



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพถ้ำกันเทาโดยใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาว

Improvement of Bottom Ash by Fly Ash and Lime Powder

นามผู้วิจัย นายกิจจา เกษปรีชาสวัสดิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญาณี ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

สืบสังธี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาโดยใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาว

Improvement of Bottom Ash by Fly Ash and Lime Powder

โดย

นายกิจจา เกษปรีชาสวัสดิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิจจา เกษปรีชาสวัสดิ์ 2554: การปรับปรุงคุณภาพแก็กันเตาโดยใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาว
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชา
วิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng.
91 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาวมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแก็กันเตา
เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง โดยศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแก็กันเตา ได้แก่
การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปริมาณของเถ้าลอย เศษปูนขาว และอายุการบ่ม แก็กันเตา เถ้าลอย และ
เศษปูนขาวที่ใช้ในงานวิจัยนำมาจากไฟฟ้าบีแอลซีพี เพาเวอร์ จังหวัดระยอง สำหรับวัสดุผสมที่ใช้คือ (1)
แก็กันเตาผสมเถ้าลอยและเศษปูนขาว (2) แก็กันเตาและเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว และ (3) แก็กันเตาผสม
เศษปูนขาว โดยทำการผสมสารผสมเพิ่มที่ละ 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม

ผลการศึกษาพบว่าวัสดุผสมที่ 1 (แก็กันเตาผสมเถ้าลอยและเศษปูนขาว) ที่สัดส่วนผสมที่ดีที่สุด
คือ 60:40 โดยใช้สารผสมเพิ่ม (เถ้าลอยและเศษปูนขาว) ในสัดส่วน 75:25 ซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มที่ให้ค่า
CBR สูงที่สุดประมาณ 293% วัสดุผสมที่ 2 (แก็กันเตาและเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว) ที่สัดส่วนผสมที่ดี
ที่สุดคือ 70:30 โดยใช้วัสดุตั้งต้น (แก็กันเตาและเถ้าลอย) ในสัดส่วน 80:20 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ให้ค่า CBR
สูงที่สุดประมาณ 209% และวัสดุผสมที่ 3 (แก็กันเตาผสมเศษปูนขาว) ที่สัดส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ 60:40
ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ให้ค่า CBR สูงที่สุดประมาณ 172% ตามลำดับ ค่าดัชนีความเหนียวมีค่าลดลงเหลือ
เท่ากับร้อยละ 3 ถึง 5, ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของแก็กันเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วมีค่าสูงขึ้น,
ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลง, ค่า CBR แบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำ มีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่ม
ที่เพิ่มมากขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของแก็กันเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วมีค่าลดลง (เทียบน้ำ)
เมื่อใส่สารผสมเพิ่ม โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมที่ 1 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% จะมีค่า
ลดลงมากที่สุดประมาณ 4.105×10^{-7} cm/sec. วัสดุผสมที่ 2 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% จะมีค่าลดลง
มากที่สุดประมาณ 5.412×10^{-7} cm/sec. และวัสดุผสมที่ 3 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% จะมีค่าลดลง
มากที่สุดประมาณ 3.751×10^{-7} cm/sec.

จากการศึกษาสรุปได้ว่า วัสดุผสมทั้งสามชนิดที่สัดส่วนคือ 60:40, 70:30 และ 60:40 ตามลำดับ
มีความเป็นไปได้ที่นำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง ซึ่งค่า CBR ผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับใช้เป็นชั้นพื้นทาง
ของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

Kijja Ketprechasawat 2011: Improvement of Bottom Ash by Fly Ash and Lime Powder.
Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of
Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prateep Duangduan, M.Eng.
91 pages.

This research attempted to study the improvement of bottom ash by fly ash and lime powder. The study focussed on the effect of particles size distribution of bottom ash, quantity of fly ash and lime powder and curing times on the engineering properties of the mixes. Bottom ash, fly ash and lime powder used in the experiment were supplied by the BLCP POWER, an electricity generating plant in Rayong. Three mixes of material were (1) bottom ash as raw material and fly ash and lime powder as additives (2) bottom ash and fly ash as raw materials and lime powder as additives (3) bottom ash as raw material and lime powder as additive. Percentages (by dry weight) of additive (s) used in each mix were 10, 20, 30, 40 and 50.

Experimental results showed that maximum CBR of 293% was achieved for mix 1 when the proportion of raw material to admixtures was 60:40 where the proportion of fly ash to lime powder was 75:25. For mix 2, the maximum CBR of 209% was obtained when the raw materials and admixture were mixed at 70:30 with bottom ash : fly ash ratio of 80:20. The maximum CBR for mix 3 was 172% when bottom ash was mixed with lime powder at the proportion of 60:40. The presence of admixture(s) resulted in the drop in Plasticity Index to between 3 and 5%, but the gain in maximum dry density and lower optimum moisture content. CBR for soaked and unsoaked samples increased with curing time. The lowest coefficients of permeability of mixes were 4.105×10^{-7} , 5.412×10^{-7} and 3.751×10^{-7} cm/sec when the proportion of admixtures was 20%.

The optimum proportion of raw material : admixtures of 60:40, 70:30 and 60:40 for mix 1, 2 and 3 respectively will yield optimum CBR which comply to the standard of Department of Highways (DOH) for base-course material.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ประทีป ดวงเดือน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักเป็นอย่างสูง ที่ให้การประสิทธิประสาทวิชาความรู้และคำปรึกษา เพื่อให้เกิดแนวความคิดและความเข้าใจในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ก่อโชค จันทรวงูร ที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ ที่สำคัญขอขอบพระคุณ คุณหัตถ์ชัย ลิ้มเจริญ และบริษัท BLCP POWER จำกัดที่เอื้อเฟื้อวัสดุและทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่พร่ำสอนและให้ความรู้แก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณพี่ๆ ที่ศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานรากที่เอื้อเฟื้อข้อมูลรวมไปถึงพี่นกวรรณ อาจารย์หมอและเจ้าหน้าที่เทคนิคทุกท่านที่ประจำ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี ที่เอื้อเฟื้อด้านสถานที่ เครื่องมือและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดีจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายที่สุด ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ชาย ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนทุนการศึกษาเสมอมา รวมถึง พี่ น้องและเพื่อนๆ ที่ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือมาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน

กিজา เกษปรีชาสวัสดิ์

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	30
สรุปและข้อเสนอแนะ	82
สรุป	82
ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	91

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-94a (1995)	6
2	มาตรฐานการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์	15
3	การสรุปงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง	21
4	การเรียกชื่อและสัญลักษณ์ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	29
5	องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของโลหะในวัสดุทดสอบ	36
6	องค์ประกอบทางเคมีในเถ้าลอยเปรียบเทียบกับเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F และ C	37
7	องค์ประกอบทางเคมีในเศษปูนขาวเปรียบเทียบกับปูนขาวมาตรฐาน	37
8	ผลการทดสอบ Liquid Limit, Plastic Limit, Plastic Limit และ Specific Gravity ของวัสดุตัวอย่าง	38
9	ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน	39
10	ผลการทดสอบ Soaked และ Unsoaked CBR ของวัสดุทดสอบ	41
11	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุทดสอบ	41
12	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของสารผสมเพิ่มที่สัดส่วนต่างๆ	43
13	ผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของสารผสมเพิ่มที่สัดส่วนต่างๆ	44
14	ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ที่ปริมาณต่างๆ	47
15	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ที่ปริมาณต่างๆ	50
16	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR. ของวัสดุผสมที่ 1 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ต่างๆ ตามอายุการบ่ม	52
17	ผลการทดสอบ Soaked CBR ของวัสดุผสมที่ 1 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ต่างๆ ตามอายุการบ่ม	53
18	ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มของเถ้าก้นเตา	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม	56
20	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุตั้งต้นที่สัดส่วนต่างๆ	57
21	ผลการทดสอบ Soaked และ Unsoaked CBR ของวัสดุตั้งต้นที่สัดส่วนต่างๆ	58
22	ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของวัสดุตั้งต้น (เถ้าก้นเตาผสมเถ้าลอยสัดส่วน 80:20) ผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณต่างๆ	59
23	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเถ้าก้นเตาและเถ้าลอย ผสมสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ที่ปริมาณต่างๆ	62
24	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR ของวัสดุผสมที่ 2 (วัสดุตั้งต้นสัดส่วน 80:20) ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ ตามอายุการบ่ม	65
25	ผลการทดสอบ Soaked CBR ของวัสดุผสมที่ 2 (วัสดุตั้งต้นสัดส่วน 80:20) ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ ตามอายุการบ่ม	65
26	ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มของเถ้าก้นเตาและเถ้าลอย	67
27	ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม	68
28	ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของเถ้าก้นเตา ผสมสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ที่ปริมาณต่างๆ	69
29	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเถ้าก้นเตา ผสมสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ที่ปริมาณต่างๆ	71
30	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR. ของวัสดุผสมที่ 3 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ (เศษปูนขาว) ตามอายุการบ่ม	73
31	ผลการทดสอบ Soaked CBR. ของวัสดุผสมที่ 3 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ (เศษปูนขาว) ตามอายุการบ่ม	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
32	ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มของเถ้าก้นเตา	76
33	ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม	77
34	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมที่ 1 ในปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ	78
35	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมที่ 2 ในปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ	79
36	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมที่ 3 ในปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ	79
37	ปริมาณเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาว กับค่า CBR และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ ของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด	84

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ผลของระยะเวลาในการบ่มและอุณหภูมิในการบ่มต่อการพัฒนา กำลังของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวและเถ้าลอย	10
2	ระยะเวลาในการทำวิจัย	27
3	ขั้นตอนการวิจัยปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตา	28
4	บริเวณที่ดำเนินการจัดเก็บตัวอย่างเถ้าก้นเตา	30
5	บริเวณที่ดำเนินการจัดเก็บตัวอย่างเถ้าลอย	30
6	บริเวณที่ดำเนินการจัดเก็บตัวอย่างเศษปูนขาว	31
7	การกระจายตัวและขนาดของอนุภาคเถ้าก้นเตา	32
8	ขนาดและรูปร่างลักษณะอนุภาคของเถ้าก้นเตา	32
9	ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าก้นเตา	32
10	กราฟระหว่าง intensity และ theta ของเถ้าก้นเตาจากการตรวจวัด โดยใช้เครื่อง XRD	33
11	การกระจายตัวและขนาดของอนุภาคเถ้าลอย	34
12	ขนาดและรูปร่างลักษณะอนุภาคของเถ้าลอย	34
13	ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าลอย	34
14	กราฟระหว่าง intensity และ theta ของเถ้าลอยจากการตรวจวัด โดยใช้เครื่อง XRD	35
15	ผลการทดสอบการกระจายขนาดของวัสดุที่ใช้ทดสอบ	39
16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้น ของวัสดุที่ทดสอบ	40
17	ค่าความสัมพันธ์ความชื้นน้ำของวัสดุทดสอบ	42
18	ความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ของเถ้าลอยผสมเศษปูนขาวที่สัดส่วนต่างๆ	43
19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของสารผสมเพิ่มกับปริมาณ เศษปูนขาวที่อายุการบ่มต่างๆ	45
20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของสารผสมเพิ่มกับอายุการบ่ม	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1	47
22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1	48
23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1	48
24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1	49
25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของ แก้วกันเตาผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ที่ปริมาณต่างๆ	50
26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1	51
27	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1	51
28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1 ที่อายุการบ่มต่างๆ	54
29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่ม ของวัสดุผสมที่ 1	55
30	ความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ของแก้วกันเตาผสมแกลบที่สัดส่วนต่างๆ	57
31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR หลังการบดอัด กับปริมาณแกลบของวัสดุตั้งต้น	59
32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2	60
34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2	61
35	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2	61
36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของเถ้าก้นเตา และเถ้าลอย (วัสดุตั้งต้นสัดส่วน 80:20) ผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณต่างๆ	63
37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2	63
38	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2	64
39	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2 ที่อายุการบ่มต่างๆ	66
40	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของวัสดุผสมที่ 2	66
41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 3	70
42	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณต่างๆ	71
43	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 3	72
44	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 3	72
45	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มของวัสดุผสมที่ 3 ที่อายุการบ่มต่างๆ	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
46	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่ม ของวัสดุผสมที่ 3	75
47	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่ม ของวัสดุผสมที่ 1 ที่อายุการบ่มต่างๆ	80
48	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่ม ของวัสดุผสมที่ 2 ที่อายุการบ่มต่างๆ	80
49	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่ม ของวัสดุผสมที่ 2 ที่อายุการบ่มต่างๆ	81

การปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาโดยใช้เถ้าลอยและเศษปูนขาว

Improvement of Bottom Ash by Fly Ash and Lime Powder

คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น เช่น ในการผลิตกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เมื่อมีการนำถ่านหินเหล่านี้มาใช้ประโยชน์แล้ว สิ่งที่เป็นผลตามมาจากการเผาไหม้ถ่านหินคือ เถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาว ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำเถ้าลอยและเศษปูนขาวมาใช้ประโยชน์น้อยมาก ดังนั้นการนำเถ้าลอยและเศษปูนขาวมาใช้ประโยชน์จะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างมาก อีกทั้งยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเถ้าลอยและเศษปูนขาว และลดค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บได้อีกทางด้วย โดยในต่างประเทศได้มีการนำเถ้าลอยและเศษปูนขาวไปผสมในดินเพื่อทำเป็นดินคันทางแต่ว่ายังไม่เป็นที่แพร่หลายกันมากนัก

ในงานก่อสร้างทางโดยทั่วไปจะมีการนำดินในท้องถิ่นนั้นๆ มาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างทาง แต่ทว่าวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นนั้น อาจมีความแปรปรวนของวัสดุค่อนข้างสูง ทำให้ความสามารถในการรับแรงต่ำกว่าเกณฑ์ที่ต้องการ เพื่อให้ได้วัสดุที่ดีอาจจำเป็นต้องขนส่งมาจากแหล่งหินหรือดินที่อยู่ห่างไกล ทำให้ราคาของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างมีราคาแพง เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนวัสดุที่มีคุณภาพในการก่อสร้าง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพโดยนำเถ้าก้นเตา มาผสมกับเถ้าลอย และเศษปูนขาว ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาในการขาดวัสดุที่มีคุณภาพเพียงพอที่จะทำการก่อสร้างถนน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสัดส่วนผสมสำหรับถ้ำกันเตา ถ้ำลอย และเศษปูนขาว ที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นวัสดุงานทาง
2. ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณของถ้ำกันเตา ถ้ำลอย และเศษปูนขาว ต่อความเหนียว (Plasticity) ของวัสดุผสม
3. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้ถ้ำกันเตา ถ้ำลอย และเศษปูนขาว ได้แก่ ปริมาณของถ้ำกันเตา ถ้ำลอยและเศษปูนขาว และอายุการบ่ม
4. ศึกษาถึงอิทธิพลของค่า CBR ของวัสดุผสม เพื่อหาค่า CBR ที่สูงที่สุด
5. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำถ้ำกันเตา ถ้ำลอย และเศษปูนขาว มาใช้แทนดินลูกรังเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะด้านวิศวกรรมการทางต่อไป

ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวอย่างถ้ำกันเตา และตัวอย่างถ้ำลอยที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดนำมาจากบริษัท BLCP POWER จำกัด นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
2. สารผสมเพิ่มที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ชนิดได้แก่
 - 2.1 ถ้ำลอยที่ยังไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดจากบริษัท BLCP POWER จำกัด นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
 - 2.2 เศษปูนขาวที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

3. ศึกษาอิทธิพลของวัสดุปรับปรุงคุณภาพ ที่สัดส่วนผสมต่างๆ มีต่อคุณภาพแก็กันเตา และที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับแก็กันเตาที่ไม่ได้ผสมวัสดุปรับปรุงคุณภาพ

3.1 ทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานของ Modified Proctor Compaction Test จนได้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content)

3.2 การทดสอบค่า CBR ตามมาตรฐาน ASTM D1883-94 ทั้งแบบ Soaked CBR และ Unsoaked CBR

3.3 ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของตัวอย่างแก็กันเตา และแก็กันเตา ที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพ และวิศวกรรมของแก็กันเตาที่ผสมเถ้าลอยและเศษปูนขาว
2. ทราบถึงการพัฒนาค่า Unsoaked CBR และค่า Soaked CBR ของแก็กันเตาผสมเถ้าลอยและเศษปูนขาว
3. ทราบถึงสัดส่วนผสมของแก็กันเตาที่ใช้ผสมกับเถ้าลอยและเศษปูนขาวที่เหมาะสม
4. ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำแก็กันเตามาปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยและเศษปูนขาวเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในงานทาง

การตรวจเอกสาร

เถ้าก้นเตา

ขั้นตอนการเกิดเถ้าก้นเตา

ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหินจะถูกโม่บดเป็นผงละเอียด (Pulverized) ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ในเตา เพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นจะถูกส่งไปยังเตาเผาไหม้ถ่านหินเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระแสไฟฟ้า ภายหลังจากการเผาไหม้ถ่านหินแล้วจะเกิดเถ้า 2 ชนิด คือเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) กับเถ้าลอย (Fly Ash) คิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 20 : 80 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน ชนิดของเตาเผา กระบวนการเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้โดยเถ้าก้นเตาจะตกลงก้นถึง ส่วนเถ้าลอยจะลอยขึ้นและถูกดักจับบริเวณปล่องของโรงไฟฟ้าถ่านหิน

คุณลักษณะโดยทั่วไปของเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตา คือ กากหรือตะกอนที่มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและละเอียดปะปนกัน ซึ่งได้จากการเผาไหม้ถ่านหินตามกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้คุณภาพรองจากแร่แอนทราไซต์ มีเนื้อแข็ง สีน้ำตาลถึงดำลักษณะมันวาว มีเหลี่ยมคม มีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ พื้นผิวเป็นแบบขรุขระคล้ายกับทราย ไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค

เถ้าก้นเตา เกิดมาจากถ่านหินซึ่งถูกบดละเอียดและเผาในอุณหภูมิสูงถึงระดับ 900°C - 1500°C เช่นเดียวกันแต่เกิดการรวมตัวของอนุภาคแทนที่จะลอยออกไปแล้วตกลงสู่ข้างล่าง จึงทำให้มีลักษณะและขนาดแตกต่างกัน โดยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาต่างๆ แต่จะพบว่าขาดความไวต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่เหมือนกับเถ้าลอย จึงยังไม่มีผู้ใดนำมาใช้ประโยชน์เป็นสารเชื่อมประสานในงานก่อสร้าง แต่สามารถนำไปใช้แทนที่ทรายในคอนกรีต และทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้น

และนอกจากนี้ยังมีการประยุกต์นำไปใช้ในงานทางโครงสร้างและงานทางด้านถนน ดังตัวอย่างการศึกษาผลกระทบจากการนำเอาเถ้าก้นเตาไปใช้ในงานก่อสร้างถนนในประเทศสวีเดน โดยเป็นการศึกษา Lind *et al.* (2006) เพื่อที่จะหาผลกระทบการรั่วไหลหรือการรั่วซึมของโลหะหนัก

ที่ร่วงไหลหรือน้ำชะละลาย ที่มาจากถนนที่ทำการนำเอาเถ้าก้นเตาเป็นส่วนประกอบในการสร้างถนนระหว่างปี 2001-2004 ในประเทศสวีเดนโดยในการศึกษานี้พบว่า มีปัญหาการปนเปื้อนของ Cu ในปริมาณที่สูงในสภาวะปกติ แต่ในส่วนของโลหะหนักอื่นๆ จะพบว่าไม่มีปัญหาการปนเปื้อนมากนัก

นิพนธ์ (2552) ได้ศึกษาโอกาสในการปนเปื้อนทางสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้เถ้าก้นเตา โดยนำมาทดสอบหาสารอันตราย แล้วนำผลทดสอบมาเทียบกับค่า TTCL พบว่ามีความเข้มข้นของโลหะในปริมาณที่ไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมแห่งประเทศไทย

เถ้าลอย

ขั้นตอนการเกิดเถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้อย่างหนึ่งจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน สิ่งที่เป็นในถ่านหิน เช่น Clay, Quartz, และ feldspar จะหลอมตัวเปลี่ยนสภาพ ลอยขึ้นไปกับอากาศร้อน และผ่านไปยังบริเวณที่เย็นกว่าอย่างรวดเร็ว ทำให้แข็งตัวเป็นอนุภาคกลมขนาดเล็ก เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและเป็นผงฝุ่นไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค โดยทั่วไป ซึ่งถูกดักจับด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Electrostatic Precipitator ส่วนที่หลอมเกาะกันเป็นก้อนที่มีน้ำหนักรวมมากก็จะตกลงมาเป็นเถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

คุณลักษณะทั่วไปของเถ้าลอย

เถ้าลอยถูกแบ่งตามชนิดของถ่านหิน ในส่วนของโครงสร้าง องค์ประกอบทางด้านเคมีหรือคุณสมบัติด้านต่างๆ ของเถ้าลอยนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของถ่านหินที่นำมาใช้ในการเผาไหม้ ส่วนใหญ่พบว่าจะประกอบไปด้วยออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา เหล็ก และแคลเซียม และประมาณ 0.5-3.5 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นออกไซด์ของแมกนีเซียม โพแทสเซียม และธาตุอื่นๆ

เถ้าลอยที่ใช้เป็นสารปอซโซลาน (Artificial Pozzolan) คือ สารที่มีส่วนประกอบหลักเป็น อันธรูปของซิลิกา และ อลูมินา อนุภาคส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม หรือเหลี่ยมขึ้นกับ ชนิดของถ่านหิน กระบวนการเผา และอุณหภูมิการเผา ขนาดของเถ้าลอยมีความละเอียดสูง ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์

เถ้าลอยเมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อผสมเถ้าลอยกับน้ำอย่างพอเหมาะภายใต้อุณหภูมิปกติ แคลเซียมออกไซด์ที่มีอยู่บ้างในเถ้าลอย จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสาร แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกา และ อลูมินา ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในเนื้อเถ้าลอย กลายเป็นสารใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate) กับ แคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (calcium aluminate hydrate) ซึ่งต่างก็มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน ซึ่งกำลังความแข็งแรงของสารเชื่อมประสาน จะเพิ่มขึ้นตามอายุนับตั้งแต่เริ่มปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ปัจจุบันมาตรฐาน ASTM C618-94 (1995) กำหนดประเภทของเถ้าลอยแบบกว้างๆ ออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้อ็องค์ประกอบทางเคมี ของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผาถ่านหินเป็นตัวกำหนด

ตารางที่ 1 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-94a (1995)

คุณสมบัติ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, ร้อยละ	70.0	50.0
SO_3 , มากที่สุดร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, มากที่สุดร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้, มากที่สุดร้อยละ	6.0	6.0
ดัชนีกำลัง, น้อยที่สุดร้อยละ	75.0	75.0

เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ และบิทูมินัส และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นเถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (Low Calcium Fly Ash) ซึ่งมีคุณสมบัติการเป็นปูนซีเมนต์อยู่น้อย แต่มีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน

เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าลอยที่มีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ และซับบิทูมินัส และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15-23 เถ้าลอยประเภทนี้บางครั้งจะเรียกว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash) ซึ่งมีทั้งคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์และคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน

สำหรับประเทศไทยมีการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้อยู่บนพื้นฐานที่ว่า เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ เมื่อผสมกับน้ำในปริมาณที่พอเหมาะแล้วบ่มน้ำทิ้งไว้ จะเริ่มแข็งตัวใน 1 วัน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แข็งตัวได้ด้วยตนเอง ทั้งนี้เพราะ เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะส่วนใหญ่จะมีปริมาณ CaO อิสระปนอยู่มากพอที่จะทำปฏิกิริยา Pozzolanic ต่อไปกับ ซิลิกา และอลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของ Non-Crystalline Glass จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวขึ้นได้ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต การนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานดินส่วนใหญ่กระทำใน 2 ลักษณะ คือเถ้าลอยผสมน้ำเทพหลว และเถ้าลอยบดอัด

เศษปูนขาว

เศษปูนขาว (Lime Powder) การนำเศษปูนขาวซึ่งมี CaO เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังควบคู่ไปกับการบดอัดดินนั้นยังมิได้มีการศึกษาทั้งในประเทศและต่างประเทศมากนัก ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานตลอดจนถึงการนำไปใช้งานอย่างจริงจังต่อไปในอนาคต

คุณลักษณะทั่วไปของเศษปูนขาว

เศษปูนขาว คือ กากหรือของเหลือทิ้งที่มีลักษณะเป็นละเอียดค่อนข้างสม่ำเสมอ มีเทาหรือขาวขุ่น มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานตามธรรมชาติ เนื่องจากประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะเป็นผงร่วนไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำในปริมาณที่เหมาะสมและอายุการบ่มมากขึ้นจะแข็งตัวได้ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่แข็งตัวได้อันเนื่องมาจากเศษปูนขาวมีปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) ปนอยู่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไปกับซิลิกาและอลูมินาจนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวได้ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต

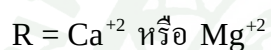
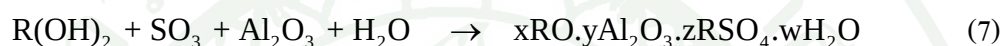
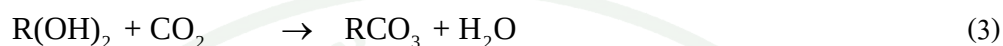
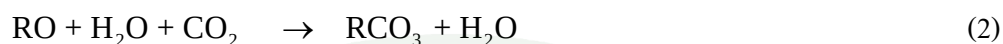
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเถ้าลอยกับปูนขาว

