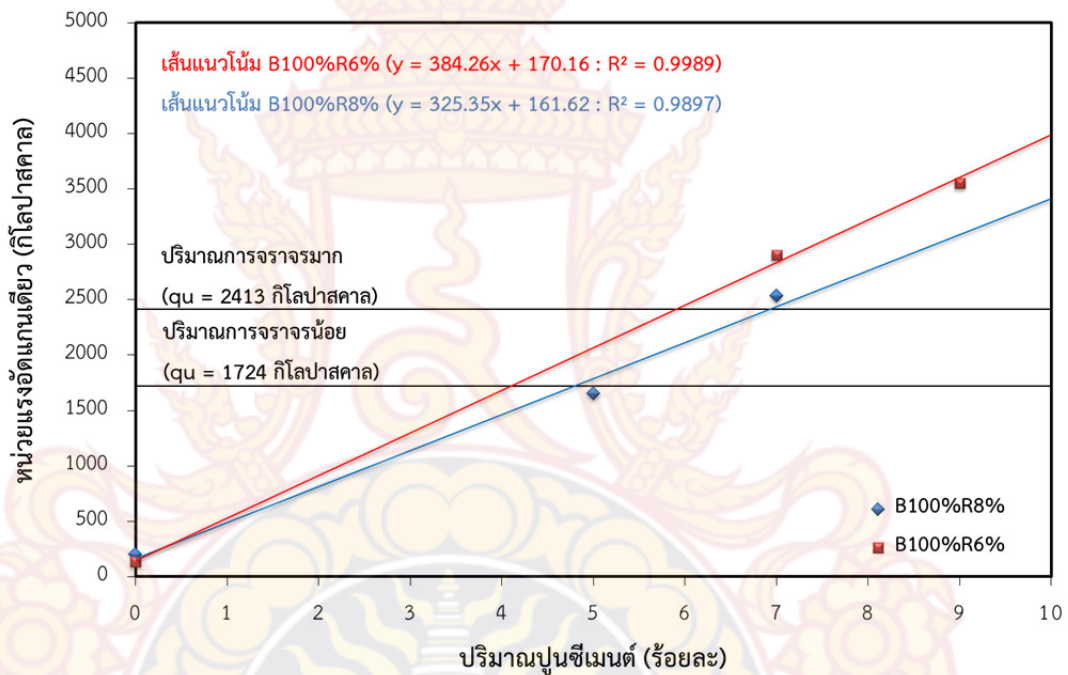


ภาพที่ 79 ผลการทดสอบหาค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่ใช้เถ้ากั้นเตาผ่านตะแกรงเบอร์ 4

จากภาพที่ 79 พบว่าจากเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของตัวอย่างเถ้ากั้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 (B100%R6%) จะให้ค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวสูงกว่าตัวอย่างเถ้ากั้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 (B100%R8%) ทุกๆการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน ยกเว้นมาซึ่งใส่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 โดยค่ากำลังอัดแกนเดียวของ B100%R8% มีค่าสูงกว่า B100%R6% อยู่เล็กน้อยเนื่องจากน้ำยางพาราจะไปช่วยให้เถ้ากั้นเตายึดเกาะกันได้ดี และค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่าง B100%R8% เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, ร้อยละ 5 และร้อยละ 7 เท่ากับ 216, 1897 และ 2786 กิโลปาสคาล

ตามลำดับ สำหรับค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่าง B100%R6% เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, ร้อยละ 7 และร้อยละ 9 เท่ากับ 148, 3148 และ 3793 กิโลปาสคาล ตามลำดับ

ผลจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวกับตัวอย่างเอ้ากันเตาที่ผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว ผสมกับน้ำยาล้างพาราและปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับปริมาณจรรยาจรรยาและปริมาณการจรรยาจรรยา ดังแสดงในภาพที่ 80



ภาพที่ 80 ผลการทดสอบหาค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่ใช้เอ้ากันเตาผ่านตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว

จากภาพที่ 80 พบว่าจากเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของตัวอย่างเอ้ากันเตาผสมน้ำยาล้างพาราร้อยละ 6 (B100%R6%) จะให้ค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวสูงกว่าตัวอย่างเอ้ากันเตาผสมน้ำยาล้างพาราร้อยละ 8 (B100%R8%) ทุกๆการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน ยกเว้นมาซึ่งใส่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 โดยค่ากำลังอัดแกนเดียวของ B100%R8% มีค่าสูงกว่า B100%R6% อยู่เล็กน้อยเนื่องจากน้ำยาล้างพาราจะไปช่วยให้เอ้ากันเตายึดเกาะกันได้ดี ค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่าง B100%Rb8% เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, ร้อยละ 5 และร้อยละ 7 เท่ากับ 200, 1654 และ 2536 กิโลปาสคาล ตามลำดับ สำหรับค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่าง B100%R6% เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, ร้อยละ 7 และร้อยละ 9 เท่ากับ 133, 2905 และ 3554 กิโลปาสคาล ตามลำดับ

จากผลการทดสอบหาค่าแรงอัดแกนเดียวของทั้งสามกรณี สามารถสรุปการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของหน่วยแรงอัดแกนเดียวพิจารณาตามเส้นแนวโน้มของตัวอย่างเอ้ากันเตาผสมน้ำยาล้างพาราร้อยละ 8

(B100%R8%) และเก้าอี้เตาผสมน้ำย่างพารา ร้อยละ 6 (B100%R6%) เปรียบเทียบกับข้อกำหนด ค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวสำหรับปริมาณการจรรยาจรน้อย (1724 กิโลปาสคาล) และปริมาณการจรรยาจรมาก (2413 กิโลปาสคาล) ดังตารางที่ 19 พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับปริมาณการจรรยาจรมากคือ ร้อยละ 7 โดยเมื่อผสมน้ำย่างพาราในปริมาณร้อยละ 6 จะได้ค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวมากกว่าการผสมน้ำย่างพารา ร้อยละ 8 ในทุกกรณี สำหรับกรณีที่ใช้ในงานปริมาณการจรรยาจรน้อยปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 5 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้ปริมาณน้ำย่างพาราผสมกับเก้าอี้เตาที่เหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละ 6 ลักษณะการวิบัติของเก้าอี้เตาผสมน้ำย่างพารา ร้อยละ 8 และร้อยละ 6 พบว่ามีการวิบัติแบบเฉือน

ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบหน่วยแรงอัดแกนเดียวของแต่ละอัตราส่วนผสม

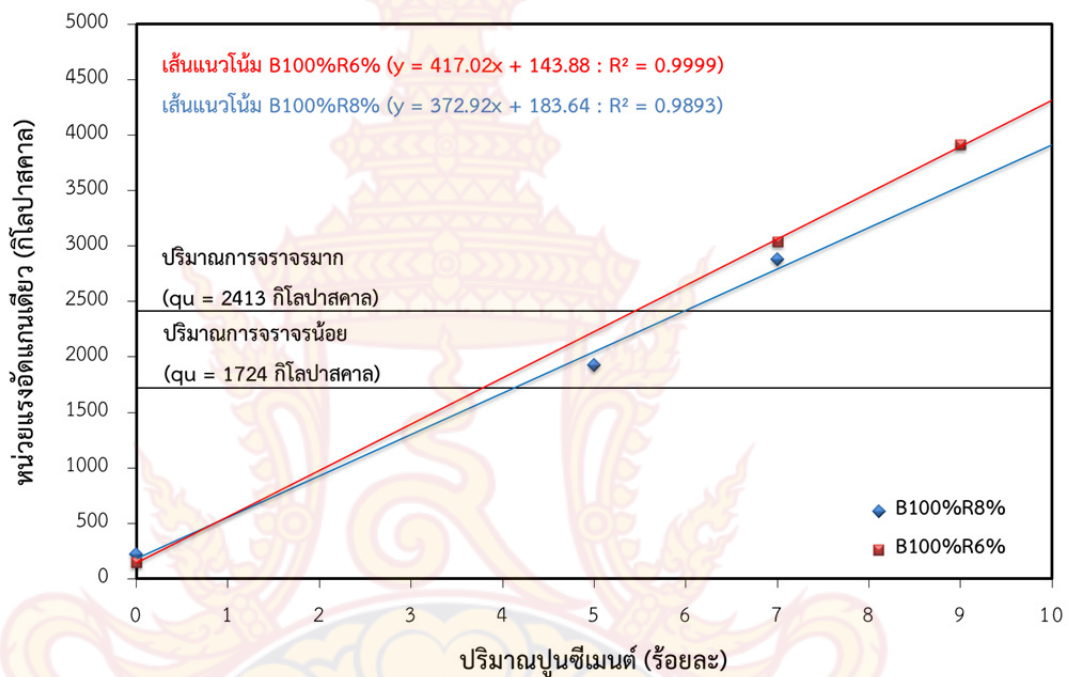
เก้าอี้เตาผสมปูนซีเมนต์	หน่วยแรงอัดแกนเดียว (กิโลปาสคาล)					
	ปริมาณน้ำย่างพารา ร้อยละ 8	ร้อยละความแตกต่าง		ปริมาณน้ำย่างพารา ร้อยละ 6	ร้อยละความแตกต่าง	
		ปริมาณจรรยาจรน้อย	ปริมาณจรรยาจรมาก		ปริมาณจรรยาจรน้อย	ปริมาณจรรยาจรมาก
เก้าอี้เตากำหนดขนาดคละ						
B95%C5%	2154.88	+24.99	-10.70	2351.66	+36.41	-2.54
B93%C7%	2937.96	+70.42	+21.76	3231.72	+87.45	+33.93
B91%C9%	3721.04	+115.84	+54.21	4111.78	+138.50	+70.40
เก้าอี้เตาผ่านตะแกรงเบอร์ 4						
B95%C5%	1995.07	+15.72	-17.32	2225.96	+29.12	-7.75
B93%C7%	2717.91	+57.65	+12.64	3048.28	+76.81	+26.33
B91%C9%	3440.75	+99.60	+42.59	3870.60	+124.51	+60.41
เก้าอี้เตาผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8						
B95%C5%	1788.37	+3.73	-25.89	2069.24	+20.03	-14.25
B93%C7%	2439.07	+41.48	+1.08	2837.76	+64.60	+17.60
B91%C9%	3089.77	+79.22	+28.05	3606.28	+109.18	+49.45

หมายเหตุ เครื่องหมาย + หมายถึง มีค่าสูงกว่าข้อกำหนด

เครื่องหมาย - หมายถึง มีค่าต่ำกว่าข้อกำหนด

#### 4.3 อิทธิพลของการแช่น้ำตัวอย่าง

ผลจากการทดสอบแรงอัดแกนเดียวกับตัวอย่างเถ้ากั้นเตาที่กำหนดขนาดคละผสมกับน้ำยางพาราและปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับปริมาณจรรยาจรน้อยและปริมาณการจรรยาจรมาก ในสภาพแช่น้ำเป็นระยะเวลา 4 วัน ดังแสดงในภาพที่ 81



ภาพที่ 81 ผลการทดสอบหาหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่างเนื่องจากอิทธิพลของการแช่น้ำ

จากภาพที่ 81 แสดงให้เห็นว่าเถ้ากั้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 และ 8 ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 (B100%R6%C5%, B100%R8%C5%) สามารถใช้ได้กับสภาพปริมาณการจรรยาจรน้อยเท่านั้น แต่สำหรับเถ้ากั้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 และ 8 ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 6 ขึ้นไปสามารถใช้กับทั้งสภาพปริมาณการจรรยาจรน้อยและปริมาณการจรรยาจรมาก

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดสอบหาค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของเถ้ากั้นเตาที่กำหนดขนาดคละผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพารากับผลจากการทดสอบหาค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของเถ้ากั้นเตาที่กำหนดขนาดคละที่ผสมปูนซีเมนต์แต่ไม่ผสมน้ำยางพาราในงานวิจัยที่คล้ายกัน สำหรับอายุการบ่ม 7 วัน และอายุการบ่ม 7 วัน แช่น้ำ 4 วัน สามารถแสดงข้อมูลผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 อิทธิพลของการแช่น้ำต่อค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียว

อัตราส่วนผสม	หน่วยแรงอัดแกนเดียว (กิโลปาสคาล)		
	บ่ม 7 วัน ไม่แช่น้ำ	บ่ม 7 วัน แช่น้ำ 4 วัน	ร้อยละความ แตกต่าง
ใ้ก้านเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพารา (การศึกษาครั้งนี้)			
B95%R8%C5%	2155	2049	-4.92
B93%R8%C7%	2938	2795	-4.87
B93%R6%C7%	3232	3064	-5.20
B91%R6%C9%	4112	3898	-5.20
ใ้ก้านเตาผสมเถ้าขานอ้อยและปูนซีเมนต์ (ธนากร พุ่มแก้ว และคณะ, 2560)			
Bo100%Ba0%C5%	1924	1600	-16.84
Bo100%Ba0%C7%	2810	2181	-22.38
Bo75%Ba25%C7%	3125	2603	-16.70
Bo75%Ba25%C9%	4056	3560	-12.23