Chu *et al.* (1955) กล่าวว่าเถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงสีเทาซึ่งได้จากการบวนการเผาถ่านหินเมื่อถ่านหินเผาไหม้ในอากาศก็จะได้ผงเถ้าลอยที่มีลักษณะเป็นทรงกลมของซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนประกอบ เถ้าลอยมีลักษณะเหมือนเถ้าภูเขาไฟ ซึ่งชาวโรมันใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งเรียกว่าวัสดุปอซโซลาน ซึ่งไม่มีความเป็นวัสดุเชื่อมประสานด้วยตนเอง แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาวและน้ำจะมีคุณลักษณะเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและปูนขาวจึงสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินได้ หลังจากทำการผสมด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม ดินจะมีความชื้นอยู่ในสถานะ Nonplastic แต่สามารถทำการบดอัดให้มีความแข็งแรงได้

Diamond and Kinter (1965); Jambor (1963) และ Croft (1964) อธิบายในลักษณะเดียวกันว่า ปูนขาวซึ่งทำปฏิกิริยากับดินเหนียวหรือวัสดุปอซโซลานขนาดเล็กๆ เช่น Hydrous Silica จะทำให้เกิดสารละลาย Calcium Silicate ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเม็ดดินให้เกาะติดกันคล้ายๆ กับปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับเม็ดดิน

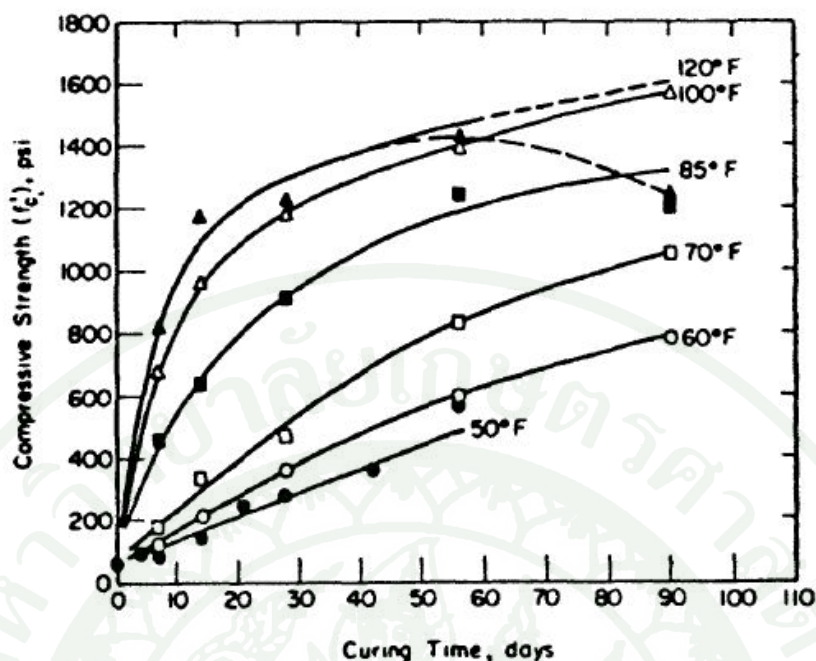
กำลังที่พัฒนาเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและปูนขาว ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (Watt and Throne, 1965)

Minnick (1967) เสนอสมการของปฏิกิริยาต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเถ้าลอยและปูนขาวดังนี้



การเพิ่มปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม และการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่ม (Minnick *et al.*, 1970) ผลของระยะเวลาในการบ่มและอุณหภูมิในการบ่มต่อการพัฒนากำลังของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวและเถ้าลอยแสดงในภาพที่ 1

ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจะต้องมีองค์ประกอบสำคัญคือ สารที่เป็นออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา และ แคลเซียมออกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ การทดลองของ Fraay *et al.* (1989) และ Hensen (1990) พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 20°C จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาในซีเมนต์เพสต์ได้เมื่ออายุระหว่าง 7-14 วัน และสามารถทำปฏิกิริยาได้จนถึงอายุมากกว่า 3 ปีครึ่ง



ภาพที่ 1 ผลของระยะเวลาในการบ่มและอุณหภูมิในการบ่มต่อการพัฒนากำลังของดินที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวและเถ้าลอย

ที่มา: Watt and Throne (1965)

ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับดินลูกรังที่ใช้ในงานทาง

ในประเทศไทยเพื่อให้การก่อสร้างงานทางมีมาตรฐานเดียวกันได้มีหน่วยงานที่กำหนดมาตรฐานต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างซึ่งหน่วยงานที่สำคัญ ได้แก่ กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยคุณสมบัติของวัสดุชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง มีข้อกำหนดดังนี้

กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532) ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุสำหรับพื้นทางดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์ค่าความสึกหรอน้อยกว่า 40 %
2. เปอร์เซ็นต์ของมวลที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกิน 2/3 ของเปอร์เซ็นต์ของมวลที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40

3. มีขนาดผลตามวิธีการหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง และต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามที่กำหนด

4. Liquid Limit ไม่เกิน 25 %

5. ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ไม่เกิน 6 %

6. ค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80 ที่การบดอัด 95 %ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด

กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532) ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุสำหรับรองพื้นทาง
ดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์ค่าความสึกหรอ ไม่เกิน 60 %

2. มีขนาดผลตามวิธีการหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง และต้องมีขนาด
ใดขนาดหนึ่งตามที่กำหนด

3 Liquid Limit ไม่เกิน 35 %

4. ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ไม่เกิน 11 %

5. มีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 25-30 %

การปรับปรุงคุณภาพดิน

การปรับปรุงคุณภาพดิน คือ วิธีการที่ทำให้วัสดุธรรมชาติที่มีคุณสมบัติไม่ดีให้มีคุณภาพดีขึ้น เพื่อให้วัสดุมีความสามารถทนทานต่อการสึกกร่อน สามารถรับน้ำหนักหรือการจราจรดีขึ้น โดยการปรับปรุงคุณภาพดินมีแนวความคิดพื้นฐานที่สำคัญ คือ การทำให้แน่น (Densification) การเชื่อมประสาน (Cementation) การเสริมแรง (Reinforcement) และการระบายน้ำ (Drainage and Consolidation)

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีทางเคมี

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization) ได้มีการใช้อย่างกว้างขวางทั่วโลก ตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ผ่านมา เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านวิศวกรรม เช่น การเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน และด้านการเปลี่ยนรูป และเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกายภาพ เช่น ปรับปรุงคุณสมบัติในด้านความเป็นพลาสติกของดิน หรือในบางครั้งก็เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านเคมี เช่น การลดความรุนแรงของดินกระจายตัวโดยวิธี Lime Treatment หรือเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆ พร้อมๆ กัน ประโยชน์ที่เห็นได้ชัดเจนสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมีก็คือ ความรวดเร็วในการก่อสร้างโดยเฉพาะงานที่ต้องการเพิ่มกำลัง (Bearing Capacity) บริเวณฐานรากดินอ่อน ในเวลาจำกัดหรือในงานทำกำแพงกันดินสำหรับงานฐานรากอาคารสูง เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนต่ออาคารข้างเคียง เป็นต้น เทคนิคชนิดนี้ใช้ได้กับดินหลายประเภท ทั้งดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) และดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesion less Soil)

Mitchell (1982) ได้กล่าวไว้ว่า การใช้สารเคมีผสมลงในดิน มีวัตถุประสงค์โดยทั่วไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินได้แก่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรซึ่งพิจารณาได้จากการบวมตัวและการหดตัวของดิน ปรับปรุงคุณสมบัติในการรับน้ำหนัก หรือพฤติกรรมของ Stress-Strain ของดินปรับปรุงการไหลซึมของน้ำที่ผ่านดิน และเพิ่มความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

สารเคมี หรือสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ ปูนขาว ซีเมนต์ ยิปซัม หรือเถ้าลอย เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย สำหรับความเหมาะสมของการเลือกใช้สารเพิ่มเสถียรภาพนั้น จะต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ในการทำงาน การจัดเก็บรักษาและต้องมียอดคงประกอบที่ไม่มีพิษ รวมทั้งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี

1. คุณสมบัติของดิน (Soil Properties) ดินตามธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเฉพาะตัว ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) อาจกล่าวสรุปได้ว่า การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle

Size Distribution) สารอินทรีย์ สารประกอบอื่นๆ เช่น เกลือซัลเฟต หรือคลอไรด์ และองค์ประกอบทางเคมี จัดเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดิน

2. สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizers) โดยทั่วไปแล้ว สารเพิ่มเสถียรภาพชนิดเดียวกันที่ผสมในปริมาณที่มากกว่าจะให้กำลังมากกว่าภายใต้เงื่อนไขตัวแปรอื่นคงที่และดินนั้นมีความชื้นเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ในทางกลับกัน สารเพิ่มเสถียรภาพต่างชนิดกันย่อมมีผลต่อการพัฒนากำลังของดินด้วยอัตราที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเชื่อมประสาน (Cementitious Compounds) รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อสารเพิ่มเสถียรภาพนั้นทำปฏิกิริยากับดิน

3. น้ำ (Water) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี เพราะน้ำจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการเพิ่มกำลังของดิน ปริมาณความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปไม่ได้ไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยา จะยังคงเหลือกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่แข็งตัวแล้วและเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้กำลังของดินต่ำกว่าความเป็นจริง

4. เทคนิคการปรับปรุง (Techniques of Stabilization) นอกจากองค์ประกอบอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว กำลังของดินยังขึ้นอยู่กับเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพ ระยะเวลาในการผสมที่แตกต่างกัน ความเร็วในการผสม เงื่อนไขในการบ่ม ตลอดจนการเตรียมสภาพดินก่อนการปรับปรุง และการดูแลหลังการผสม (Pre and post treatment) จะมีผลทำให้กำลังของดินที่แตกต่างกันไป

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเติมสารผสมเพิ่ม

1. การเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้า (Cation Exchange) โซเดียมอออนในดินจะถูกแทนที่โดยอออนบวกอื่นๆ ซึ่งมีวาเลนซ์สูงกว่า หรือมีขนาดอะตอมใหญ่กว่าโดยเรียงลำดับความสามารถในการแทนที่จากมากไปน้อย คือ $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > H^+ > Na^+ > Li^+$ สำหรับอออนลบที่พบมาก คือ SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} และ NO_3^-

2. การจับตัวกันของเม็ดดิน (Flocculation-agglomeration) การเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงไปในดินจะทำให้อนุภาคดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น กล่าวคือ อีออนบวกจากสารเพิ่มเสถียรภาพเมื่อเข้าไปในมวลดิน จะเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคของดินเหนียว สารซิลิเกตจะละลายเข้าสู่โพรงน้ำก่อให้เกิดสารเชื่อมประสาน ส่งผลให้เม็ดดินมีโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อความเข้มข้นของอีออนสูงขึ้น จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดินเหนียว ซึ่งจะทำให้ห่วงน้ำ Double Layer หดตัวแคบเข้า อนุภาคดินเหนียวจะเกิดการดึงดูดกันเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ อนุภาคของเม็ดดินจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ Liquid Limit ลดลง และ Plasticity Index ลดลง โครงสร้างของดินจะมีความมั่นคงขึ้น

3. การเชื่อมประสาน (Pozzolanic Reaction) สารซิลิกา (SiO_2) และ/หรือ Alumina (Al_2O_3) จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช้ผสมกับดินที่อุณหภูมิปกติและความชื้น ทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานจัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอันหนึ่งที่ทำให้กำลังของดินเพิ่มมากขึ้น

4. การเกิดสารประกอบคาร์บอเนต (Lime Carbonate) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ในสารเพิ่มเสถียรภาพจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 หรือ $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้มีผลเพียงเล็กน้อยในการปรับปรุงคุณภาพ แต่ก็ไม่ควรให้เกิดขึ้นมากเนื่องจากจะทำให้การทำปฏิกิริยาอื่นๆ ลดน้อยลง

จากปฏิกิริยาข้างต้น เห็นได้ว่าอาจจะมีคุณสมบัติบางประการใกล้เคียงกับส่วนผสมดินซีเมนต์ ซึ่งมีอยู่หลายมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2 โดยต่างประเทศแถบยุโรปและอเมริกามักจะออกแบบโดยยึดมาตรฐานของ Portland Cement Association ซึ่งยึดเอาการทดลอง Freezing and Thawing เป็นหลักในการประเมินความแข็งแรงของดินซีเมนต์ เพราะมีสภาพอากาศแตกต่างกันมาก ส่วนในประเทศไทยกรมทางหลวงใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมของ Portland Cement Association แต่ประเมินความแข็งแรงของดินซีเมนต์โดยใช้มาตรฐานของ Transport and Road Research Laboratory (TRRL) คือค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) จากแท่งตัวอย่างดินซีเมนต์ที่บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ปริมาณน้ำที่ Optimum Moisture Content (OMC) ภายหลังการบ่มในถุงพลาสติกเพื่อมิให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงนาน 7 วันแล้วนำไปแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมงจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) สำหรับพื้นทางดินซีเมนต์หรือมีค่าไม่น้อยกว่า 689 กิโลพาสคัล สำหรับรองพื้นทางดิน

ตารางที่ 2 มาตรฐานการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์

ลำดับที่	สถาบัน	มาตรฐานการออกแบบ
1.	กรมทางหลวง ประเทศไทย	กำลังอัดเมื่ออายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
2.	บริษัทปูนซีเมนต์ไทย	CBR ไม่น้อยกว่า 120
3.	British Road Research Laboratory	กำลังอัดเมื่ออายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
4.	กรมทางหลวง ประเทศกานา	CBR ไม่น้อยกว่า 120
5.	ประเทศแอฟริกา ส่วนมาก	CBR ไม่น้อยกว่า 120
6.	National Association of Australia State Roads Authority (NAASRA)	กำลังอัดเมื่ออายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและ CBR เมื่ออายุ 7 วันและอยู่ในสภาพแช่น้ำ 4 วัน ไม่น้อยกว่า 120

ที่มา: Ruenkairergsa (1982)

คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงไป

1. คุณสมบัติด้านความเหนียว (Plasticity Index) สารเพิ่มเสถียรภาพเมื่อเติมลงไปในดิน จะทำให้ความเหนียวของดินเปลี่ยนแปลง โดย Plasticity Index จะลดลง Plastic Limit จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพ สำหรับ Liquid Limit อาจเพิ่มหรือลดลงขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของดินที่ใช้ผสม โดยดินเหนียวที่มีค่า Plasticity สูง ค่า Liquid Limit จะลดลง ส่วนดินเหนียวที่มีค่า Plasticity ต่ำ ค่า Liquid Limit จะเพิ่มขึ้น

2. คุณสมบัติทางด้านการบดอัด (Compaction) เมื่อผสมสารเพิ่มเสถียรภาพลงไปในดินจะทำให้คุณสมบัติของดินทางด้านการบดอัดเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ลดลง และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของดินเดิมที่ใช้

3. คุณสมบัติทางด้านกำลัง (Compressive Strength) กำลังของส่วนผสมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น ชนิดของดิน ปริมาณ และชนิดของสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช้ ความหนาแน่นของการบดอัด ปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการบ่ม และปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพของดิน

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้เถ้าก้นเตา

Chapman *et al.* (1996) ได้ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าก้นเตาโดยการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ปูนขาวผสมที่จำนวนอัตราร้อยละ 1-6 พบว่าค่ากำลังแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) มีค่าเพิ่มขึ้นรวมถึงศึกษาการนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางในรูปแบบธรรมชาติ และรูปแบบหลังการปรับปรุงคุณภาพแล้ว พบว่ามีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง

Forteza *et al.* (2004) ได้มีการนำเอาเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาถ่านหินมาใช้ผสมลงในดิน เพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางและรองพื้นทางในการก่อสร้างถนนในประเทศสเปนปรากฏว่าสามารถทำให้ค่า CBR. มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเดิม

Bumjoo and Monica (2006) ได้ศึกษาหาอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาเพื่อทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยขึ้นเรื่อยมากกว่าเถ้าก้นเตา จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดต่ำลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่ามากขึ้น

มนตรี และคณะ (2543) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าถ่านหินบิทูมินัสซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ามาบตาพุด จ.ระยอง และลูกรังจากจังหวัดนครราชสีมา และจังหวัดระยองโดยผสมในอัตราส่วนผสม ดินลูกรัง:เถ้าถ่านหินบิทูมินัส ในอัตราส่วน 100:0, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30, 65:35 และ 60:40 ที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วันตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ดินลูกรังที่ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสจะมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสูงกว่าดินลูกรังที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน การทดสอบกำลังอัดพบว่าก่อนทดสอบที่ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสในอัตรา 30% ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วัน ของดินลูกรังจากจังหวัดนครราชสีมา และจากจังหวัดระยอง ได้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 60.60 ksc. และ 62.36 ksc.ตามลำดับ ค่ากำลัง

ก่อนทดสอบจะมีค่าต่ำลงเมื่อผสมเถ้านหินบิทุมินัสมากขึ้น ส่วนก่อนทดสอบที่ผสมเถ้านหินบิทุมินัสที่ต่ำกว่า 30% จะให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่จะสูงมากที่สุดที่อัตรา 30%

วิเศษ (2552) ได้ศึกษาปริมาณเถ้านเตาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้านเตามากขึ้นค่า Plasticity Index ลดลงโดยดินลูกรังเกรดผสม B มีค่าลดลงประมาณ 2-4 % ส่วนดินลูกรังเกรดผสม D มีค่าลดลงประมาณ 2-6 % ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง, ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. มีค่าเพิ่มสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วลดต่ำลงโดยให้ค่าที่เหมาะสมที่อัตราส่วนผสม 0-10 และ 25% ของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ทดสอบทันทีของดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้านเตาที่บ่มน้ำมากขึ้น แต่ในดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้านเตามีค่าสูงขึ้น ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีค่าสูงขึ้นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2-10 เท่าทั้งในดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D

จุฑาทิพย์ (2552) ได้ศึกษาปริมาณเถ้านเตาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินทรายและหินคลุก โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน, ปริมาณของเถ้านและอายุการ บ่มได้นำหินคลุกผสมเถ้านเตาในอัตราส่วน 20,25 และ 30% และดินทรายผสมเถ้านเตาในอัตราส่วน 10,20 และ 30% จากปัจจัยดังกล่าวพบว่า หินคลุกผสมเถ้านเตาและทรายผสมเถ้านเตามีการพัฒนา CBR สูงขึ้นทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้านเตา ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อผสมเถ้านเตาที่ 25% ของน้ำหนักดินแห้ง และพัฒนา CBR เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

รณภูมิ (2553) ได้ศึกษาหาคุณสมบัติของดินลูกรังผสมเถ้านเตาและเศษปูนขาว ซึ่งได้แก่การกระจายขนาดของเม็ดดิน, ปริมาณของเถ้านเตา, ปริมาณเศษปูนขาวและอายุของการบ่ม โดยแบ่งเป็นสองเกรด ได้แก่ เกรด B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยเกรด B ผสมเถ้านเตาและเศษปูนขาวกับดินในอัตราส่วน 5, 10, 15 และ 20 % และเกรด D ผสมเถ้านเตาและเศษปูนขาวกับดินในอัตราส่วน 10, 20, 25 และ 30 % โดยน้ำหนักของดินแห้ง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณเถ้านเตาเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าสูงขึ้น ค่า Unsoaked และ Soaked C.B.R. ให้ค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 10 และ 25 % ของดินลูกรังเกรด B และ D ตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

อุมาพร (2553) ได้ศึกษาหาอัตราส่วนของสารผสมเพิ่มระหว่างเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวที่เหมาะสมคือ 3:7 โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม นำมาผสมกับดินลูกรังเกรด B และ D ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มสูงขึ้น และค่า C.B.R. แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่ม

กิตติศักดิ์ (2553) ได้ศึกษาการนำเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าและปูนขาวมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง พบว่า เมื่อผสมปริมาณเถ้าก้นเตาและปูนขาวเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความเหนียวของดินลดลง, ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง, ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น, ปริมาณเถ้าก้นเตาและปูนขาวที่ทำให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. มีค่าเพิ่มสูงมากที่สุด คือ ประมาณ 40% ในดินลูกรังเกรดผสม B และ D เมื่อผสมเกินกว่าค่านี้กำลังจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น, ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นประมาณ 10 เท่าในดินลูกรังเกรด B และสูงขึ้นประมาณ 9 เท่า ในดินลูกรังเกรด D และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้ดินลูกรังเกรด B มีค่าความชื้นน้ำต่ำลงประมาณ 6 เท่าและลูกรังเกรด D มีค่าต่ำลงประมาณ 8 เท่า

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการใช้เถ้าลอย

อนิรุทธิ์ และสุเทพ (2530) ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังในกลุ่ม GC, GP-GM และดินทรายปนดินเหนียวด้วยเถ้าลอยแม่เมาะพบว่า การผสมเถ้าลอยในตัวอย่างดินเม็ดละเอียดจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดลดลง ส่วนในดินเม็ดหยาบนั้น จะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดลดลง ส่วนกำลังอัดของดินผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด โดยอัตราส่วนผสมสูงสุดจะอยู่ในช่วงระหว่าง 15-25 % เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของดินผสมเถ้าลอยกับดินผสมซีเมนต์ และปูนขาว พบว่า กำลังอัดของดินผสมเถ้าลอยจะมีค่าต่ำกว่าดินที่ผสมปูนซีเมนต์ แต่สูงกว่าดินที่ผสมปูนขาว

พลการ (2542) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้ผสมดินลูกรัง โดยใช้ดินลูกรังกลุ่ม SC ที่นำมาจากจังหวัดระยอง และใช้เถ้าลอยลิกไลต์ จากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยต่อดินลูกรังเท่ากับ 0:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนักของดิน จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะมี

ค่าลดลง สำหรับผลการศึกษาค่า CBR. พบว่าค่า Unsoaked CBR. มีกำลังเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และไม่สูญเสียความแข็งแรงเมื่อนำตัวอย่างไปแช่น้ำ แต่ถ้าปริมาณเถ้าลอยลิกต์ในดินมากกว่า 1:3 พบว่ากำลังกลับลดลง การบวมตัวจะมีค่าประมาณ 80% เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินลูกรังที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย

วินัย และคณะ (2543) ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในดินลูกรังและอายุการบ่ม ซึ่งมีผลต่อค่า CBR. ของดินลูกรังโดยอาจสรุปได้ว่า ค่า Unsoaked CBR. ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่าแปรผันกับปริมาณเถ้าลอย และอายุการบ่ม ส่วนค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด โดยมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับปริมาณเถ้าลอย ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดแปรผกผันกับปริมาณเถ้าลอย คือมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นทั้งนี้เพราะการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้ส่วนละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเนื่องจากการบดอัดมีค่าลดลง ค่า CBR. ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า CBR. ของดินลูกรังที่ไม่ผสมเถ้าลอย

พิทักษ์พงษ์ และสุรศักดิ์ (2544) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง โดยใช้ดินลูกรังจากจังหวัดสุพรรณบุรีมาผสมกับเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของดินแห้ง ผลการศึกษารอบอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานพบว่าเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะมีค่าลดลงตามลำดับ ด้านกำลังของดินพบว่า ค่า CBR. และค่า Unconfined Compressive Strength ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่ม และปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการบวมตัวลดลงประมาณ 10% เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย

ศรัณรัตน์ (2545) ได้ศึกษาการพัฒนากำลังของดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ โดยเน้นสัดส่วนผสมของเถ้าลอยปริมาณมาก สารเชื่อมประสานที่ใช้ในกาปรับปรุงกำลังของดินเหนียวอ่อนได้แก่ ปูนขาว และปูนขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน 1:1, 1:3, 1:6 และ 1:9 โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณ 100, 150, 200 และ 250 กก./ม.³ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสานเท่ากับ 0.8 บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 4, 7, 14, 28, 90 และ 180 วัน จากนั้นจึงทำการทดสอบหาค่ากำลังของดินโดยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ผลการศึกษาพบว่าดินผสมปูนขาวมีการพัฒนากำลังอย่างสม่ำเสมอทั้งในระยะแรกและระยะยาว โดยกำลังจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมที่ค่า 200 กก./ม.³ สำหรับดินที่ใช้ปูนขาวและเถ้าลอยรวมกัน การพัฒนากำลังจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเถ้าลอยที่ผสมและปริมาณสารเชื่อมประสาน ที่อัตราส่วน 1:1

และที่ปริมาณสารเชื่อมประสาน 200 และ 250 กก./ม.³ ดินมีการพัฒนากำลังอย่างชัดเจน ในขณะที่ดินมีการพัฒนากำลังปานกลางที่ 100 และ 150 กก./ม.³ สำหรับที่อัตราส่วน 1:3 ดินมีการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อย จากการทดลองพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนที่มากกว่า 1:3 ทำให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินลดลงอย่างมาก

สมพร (2548) ได้ศึกษาพบว่าการใช้เถ้าลอยในการปรับปรุงคุณภาพดินพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้น ค่าดัชนีความเหนียวจะลดลงประมาณ 1-4% ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดส่วนมากคงที่ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลง ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยและอายุการบ่มซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่า CBR. ที่อายุการบ่ม 3, 7 และ 14 วันกับค่า CBR. ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 50%, 70% และ 85% ตามลำดับ