จากตารางที่ 19 พบว่าค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวของตัวอย่าง ที่มีส่วนผสมของน้ำยางพารากรณีแช่น้ำมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้แช่น้ำ โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างประมาณร้อยละ 5 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาในลักษณะเดียวกันของ ธนากร พุ่มแก้ว และคณะ (2560) ซึ่งไม่มีส่วนผสมของน้ำยางพารา แสดงให้เห็นว่าผลของการผสมน้ำยางพารา ทำให้ตัวอย่างมีความที่บ้น้ำมากขึ้น เป็นผลให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง และค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากันของแต่ละสัดส่วนผสม เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานพบว่าการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 เหมาะสำหรับการใช้ในบริเวณที่มีปริมาณการจราจรน้อย สำหรับการใช้งานในบริเวณที่มีการจราจรมากนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 7

## 5. ผลการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์.

### 5.1 ผลการทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. ของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบออกเป็น 3 แบบ คือ ตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำทดสอบทันที ตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำอายุ 7 วันแล้วทดสอบ และตัวอย่างอายุ 7 วัน แช่น้ำ 4 วันแล้วทดสอบ โดยใช้ใ้ก้านเตาผสมตามขนาดคละ มีรายละเอียดผลการทดสอบ ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบหาค่าซี.บี.อาร์.ของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

อัตราส่วนผสม	ทดสอบทันที	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน และแช่น้ำ 4 วัน
B95%R8%C5%	100.64	379.89	364.49
B93%R8%C7%	116.87	469.31	450.54
B93%R6%C7%	129.62	497.22	474.84
B91%R6%C9%	143.22	577.44	551.45

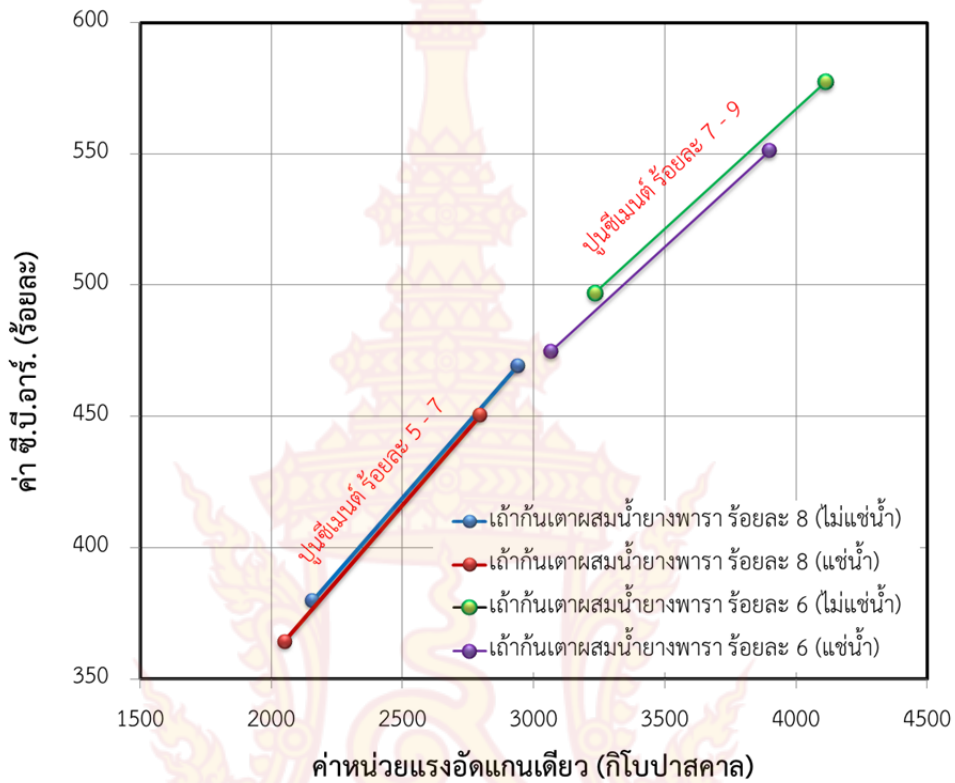
จากตารางที่ 20 พบว่าเมื่อบ่มตัวอย่างจนมีอายุ 7 วัน ค่า ซี.บี.อาร์. เพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทดสอบทันที ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่สมบูรณ์มากขึ้น ในขณะที่เมื่อนำตัวอย่างที่มีอายุการบ่ม 7 วัน ไปแช่น้ำเป็นเวลา 4 วัน แล้วนำมาทดสอบหาค่า ซี.บี.อาร์. แบบแช่น้ำ พบว่าค่า ซี.บี.อาร์. ลดลงอย่างน้อยที่สุดประมาณร้อยละ 5 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของการแช่น้ำส่งผลให้ค่า ซี.บี.อาร์. ลดลง เมื่อพิจารณาจากค่าซี.บี.อาร์. แล้วพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 ทำให้ค่า ซี.บี.อาร์. มากกว่าการผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 จึงสรุปว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด คือ แก้วกั้นเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบหาค่าแรงอัดแกนเดียว

#### 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซี.บี.อาร์. และค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

ความสัมพันธ์ของค่า ซี.บี.อาร์. และค่าแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง ของแก้วกั้นเตาผสมน้ำยางพารา และปูนซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน โดยใช้แก้วกั้นเตาผสมตามขนาดคละ สำหรับกรณีตัวอย่างไม่แช่น้ำและแช่น้ำสามารถแสดงในดังภาพที่ 82 โดยจากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถแสดงเป็นสมการเชิงเส้น ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{CBR} &= 0.1142q_u + 133.79 && \text{(แก้วกั้นเตาผสมน้ำยางพารา ร้อยละ 8)} \\
 \text{CBR}_{(\text{แช่น้ำ})} &= 0.1153q_u + 128.14 && \text{(แก้วกั้นเตาผสมน้ำยางพารา ร้อยละ 8)} \\
 \text{CBR} &= 0.0912q_u + 202.59 && \text{(แก้วกั้นเตาผสมน้ำยางพารา ร้อยละ 6)} \\
 \text{CBR}_{(\text{แช่น้ำ})} &= 0.0919q_u + 193.39 && \text{(แก้วกั้นเตาผสมน้ำยางพารา ร้อยละ 6)}
 \end{aligned}$$





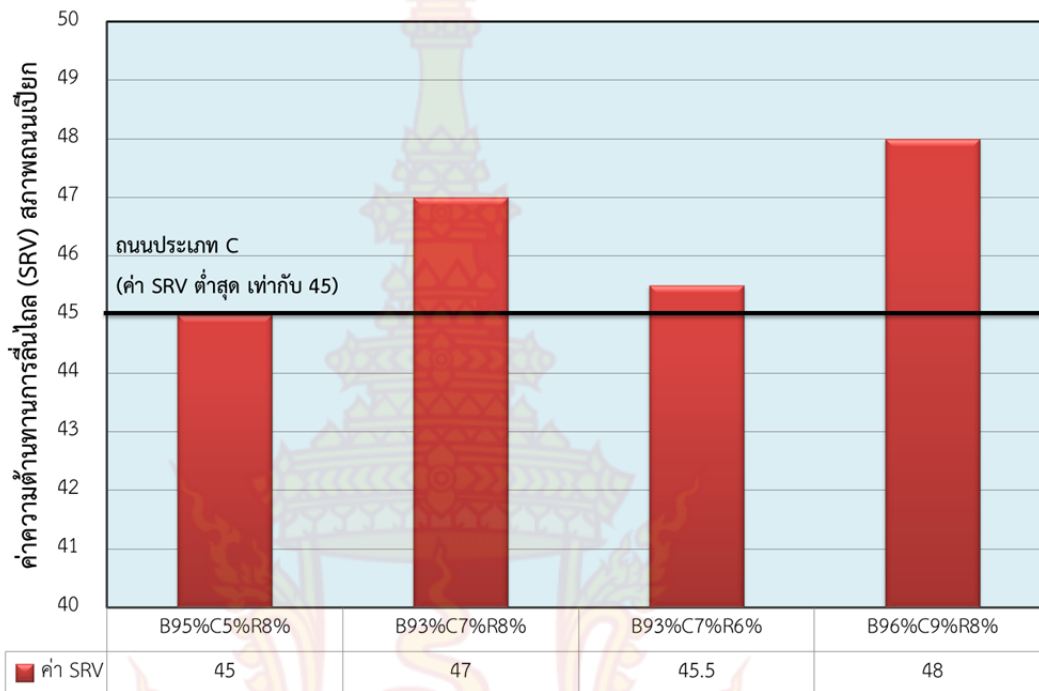
ภาพที่ 82 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดแกนเดียวและค่า ซี.บี.อาร์.

### 6. ผลการทดสอบการลื่นไถลในสภาพเปียก

ผลการทดสอบการลื่นไถลในสภาพเปียกตัวอย่างทดสอบ โดยเครื่องทดสอบการลื่นไถล British Pendulum Tester เพื่อทดสอบหาค่าความผิดชั้นผิวทาง เมื่อได้ทำการทดสอบการลื่นไถลของตัวอย่างอัตราส่วนผสมของเก้าก้นเตาผสมน้ำยางพารา ร้อยละ 8 ปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 (B95%C5%R8%) และปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 (B93%C7%R8) สำหรับปริมาณจราจรน้อย เก้าก้นเตาผสมน้ำยางพารา ร้อยละ 6 ปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 (B93%C7%R6%) และปูนซีเมนต์ร้อยละ 9 (B91%C9%R6%) สำหรับปริมาณจราจรมาก พบว่าผิวทางของวัสดุทุกอัตราส่วนที่ให้ค่าความต้านทานการลื่นไถล ดังแสดงในตารางที่ 22 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานความต้านทานการลื่นไถลต่ำสุด (ในสภาพถนนเปียก) ดังภาพที่ 83

ตารางที่ 22 ผลการทดสอบความต้านทานการลื่นไถล

อัตราส่วน	ค่าเฉลี่ยความต้านทานการลื่นไถล (SVR)
B95%C5%R8%	45
B93%C7%R8%	47
B93%C7%R6%	45.5
B91%C9%R6%	48



**ภาพที่ 83** การเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไกลในสภาพถนนเปียก

จากข้อมูลผลการทดสอบในตารางที่ 22 พบว่าค่าความต้านทานการลื่นไกลในสภาพเปียกมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 45 แต่มีค่าน้อยกว่า 55 แสดงให้เห็นว่าถ้ากำหนดผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 และ 8 ร่วมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และ 7 และจากภาพที่ 80 แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทางได้ โดยพิจารณาตามความต้านทานการลื่นไกลเปรียบเทียบกับมาตรฐานพบว่า เข้าเกณฑ์ประเภท C คือ ถนนสาธารณะในทางตรงที่มีความลาดชันน้อย รัศมีความโค้งไม่มากนัก และมีบริเวณแคบๆ

**7. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ้ากั้นเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพารากับมาตรฐานงานทาง**

ผลจากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมของถ้ากั้นเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราที่ได้ทำการศึกษา โดยพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุดินซีเมนต์ ได้แก่ B95%C5%R6% สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรน้อย และวัสดุทดแทนหินคลุกผสมซีเมนต์ ได้แก่ B93%C7%R6% สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรมาก และทั้งสองสัดส่วนสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางได้ด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานงานทางแล้วสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเก้าอี้ตามสมปุนซีเมนต์และน้ำยารักษาพื้นคอนกรีตมาตรฐานงานทาง