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการใช้ปูนขาว

การเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ทำให้เกิดการจับตัวของอนุภาคเม็ดดินดีขึ้น เป็นผลให้กำลังของดินสูงขึ้น Sherard *et al.* (1977) พบว่า ปริมาณของปูนขาวที่ใช้ในการลดระดับการกระจายตัวอยู่ระหว่าง ร้อยละ 1.00 – 2.00 โดยน้ำหนักดินแห้ง ดินเหนียวแม้จะมีการปรับปรุงด้วยปริมาณปูนขาวเพียงเล็กน้อย ก็มีผลทำให้ดินนั้นจะมีความเปราะเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มของการแตกร้าวได้ง่าย

Hausamann (1990) ได้ศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าผสมกับดินก็จะทำให้กำลังสูงขึ้น แต่อัตราการเพิ่มกำลังจะช้ากว่าอัตราการเพิ่มกำลังของดินผสมซีเมนต์ สำหรับการเพิ่มของกำลังยังขึ้นอยู่กับ ขนาดและความสูงของแท่งตัวอย่าง ความหนาแน่นของการบดอัด ปริมาณความชื้น ระยะเวลาการบ่ม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการบ่ม และปริมาณปูนขาวที่เข้าไปผสม

ตารางที่ 3 การสรุปงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง

นักวิจัย	สารผสมเพิ่ม				ผลการวิจัย
	เถ้าก้น	เถ้า	ปูน	เศษปูน	
	เตา	ลอย	ขาว	ขาว	
Chu <i>et al.</i> (1955)		●	●		ปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและปูนขาวสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินได้
Diamond and Kinter (1965); Jambor (1963); Croft (1964)		●	●		ปูนขาวซึ่งทำปฏิกิริยากับดินเหนียวหรือวัสดุปอสโซลานขนาดเล็กๆ จะทำให้เกิดสารละลาย Calcium Silicate ซึ่งจะทำให้เกิดการเชื่อมประสานเม็ดดินให้ติดกัน
Watt and Throne (1965)		●	●		กำลังที่พัฒนาเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและปูนขาว ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน
Minnick <i>et al.</i> (1970)		●	●		การเพิ่มปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอสโซลานสามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม และการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่ม
Fraay <i>et al.</i> (1989); Hensen (1990)		●	●		ปฏิกิริยาปอสโซลานที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 20°C จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาในซีเมนต์เพสต์ได้เมื่ออายุระหว่าง 7-14 วัน และสามารถทำปฏิกิริยาได้จนถึงอายุมากกว่า 3 ปีครึ่ง
Chapman <i>et al.</i> (1996)	●		●		เมื่อเถ้าก้นเตาผสมปูนขาว 1-6% พบว่าสามารถนำเถ้าก้นเตาไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางได้
Forteza <i>et al.</i> (2004)	●				นำเถ้าก้นเตาผสมลงในดินพบว่า CBR สูงขึ้นและใช้เป็นชั้นพื้นทางหรือรองพื้นทางได้

ตารางที่ 3 (ต่อ)

นักวิจัย	สารผสมเพิ่ม				ผลการวิจัย
	เถ้าก้น	เถ้า	ปูน	เศษปูน	
	เตา	ลอย	ขาว	ขาว	
Bumjoo and Monica (2006)	●	●			นำเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยผสมกัน พบว่าเมื่อเถ้าลอยมากขึ้น γ_d ลดลง OMC สูงขึ้น
มนตรี และคณะ (2543)	●				ดินลูกรังผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัส 30% ให้กำลังอัดมากที่สุดที่อายุบ่ม 90 วัน
วิเศษ (2552)	●				ดินลูกรังเกรด B และ D ผสมเถ้าก้นเตาที่ 0-10 และ 25% ตามลำดับ ทำให้ค่า CBR แบบ Unsoaked และ Soaked มีค่าสูงที่สุด
จุฑาทิพย์ (2552)	●				หินคลุกและทรายที่ผสมเถ้าก้นเตาที่ 25% ทำให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR มีค่าสูงที่สุด
รณภูมิ (2553)	●		●	●	เมื่อปริมาณเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น ค่า C.B.R. แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำให้ค่าสูงที่สุดที่อัตราส่วนผสม 10 และ 25% ของดินลูกรังเกรด B และ D ตามลำดับ
อุมาพร (2553)	●			●	อัตราส่วนระหว่างเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวที่เหมาะสมคือ 3:7 นำมาผสมกับดินลูกรังเกรด B และ D ให้ค่า C.B.R. แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำมีค่าสูงขึ้น
กิตติศักดิ์ (2553)	●		●		ปริมาณเถ้าก้นเตาและปูนขาวที่ทำให้ค่า C.B.R. แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำมีค่าสูงที่สุดคือประมาณ 40% ในดินลูกรังเกรดผสม B และ D ตามลำดับ

ตารางที่ 3 (ต่อ)

นักวิจัย	สารผสมเพิ่ม				ผลการวิจัย
	เถ้าก้น เตา	เถ้า ลอย	ปูน ขาว	เศษปูน ขาว	
อนิรุทธิ์ และ สุเทพ (2530)		●			กำลังอัดของดินผสมเถ้าลอยจะมีค่าสูง ที่สุด ที่อัตราส่วนผสมสูงสุดจะอยู่ในช่วง ระหว่าง 15–25%
พลาการ (2542)		●			อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินลูกรัง 1:3 ให้ค่า CBR. สูงที่สุด
วินัย และคณะ (2543)		●			ค่า CBR. ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่า แปรผันกับปริมาณเถ้าลอย และอายุการ บ่ม
พิทักษพงษ์ และ สุรศักดิ์ (2544)		●			ค่า CBR. และค่ากำลังรับแรงอัดของดิน ลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตาม ระยะเวลาบ่ม และปริมาณเถ้าลอยที่ เพิ่มขึ้น
ศรัณรัตน์ (2545)		●	●		ดินที่ผสมปูนขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วน ผสมของเถ้าลอยและปูนขาว 1:1 ดินจะมี การพัฒนากำลังอย่างชัดเจน
สมพร (2548)		●			ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. ของดิน ลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตาม ปริมาณเถ้าลอยและอายุการบ่ม
Sherard <i>et al.</i> (1977)			●		ดินเหนียวแม้จะมีการปรับปรุงด้วย ปริมาณปูนขาวเพียงเล็กน้อย ก็มีผล ทำให้ดินนั้นจะมีความเปราะเพิ่มมากขึ้น
Hausamann (1990)			●		เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าผสมกับดิน ก็จะทำให้กำลังสูงขึ้น แต่อัตราการเพิ่ม กำลังจะช้ากว่าอัตราการเพิ่มกำลังของดิน ผสมซีเมนต์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ชุดเครื่องมือทดสอบ Natural Water Content (มาตรฐาน ASTM D 2216-92)
2. ชุดเครื่องมือทดสอบ Cone Penetrometer (มาตรฐาน BS 1377:1990)
3. ชุดเครื่องมือทดสอบ Atterberg 's Limits Test (มาตรฐาน ASTM D 2216-80 , D 4318-98)
4. ชุดเครื่องมือทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน (มาตรฐาน ASTM D 422-63)
5. ชุดเครื่องมือทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (มาตรฐาน ASTM D 854-98)
6. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือน Unconfined Compressive Strength (มาตรฐาน ASTM D2166-00)
7. ชุดเครื่องมือทดสอบการบดอัดดินแบบ Modified Proctor Compaction Test (มาตรฐาน ASTM D 1557-91)
8. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบ California Bearing Ratio (มาตรฐาน ASTM D 1883-94)
9. ชุดเครื่องมือทดสอบความชื้นน้ำของดิน (มาตรฐาน ASTM D 2434-68)

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. เถ้าหนัก และเถ้าลอยที่ใช้ได้มาจากการเผาถ่านหิน จากบริษัท BLCP POWER นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

2. เศษปูนขาวได้มาจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

3. น้ำที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำประปา

วิธีการ

คำจำกัดความ

ในงานวิจัยนี้แบ่งวัสดุผสมเป็น 3 ชนิดได้แก่

1. วัสดุผสมที่ 1 คือ วัสดุผสมที่ได้จากการผสมเถ้าก้นเตาด้วยเถ้าลอยและเศษปูนขาว
วัสดุตั้งต้นที่ 1 : เถ้าก้นเตา
สารผสมเพิ่มที่ 1 : เถ้าลอยและเศษปูนขาว
2. วัสดุผสมที่ 2 คือ วัสดุผสมที่ได้จากการผสมเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยด้วยเศษปูนขาว
วัสดุตั้งต้นที่ 2 : เถ้าก้นเตาและเถ้าลอย
สารผสมเพิ่มที่ 2 : เศษปูนขาว
3. วัสดุผสมที่ 3 คือ วัสดุผสมที่ได้จากการผสมเถ้าก้นเตาด้วยเศษปูนขาว
วัสดุตั้งต้นที่ 3 : เถ้าก้นเตา
สารผสมเพิ่มที่ 3 : เศษปูนขาว

โดยมีขั้นตอนการวิจัย (ภาพที่ 2) ดังต่อไปนี้

1. ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างวัสดุเช่น เถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาวด้วยการทดสอบดังนี้

ก. Natural Water Content (ASTM D 2216-92)

ข. การกระจายขนาดของเม็ดดิน (ASTM D 422-63)

ค. ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (ASTM D 854-98)

ง. Atterberg's Limits Test (ASTM D 2216-80, D 4318-98)

จ. Cone Penetrometer (BS 1377:1990)

ฉ. จำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification (ASTM D 2487-69)

2. ทดสอบการบดอัดวัสดุตั้งต้นที่สัดส่วนต่างๆ ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

3. ทดสอบค่า CBR แบบ Soaked และ Unsoaked ของวัสดุตั้งต้นที่สัดส่วนต่างๆ ซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น เพื่อหาสัดส่วนที่มีค่า CBR สูงที่สุด

4. นำสัดส่วนของวัสดุตั้งต้นที่มีค่า CBR สูงสุดที่เตรียมไว้ มาทดสอบหาค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plastic Index

5. ทดสอบการบดอัดสารผสมเพิ่มที่สัดส่วนต่างๆ ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

6. ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของสารผสมเพิ่มที่สัดส่วนต่างๆ ซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น

7. นำสัดส่วนของสารผสมเพิ่มที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด มาทดสอบหาค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plastic Index

8. นำวัสดุตั้งต้นมาผสมกับสารผสมเพิ่ม เช่น สัดส่วนผสมที่ 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 ของน้ำหนักแห้งโดยเพิ่มสารผสมเพิ่มเรื่อยๆ เป็นขั้น และนำมาทดสอบหาค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plastic Index

9. ทดสอบการบดอัดวัสดุผสมที่สัดส่วนต่างๆ ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

10. ทดสอบค่า CBR แบบ Soaked และ Unsoaked ของวัสดุผสมที่สัดส่วนต่างๆ ซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน

11. ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของถ้ำกั้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว ซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น โดยถ้ำกั้นเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว จะทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำทันทีหลังการบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

12. ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลาในการทำวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทำวิจัยตั้งแต่เดือนมีนาคม พ.ศ.2553 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554

แผนการดำเนินงานวิจัย	2553										2554		
	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ตรวจสอบเอกสาร													
เตรียมตัวอย่างวัสดุ และ อุปกรณ์													
ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น													
ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม													
วิเคราะห์ผลการวิจัย													
สรุปผลการวิจัย													
จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์													

ภาพที่ 2 ระยะเวลาในการทำวิจัย



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการวิจัยปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตา

การเรียกชื่อและสัญลักษณ์ของตัวอย่างวัสดุ

การเรียกชื่อตัวอย่างวัสดุผสมชนิดต่าง ๆ นั้น มีวิธีเรียกชื่อดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเรียกชื่อและสัญลักษณ์ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์	ความหมาย
BA	เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)
FA	เถ้าลอย (Fly Ash)
LP	เศษปูนขาว (Lime Powder)
FLP	สารผสมเพิ่มที่ได้จากการผสมเถ้าลอยและเศษปูนขาว
BF	วัสดุตั้งต้นที่ได้จากการผสมเถ้าก้นเตาและเถ้าลอย
ZAV	Zero air void line (เส้นแสดงปริมาณอากาศเป็นศูนย์)
Un	การทดสอบ CBR แบบไม่แช่น้ำ
So	การทดสอบ CBR แบบแช่น้ำ

ผลและวิจารณ์

คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาว

ตัวอย่างเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาวที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้จากการสุ่มตัวอย่างจาก กองเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาว ของบริษัท BLCP POWER นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมืองระยอง จังหวัดระยอง ดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4 บริเวณที่ดำเนินการจัดเก็บตัวอย่างเถ้าก้นเตา



ภาพที่ 5 บริเวณที่ดำเนินการจัดเก็บตัวอย่างเถ้าลอย

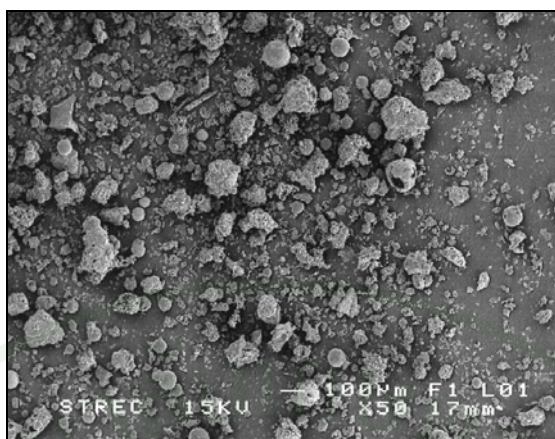


ภาพที่ 6 บริเวณที่ดำเนินการจัดเก็บตัวอย่างเศษปูนขาว

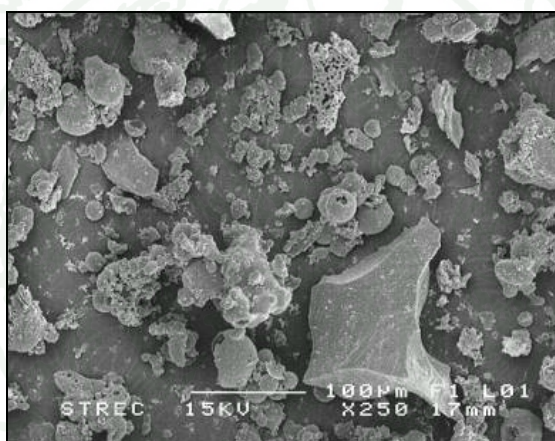
คุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางเคมีของเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตาที่นำมาใช้ในการทดสอบมาจากการเผาถ่านหินบิทูมินัสที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งเป็นกากหรือตะกอนที่มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและละเอียดปะปนกัน ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินมีเนื้อแข็ง สีนํตาลถึงดำ ลักษณะมันวาว และจากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ตรวจสอบที่กำลังขยายแตกต่างกัน จะพบว่าอนุภาคของเถ้าก้นเตานั้นมีขนาดที่แตกต่างและรูปร่างที่แตกต่างกันไป โดยจะมีลักษณะพื้นผิวทั้งที่เรียบและที่เป็นเป็นแบบขรุขระ และมีลักษณะความเป็นเหลี่ยมคมที่มุมของอนุภาค ดังแสดงไว้ดังภาพที่ 7-9 ไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค

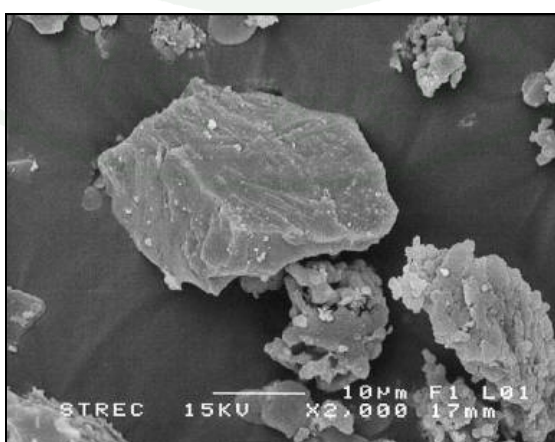
จากผลการวิเคราะห์พบว่า กราฟ XRD ของเถ้าก้นเตาที่ได้มีองค์ประกอบของสารหลายชนิด (ภาพที่ 10) ซึ่งเมื่อเทียบกับกราฟของสารมาตรฐานคาดว่า เถ้าก้นเตานี้มีองค์ประกอบของสารประเภทซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ quartz, mullite, hematite และ cristobalite และเมื่อพิจารณาจากรูปแบบของเส้นกราฟ แสดงให้เห็นว่าสารที่เป็นองค์ประกอบของเถ้าก้นเตานี้มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นผลึกซึ่งมีการจัดเรียงตัวของระนาบผลึกที่มีความเป็นระเบียบ



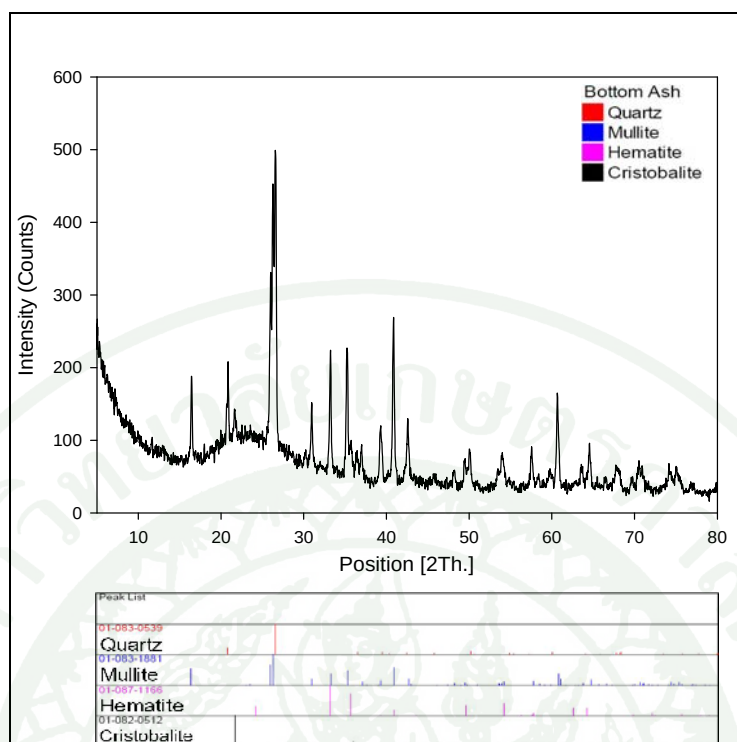
ภาพที่ 7 การกระจายตัวและขนาดของอนุภาคเกาะกันเตา



ภาพที่ 8 ขนาดและรูปร่างลักษณะอนุภาคของเกาะกันเตา



ภาพที่ 9 ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเกาะกันเตา

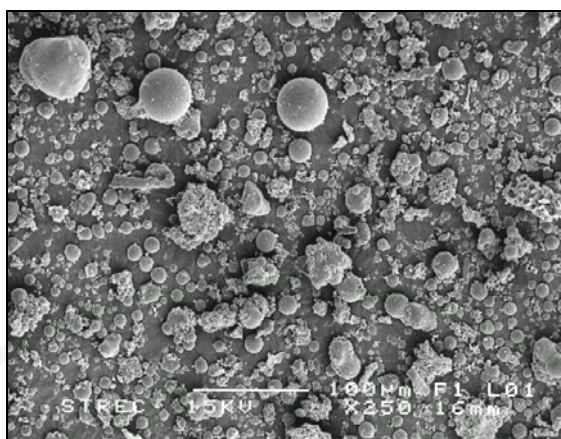


ภาพที่ 10 กราฟระหว่าง intensity และ theta ของเถ้าก้นเตาจากการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD

คุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอย

ส่วนเถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงสีเทา คล้ายกับสีของซีเมนต์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมครอน จนถึง 150 ไมครอน จากภาพถ่ายเถ้าก้นเตาจากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังภาพที่ 11-13 มีลักษณะค่อนข้างกลม หรืออาจพบรูปร่างที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนเผา และชนิดของถ่านหิน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้ในงานวิจัยจึงอาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C618-92a

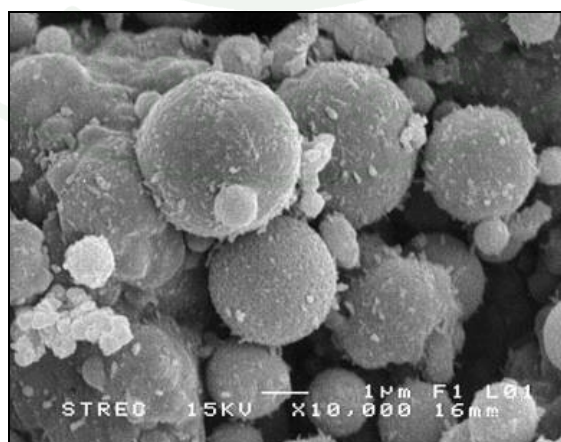
ส่วนผลการวิเคราะห์พบว่า กราฟ XRD ของเถ้าลอยพบองค์ประกอบของสารหลายชนิด ซึ่งเมื่อเทียบกับกราฟของสารมาตรฐานคาดว่า เถ้าลอยนี้มีองค์ประกอบของสารได้แก่ quartz, mullite และ hematite ซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนใหญ่ดังภาพที่ 14



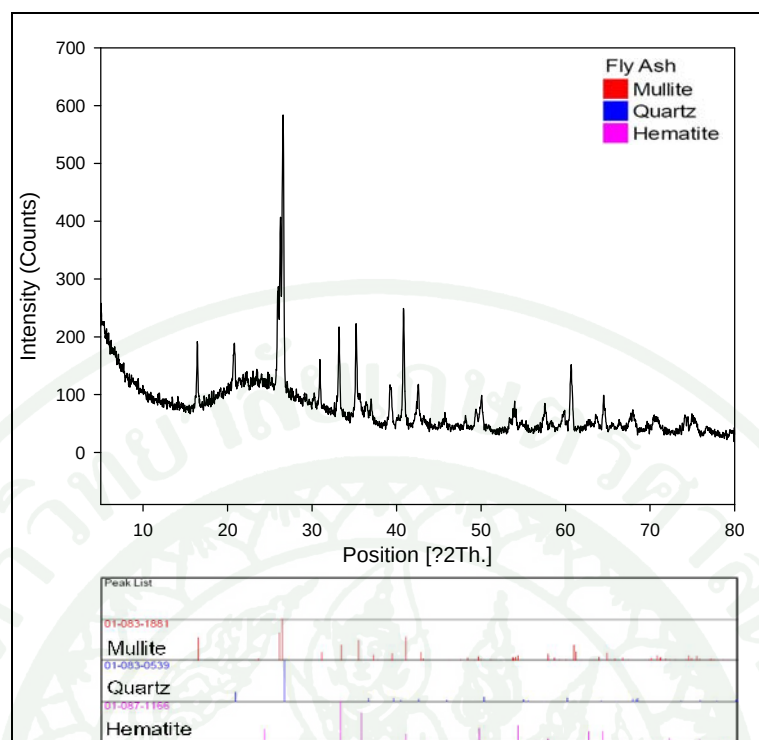
ภาพที่ 11 การกระจายตัวและขนาดของอนุภาคเถ้าลอย



ภาพที่ 12 ขนาดและรูปร่างลักษณะอนุภาคของเถ้าลอย



ภาพที่ 13 ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าลอย



ภาพที่ 14 กราฟระหว่าง intensity และ theta ของเถ้าลอยจากการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเศษปูนขาว

เศษปูนขาว คือ กากหรือของเหลือทิ้งที่มีลักษณะเป็นละเอียดค่อนข้างสม่ำเสมอ มีสีน้ำตาลหรือขาวขุ่น เนื่องจากประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะเป็นผงร่วนไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำในปริมาณที่เหมาะสมและอายุการบ่มมากขึ้นจะแข็งตัวได้ ทั้งนี้คุณสมบัติดังกล่าวเกิดจากมีปริมาณปูนขาวอิสระปนอยู่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO) ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอลิซัลชันต่อไปกับซิลิกาและอลูมินาจนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวได้ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต (CAH)

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาวที่สำคัญอีก การทดสอบหนึ่งคือการทดสอบ X – Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อทราบปริมาณธาตุที่เป็นสารประกอบในรูปออกไซด์ของโลหะ ดังแสดงในตารางที่ 5 เนื่องจากสารผสมเพิ่มที่ทำการปรับปรุงควรมีคุณสมบัติเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่เถ้าก้นเตาที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบในรูปของออกไซด์โดยวิธีการ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกับถ้ำลอย (ตารางที่ 5) ซึ่งมีข้อกำหนดขององค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยจะใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์โดยแบ่งออกเป็นชั้นคุณภาพของถ้ำลอยออกเป็นชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F มีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เป็นไปตามตารางที่ 6

ส่วนผลการวิเคราะห์ของเศษปูนขาวโดยวิธีการ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) นำมาเปรียบเทียบกับปูนขาวมาตรฐาน (มอก. 319 เล่ม 1-2551) พบว่ามีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานที่ระบุไว้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของโลหะในวัสดุทดสอบ

วัสดุ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)									
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	TiO ₂	MnO ₂	Fe ₂ O ₃
เถ้าก้นเตา	0.97	0.82	22.74	55.92	0.39	0.05	2.27	2.15	0.18	11.88
ถ้ำลอย	0.82	0.69	22.27	60.13	0.84	0.47	1.75	1.83	0.10	6.72
เศษปูนขาว	<0.01	1.05	2.13	7.46	0.08	29.79	52.65	0.23	0.08	5.01