มาตรฐาน	คุณสมบัติที่กำหนด	คุณสมบัติที่ได้จากการศึกษา
ชั้นรองพื้นทาง (กรมทางหลวง)	ขนาดคละ เกรด A, B, C, D, E	ขนาดคละ เกรด E
	ขีดจำกัดเหลว ไม่เกินร้อยละ 35	ขีดจำกัดเหลว มีค่าเป็นศูนย์ (NP)
	ดัชนีความเหนียว ไม่เกินร้อยละ 11	ดัชนีความเหนียว มีค่าเป็นศูนย์ (NP)
	ค่า ซี.บี.อาร์. ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25	ค่า ซี.บี.อาร์. มากกว่าร้อยละ 25
พื้นทางดินซีเมนต์ (กรมทางหลวง)	ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ไม่เกินร้อยละ 70	ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ร้อยละ 50.69
	ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกินร้อยละ 25	ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 9.89
	ขีดจำกัดเหลว ไม่เกินร้อยละ 40	ขีดจำกัดเหลว มีค่าเป็นศูนย์ (NP)
	ดัชนีความเหนียว ไม่เกินร้อยละ 15	ดัชนีความเหนียว มีค่าเป็นศูนย์ (NP)
	<u>สำหรับปริมาณการจราจรน้อย</u> หน่วยแรงอัดแกนเดียว ไม่น้อยกว่า 1724 กิโลปาสคาล	<u>สำหรับปริมาณการจราจรน้อย</u> อัตราส่วน B95%C5%R6% หน่วยแรงอัดแกนเดียว มากกว่า 1724 กิโลปาสคาล
พื้นทางหินคลุกผสม ซีเมนต์ (กรมทางหลวง)	ขีดจำกัดเหลว ไม่เกินร้อยละ 25	ขีดจำกัดเหลว มีค่าเป็นศูนย์ (NP)
	ดัชนีความเหนียว ไม่เกินร้อยละ 6	ดัชนีความเหนียว มีค่าเป็นศูนย์ (NP)
	ค่า ซี.บี.อาร์. ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80	ค่า ซี.บี.อาร์. มากกว่าร้อยละ 80
	<u>สำหรับปริมาณการจราจรมาก</u> หน่วยแรงอัดแกนเดียว ไม่น้อยกว่า 2413 กิโลปาสคาล	<u>สำหรับปริมาณการจราจรมาก</u> อัตราส่วน B93%C7%R6% หน่วยแรงอัดแกนเดียว มากกว่า 2413 กิโลปาสคาล
ความต้านทานต่อการลื่นไถล (SRV) ในสภาพเปียก (กรมทางหลวง)	ถนนประเภท A ค่า SRV ต่ำสุด 65 ถนนประเภท B ค่า SRV ต่ำสุด 55 ถนนประเภท C ค่า SRV ต่ำสุด 45	ค่า SRV เท่ากับ 45 ขึ้นไป

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพารา และปูนซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง โดยทำการทดสอบเพื่อศึกษาอัตราส่วนของวัสดุที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุงานทางชั้นรองพื้นทาง

#### 1. สรุปผลการศึกษา

##### 1.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพารา

1. การจำแนกประเภทของเก้าอี้กันเตา ตามระบบการจำแนกแบบเอกภาพ (UCSC) พบว่า จำแนกได้เป็นดินทรายปนตะกอนที่มีขนาดคละกันดี (SW-SM) และลักษณะการกระจายตัวของเก้าอี้กันเตา จัดอยู่ในมาตรฐานชั้นรองพื้นทางเกรด E ตามมาตรฐานกรมทางหลวง

2. ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของเก้าอี้กันเตามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.69

3. ผลการทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลว พบว่าวัสดุแต่ละอัตราส่วนผสมไม่สามารถหาค่าขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกได้ แสดงให้เห็นว่าเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียว (Non-Plastic, NP)

##### 1.2 คุณสมบัติด้านกำลังของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์

1. ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน สำหรับเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 ถึง 10 และปูนซีเมนต์ ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือการผสมปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 จะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในกลุ่มปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ ซึ่งก็เป็นผลจากการที่ซีเมนต์เพสไปเคลือบผิวเม็ดเก้าอี้กันเตาและทำหน้าที่เหมือนกาวทำให้มีแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดีดีกว่าการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่า สำหรับปริมาณความชื้นจะลดลงตามปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณน้ำยางพาราที่เหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละ 6

2. ผลการทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับปริมาณการจราจรมากคือ ร้อยละ 7 โดยเมื่อผสมน้ำยางพาราในปริมาณร้อยละ 6 จะได้ค่าหน่วยแรงอัดแกนเดียวมากกว่าการผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 ในทุกกรณี สำหรับกรณีที่ใช้ในงานปริมาณการจราจรน้อยปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 5 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้ปริมาณน้ำยางพาราผสมกับเก้าอี้กันเตาที่เหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละ 6 ลักษณะการวิบัติของเก้าอี้กันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 และร้อยละ 6 พบว่าเป็นการวิบัติแบบเฉือน สำหรับกรณีของตัวอย่างที่แช่น้ำ พบว่าหน่วยแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้แช่น้ำ โดยมียุทธศาสตร์ความแตกต่างประมาณร้อยละ 5 เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานพบว่าการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 เหมาะสำหรับการใช้ในบริเวณที่มีปริมาณการจราจรน้อย สำหรับการใช้งานในบริเวณที่มีการจราจรมากนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 7

3. ผลการทดสอบหาค่า ซี.พี.อาร์. พบว่าเมื่อบ่มตัวอย่างจนมีอายุ 7 วัน ค่า ซี.พี.อาร์. เพิ่มขึ้นมากกว่า 3 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทันที ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่สมบูรณ์มากขึ้น ในขณะที่เมื่อนำตัวอย่างที่มีอายุการบ่ม 7 วัน ไปแช่น้ำเป็นเวลา 4 วัน แล้วนำมาทดสอบหาค่า ซี.พี.อาร์. แบบแช่น้ำ พบว่าค่า ซี.พี.อาร์. ลดลงอย่างน้อยที่สุดประมาณร้อยละ 5 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของการแช่น้ำส่งผลให้ค่า ซี.พี.อาร์. ลดลง เมื่อพิจารณาค่าซี.พี.อาร์. แล้วพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 ทำให้ค่า ซี.พี.อาร์. มากกว่าการผสมน้ำยางพาราร้อยละ 8 จึงสรุปว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด คือ แก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าแรงอัดแกนเดียว

### 1.3 ผลการทดสอบการลื่นไถลในสภาพเปียก

ค่าความต้านทานการลื่นไถลในสภาพเปียกมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 45 แต่มีค่าน้อยกว่า 55 แสดงให้เห็นว่าแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 และ 8 ร่วมกับปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และ 7 และจากภาพที่ 80 แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทางได้ โดยพิจารณาตามความต้านทานการลื่นไถลเปรียบเทียบกับมาตรฐานพบว่า เข้าเกณฑ์ประเภท C คือ ถนนสาธารณะในทางตรงที่มีความลาดชันน้อย รัศมีความโค้งไม่มากนัก และมีบริเวณแยกน้อย

### 1.4 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง

จากผลการศึกษาทั้งทางกายภาพ ด้านกำลัง พิจารณาอิทธิพลของขนาดคละ อิทธิพลของการแช่น้ำ ของตัวอย่างทดสอบในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วนผสมของแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 ผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุงานที่มีปริมาณการจราจรมาก และวัสดุอัตราส่วนผสมของแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราร้อยละ 6 ผสมปูนซีเมนต์ ร้อยละ 5 เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุงานที่มีปริมาณการจราจรน้อย

## 2. การนำไปใช้ประโยชน์

1. ขนาดของแก้วกันเตาที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานควรใช้แก้วกันเตาที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เนื่องจากหากใช้แก้วกันเตาผสมตามขนาดคละ จะเป็นการยุ่งยากต่อการเตรียมตัวอย่างในปริมาณมาก และหากใช้แก้วกันเตาไม่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 จะทำให้คุณสมบัติทางด้านกำลังลดลง ผิวขรุขระ และมีผงฝุ่นที่ผิวจำนวนมาก

2. วัสดุแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์ อัตราส่วน B95%C5%R6% และ B93%C7%R6% สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางได้

3. วัสดุแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์ อัตราส่วน B95%C5%R6% สามารถนำไปใช้ทดแทนดินซีเมนต์สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรน้อยได้ และ อัตราส่วน B93%C7%R6% สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนหินคลุกผสมซีเมนต์สำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรมากได้

3. วัสดุแก้วกันเตาผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์ อัตราส่วน B95%C5%R6% และ B93%C7%R6% สามารถนำไปใช้สำหรับถนนสาธารณะในทางตรงที่มีความลาดชันน้อย รัศมีความโค้งไม่มากนัก และมีบริเวณแยกน้อย ตามการพิจารณาค่าความต้านทานต่อการลื่นไถลสภาพเปียก

### 3. ข้อเสนอแนะ

1. ควรพิจารณาถึงอิทธิพลของการบ่มในระยะยาวสำหรับการศึกษาในอนาคต
2. ควรศึกษาการใช้วัสดุผลพลอยได้ชนิดอื่นๆ เปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับการใช้แก้วแก้วกันตะ
3. ควรศึกษาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ได้แก่ จีโอฟอลิเมอร์ เป็นวัสดุผสมเพิ่ม
4. ควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคหลังจากมีการผสมปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม
5. ควรศึกษาคูณสมบัติการรับแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคั้นตัว ค่าความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากการล้า และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ ด้วย



## บรรณานุกรม

- กรมทางหลวง. (2556). **มาตรฐานที่ ทล.-ม. 203 มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์**. [ออนไลน์].  
วันที่ค้นข้อมูล 23 สิงหาคม 2562. จาก [http:// www.doh.go.th/doh/images/aboutus/  
standard/01/dhs203-56.pdf](http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs203-56.pdf).
- กรมทางหลวง. (2556). **มาตรฐานที่ ทล.-ม. 204 มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์**. [ออนไลน์]. วันที่ค้น  
ข้อมูล 23 สิงหาคม 2562. จาก [http:// www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/  
01/dhs204-56.pdf](http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs204-56.pdf).
- กองวิเคราะห์วิจัยและทดสอบวัสดุ. (2557). **มาตรฐานงานทาง**. กรมโยธาธิการและผังเมือง.  
การยางแห่งประเทศไทย. (2555). **สถานการณ์ราคาน้ำยางพารา**. [ออนไลน์] วันที่ค้นข้อมูล 23  
สิงหาคม 2562. จาก <http://www.rubber.co.th/rubber2012/menu5.php>.
- จุฬาทิพย์ เขียวแจ่ม และประทีป ดวงเดือน. (2552). การปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกและทรายโดยใช้  
เถ้าก้นเตา. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14**, 13-15 พฤษภาคม,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จ.นครราชสีมา.
- จอมปวีร์ จันทร์หิรัญ. (2556). การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าหนัก (Bottom Ash) เพื่อใช้ในงานทาง.  
**วารสารทางหลวง**, ฉบับที่ 2, 37-50.
- ชินิศร์ โพธิ์แดง. (2556). **การศึกษาการทดสอบความต้านทานการลื่นไถลของพื้นผิวถนน**, [ออนไลน์].  
วันที่ค้นข้อมูล 23 สิงหาคม 2562. จาก [http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/work/file2-  
2014\\_03\\_11\\_15\\_13\\_03.pdf](http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/work/file2-2014_03_11_15_13_03.pdf).
- ชยันต์ เจริญพร และสุเชษฐ์ เอี่ยมเขย. (2542). ความต้านทานการลื่นไถลของงานซ่อมบำรุงแบบ.  
**รายงานวิจัย ฉบับที่ วพ. 171**, ศูนย์วิจัยและพัฒนาทางกรมทางหลวง, กรมทางหลวง.
- ชูศักดิ์ ศิริรัตน์. (2554). **ปฐพีกลศาสตร์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท้อป.
- ทีพีไอ. (2551). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ: บริษัท ทีพีไอ จำกัด.
- ทรงลักษณ์ วิโรจน์รัตน์, สมชาย อินทะตา และเรืองรุชต์ ชีระโรจน์. (2551). ระดับการเกิดปฏิกิริยา  
ไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของเพสต์ผสมเถ้าก้นเตาบาดละเอียด โดยวิธีวิเคราะห์  
ภาพถ่าย. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13**, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช  
พัทยา, จ.ชลบุรี.
- ธิติพงศ์ หล่อพิศาลชัย, อาทิตย์ ปันณราช และณัฐพร เอ็มเจริญ. (2556). **การศึกษาคุณสมบัติทางด้าน  
กำลังของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา**. ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม  
โยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- ชนากร พุ่มแก้ว, พันสินธุ์ แก้วกำเนิด และวิทยา พลไกร. (2560). **การศึกษาศักยภาพของเถ้าก้นเตาผสมเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง**, ปรินญาณินพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล.
- ธีระพล ลดาลลิตสกุล, กิตติพงษ์ โสภากา, ยุทธพงศ์ บุญมาทัน และเศรษฐ์พงษ์ พงศาภิภาวัฒน์. (2551). **แนวทางการใช้เถ้าลอยในงานเพสเมนต์รีไซเคิล**, **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13**. 14-16 พฤษภาคม, โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา, จ.ชลบุรี.
- ประชุม คำพุด. (2550). **การนำน้ำยาราดธรรมชาติมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังและการเป็นฉนวนกันความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ -อบไอน้ำ**. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30 (ฉบับที่ 2), 363-376.
- โกคินทร์ ชำเกิด. (2554). **คุณสมบัติการบดอัดและค่าซีปียาร์ของดินเม็ดละเอียดลูกรังและหินคลุก**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- มนตรี เดชาสกุลสม, จอมปวีร์ จันทร์หิรัญ และหัตถ์ชัย ลิ้มเจริญ. (2551). **การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ Bottom Ash เพื่อใช้ในงานทาง**, **การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบปี 2551**, กรมทางหลวง.
- วิเศษ แจ่มจิตร, และประทีป ดวงเดือน. (2552). **การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา**. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14**. 13-15 พฤษภาคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จ.นครราชสีมา.
- วิจิต สุวรรณปรีชา. (2548). **การใช้ยางพาราผสมยางมะตอยฉาบผิวถนนเพิ่มปริมาณการใช้ยางพาราในประเทศลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง**. [ออนไลน์]. วันที่ค้นข้อมูล 23 สิงหาคม 2562. จาก [http://www.thailandrubber.thaigov.net/knowledge\\_1p.html](http://www.thailandrubber.thaigov.net/knowledge_1p.html).
- วุฒินันท์ เหล่ามะลอ. (2554). **การปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาผสมตะกอนดินเหนียวโดยใช้เถ้าลอยและปูนขาว**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำเร็จ รักซ้อน และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). **ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี** (พิมพ์ครั้งที่ 1) กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- สุกิจ นามพิชญ์, ชูศักดิ์ ศิริรัตน์, เอกรัตน์ รวยรวย, ศุภสิทธิ พงศ์ศิวัชสถิตย์ และสุธี ปิยะพิพัฒน์. (2549). **คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics Laboratory)**. [ออนไลน์]. วันที่ค้นข้อมูล 23 สิงหาคม 2562. จาก [https://engfanatic.tumcivil.com/tumcivil\\_1/media/Somsak-LAB/SoilSheetFull.pdf](https://engfanatic.tumcivil.com/tumcivil_1/media/Somsak-LAB/SoilSheetFull.pdf).
- สิทธิชัย ศิริพันธุ์, พิทักษ์ บุญนุ่น, กิจถาวร โลหะ และอนุรักษ์ กำเนิดวิภา. (2548). การใช้ยางธรรมชาติเพื่อพัฒนางานคอนกรีต. **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สัญญาเลขที่ RDG 4750047**. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- สมัชชา แสนสุวรรณศรี, วิชรินทร์ กาสลัก และชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์. (2549). การปรับปรุงคุณภาพดินลมหอบขอนแค้นด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าก้นเตาเพื่อใช้ในงานพื้นทาง. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11**, 20-22 เมษายน, โรงแรมเมอร์ลินบีช รีสอร์ท ป่าตอง, จ.ภูเก็ต.
- สีบสกุล ดวงเดือน, จิรวัดน์ เพลิงศรีทอง และธนาวุฒิ กองสังข์. (2551). **การปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาโดยใช้เปลือกไข่เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง**, ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อุมาพร ปฏิพันธ์ภูมิสกุล. (2552). **การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- SathyaPrabha, K. and Rajasekar, J. (2015). Experimental Study on Properties of Concrete Using Bottom Ash with Addition of Polypropylene Fibre. **International Journal of Scientific and Research Publications**, Volume 5, Issue 8.