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าก้นเตา ถ้ำลอย และเศษปูนขาว

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตา ถ้ำลอย และเศษปูนขาว ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ ค่า Liquid Limit, Plastic Limit, Plasticity Index และ Specific Gravity ซึ่งผลการทดสอบต่างๆ ได้แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีในถ้ำลอยเปรียบเทียบกับถ้ำลอยชั้นคุณภาพ F และ C

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพถ้ำลอย		ตัวอย่าง ถ้ำลอย
	F	C	
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินา และเฟอร์ริก ออกไซด์ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	>70	>50	89.12
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), max %	<10	>10	1.75
ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), max %	-	-	0.69
ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5.0	5.0	0.47
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0	15.00
ปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (Loss on Ignition), max %	6.0	6.0	ไม่มีข้อมูล
อัลคาไลน์ในรูปของไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5	0.82

ที่มา: ASTM C618-92a (1994)

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีในเศษปูนขาวเปรียบเทียบกับปูนขาวมาตรฐาน

คุณลักษณะ	คุณลักษณะทางเคมีและฟิสิกส์ของปูนสุก			ตัวอย่าง เศษปูนขาว
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	ชั้นคุณภาพ 3	
แคลเซียมออกไซด์ ไม่น้อยกว่า	90	88	85	52.65
ซิลิกอนไดออกไซด์ ไม่เกิน	1.0	1.5	2.0	7.46
คาร์บอนไดออกไซด์ ไม่เกิน	2.5	3.0	3.5	—
สิ่งเจือปน				
- ไอร์ออน (III) ออกไซด์	0.4	0.4	0.4	—
- ซัลเฟอร์	0.5	1.0	1.5	—
- อะลูมิเนียมออกไซด์	1.0	1.0	1.0	2.13
- แมกนีเซียมออกไซด์	1.8	2.0	2.0	1.05
ปริมาณสารที่ไม่ละลายน้ำ ไม่เกิน	7.0	9.0	12.0	—

ที่มา: มอก. 319 เล่ม 1-2551

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบ Liquid Limit, Plastic Limit, Plastic Limit และ Specific Gravity ของวัสดุตัวอย่าง

คุณสมบัติเบื้องต้น	เถ้าก้นเตา	เถ้าลอย	เศษปูนขาว
ปริมาณความชื้น, %	11.93 – 12.66	14.84 – 15.59	ไม่มี
ความถ่วงจำเพาะ	2.32	2.26 – 2.27	2.86 – 2.90
Liquid Limit, %	ไม่มี	35.91 – 37.51	ไม่มี
Plastic Limit, %	ไม่มี	23.97 – 28.65	ไม่มี
Plasticity Index, %	ไม่มี	8.87 – 11.93	ไม่มี

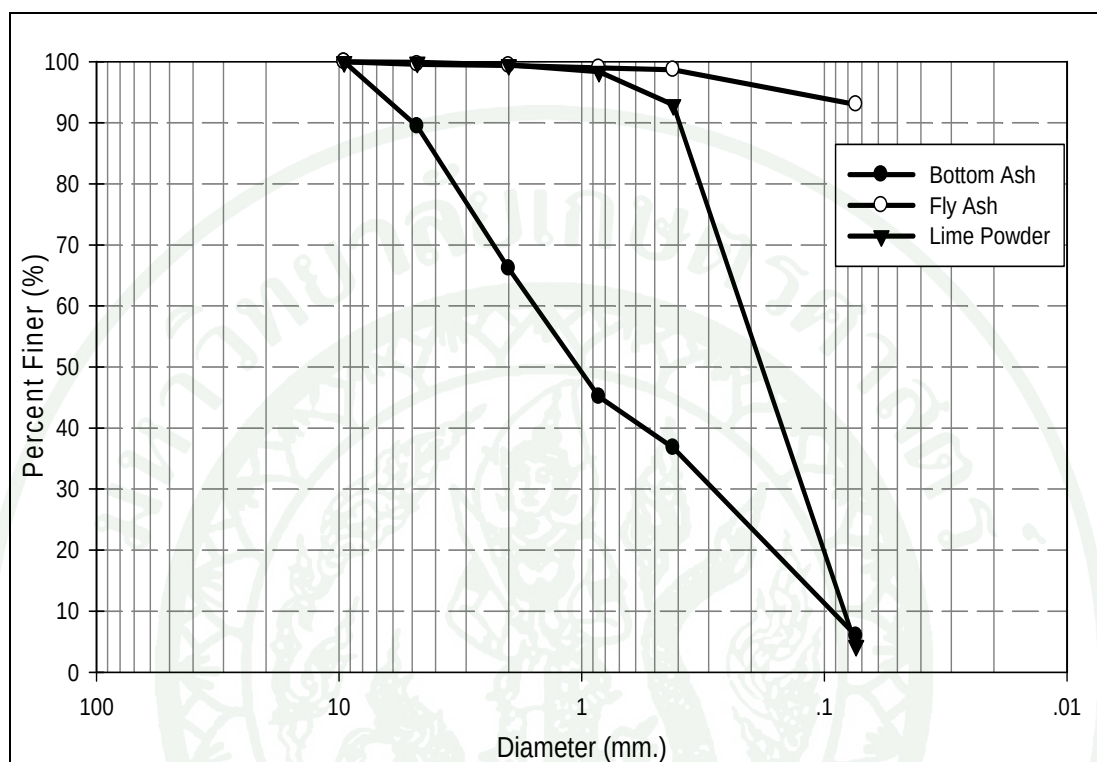
ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาวได้แสดงไว้ดังภาพที่ 15 ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของเถ้าก้นเตาเป็นแบบมีขนาดไม่สม่ำเสมอ (Poorly-graded) การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification และ AASHTO พบว่าตัวอย่างเถ้าก้นเตาอยู่ในกลุ่ม SP และ A-3(0) โดยเถ้าลอยที่ทำการอบแล้วเมื่อนำมาทดสอบจัดอยู่ในกลุ่ม ML จัดเป็นทรายแป้งที่มีขนาดเล็กมากและมีความเหนียวน้อยและจำแนกตามระบบ AASHTO พบว่าเถ้าลอยจัดอยู่ในกลุ่ม A-4(8) ส่วนเศษปูนขาวเมื่อจำแนกตามระบบ AASHTO พบว่าเศษปูนขาวเมื่อนำมาทดสอบจะพบว่าเศษปูนขาวจัดอยู่ในกลุ่ม A-3(0) และในระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในกลุ่ม SP ซึ่งจัดเป็นทรายที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาว

คุณสมบัติด้านการบดอัด

ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.ft/ft³) โดยผลการทดสอบของวัสดุแสดงไว้ดังตารางที่ 9 และภาพที่ 16 จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่ามากที่สุดคือ เศษปูนขาว เถ้าลอย เถ้าก้นเตา ตามลำดับ ส่วนค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมที่มากที่สุดคือ เถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาว ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณความชื้นที่ลดลงนี้อาจเป็นผลมาจาก

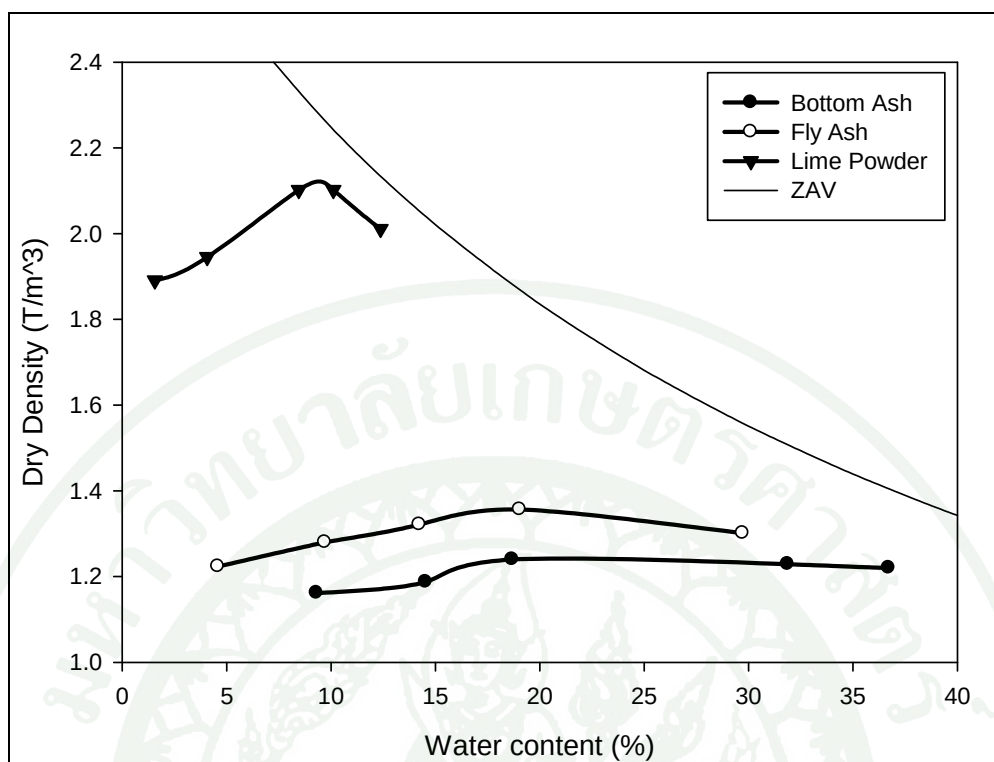
ในเถ้าลอยและเศษปูนขาวมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเถ้าก้นเตา พื้นที่ผิวจำเพาะจึงสูงกว่าขณะทำการบดอัด ความต้องการปริมาณน้ำที่ใช้ในการจัดเรียงตัวของอนุภาคจึงลดลงตามไปด้วย



ภาพที่ 15 ผลการทดสอบการกระจายขนาดของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน

วัสดุที่ทดสอบ	ความหนาแน่นสูงสุด, γ_d (t/m ³)	ปริมาณความชื้นเหมาะสม, w (%)
เถ้าก้นเตา	1.24 (± 0.02)	20.00 (± 0.05)
เถ้าลอย	1.36 (± 0.04)	18.30 (± 0.03)
เศษปูนขาว	2.11 (± 0.03)	9.20 (± 0.03)



ภาพที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของวัสดุที่ทดสอบ

คุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังของวัสดุทดสอบโดยการทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Soaked และ Unsoaked CBR ของเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาวแสดงไว้ดังตารางที่ 10 จากผลการทดสอบพบว่าเศษปูนขาวให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR สูงที่สุด รองลงมาคือเถ้าก้นเตา ส่วนเถ้าลอย ให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR ต่ำที่สุด ซึ่งในเศษปูนขาวมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO) จำนวนมากอาจเกิดกระบวนการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO) รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงและเศษปูนขาวที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาจะเข้ามาชิดกัน โดยจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเป็นหลัก ทำให้คุณสมบัติทางด้านกำลังดีกว่าวัสดุอื่น ส่วนเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยนั้นสอดคล้องกับผลการทดสอบการบดอัดและลักษณะการกระจายขนาดของเม็ดดินโดยกำลังที่เกิดขึ้น มาจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดินเป็นหลักมี ส่งผลให้ได้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR ลดลงตามลำดับ

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบ Soaked และ Unsoaked CBR ของวัสดุทดสอบ

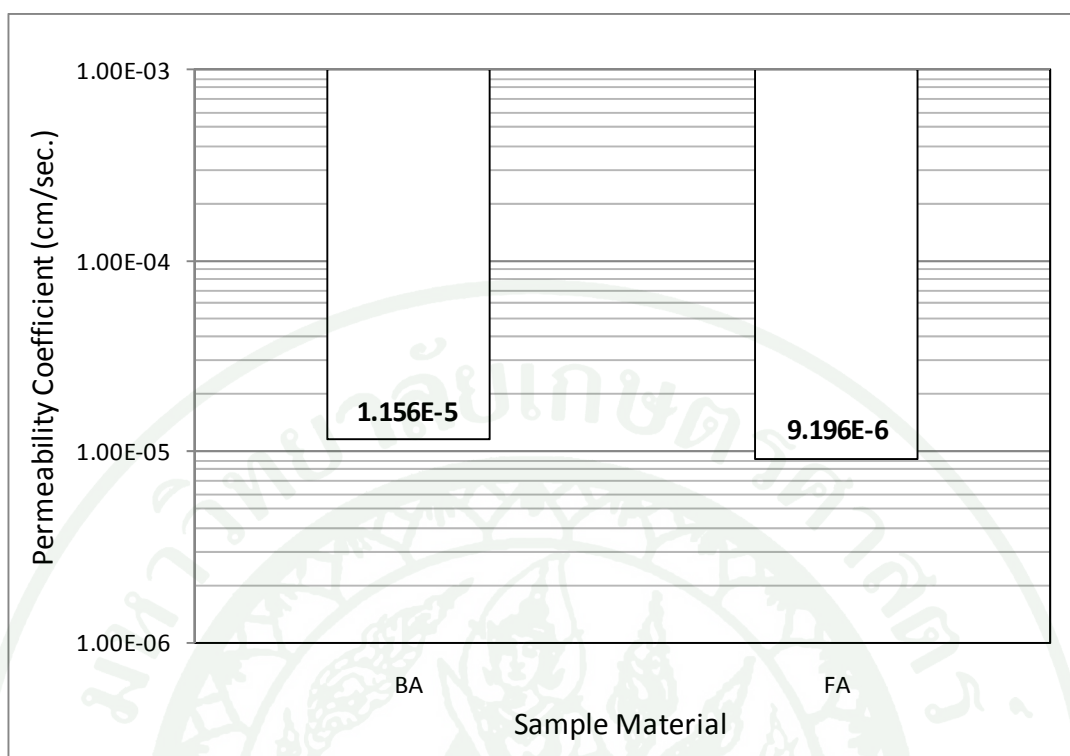
วัสดุทดสอบ	California Bearing Ratio (CBR), (%)	
	Unsoaked	Soaked
เถ้าก้นเตา	53.43	46.67
เถ้าลอย	18.92	14.67
เศษปูนขาว	81.22	21.33

คุณสมบัติทางด้านการซึมน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการซึมน้ำของวัสดุทดสอบ ได้แก่ เถ้าก้นเตา และเถ้าลอย ซึ่งทดสอบโดยวิธี Constant Head แบบใช้ความดันเข้าช่วย โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของวัสดุทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 11 และภาพที่ 17 พบว่า เถ้าลอยมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำต่ำที่สุดเนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถเข้าไปอุดช่องว่างได้อย่างเต็มที่ จึงทำให้ช่องว่างลดลงเป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำต่ำ ในขณะที่เถ้าก้นเตาจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากขนาดอนุภาคของเถ้าก้นเตามีขนาดใหญ่กว่าของเถ้าลอย จึงทำให้ประมาณช่องว่างมีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำสูง

ตารางที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	สัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ(cm./sec.)
เถ้าก้นเตา	1.16E-05
เถ้าลอย	9.20E-06



ภาพที่ 17 ค่าความสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของวัสดุทดสอบ

คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ 1 (เก้าอี้เก้าอี้ ผสมเก้าอี้ และเศษปูนขาว)

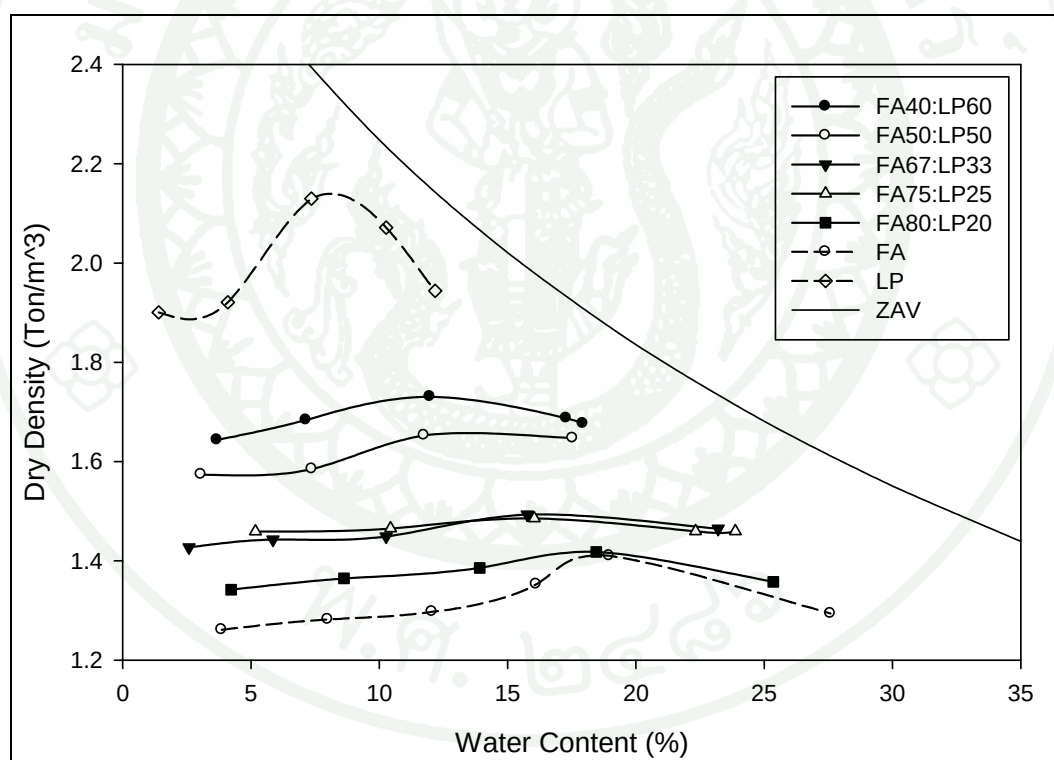
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของสารผสมเพิ่ม (เก้าอี้ และเศษปูนขาว)

คุณสมบัติด้านการบดอัดของสารผสมเพิ่ม

ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เมื่อทำการบดอัดสารผสมเพิ่มในสัดส่วนผสมเก้าอี้ต่อเศษปูนขาวคือ 40:60, 50:50, 67:33, 75:25, 80:20 โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม พบว่าเมื่อปริมาณเศษปูนขาวเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณเศษปูนขาว โดยที่เศษปูนขาวมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าเก้าอี้ มีผลทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น และการเพิ่มปริมาณเศษปูนขาว ทำให้มีปริมาณน้ำที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยามีมากขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลง ดังแสดงในตารางที่ 12 และภาพที่ 18

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของสารผสมเพิ่มที่สัดส่วนต่างๆ

วัสดุทดสอบ โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม		ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ปริมาณความชื้น
เถ้าลอย (FA), %	เศษปูนขาว (LP), %	(ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	เหมาะสม (%)
80	20	1.419	18.10
75	25	1.473	17.90
67	33	1.497	16.10
50	50	1.670	13.85
40	60	1.723	12.11



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของเถ้าลอยผสมเศษปูนขาวที่สัดส่วนต่างๆ

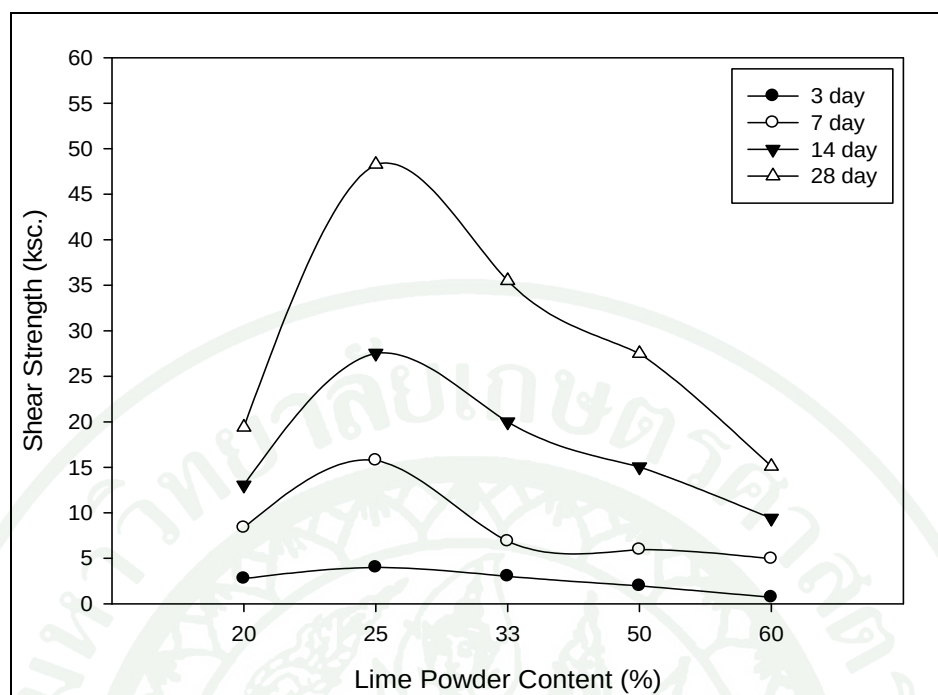
คุณสมบัติด้านกำลังของสารผสมเพิ่ม

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของสารผสมเพิ่มโดยการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของสารผสมเพิ่มแสดงไว้ดังตารางที่ 13 และภาพที่ 19 พบว่าเมื่อเถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มหลักและเพิ่มปริมาณของเศษปูนขาวมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นและมีกำลังสูงขึ้นตามปริมาณเศษปูนขาว ซึ่งสัดส่วนที่ให้กำลังมากที่สุดของสารผสมเพิ่มคือ 75:25 (เถ้าลอย 75% ต่อเศษปูนขาว 25%) โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม มีกำลังรับแรงเฉือนประมาณ 48.27 กก./ซม² ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณเศษปูนขาวที่เพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณน้ำไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างเต็มที่ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้นก็จะไม่มีผลมากต่อการเกิดปฏิกิริยา (Diamond *et al.*, 1965)

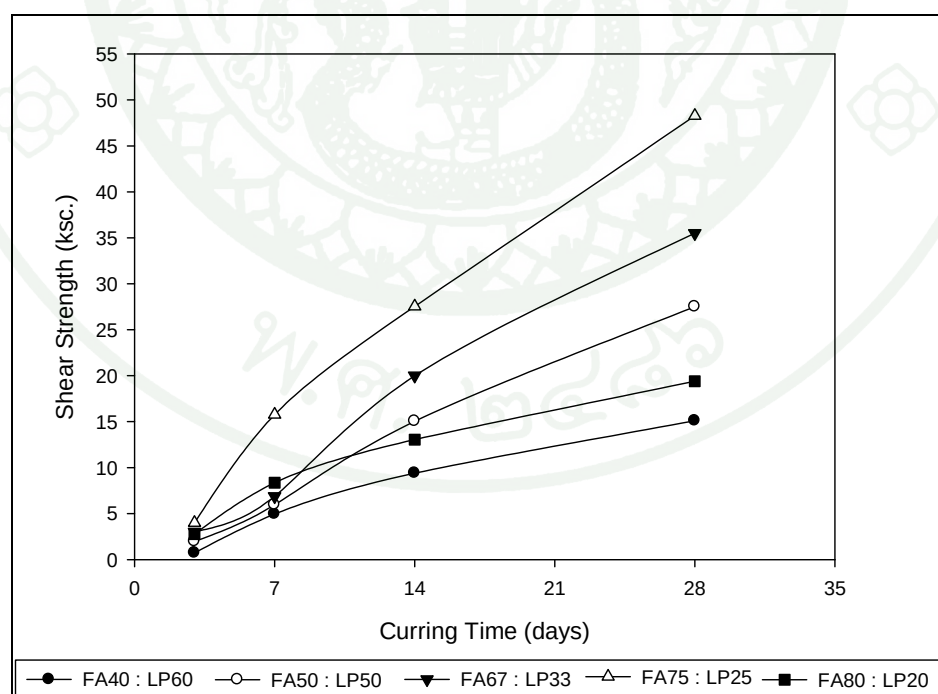
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของสารผสมเพิ่มที่สัดส่วนต่างๆ

วัสดุทดสอบ โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม		Shear Strength ที่อายุการบ่ม 28 วัน
เถ้าลอย (FA), %	เศษปูนขาว (LP), %	(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
80	20	19.40
75	25	48.27
67	33	35.50
50	50	27.50
40	60	15.10

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการรับแรงของสารผสมเพิ่ม (เถ้าลอยผสมเศษปูนขาว) พบว่าปริมาณเศษปูนขาวมีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ที่ปริมาณเศษปูนขาวให้ค่ากำลังของสารผสมเพิ่มมีค่ามากที่สุดที่สัดส่วน 75:25 (เถ้าลอย 75% ต่อเศษปูนขาว 25%) ถึงแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้นกำลังของสารผสมเพิ่มก็จะไม่เพิ่มขึ้น แต่จะทำให้กำลังของสารผสมเพิ่มลดลง และผลของการบ่มต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนพบว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นตามอายุการบ่มดังภาพที่ 19 และภาพที่ 20 ซึ่งจะเห็นได้ว่า สัดส่วนของสารผสมเพิ่มที่ เถ้าลอย 75% ต่อเศษปูนขาว 25% เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพถ้ำกันเตาในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของสารผสมเพิ่มกับปริมาณเศษปูนขาวที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของสารผสมเพิ่มกับอายุการบ่ม

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมที่ 1

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตา เถ้าลอยและเศษปูนขาว โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางด้านกำลังโดยการทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Soaked และ Unsoaked CBR ของวัสดุทดสอบ การศึกษาจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ประเด็นคือ

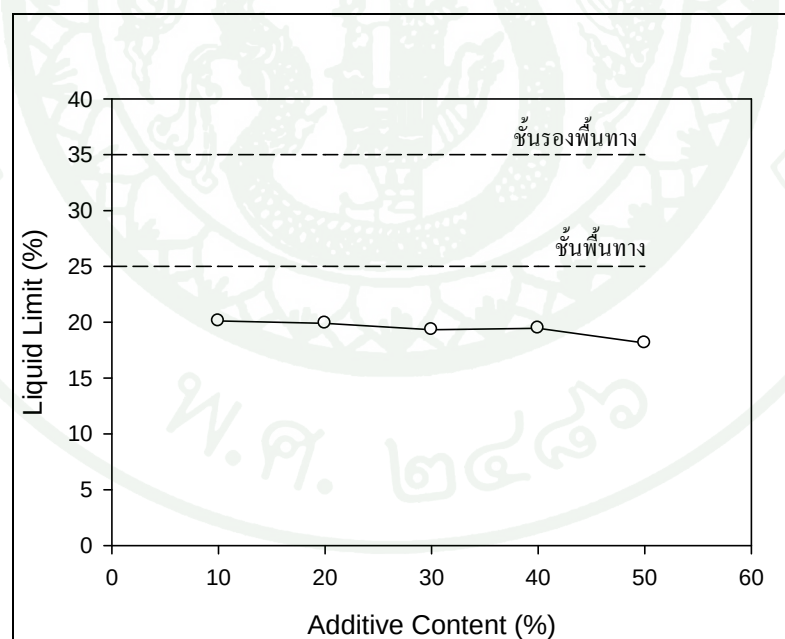
1. พิจารณาอิทธิพลของสารผสมเพิ่มต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มโดยทดสอบทันทีหลังผสม
2. อิทธิพลของปริมาณเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวต่ออายุการบ่มของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มเปรียบเทียบกับเถ้าก้นเตาที่ไม่ได้ผสมสารผสมเพิ่ม

และเนื่องจากสารผสมเพิ่มที่นำมาปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้น ได้พิจารณาสัดส่วนของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังมากที่สุด (ซึ่งต่อไปเรียกว่า FA75 : LP25) ดังนี้

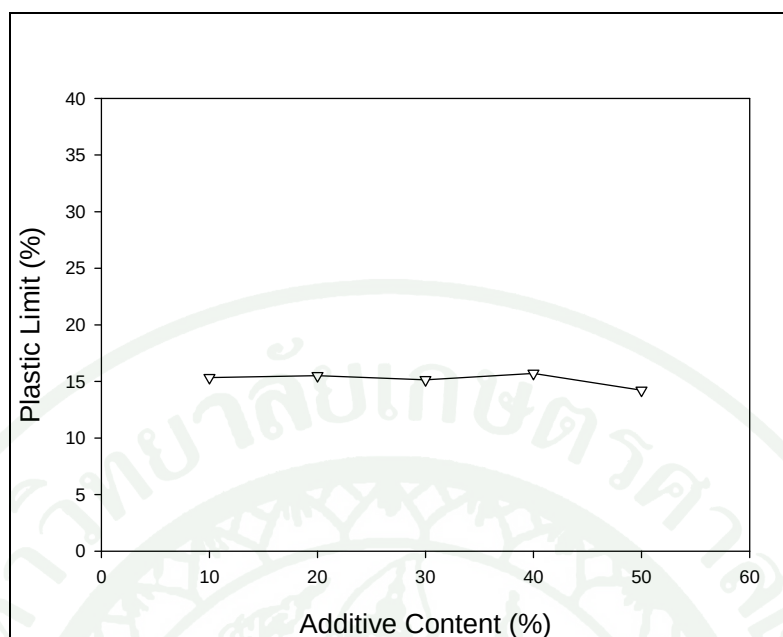
อิทธิพลของปริมาณสารผสมเพิ่ม (เถ้าลอยผสมเศษปูนขาวที่สัดส่วน 75:25) ต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index แสดงไว้ดังตารางที่ 14 และภาพที่ 21-24 จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อผสมสารผสมเพิ่มลงในตัวอย่างเถ้าก้นเตา ทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าลดลงประมาณ 1-2% สาเหตุที่ทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเศษปูนขาวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นเศษปูนขาวมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุและคุดน้ำออกจากมวลของวัสดุ จึงทำให้เกิดการ Flocculation และเกิดการรวมตัวกัน (Agglomeration) ในส่วนค่า Plastic Limit มีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาข้างต้น เช่นเดียวกับค่า Liquid Limit เป็นผลทำให้ดัชนีความเหนียว (Plastic Index) มีค่าลดลง โดยมีค่า Plasticity Limit ลดลงประมาณ 1-2% ดังนั้นจากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้วัสดุผสมที่ 1 มีค่าดัชนีความเหนียว (Plastic Index) ลดลงโดยประมาณ 3-5%

ตารางที่ 14 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ที่ปริมาณต่างๆ

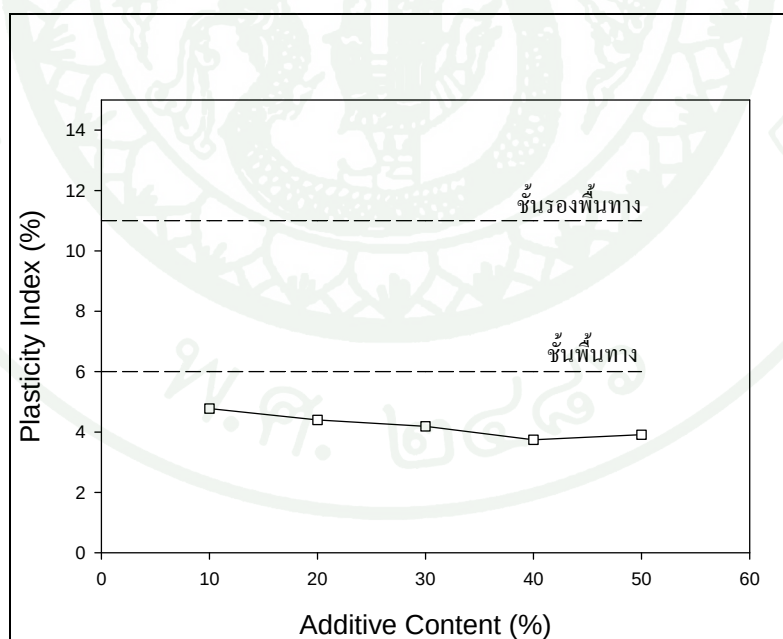
ปริมาณสารผสมเพิ่ม FA:LP (75:25) (%)	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index (%)
0	—	—	—
10	20.11	15.33	4.78
20	19.91	15.51	4.40
30	19.33	15.14	4.19
40	19.45	15.71	3.74
50	18.13	14.22	3.91



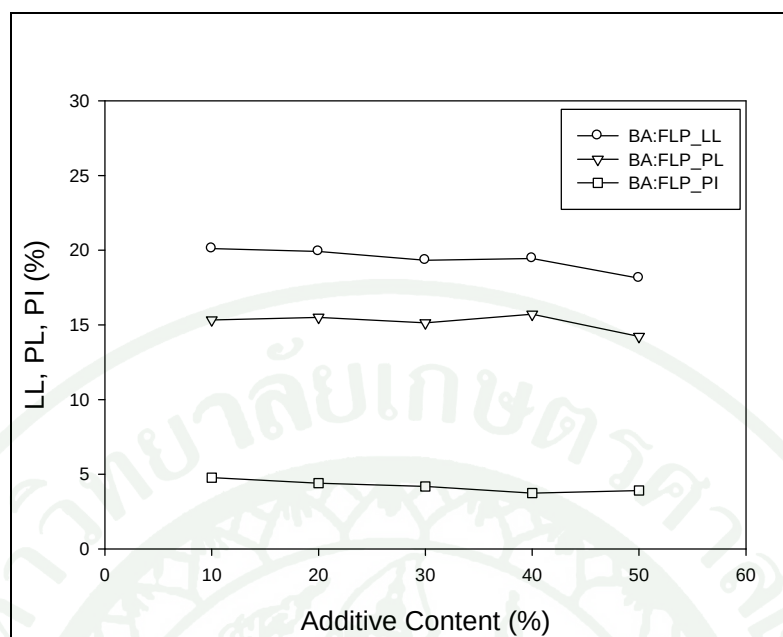
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1



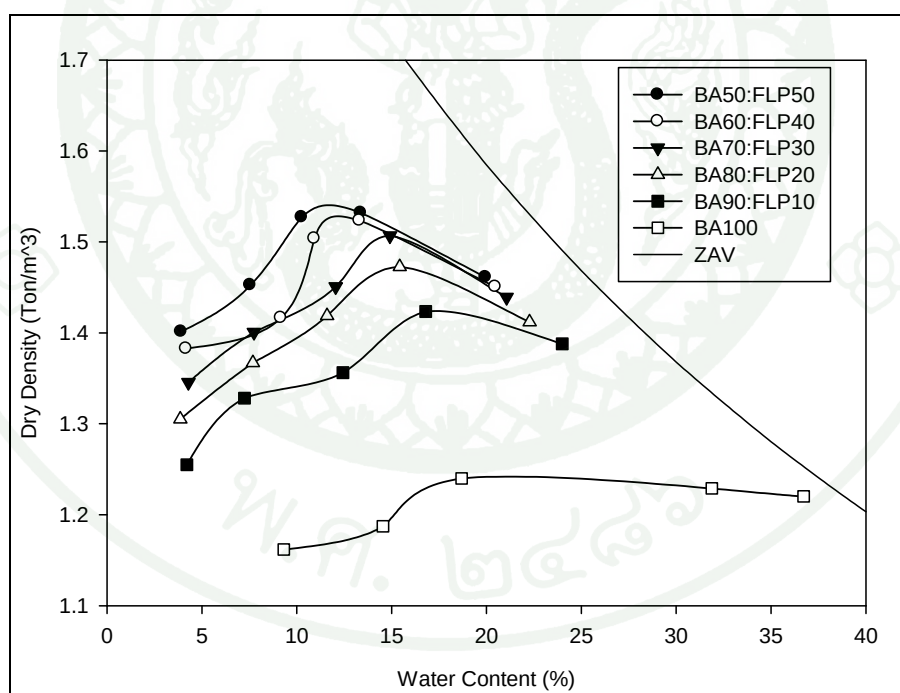
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1

คุณสมบัติด้านการบดอัด

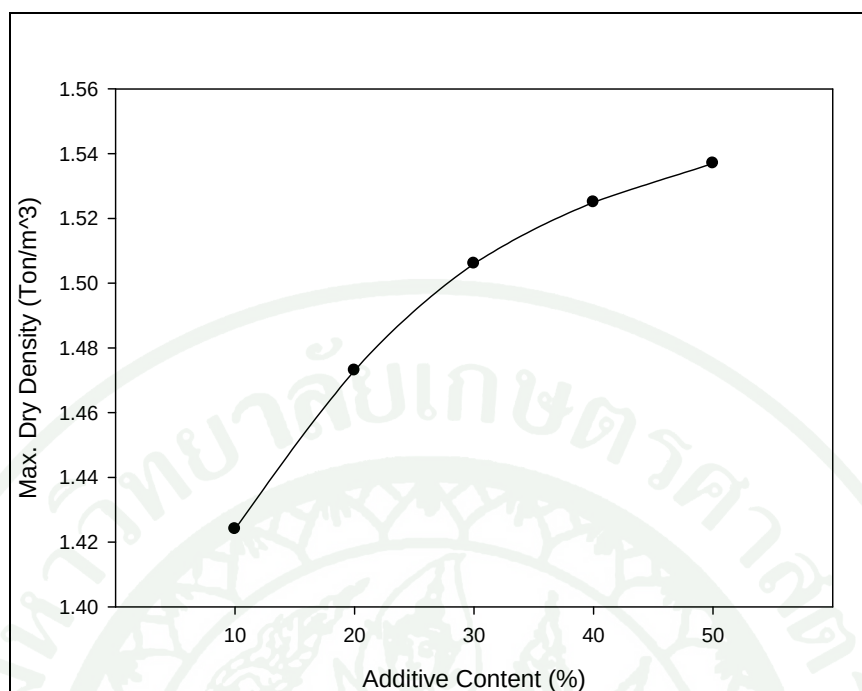
ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.ft/ft³) ผสมสารผสมเพิ่มที่สัดส่วนผสม 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม แสดงไว้ดังตารางที่ 15 และภาพที่ 25-27 พบว่าเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นสาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการผสมเข้าลอมและเศษปูนขาวที่มีน้ำหนักหนักกว่าลงไปแทนที่เถ้าก้นเตา จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของวัสดุผสม มีแนวโน้มลดลงทั้งนี้ปริมาณความชื้นที่ลดลงนี้อาจเป็นผลมาจากสารผสมเพิ่มที่ผสมลงในเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเถ้าก้นเตามาก พื้นที่ผิวจำเพาะจึงสูงกว่า อีกทั้งเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างเศษปูนขาวกับน้ำ ทำให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ปริมาณความชื้นที่ทดสอบได้มีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเถ้าก้นเตา ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ที่ปริมาณต่างๆ

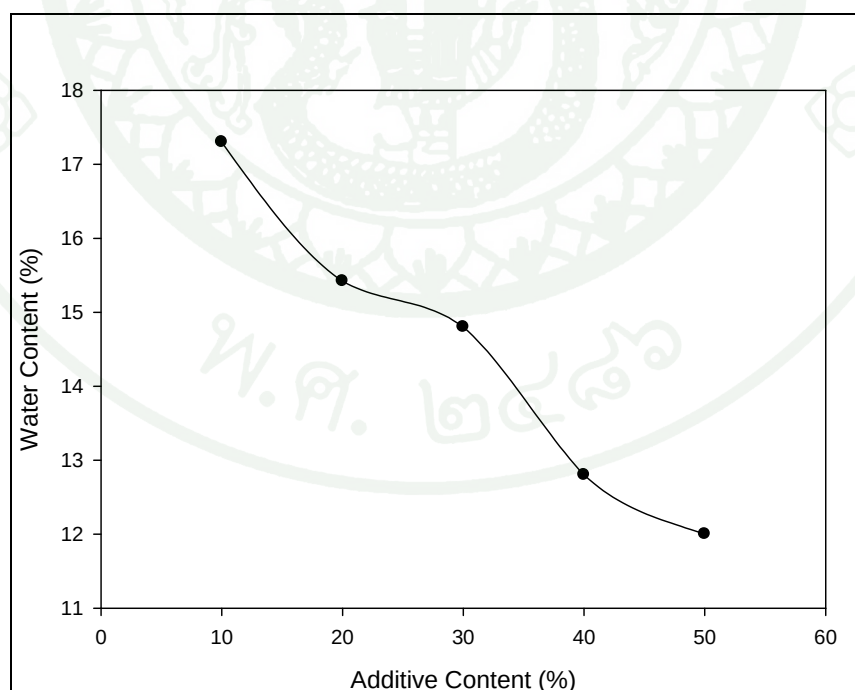
ปริมาณสารผสมเพิ่ม FA:LP (75:25) (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	ปริมาณความชื้นเหมาะสม (%)
10	1.424	17.30
20	1.473	15.42
30	1.506	14.80
40	1.525	12.80
50	1.537	12.00



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ที่ปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่ม สัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่ม สัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1

คุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR ของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มโดยที่เถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ที่สัดส่วน 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม ทำการทดสอบทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 16-17 และภาพที่ 28-29

จากการทดสอบพบว่า คุณสมบัติด้านกำลังที่เพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตา ที่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่ม (เถ้าก้นเตาผสมเศษปูนขาว) ทำให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผสมเพิ่มรวมไปถึงอายุการบ่มทำให้ค่า CBR มีค่าสูงขึ้น

จากผลการทดสอบจะสังเกตได้ว่า ค่า Soaked CBR มีค่ามากกว่า Unsoaked CBR เนื่องจากในขั้นตอนการ การแช่น้ำ (Soaked) ตัวอย่าง ทำให้มีปริมาณน้ำจากภายนอกเข้าไปในตัวอย่าง จึงช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและเศษปูนขาวดำเนินต่อไป ทำให้มีการพัฒนากำลังเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR ของวัสดุผสมที่ 1 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่ม สัดส่วน 75:25) ต่างๆ ตามอายุการบ่ม

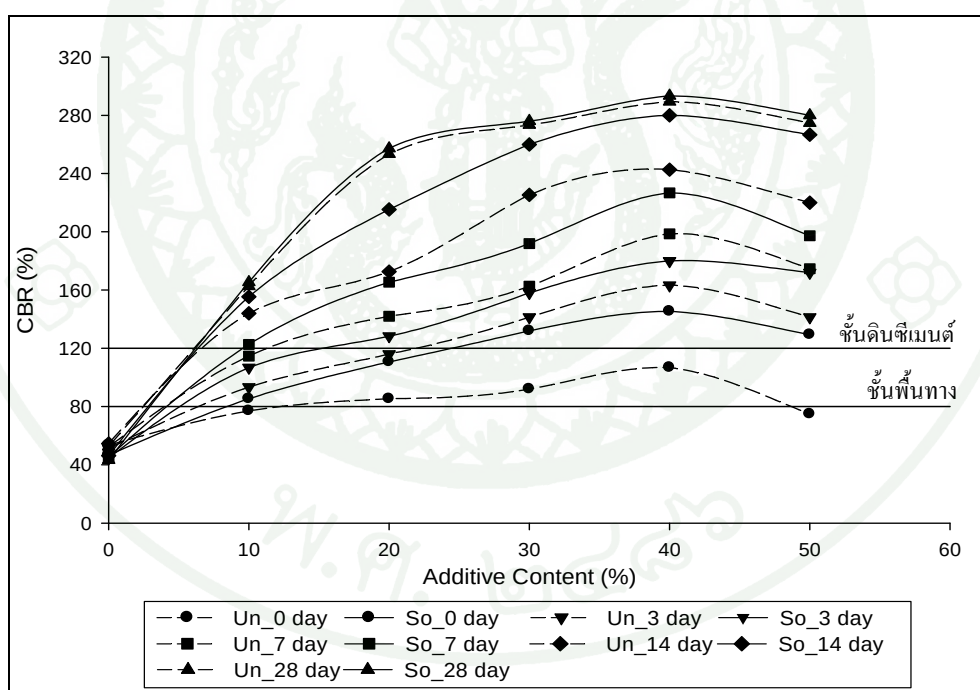
ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Unsoaked CBR (%)				
	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
0	53.43	51.23	52.43	54.62	52.47
10	77	93.33	114.67	144	162.67
20	85.33	116	142	172.67	253.33
30	92	141.33	162.67	225.33	273.33
40	106.67	163.33	198.67	242.67	289.33
50	74.81	141.33	174.67	220	274.67

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบ Soaked CBR ของวัสดุผสมที่ 1 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่ม สัดส่วน 75:25) ต่างๆ ตามอายุการบ่ม

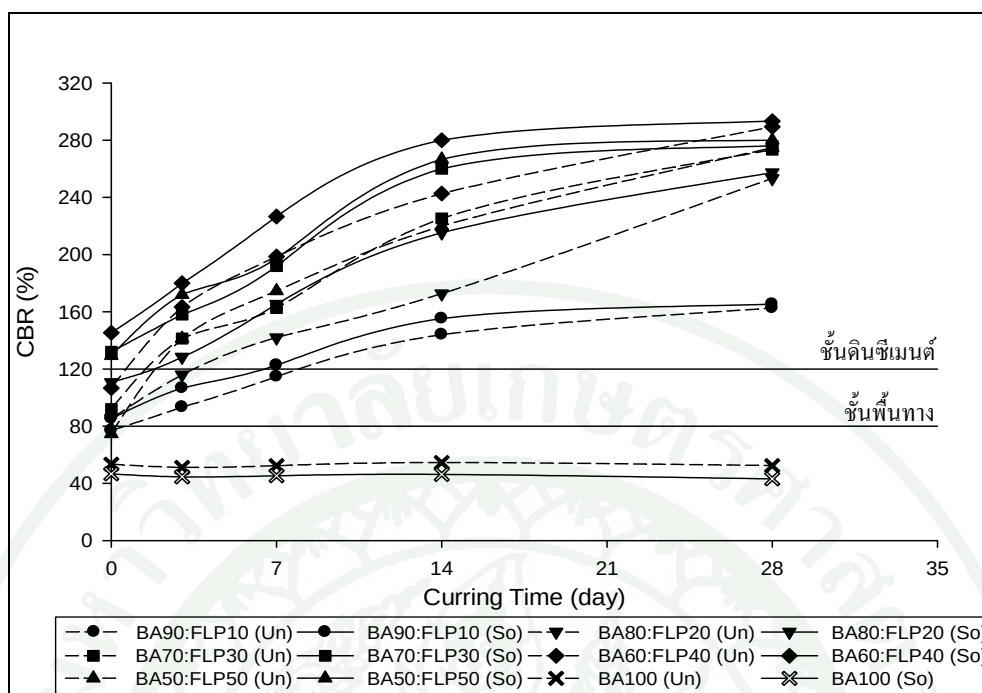
ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Soaked CBR (%)				
	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
0	44.67	44.61	45.37	46.32	43.2
10	85.33	106.67	122.67	155.33	165.33
20	110.67	128.33	165.33	215.33	257.33
30	132	158	192	260	276
40	145.33	180	226.67	280	293.33
50	129.33	172	197.33	266.67	280

ปริมาณสารผสมเพิ่ม (เถ้าก้นเตาผสมเศษปูนขาว) มีผลต่อค่า Soaked และ Unsoaked CBR เนื่องจากค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณสารผสมเพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังภาพที่ 28-29 เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มที่ 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม ทำการทดสอบทันทีหลังการบดอัดและอายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า กำลังของเถ้าก้นเตาเมื่อได้ทำการปรับปรุงคุณภาพที่สัดส่วนดังกล่าว จะมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 77, 85.33, 92, 106.67 และ 74.81% ตามลำดับ เมื่อทดสอบทันทีหลังการบดอัด ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.44, 1.60, 1.72, 2.00 และ 1.40 เท่า ตามลำดับ ส่วนค่า Soaked CBR มีค่าเท่ากับ 85.33, 110.67, 132, 145.33 และ 129.33% ตามลำดับ มีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 1.83, 2.37, 2.83, 3.11 และ 2.77 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของเถ้าก้นเตาที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยสารผสมเพิ่ม ซึ่งมีค่า Soaked และ Unsoaked CBR เท่ากับ 46.67 และ 53.43% ตามลำดับ เห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการผสมสารผสมเพิ่มลงในเถ้าก้นเตาพบว่า จะให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR สูงกว่าเถ้าก้นเตาที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกสัดส่วนผสม โดยค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มที่ทดสอบทันทีหลังการบดอัดของเถ้าก้นเตา สรุปไว้ดังตารางที่ 18

ในส่วนของการบ่มซึ่งมีผลต่อค่า CBR เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 29 พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยอายุการบ่มจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง โดยทุกปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ผสมเข้ากันตามแนวโน้มการพัฒนา CBR ไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างเข้ากันตามผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสมที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า Unsoaked CBR มีค่าเท่ากับ 93.33, 114.67, 144 และ 162.67% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.21, 1.49, 1.87 และ 2.11 เท่า ตามลำดับ ส่วนค่า Soaked CBR มีค่าเท่ากับ 106.67, 122.67, 155.33 และ 165.33% ตามลำดับ มีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 1.25, 1.44, 1.82 และ 1.94 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของเข้ากันตามผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสมหลังบดอัด ซึ่งมีค่า Soaked และ Unsoaked CBR เท่ากับ 85.33 และ 77% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า CBR มีการพัฒนาสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นสรุปไว้ดังตารางที่ 19



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มสัดส่วน 75:25) ของวัสดุผสมที่ 1 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของวัสดุผสมที่ 1

ตารางที่ 18 ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มของเถ้าก้นเตา

วัสดุผสมที่ 1 (BA:FLP)	ปริมาณสารผสมเพิ่ม (%)					
	0	10	20	30	40	50
Unsoaked CBR (%)	53.43	77	85.33	92	106.67	74.81
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.0	1.44	1.60	1.72	2.00	1.40
Soaked CBR (%)	46.67	85.33	110.67	132	145.33	129.33
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.0	1.83	2.37	2.83	3.11	2.77

ตารางที่ 19 ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม

วัสดุผสมที่ 1 (BA:FLP)	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
Unsoaked CBR (%)	77	93.33	114.67	144	162.67
อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.0	1.21	1.49	1.87	2.11
Soaked CBR (%)	85.33	106.67	122.67	155.33	165.33
อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.0	1.25	1.44	1.82	1.94

คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ 2 (เถ้าก้นเตาและเถ้าลอย ผสมเศษปูนขาว)