ประวัติผู้วิจัย

## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล นายศุภชัย ไทยพุ่ม

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

3. หน่วยงานที่สามารถติดต่อได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

โทรศัพท์ 032-618500 ต่อ 4042

E-mail : supachai.tha@rmutr.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) พ.ศ. 2552

ราชมงคลรัตนโกสินทร์

วังไกลกังวล

ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา) พ.ศ. 2556

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- การเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่เกิดปัญหา (Alkali-Silica Reaction)
- การประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) กับงานทางด้านวิศวกรรม

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

1) การศึกษาพฤติกรรมโครงล็กที่ถ่ายแรงไม่ตรงจุดศูนย์กลางรวมแรงขององค์อาคาร

แหล่งทุน : งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัย ปี 2558

2) การศึกษาความแม่นยำของการทำนายพารามิเตอร์การบดอัดดินจากเส้นกราฟที่สร้างด้วยวิธีเชิงตัวเลข

แหล่งทุน : งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัย ปี 2559

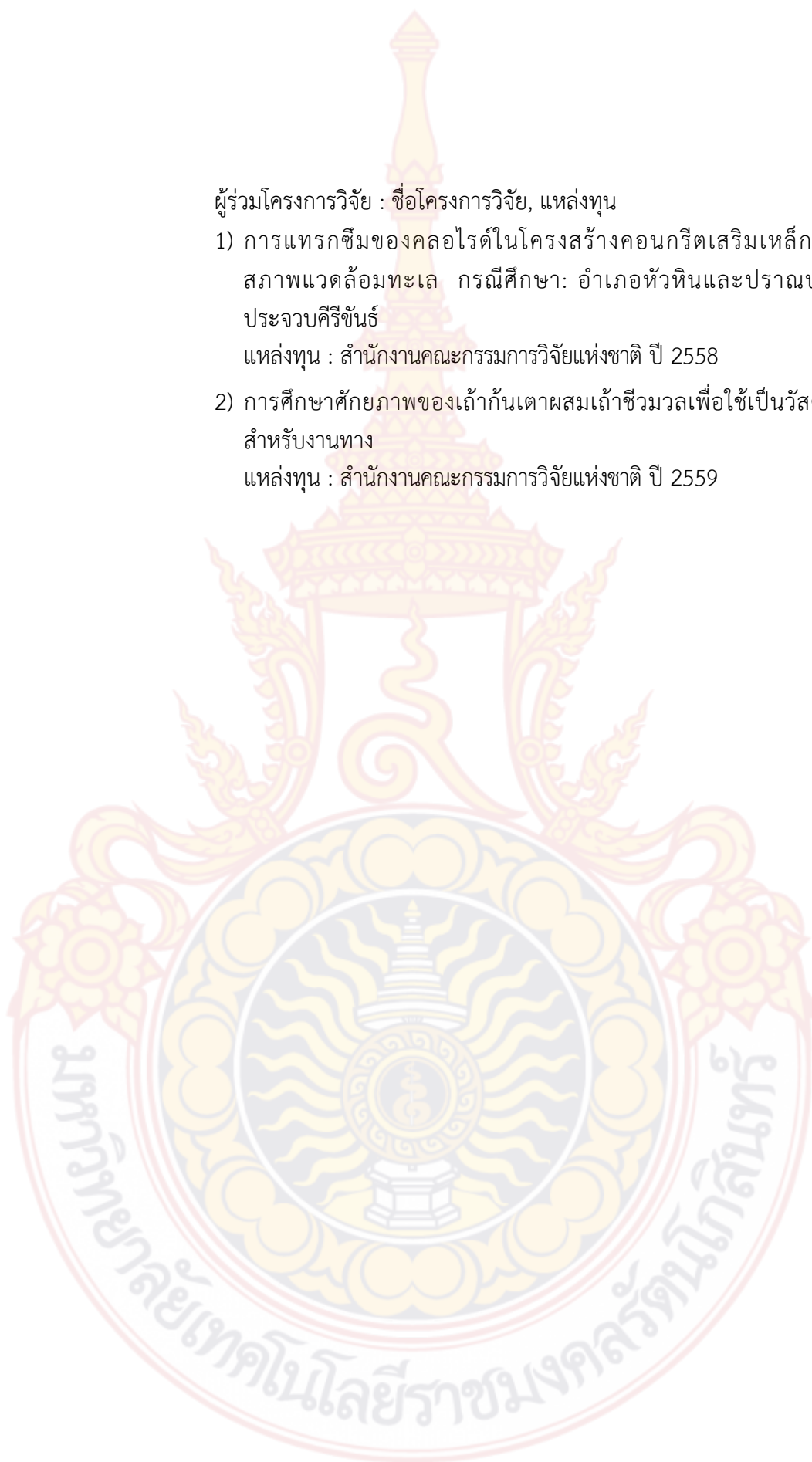
ผู้ร่วมโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย, แหล่งทุน

- 1) การแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล กรณีศึกษา: อำเภอหัวหินและปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2558

- 2) การศึกษาศักยภาพของเถ้าแก๊สเตาผสมเถ้าชีวมวลเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง

แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2559



## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชusakดิ์ 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

ปริญญาเอก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วศ.ด. (วิศวกรรมโยธา) พ.ศ. 2557

ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา) พ.ศ. 2542

พระจอมเกล้าธนบุรี

ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) พ.ศ. 2546

ราชมงคลธัญบุรี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอม ค.อ.บ. (วิศวกรรมโยธา) พ.ศ. 2538

เกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยสุโขทัย ทล.บ. (เทคโนโลยี พ.ศ. 2549

ธรรมาธิราช สารสนเทศ

ธุรกิจ)

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Microsoft Visual Basic)
- การประยุกต์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) กับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา
- ธรณีวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (Geo-environmental Engineering)

## 6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

- 1) การพัฒนาโปรแกรมคำนวณวงรอบและเส้นชั้นความสูงด้วยภาษาวิซวลเบสิก  
แหล่งทุน : งบวัสดุฝึกแผนกวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2544
- 2) โครงการวิจัยศึกษาการนำฐานข้อมูลมาประยุกต์ใช้กับการสอบทางคอมพิวเตอร์  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2545
- 3) โครงการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการอบดินเพื่อใช้หาค่าปริมาณความชื้นในมวลดิน  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2545
- 4) เครื่องมือทดสอบกำลังแบกทานของดินแบบหยั่งเบา  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2549
- 5) การพัฒนาสื่อผสมร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตสำหรับการทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550
- 6) การสร้างสื่อผสมบนระบบอินเทอร์เน็ตร่วมกับโปรแกรมทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2551
- 7) การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการทดสอบวัสดุก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธาประยุกต์ร่วมกับการใช้สื่อผสมบนระบบอินเทอร์เน็ต  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2552
- 8) การศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินผสมซีเมนต์และเบนโทไนท์เพื่อการป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในดิน  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2552
- 9) การศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเถ้าแกวผสมหินฝุ่นและปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในงานวิศวกรรมธรณีสิ่งแวดลอม  
แหล่งทุน : งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัย ปี 2556
- 10) การศึกษากำลังแบกทานของดินทรายจากผลการทดสอบการเจาะหยั่งแบบเบาโดยพิจารณาอิทธิพลของมุมปลายกรวยหัวหยั่ง  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2557

- 11) การแทรกซึมของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล กรณีศึกษา: อำเภอหัวหินและปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2558
- 12) การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบกทานของดินทรายที่ปนเปื้อนน้ำมัน  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2558
- 13) การศึกษาศักยภาพของเถ้าก้นเตาผสมเถ้าชีวมวลเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2559

ผู้ร่วมโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย, แหล่งทุน

- 1) โครงการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับงานปฏิบัติการทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2547
- 2) โครงการศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าการใช้ PVD และ Cement Column ในการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนเชิงเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรม  
แหล่งทุน : สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ประจำปี 2549
- 3) การพัฒนาขึ้นรูปวัสดุแผ่นวัสดุผสมจากเส้นใยมะพร้าว-พลาสติกโพลีเอทิลีนเพื่องานวัสดุก่อสร้างและหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์  
แหล่งทุน : งบประมาณเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนล่าง ปี 2549
- 4) การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างเหล็กด้วยโปรแกรมภาววิซวลเบสิก 6.0  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550
- 5) การพัฒนากระเบื้องยางปูพื้นจากเส้นใยมะพร้าวผสมยางธรรมชาติ  
แหล่งทุน : งบประมาณเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนล่าง ปี 2551
- 6) การออกแบบจุดต่อโครงสร้างเหล็กโดยวิซวลเบสิก 6 V.2.1  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2551
- 7) การสร้างแบบจำลองขนาดเล็กเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนในดินผ่านกำแพงดินซีเมนต์  
แหล่งทุน : งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2552

- 8) การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยการสร้างบ่อทดสอบในสนาม  
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปี 2553
- 9) การพัฒนาแนวคิดการนำเข้าสู่ข้อมูลแบบกราฟฟิกเพื่อพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กร่วมกับโครงสร้างเหล็ก  
แหล่งทุน : งบประมาณรายได้อื่นมหาวิทยาลัย ปี 2556
- 10) การประยุกต์วิธีทางกราฟฟิกร่วมกับระบบฐานข้อมูลเพื่อพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างสำหรับบ้านพักอาศัย  
แหล่งทุน : งบประมาณรายได้อื่นมหาวิทยาลัย ปี 2558
- 11) การศึกษาความแม่นยำของการทำนายพารามิเตอร์การบดอัดดินจากเส้นกราฟที่สร้างด้วยวิธีเชิงตัวเลข  
แหล่งทุน : งบประมาณรายได้อื่นมหาวิทยาลัย ปี 2559