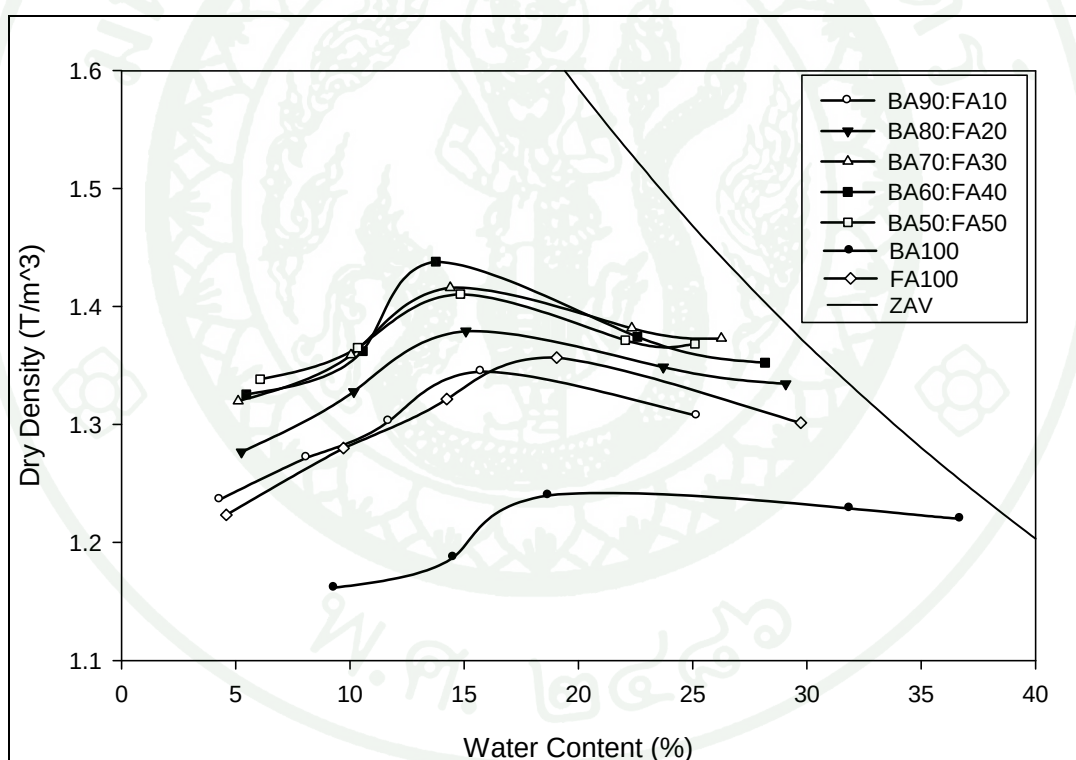
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุตั้งต้น (เถ้าก้นเตา และเถ้าลอย)

คุณสมบัติด้านการบดอัดของวัสดุตั้งต้น

ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต ($\text{lb}\cdot\text{ft}/\text{ft}^3$) เมื่อทำการบดอัดวัสดุตั้งต้นในสัดส่วนผสมเถ้าก้นเตาต่อเถ้าลอยคือ 50:50, 60:40, 70:30, 80:20 และ 90:10 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุตั้งต้น เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมพบว่าเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณเถ้าลอย โดยที่เถ้าลอยมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าเถ้าก้นเตา เมื่อทำการบดอัดอนุภาคของเถ้าลอยจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างในอนุภาคของเถ้าก้นเตา มีผลทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มปริมาณและขนาดของอนุภาคของเถ้าลอย ทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการจัดเรียงตัวของอนุภาคมีลดลง จึงส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลง ดังแสดงในตารางที่ 20 และภาพที่ 30

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุตั้งต้นที่สัดส่วนต่างๆ

วัสดุทดสอบ โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุตั้งต้น		ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ปริมาณความชื้น
เถ้าก้นเตา (BA), %	เถ้าลอย (FA), %	(ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	เหมาะสม (%)
90	10	1.358	16.92
80	20	1.389	15.80
70	30	1.432	14.66
60	40	1.436	14.9
50	50	1.437	15.1



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาผสมเถ้าลอยที่สัดส่วนต่างๆ

คุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุตั้งต้น

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุตั้งต้นโดยการทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Soaked และ Unsoaked ของวัสดุตั้งต้น แสดงไว้ดังตารางที่ 21 และภาพที่ 31 พบว่าเมื่อเอ้ากันเตาเป็นวัสดุตั้งต้นหลักและเพิ่มปริมาณของเอ้าลอยมากขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น และมีกำลังสูงขึ้นตามปริมาณเอ้าลอย ซึ่งสัดส่วนที่ให้กำลังมากที่สุดของวัสดุตั้งต้นคือ 80:20 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุตั้งต้น มีค่า Soaked และ Unsoaked CBR ประมาณ 79.78% และ 102.33% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเอ้าลอยมากขึ้น ทำให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR ลดต่ำลง

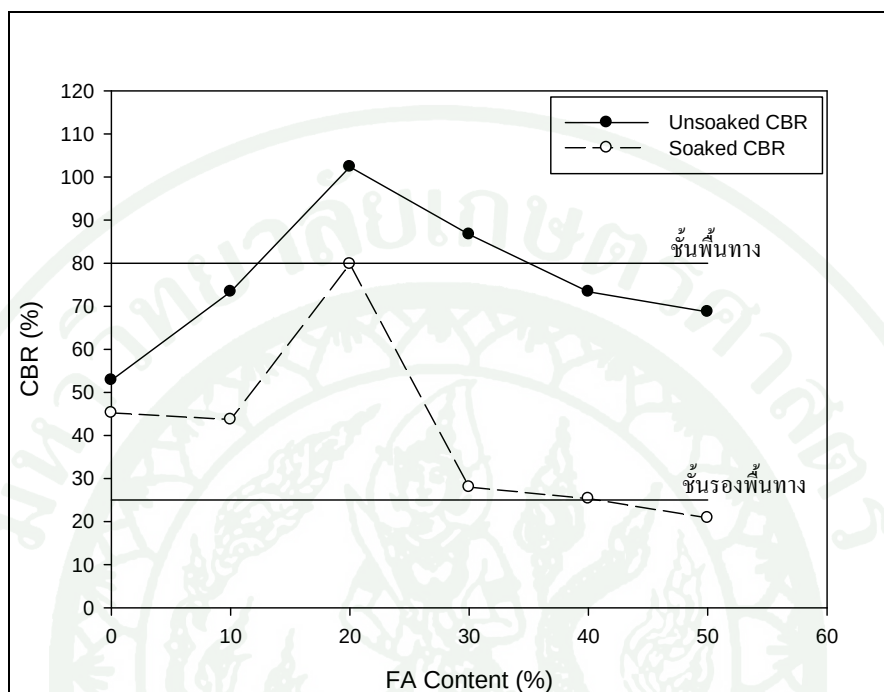
ตารางที่ 21 ผลการทดสอบ Soaked และ Unsoaked CBR ของวัสดุตั้งต้นที่สัดส่วนต่างๆ

วัสดุทดสอบ โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม		California Bearing Ratio (CBR)	
เอ้ากันเตา (BA), %	เอ้าลอย (FA), %	Unsoaked (%)	Soaked (%)
90	10	73.33	46.67
80	20	102.33	79.78
70	30	86.67	28.00
60	40	73.33	25.33
50	50	68.67	20.84

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมที่ 2

อิทธิพลของปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index แสดงไว้ดังตารางที่ 22 และภาพที่ 32-35 จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อผสมเศษปูนขาวลงในตัวอย่างเอ้ากันเตาและเอ้าลอย ทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าลดลงประมาณ 4-5% สาเหตุที่ทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มลดลงต่างกันเนื่องจากเศษปูนขาวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นเศษปูนขาวมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุและคอลลอยด์ออกจากมวลของวัสดุ จึงทำให้เกิดการ Flocculation และเกิดการรวมตัวกัน (Agglomeration) ในส่วนค่า Plastic Limit มีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาข้างต้นเช่นเดียวกับค่า Liquid Limit เป็นผลทำให้ค่าดัชนีความเหนียว (Plastic Index) มีค่าลดลง โดยมีค่า Plasticity Limit ลดลงประมาณ 1% ดังนั้นจากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ

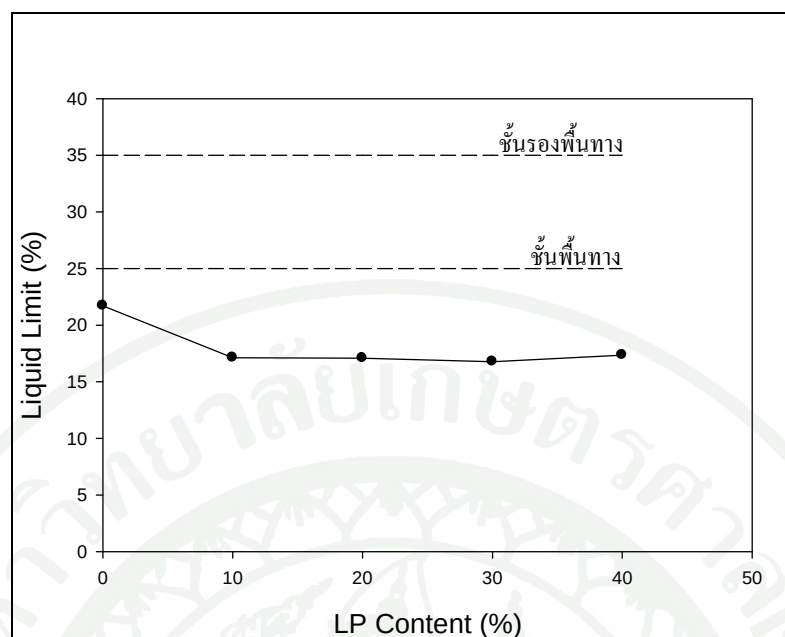
สารผสมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้วัสดุผสมที่ 2 มีค่าดัชนีความเหนียว (Plastic Index) ลดลงโดยประมาณ 3-5%



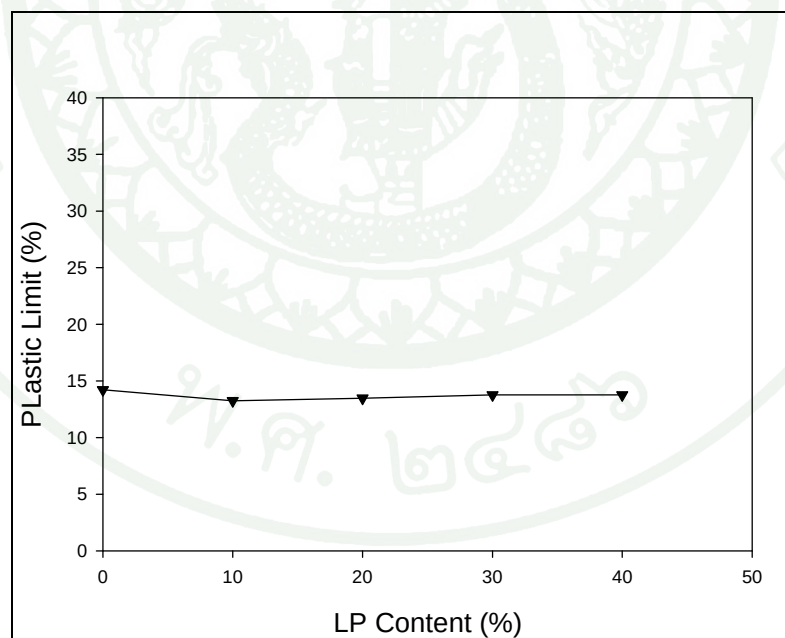
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR หลังการบดอัดกับปริมาณเถ้าลอยของวัสดุตั้งต้น

ตารางที่ 22 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของวัสดุตั้งต้น (เถ้าก้นเตาผสมเถ้าลอยสัดส่วน 80:20) ผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณต่างๆ

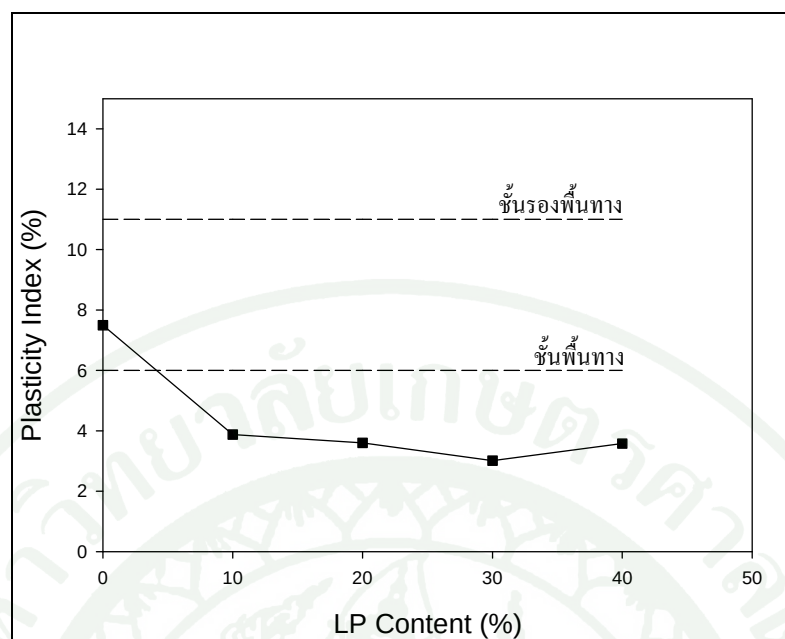
ปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) (%)	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index (%)
0	21.71	14.21	7.50
10	17.12	13.24	3.88
20	17.07	13.47	3.60
30	16.77	13.76	3.01
40	17.35	13.77	3.58



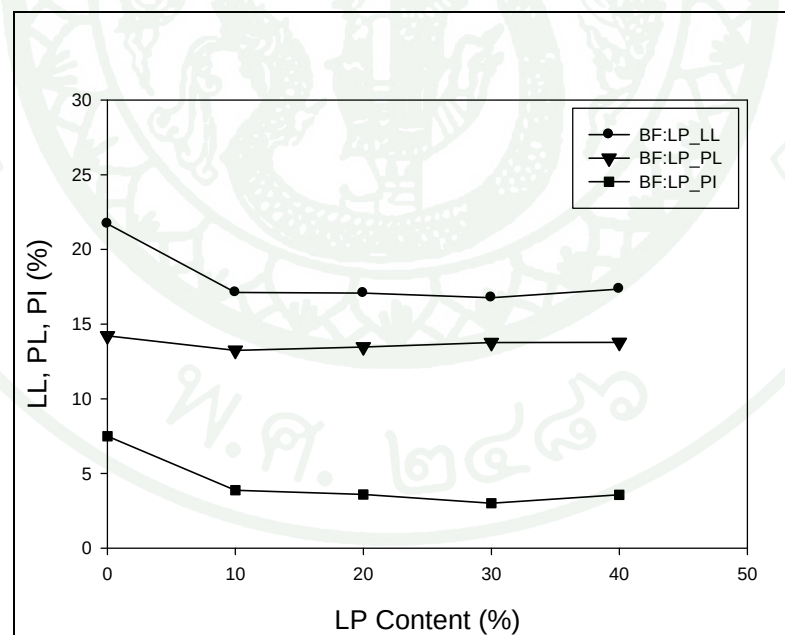
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2



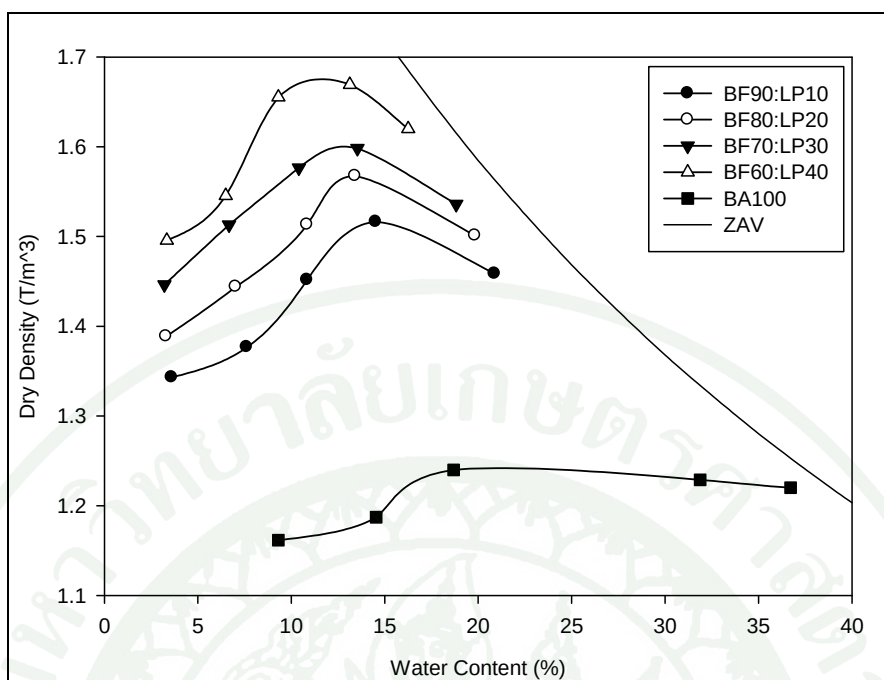
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2

คุณสมบัติด้านการบดอัด

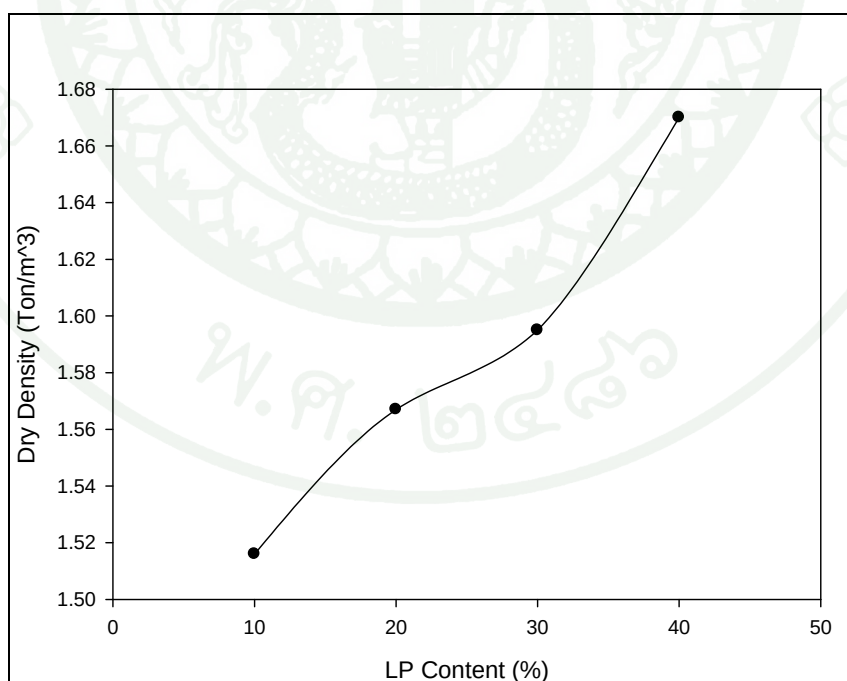
ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.ft/ft³) ผสมสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ที่สัดส่วนผสม 10, 20, 30 และ 40 % โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม แสดงไว้ดังตารางที่ 23 และภาพที่ 36-38 พบว่าเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการผสมเศษปูนขาวที่มีน้ำหนักหนักกว่าลง ไปแทนที่เถ้าก้นเตา จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของวัสดุผสม มีแนวโน้มลดลงทั้งนี้ปริมาณความชื้นที่ลดลงนี้อาจเป็นผลมาจากสารผสมเพิ่มที่ผสมลงในเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเถ้าก้นเตามาก พื้นที่ผิวจำเพาะจึงสูงกว่า อีกทั้งเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างเศษปูนขาวกับน้ำ ทำให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ปริมาณความชื้นที่ทดสอบได้มีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยผสมสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ที่ปริมาณต่างๆ

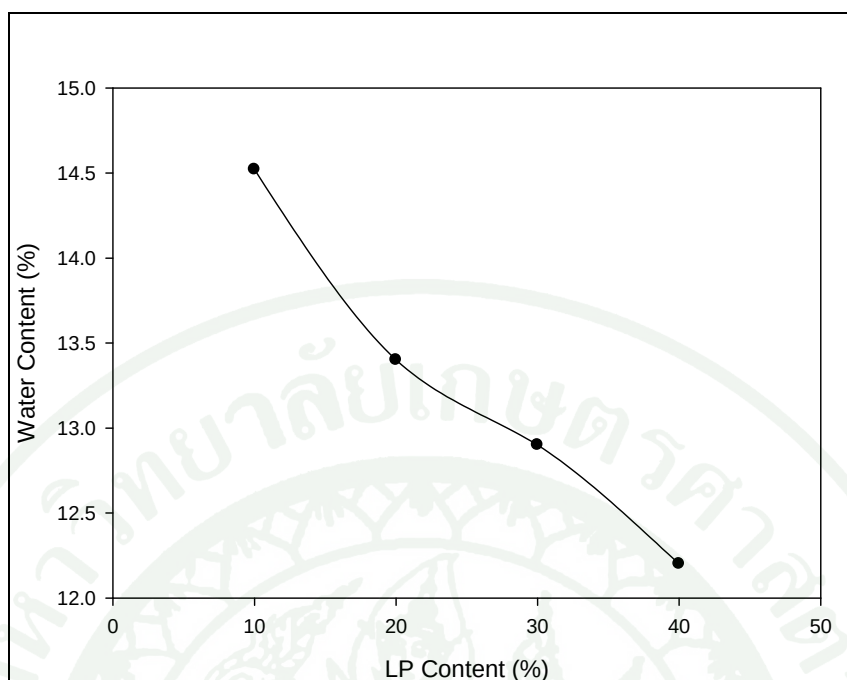
ปริมาณสารผสมเพิ่ม เศษปูนขาว (LP)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ปริมาณความชื้นเหมาะสม
(%)	(ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	(%)
10	1.516	14.52
20	1.567	13.40
30	1.595	12.90
40	1.670	12.20



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของเถ้าก้นเตาและเถ้าลอย (วัสดุตั้งต้นสัดส่วน 80:20) ผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2

คุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบ Soaked และ Unsoaked CBR ของเถ้าก้นเตาและเถ้าลอยผสมสารผสมเพิ่ม โดยที่เถ้าก้นเตาและเถ้าลอย (วัสดุตั้งต้นสัดส่วน 80:20) ผสมสารผสมเพิ่มที่สัดส่วน 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม ทำการทดสอบทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 24-25 และภาพที่ 39-40

จากการทดสอบพบว่า คุณสมบัติด้านกำลังที่เพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตาและเถ้าลอย ที่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ทำให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผสมเพิ่มรวมไปถึงอายุการบ่มทำให้ค่า CBR มีค่าสูงขึ้น

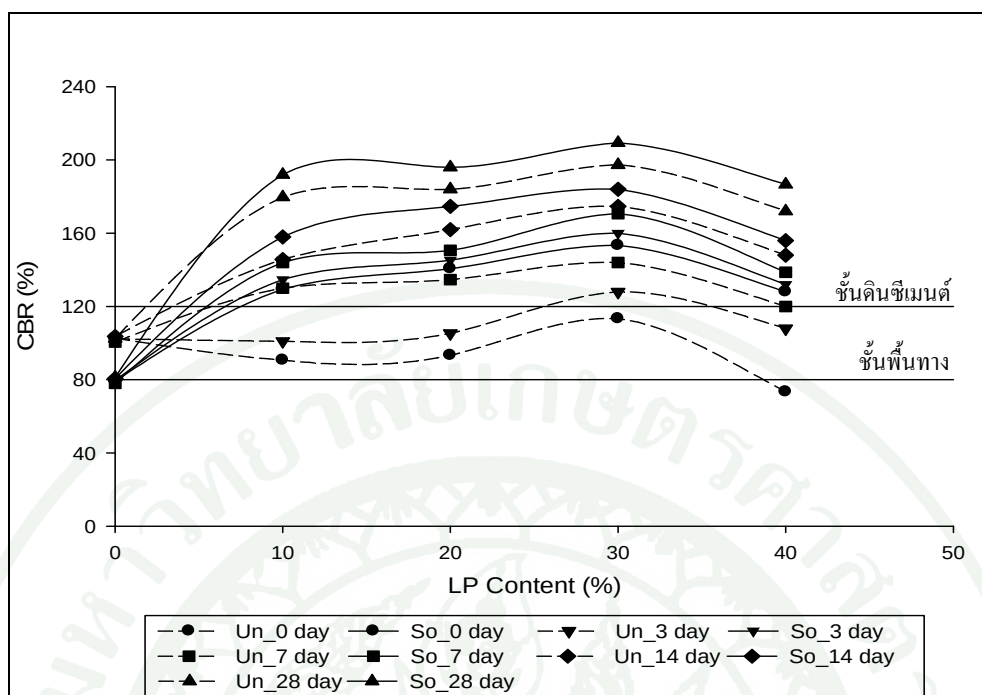
จากผลการทดสอบจะสังเกตได้ว่า ค่า Soaked CBR มีค่ามากกว่า Unsoaked CBR เนื่องจากในขั้นตอนการ การแช่น้ำ (Soaked) ตัวอย่าง ทำให้มีปริมาณน้ำจากภายนอกเข้าไปในตัวอย่าง จึงช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยและเศษปูนขาวดำเนินต่อไป ทำให้มีการพัฒนากำลังเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR ของวัสดุผสมที่ 2 (วัสดุตั้งต้นสัดส่วน 80:20)
ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ ตามอายุการบ่ม

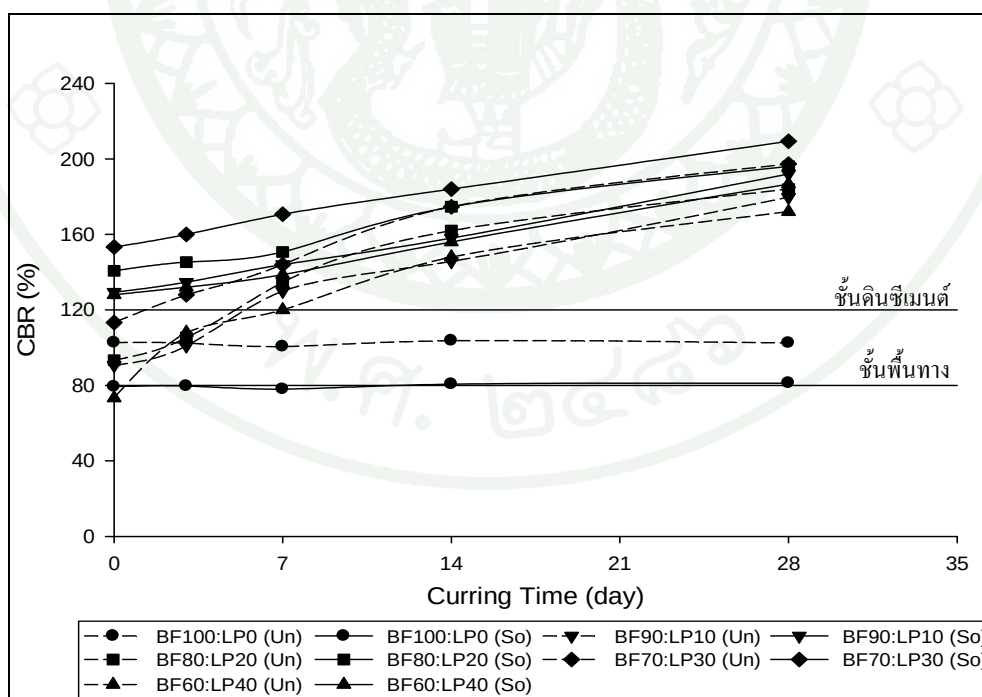
ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Unsoaked CBR (%)				
	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
0	102.67	102.33	100.55	103.66	102.45
10	90.67	101	130	145.67	179.67
20	93.33	105.33	134.67	162	184
30	113.33	128	144	174.67	197.33
40	73.33	108	120	148	172

ตารางที่ 25 ผลการทดสอบ Soaked CBR ของวัสดุผสมที่ 2 (วัสดุตั้งต้นสัดส่วน 80:20)
ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ ตามอายุการบ่ม

ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Soaked CBR (%)				
	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
0	79.33	79.66	78	80.66	81.23
10	129.33	134.67	144	158	192
20	140.67	145.33	150.67	174.67	197.33
30	153.33	160	170.67	184	209.33
40	128	132	138.67	156	186.67



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 2 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของวัสดุผสมที่ 2

ปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) มีผลต่อค่า Soaked และ Unsoaked CBR เนื่องจากค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณสารผสมเพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังภาพที่ 39-40 เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างเก่ากันเตาและเก่าลอยผสมสารผสมเพิ่มที่ 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม ทำการทดสอบทันทีหลังการบดอัดและอายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า กำลังของเก่ากันเตาและเก่าลอยเมื่อได้ทำการปรับปรุงคุณภาพที่สัดส่วนดังกล่าว จะมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 90.67, 93.33, 113.33 และ 73.33% ตามลำดับ เมื่อทดสอบทันทีหลังการบดอัด ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 0.88, 0.91, 1.10 และ 0.71 เท่า ตามลำดับ ส่วนค่า Soaked CBR มีค่าเท่ากับ 129.33, 140.67, 153.33 และ 128% ตามลำดับ มีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 1.63, 1.77, 1.93 และ 1.61 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของเก่ากันเตาที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยสารผสมเพิ่ม ซึ่งมีค่า Soaked และ Unsoaked CBR เท่ากับ 79.33 และ 102.67% ตามลำดับ เห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการผสมสารผสมเพิ่มลงในเก่ากันเตาพบว่า จะให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR สูงกว่าเก่ากันเตาที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกสัดส่วนผสม โดยค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มที่ทดสอบทันทีหลังการบดอัดของเก่ากันเตาและเก่าลอย สรุปไว้ดังตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มของเก่ากันเตาและเก่าลอย

วัสดุผสมที่ 2 (BF: LP)	ปริมาณสารผสมเพิ่ม (%)				
	0	10	20	30	40
Unsoaked CBR (%)	102.67	90.67	93.33	113.33	73
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.0	0.88	0.91	1.10	0.71
Soaked CBR (%)	79.33	129.33	140.67	153.33	128
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.0	1.63	1.77	1.93	1.61

ตารางที่ 27 ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของแก็กกันเตาผสมสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม

วัสดุผสมที่ 2 (BF:LP)	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
Unsoaked CBR (%)	90.67	101	130	145.67	179.67
อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.0	1.11	1.43	1.61	1.98
Soaked CBR (%)	129.33	134.67	144	158	192
อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.0	1.04	1.11	1.22	1.48

ในส่วนของอายุการบ่มซึ่งมีผลต่อค่า CBR เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 40 พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยอายุการบ่มจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง โดยทุกปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ผสมแก็กกันเตามีแนวโน้มการพัฒนาค่า CBR ไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างแก็กกันเตาและแก็กลอยผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสมที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า Unsoaked CBR มีค่าเท่ากับ 101, 130, 145.67 และ 179.67% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.11, 1.43, 1.61 และ 1.98 เท่า ตามลำดับ ส่วนค่า Soaked CBR มีค่าเท่ากับ 134.67, 144, 158 และ 192% ตามลำดับ มีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 1.04, 1.11, 1.22 และ 1.48 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของแก็กกันเตาผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสมหลังบดอัด ซึ่งมีค่า Soaked และ Unsoaked CBR เท่ากับ 90.67 และ 129.33% ตามลำดับ และจากตารางที่ 27 จะเห็นได้ว่าค่า CBR มีการพัฒนาสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น

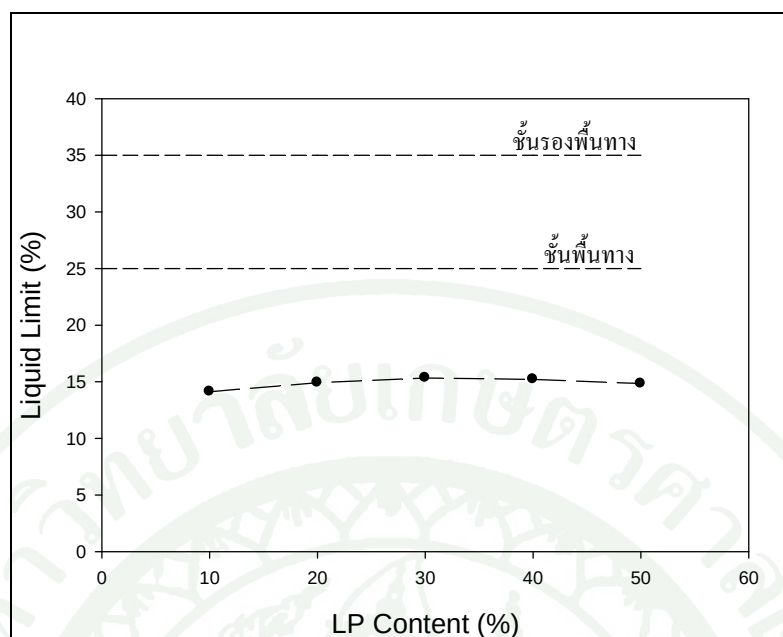
คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ 3 (เอ้ากันเตาผสมเศษปูนขาว)

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมที่ 3

อิทธิพลของปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index แสดงไว้ดังตารางที่ 28 และภาพที่ 41 จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อผสมเศษปูนขาวลงในตัวอย่างเอ้ากันเตาและเอ้าลอย ทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าลดลงประมาณ 1-2% สาเหตุที่ทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มลดลงต่างกันเนื่องจากเศษปูนขาวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นเศษปูนขาวมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุและคอลลอยด์ออกจากมวลของวัสดุ จึงทำให้เกิดการ Flocculation และเกิดการรวมตัวกัน (Agglomeration) ในส่วนค่า Plasticity Index มีพฤติกรรมเป็น NP (Non Plastic) เนื่องจากปฏิกิริยาข้างต้นเช่นเดียวกับค่า Liquid Limit เป็นผลทำให้ค่าดัชนีความเหนียว (Plastic Index) ไม่สามารถหาค่าได้

ตารางที่ 28 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของเอ้ากันเตาผสมสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) (%)	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index (%)
0	—	NP	—
10	15.33	NP	—
20	14.91	NP	—
30	14.82	NP	—
40	15.21	NP	—
50	14.11	NP	—



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 3

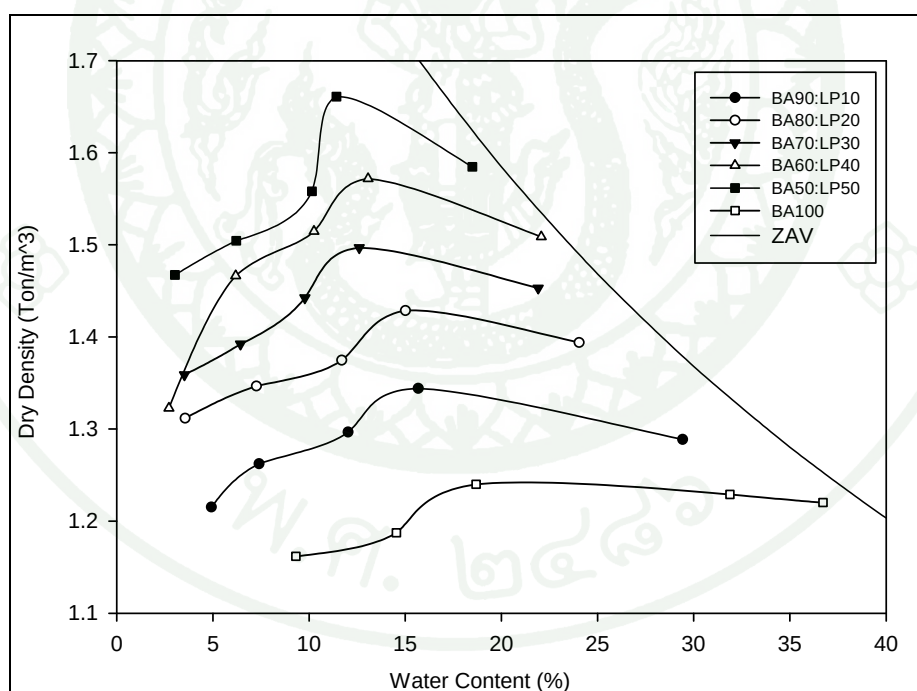
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมที่ 3 (เถ้าก้นเตา และเศษปูนขาว)

คุณสมบัติด้านการบดอัด

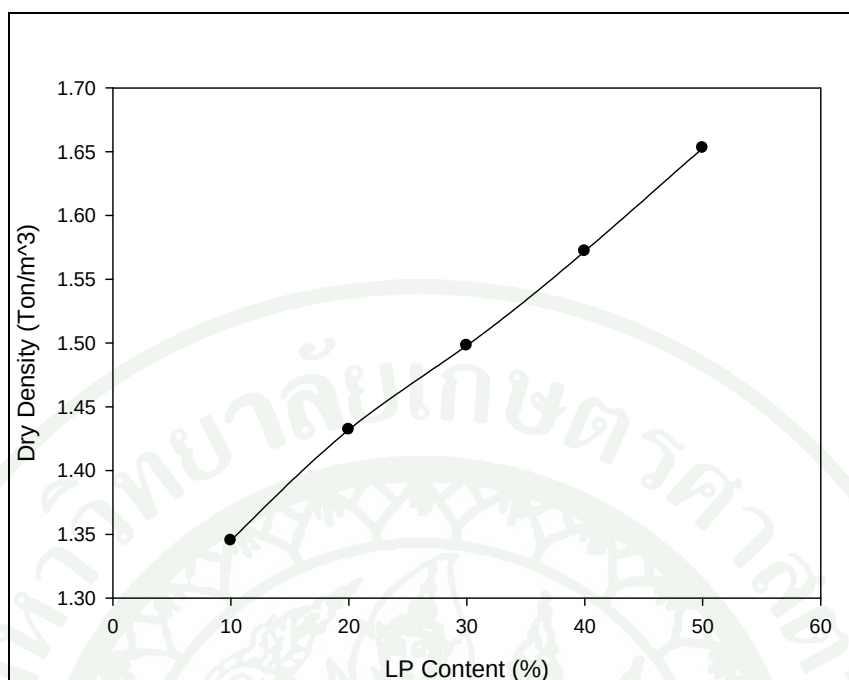
ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.ft/ft³) ผสมสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ที่สัดส่วนผสม 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม แสดงไว้ดังตารางที่ 29 และภาพที่ 42-44 พบว่าเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการผสมเศษปูนขาวที่มีน้ำหนักหนักกว่าลงไปแทนที่เถ้าก้นเตา จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของวัสดุผสม มีแนวโน้มลดลงทั้งนี้ปริมาณความชื้นที่ลดลงนี้อาจเป็นผลมาจากสารผสมเพิ่มที่ผสมลงในเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเถ้าก้นเตามาก พื้นที่ผิวจำเพาะจึงสูงกว่า อีกทั้งยังเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างเศษปูนขาวกับน้ำ ทำให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ปริมาณความชื้นที่ทดสอบได้มีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 29 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของเถ้าก้นเตา ผสมสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ที่ปริมาณต่างๆ

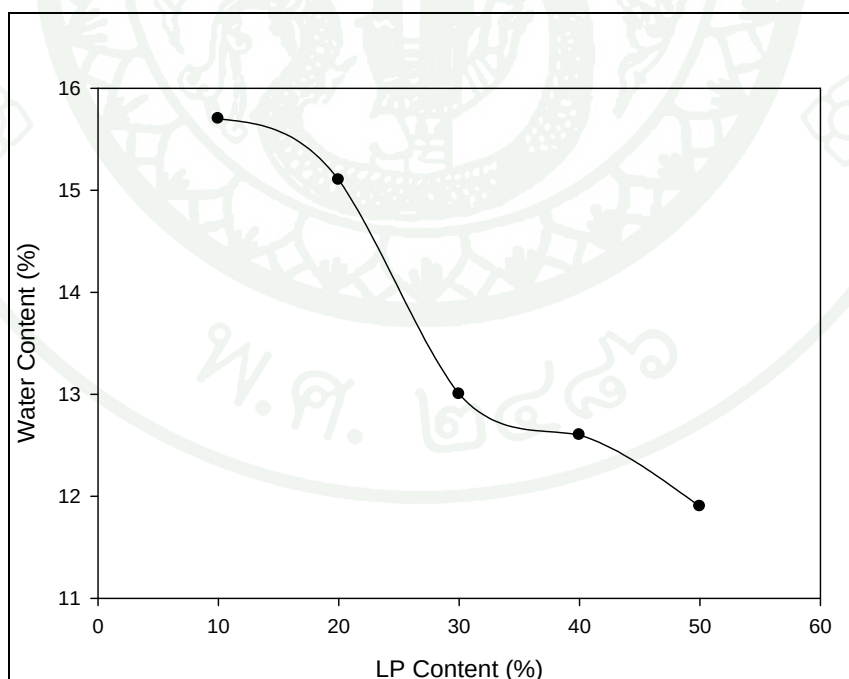
ปริมาณสารผสมเพิ่ม เศษปูนขาว(LP) (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	ปริมาณความชื้นเหมาะสม (%)
10	1.345	15.70
20	1.432	15.10
30	1.498	13.00
40	1.572	12.60
50	1.653	11.90



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 3



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ของวัสดุผสมที่ 3

คุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบ Soaked และ Unsoaked CBR ของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มโดยที่เถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มที่สัดส่วน 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม ทำการทดสอบทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 30-31 และภาพที่ 45-46

จากการทดสอบพบว่า คุณสมบัติด้านกำลังที่เพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตา ที่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) ทำให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผสมเพิ่มรวมไปถึงอายุการบ่มทำให้ค่า CBR มีค่าสูงขึ้น

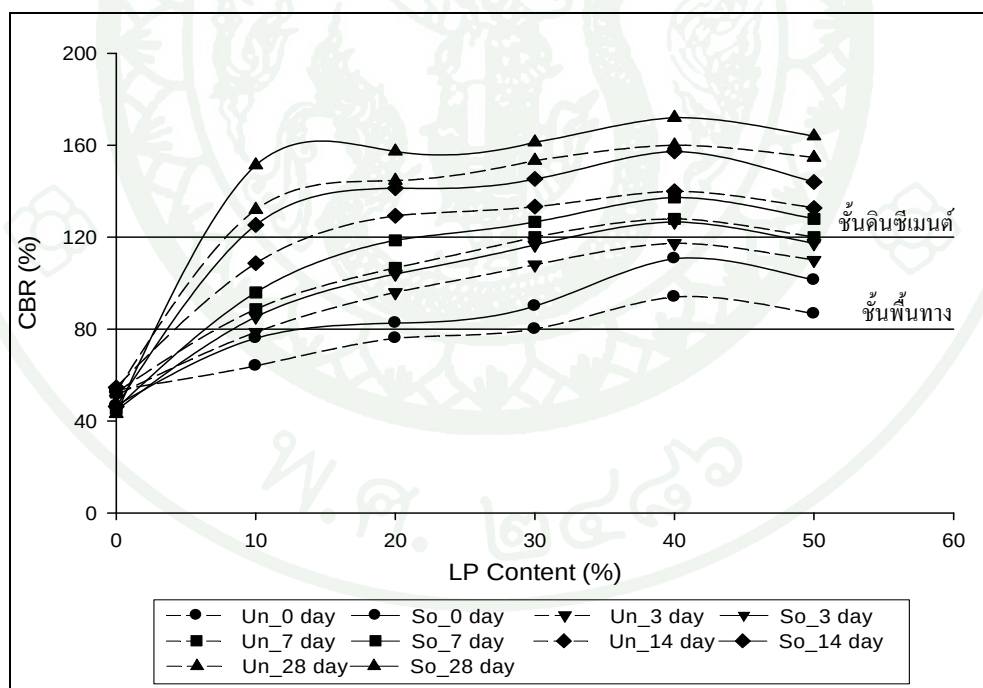
จากผลการทดสอบจะสังเกตได้ว่า ค่า Soaked CBR มีค่ามากกว่า Unsoaked CBR เนื่องจากในขั้นตอนการ การแช่น้ำ (Soaked) ตัวอย่าง ทำให้มีปริมาณน้ำจากภายนอกเข้าไปในตัวตัวอย่าง จึงช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยดำเนินต่อไป ทำให้มีการพัฒนากำลังเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 30 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR ของวัสดุผสมที่ 3 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ (เศษปูนขาว) ตามอายุการบ่ม

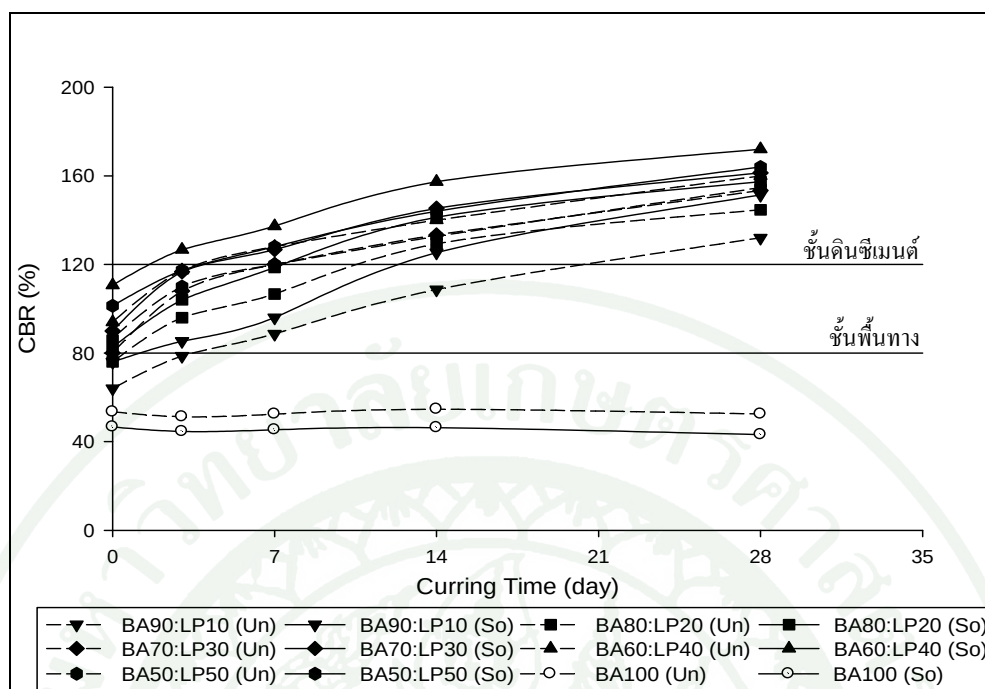
ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Unsoaked CBR (%)				
	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
0	53.43	51.23	52.43	54.62	52.47
10	64	78.67	88.67	108.67	132
20	76	96	106.67	129.33	144.67
30	80	108	120	133.33	153.33
40	94	117.33	128	140	160
50	86.67	110	120	132.67	154.67

ตารางที่ 31 ผลการทดสอบ Soaked CBR ของวัสดุผสมที่ 3 ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ (เศษปูนขาว) ตามอายุการบ่ม

ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Soaked CBR (%)				
	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
0	44.67	44.61	45.37	46.32	43.2
10	76	85.33	96	125.33	151.33
20	82.67	104	118.67	141.33	157.33
30	90	116.67	126.67	145.33	161.33
40	110.67	126.67	137.33	157.33	172
50	101.33	117.33	128	144	164



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มของ วัสดุผสมที่ 3 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของวัสดุผสมที่ 3

ปริมาณสารผสมเพิ่ม (เศษปูนขาว) มีผลต่อค่า Soaked และ Unsoaked CBR เนื่องจากค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณสารผสมเพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังภาพที่ 45 และภาพที่ 46 เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างไถ่กันเตาผสมสารผสมเพิ่มที่ 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม ทำการทดสอบทันทีหลังการบดอัดและอายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า กำลังของไถ่กันเตาเมื่อได้ทำการปรับปรุงคุณภาพที่สัดส่วนดังกล่าว จะมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 64, 76, 80, 94 และ 86.67% ตามลำดับ เมื่อทดสอบทันทีหลังการบดอัด ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.20, 1.42, 1.50, 1.76 และ 1.62 เท่า ตามลำดับ ส่วนค่า Soaked CBR มีค่าเท่ากับ 76, 82.67, 90, 110.67 และ 101.33% ตามลำดับ มีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 1.63, 1.77, 1.93, 2.37 และ 2.17 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของไถ่กันเตาที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยสารผสมเพิ่ม ซึ่งมีค่า Soaked และ Unsoaked CBR เท่ากับ 46.67 และ 53.43% ตามลำดับ เห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการผสมสารผสมเพิ่มลงในไถ่กันเตาพบว่า จะให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR สูงกว่าไถ่กันเตาที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกสัดส่วนผสม โดยค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มที่ทดสอบทันทีหลังการบดอัดของไถ่กันเตา สรุปไว้ดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มของเถ้าก้นเตา

วัสดุผสมที่ 3 (BA: LP)	ปริมาณสารผสมเพิ่ม (%)					
	0	10	20	30	40	50
Unsoaked CBR (%)	53.43	64	76	80	94	86.67
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.0	1.20	1.42	1.50	1.76	1.62
Soaked CBR (%)	46.67	76	82.67	90	110.67	101.33
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.0	1.63	1.77	1.93	2.37	2.17

ในส่วนของการบ่มซึ่งมีผลต่อค่า CBR เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 46 พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยอายุการบ่มจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง โดยทุกปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ผสมเถ้าก้นเตามีแนวโน้มการพัฒนาค่า CBR ไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสมที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า Unsoaked CBR มีค่าเท่ากับ 78.67, 88.67, 108.67 และ 132% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.23, 1.39, 1.70 และ 2.06 เท่า ตามลำดับ ส่วนค่า Soaked CBR มีค่าเท่ากับ 85.33, 96, 125.33 และ 151.33% ตามลำดับ มีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 1.12, 1.26, 1.65 และ 1.99 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสมหลังบดอัด ซึ่งมีค่า Soaked และ Unsoaked CBR เท่ากับ 76 และ 64% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า CBR มีการพัฒนาสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นสรุปไว้ดังตารางที่ 33

การพัฒนาค่าที่เพิ่มขึ้นของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิดนั้น เป็นผลมาจากการผสมปริมาณสารผสมเพิ่มที่มากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration และ Flocculation ก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และสร้างรูปร่างโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกันตามขนาดผลของเถ้าก้นเตา ทำให้เถ้าก้นเตาที่ถูกทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกันส่งผลให้กำลังของเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้นในทันทีที่มีการผสม

ตารางที่ 33 ค่า Soaked และ Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Soaked และ Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตาผสมสารผสมเพิ่ม 10% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม

วัสดุผสมที่ 3 (BA:LP)	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
Unsoaked CBR (%)	64	78.67	88.67	108.67	132
อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.0	1.23	1.39	1.70	2.06
Soaked CBR (%)	76	85.33	96	125.33	151.33
อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.0	1.12	1.26	1.65	1.99

ในส่วนการพัฒนาค่าที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มนั้นเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยา Cementation และ Pozzolanic ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้ค่ากำลังเถ้าก้นเตาเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะปูนขาวและเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน เป็นสาเหตุทำให้ค่ากำลังเถ้าก้นเตาที่ทำการปรับปรุงคุณภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

จากผลการทดสอบค่า CBR พบว่าค่ากำลังแบบ Soaked CBR ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าการทดสอบแบบ Unsoaked CBR เนื่องจากปริมาณสารผสมเพิ่ม (เถ้าลอยและเศษปูนขาว) มีการทำปฏิกิริยา Hydration, Flocculation, Cementation และ Pozzolanic แต่ในการศึกษาวิธีการบ่มตัวอย่างอาจทำให้น้ำระเหยออกไปบ้าง และเนื่องจากสารผสมเพิ่มมีการเชื่อมประสานคล้ายกับที่เกิดในปูนซีเมนต์ จึงทำให้มีความต้องการความชื้นมากขึ้นเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเมื่อนำตัวอย่างไปแช่น้ำ (Soaked) ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคมากขึ้นมีการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่แข็งแรงทำให้มีค่า CBR (Soaked) เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารผสมเพิ่มด้วย

จากการทดสอบและสมมติฐานข้างต้นเห็นได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดจากการปรับปรุงคุณภาพเถ้าก้นเตาคือ ปฏิกิริยา Cementation และ Pozzolanic เป็นหลัก ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าเถ้าก้นเตาที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย และเศษปูนขาว จัดเป็นวัสดุคล้ายดินซีเมนต์ โดยต้องอาศัยปริมาณสารผสมเพิ่มและอายุการบ่มจึงจะมีคุณสมบัติด้านกำลังใกล้เคียงหรือมากกว่ากำลังของดินซีเมนต์

คุณสมบัติทางด้านการซึมผ่านของวัสดุผสม

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด โดยทำการทดสอบทันที หลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน ด้วยวิธี Constant Head โดยใช้ความดันเข้าช่วย ซึ่งอิทธิพลของ ปริมาณสารผสมเพิ่ม แสดงไว้ในตารางที่ 34-36 และภาพที่ 47-49 พบว่าเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่ม มากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มลดลง (ที่บ่มน้ำ) โดยค่า สัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของวัสดุผสมชนิดที่ 1 จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% ประมาณ 28 เท่าของเล็กน้อยแต่ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ และวัสดุผสมชนิดที่ 2 จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% ประมาณ 11 เท่าของเล็กน้อยแต่ที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ และวัสดุ ผสมชนิดที่ 3 จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% ประมาณ 30 เท่าของเล็กน้อยแต่ที่ไม่ ได้ปรับปรุงคุณภาพ สมมติฐานของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของเล็กน้อยแต่ที่ลดลงอาจเป็น เพราะสารผสมเพิ่มที่นำมาปรับปรุงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านต่ำลงจากเล็กน้อยและเศษปูน ขาวที่เข้าไปทำปฏิกิริยาและปิดกั้นทางเดินของน้ำ ถึงแม้เล็กน้อยแต่จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน สูงก็ตาม เป็นผลให้ปริมาณสารผสมเพิ่มที่นำมาผสมกับเล็กน้อยแต่ แล้วทำการบดอัดจะทำให้ โครงสร้างของเล็กน้อยแต่เปลี่ยนแปลงไปพร้อมกับการเชื่อมประสาน เพื่ออุดช่องว่างในมวลเล็กน้อย แต่

ตารางที่ 34 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของวัสดุผสมที่ 1 ในปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ

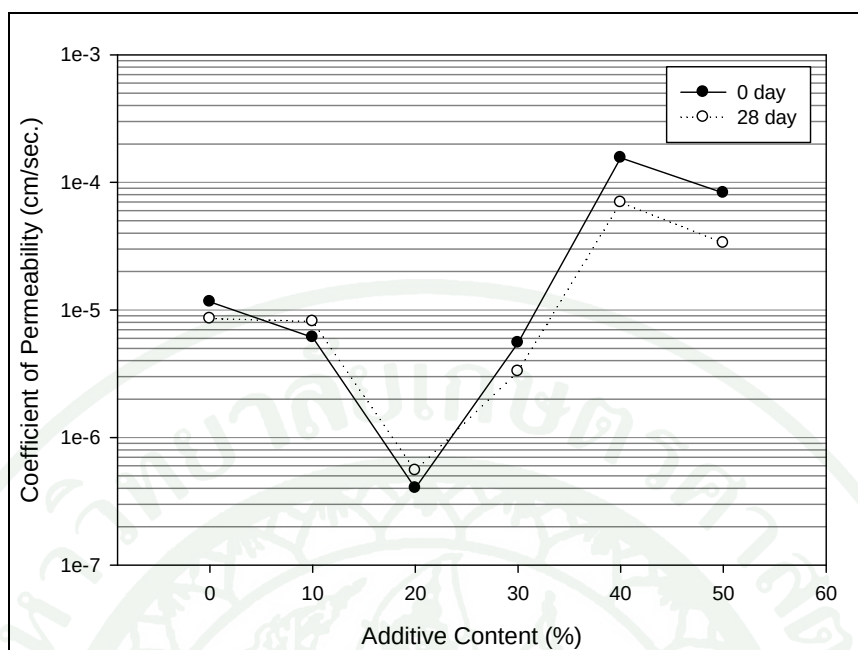
ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Coefficient of Permeability (cm./sec.)	
	หลังบดอัด	28 วัน
0	1.16E-05	8.56E-06
10	6.10E-06	8.13E-06
20	4.02E-07	5.51E-07
30	5.53E-06	3.30E-06
40	1.56E-04	6.96E-05
50	8.28E-05	3.35E-05

ตารางที่ 35 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของวัสดุผสมที่ 2 ในปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ

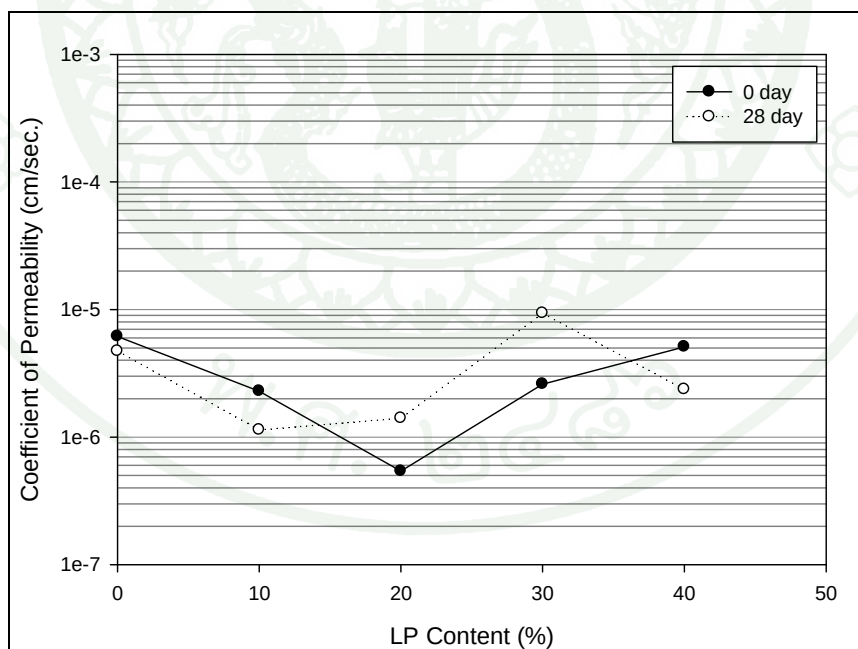
ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Coefficient of Permeability (cm./sec.)	
	หลังบดอัด	28 วัน
0	6.16E-06	4.72E-06
10	2.29E-06	1.14E-06
20	5.41E-07	1.41E-06
30	2.60E-06	9.35E-06
40	5.10E-06	2.36E-06

ตารางที่ 36 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของวัสดุผสมที่ 3 ในปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ

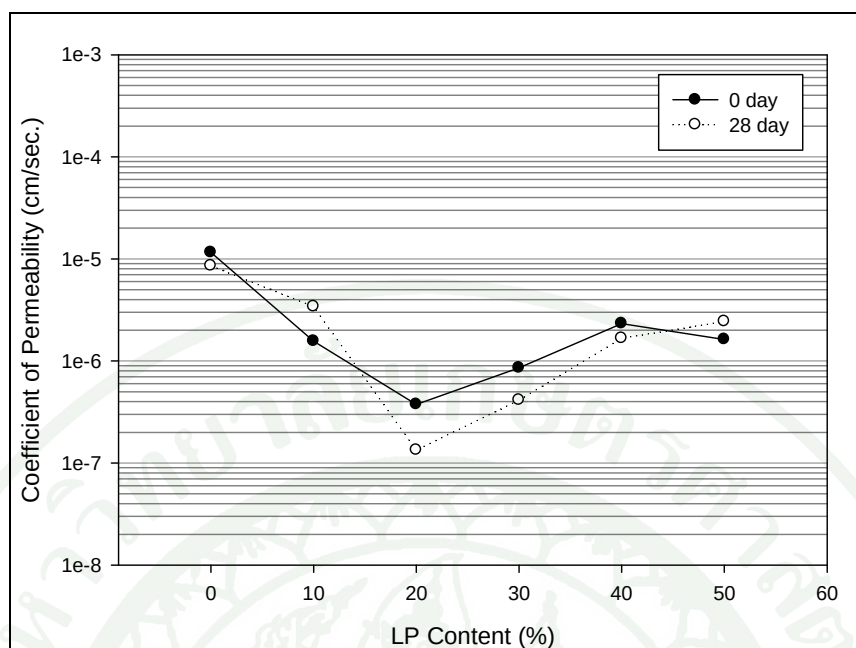
ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Coefficient of Permeability (cm./sec.)	
	หลังบดอัด	28 วัน
0	1.16E-05	8.56E-06
10	1.56E-06	3.41E-07
20	3.75E-07	1.34E-07
30	8.57E-07	4.14E-07
40	2.32E-06	1.67E-06
50	1.63E-06	2.44E-06



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่มของวัสดุผสมที่ 1 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่มของวัสดุผสมที่ 2 ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่มของวัสดุผสมที่ 3 ที่อายุการบ่มต่างๆ

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด ที่ผสมสารผสมเพิ่มปริมาณต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (โปรงน้ำ) ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมชนิดที่ 1 จะมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% ประมาณ 1.4 เท่าของวัสดุผสมที่ทดสอบหลังจากการบดอัดทันที และวัสดุผสมชนิดที่ 2 จะมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% ประมาณ 2.6 เท่าของวัสดุผสมที่ทดสอบหลังจากการบดอัดทันที และวัสดุผสมชนิดที่ 3 จะมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% ประมาณ 0.4 เท่าของวัสดุผสมที่ทดสอบหลังจากการบดอัดทันที สมมติฐานของค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด ที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นเพราะ เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นเป็นผลให้เม็ดกั้นเตาผสมสารผสมเพิ่มความชื้นน้ำลดลงเนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุและการจับตัวกัน (Cation Exchange and Flocculation) ทำให้อนุภาคดินเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. แก้วก้นเตาปิทมินัสที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ลักษณะคล้ายทราย ส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ และฟุ้งกระจายได้ง่าย จากตัวอย่างภาพถ่ายแก้วก้นเตาจากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ตรวจสอบที่กำลังขยายแตกต่างกัน จะพบว่าอนุภาคของแก้วก้นเตานั้นมีขนาดที่แตกต่างและรูปร่างที่แตกต่างกันไปโดยจะมีลักษณะพื้นผิวทั้งที่เรียบและที่เป็นแบบขรุขระ และมีลักษณะความเป็นเหลี่ยมคม ซึ่งประกอบด้วยปริมาณขนาดเทียบเท่าทราย (Sand) และ กรวด (Gravel) เป็นหลักประมาณ 94.06% ที่เหลือเป็นขนาดเทียบเท่าตะกอนทราย (Silt) และดินเหนียว (Clay) มีการกระจายขนาดของเม็ดดินคละกันไม่สม่ำเสมอ (Poorly-graded) การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification และ AASHTO จัดอยู่ในกลุ่ม SP และ A-3(0)

2. แก้วลอยที่นำมาใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด มีลักษณะคล้ายผงปูนซีเมนต์ มีลักษณะสีเทา และฟุ้งกระจายได้ง่าย จากตัวอย่างภาพถ่ายแก้วลอยจากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope เช่นเดียวกับแก้วก้นเตา จะพบว่าอนุภาคของแก้วลอยนั้นมีลักษณะพื้นผิวเรียบ และมีรูปร่างลักษณะค่อนข้างกลม หรืออาจพบรูปร่างที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้เผาถนอม โดยแก้วลอยที่ทำการอบแล้วเมื่อนำมาทดสอบสามารถจำแนกในระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในกลุ่ม ML จัดเป็นทรายแป้งที่มีขนาดเล็กมากและมีความเหนียวน้อย และจำแนกตามระบบ AASHTO พบว่าแก้วลอยจัดอยู่ในกลุ่ม A-4(8)

3. เศษปูนขาว นำมาใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นละเอียดค่อนข้างสม่ำเสมอ มีสีน้ำตาลหรือขาวขุ่น มีคุณสมบัติเป็นสารปอชโซลานตามธรรมชาติ เนื่องจากประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะเป็นผงร่วนไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำในปริมาณที่เหมาะสมและอายุการบ่มมากขึ้นจะแข็งตัวได้

4. แก้วก้นเตา แก้วลอย และเศษปูนขาว มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ประมาณ 1.24, 1.36 และ 2.11 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ มีปริมาณความชื้นเหมาะสมประมาณ 20.00, 18.30 และ 9.20% ตามลำดับ, ค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของเศษปูนขาว มีค่าสูงกว่าแก้วก้นเตา และแก้วลอย และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเฉลี่ยของแก้วลอย มีค่าต่ำกว่าแก้วก้นเตา

5. ปริมาณสารผสมเพิ่มที่ผสมลงในเอ้ากันเตาของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมมากขึ้นจะทำให้เอ้ากันเตาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว มีค่าดัชนีความเหนียวประมาณ 3-5% ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

6. เมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มลดลง

7. สารผสมเพิ่มในวัสดุผสมที่ 1 ที่มีเอ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มหลักและเพิ่มปริมาณของเศษปูนขาวมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น และมีกำลังสูงขึ้นตามปริมาณเศษปูนขาว โดยสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพเอ้ากันเตาได้เป็นอย่างดี และได้พิจารณาสัดส่วนผสมของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังมากที่สุดคือ ปริมาณเอ้าลอย 75% ต่อปริมาณเศษปูนขาว 25% โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม

8. วัสดุตั้งต้นในวัสดุผสมที่ 2 ที่มีปริมาณเอ้ากันเตาเป็นหลักและเพิ่มปริมาณของเอ้าลอยมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น และมีกำลังสูงขึ้นตามปริมาณเอ้าลอย ซึ่งพอที่จะสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพเอ้ากันเตาได้ในระดับหนึ่ง และได้พิจารณาสัดส่วนผสมของวัสดุตั้งต้นที่ให้ค่า CBR มากที่สุดคือ ปริมาณเอ้ากันเตา 80% ต่อปริมาณเอ้าลอย 20% โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุตั้งต้น

9. วัสดุผสมที่ 1 จะให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR สูงที่สุด ที่สัดส่วนระหว่างเอ้ากันเตาและสารผสมเพิ่มคือ 60:40 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม และใช้สารผสมเพิ่มในสัดส่วนระหว่างเอ้าลอยและเศษปูนขาวคือ 75:25 โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม หรือใช้ปริมาณเอ้ากันเตา เอ้าลอย และเศษปูนขาวคือ 60%, 30% และ 10% ตามลำดับ ดังตารางที่ 37

10. วัสดุผสมที่ 2 จะให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR สูงที่สุด ที่สัดส่วนระหว่างวัสดุตั้งต้นและเศษปูนขาวคือ 70:30 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม และใช้วัสดุตั้งต้นในสัดส่วนระหว่างเอ้ากันเตาและเอ้าลอยคือ 80:20 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุตั้งต้น หรือใช้ปริมาณเอ้ากันเตา เอ้าลอย และเศษปูนขาวคือ 56%, 14% และ 30% ตามลำดับ ดังตารางที่ 37

11. วัสดุผสมที่ 3 จะให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR สูงที่สุด ที่สัดส่วนระหว่างเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวคือ 60:40 โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุผสม ดังตารางที่ 37

ตารางที่ 37 ปริมาณเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาว กับค่า CBR และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด

วัสดุผสม	สัดส่วน (%)	ปริมาณวัสดุ (%)			ค่า CBR (%)		หมายเหตุ
		(อายุการบ่ม 28 วัน)					
		BA	FA	LP	Unsoaked	Soaked	
วัสดุผสมที่ 1 (BA:FLP)	90:10	90	7.5	2.5	162.67	165.33	ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน
	80:20	80	15	5	253.33	257.33	
	70:30	70	22.5	7.5	273.33	276	ค่า CBR สูงที่สุด
	60:40	60	30	10	289.33	293.33	
	50:50	50	37.5	12.5	274.67	280	
วัสดุผสมที่ 2 (BF:LP)	90:10	72	18	10	179.67	192	ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน
	80:20	64	16	20	184	197.33	ค่า CBR สูงที่สุด
	70:30	56	14	30	197.33	209.33	
	60:40	48	12	40	172	186.67	
วัสดุผสมที่ 3 (BA:LP)	90:10	90	-	10	132	151.33	ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน
	80:20	80	-	20	144.67	157.33	ค่า CBR สูงที่สุด
	70:30	70	-	30	153.33	161.33	
	60:40	60	-	40	160	172	
	50:50	50	-	50	154.67	164	

12. เมื่อเปรียบเทียบค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด โดยวัสดุผสมที่ 1 (เถ้าก้นเตาผสมเถ้าลอยและเศษปูนขาว) จะให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR สูงที่สุด รองมาเป็นวัสดุผสมที่ 2 (เถ้าก้นเตาและเถ้าลอยผสมเศษปูนขาว) และวัสดุผสมที่ 3 (เถ้าก้นเตาผสมเศษปูนขาว) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณเถ้าลอยมีผลต่อค่า CBR มาก ดังเช่นในวัสดุผสมที่ 3 ที่ไม่มีการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสม จึงทำให้ค่า CBR มีค่าน้อยที่สุด ดังตารางที่ 37

13. การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้เสนอแนวทางในการนำวัสดุผสมมาใช้ประโยชน์ด้านงานทาง โดยใช้เป็นวัสดุงานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย ซึ่งพิจารณาจากค่า Soaked CBR ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ควรเลือกวัสดุผสมที่ 1 เพราะให้ค่า CBR สูงที่สุดและใช้ปริมาณ เศษปูนขาวน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น จากปริมาณของเศษปูนขาว

14. จากผลการทดสอบทั้ง Soaked และ Unsoaked CBR ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่า ถ้าล้อย มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารผสมเพิ่มมากกว่าที่จะใช้ถ้าล้อยเป็นวัสดุตั้งต้น

15. ค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของวัสดุผสมที่ 1 เมื่อทำการปรับปรุงด้วยสารผสมเพิ่ม ในปริมาณสารผสมเพิ่ม 40% ให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR สูงที่สุด แต่ปริมาณสารผสมเพิ่มที่ 10% ก็สามารถให้ค่า Soaked และ Unsoaked CBR ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

16. ค่า Soaked และ Unsoaked CBR ของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการปรับปรุง เนื่องจากปริมาณสารผสมเพิ่มและอายุการบ่มที่มากขึ้น มีผลต่อค่า CBR ที่สูงขึ้น ซึ่งการบ่มภายหลังการบดอัดนั้น ทำให้ค่า CBR สูงขึ้นและมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยทุกปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพเท่ากันเดามีแนวโน้มการพัฒนาค่า CBR ไปในทิศทางเดียวกัน

17. เมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มลดลง (ที่บ่มน้ำ) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมที่ 1 จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% วัสดุผสมที่ 2 จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% และวัสดุผสมที่ 3 จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (โปร่งน้ำ) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุผสมที่ 1 จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% วัสดุผสมที่ 2 จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% และวัสดุผสมที่ 3 จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20%

ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการทดสอบค่า CBR ของวัสดุผสมที่ 1 จะเห็นได้ว่า สารผสมเพิ่มประมาณ 3% ก็ให้ค่า CBR ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย ซึ่งจากสัดส่วนดังกล่าวจะใช้ปริมาณเถ้าก้นเตา เถ้าลอย และเศษปูนขาวคือ 97%, 2.25% และ 0.75% ตามลำดับ
2. การศึกษาถึงคุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด ในครั้งนี้ใช้การทดสอบ CBR เพียงอย่างเดียว ดังนั้นเพื่อให้เถ้าก้นเตาที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพเปรียบเทียบกับมาตรฐานเดียวกับดินซีเมนต์จึงควรทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น Unconfined Compressive Strength, Shrinkage Factors และ Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures เป็นต้น
3. ควรมีการศึกษากาเกิดปฏิกิริยาต่างๆ และสารผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด เพื่อใช้ในการอธิบายโครงสร้างและขั้นตอนการพัฒนาของกำลังของเถ้าก้นเตาที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ อันประกอบด้วย การศึกษา Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อศึกษาในด้าน Physico-Chemical ต่อไป
4. ควรทำแปลงทดสอบวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิดในสนาม เพื่อที่จะได้ทราบพฤติกรรมที่แท้จริงในการนำไปใช้ประโยชน์และเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติที่ได้จากในสนามและในห้องปฏิบัติการ
5. ควรทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการบ่มและความล่าช้าของการบดอัดต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุผสมเพื่อใช้ในการบดอัดในขณะที่การทำงานจริงในสนามไม่สามารถที่จะควบคุมปริมาณความชื้นและเวลาการทำงานให้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาสั้นได้ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจึงควรศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณความชื้นและความล่าช้าในการบดอัดอย่างละเอียดชัดเจนมากขึ้น
6. การศึกษาในครั้งนี้ใช้เศษปูนขาวเป็นส่วนหนึ่งในสารผสมเพิ่ม ซึ่งควรทำการศึกษาเพิ่มเติมทางด้านมลภาวะที่จะเกิดต่อสิ่งแวดล้อมและการนำไปใช้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทางหลวง. 2532. รายละเอียดควบคุมการก่อสร้าง. กรมทางหลวงแผ่นดิน, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

กิตติศักดิ์ โชติ. 2553. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังด้วยเถ้าก้นเตาและปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จุฑาทิพย์ เขียวแจ่ม. 2552. การปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกและทรายโดยใช้เถ้าก้นเตา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพัฒน์ ลาคนอก. 2552. โอกาสในการเปลี่ยนทางสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้เถ้าก้นเตาในการปรับปรุงคุณภาพชั้นรองพื้นทาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พลการ พีรภาคย์. 2542. การปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังโดยวิธีผสมเถ้าลอยลิกไนต์. การศึกษาพิเศษประกาศนียบัตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

พิทักษ์พงษ์ ทองยอดอินทร์ และ สุรศักดิ์ โสพล. 2544. การปรับปรุงดินลูกรังเพื่อใช้เป็นพื้นทางโดยใช้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

มนตรี นันทิพย์, สมพล ศรีวงษา และณัฐพล พาหะมว. 2543. การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าถ่านหินบิทูมินัส. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

รณภูมิ ลิ้มศรีสวัสดิ์. 2553. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรากร ไม้เรียง, จิรพัฒน์ โชติไกร และประทีป ดวงเดือน. 2522. ปฏิบัติการ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วินัย สระอุบลม, สมคาน เอี่ยมสรรพางค์, สมบัติ ปิติพิรกุล และ อำนวย พาณิชกุลพงศ์. 2543. ผลของปริมาณเถ้ามวลเบาที่ผสมในดินและอายุการบ่มที่มีต่อค่า CBR., น. 151-156. ใน รายงานการประชุมทางวิศวกรรมโยธา ครั้งที่ 6. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

วิเศษ แจ่มจิตร. 2552. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศรัณรัตน์ พวงพัฒน์. 2545. การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพร ฤทธิวิโรจน์. 2548. การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2551. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนเถ้าอุตสาหกรรม. มอก. 319 เล่ม 1-2551.

อนิรุทธิ์ ชงไชย และ สุเทพ นิ่มนวล. 2530. การใช้ประโยชน์เถ้าลอยในการเป็นวัสดุสร้างทางหลวง. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อุมาพร ปฏิพันธ์ภูมิสกุล. 2553. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตาเศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

American Society for Testing Materials. 1994. **Standard Test Method for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete: ASTM C618-92a.** Annual Book of ASTM Standards Vol. 04.01 (1994) : 89-72.

- Bo B, L. L. Larsson, S.A.k. Ohlsson, H. Bristav, and J. norrman. 2006. **Geochemical anomalies from bottom ash in a road construction-Comparison of the leaching potential between an ash road and the surroundings.** Waste management.
- British Standards Institution. 1990. BS 1377: **British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering**, B.S.I.
- Bumjoo, K. and Monica P. 2006. **Compaction characteristics and corrosivity of Indiana class-F fly and bottom ash mixtures.** Waste Management.
- Chapman, B.R. and P. George. 1996. Fly Ash in Embankment - Hebei Province China. **Proceedings of National Symposium on the use of Recycled Materials in Engineering Construction.** Sydney: pp 70-76.
- Chu, T.Y., D.T. Davidson, W.L. Goecker and Z.C. Moh. 1955. **Soil Stabilization with Lime-Flyash Mixtures: Preliminary Studies with Silty and Clayey Soils.** Highway Research Board Bull. 108, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.
- Croft, J.B. 1964. The Progresses Involved in the Lime Stabilization of Soils. **Proc. Arrb Conf. 2.** pp. 1169-1204.
- Diamond, S. and E.B. Kinter. 1965. **Mechanisms of Soil-Lime Stabilization, An Interpretive Review.** Highway Research Record Bull. 92, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C., U.S.A.
- Forteza, R. and Other. 2004. **Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerator for its use in road base.** Waste Management.
- Fraay, A.L.A., J.M. Bijen and Y.M. De Haan. 1989. The Reaction of Fly Ash in Concrete, A Critical Examination. **Cement and Concrete Research.** 19 (2): 235-246.

Hausamann, M.R. 1990. **Engineering principles of ground modification**, Mc Graw-Hill International Editions.

Hensen, T.C. 1990. Long-Term Strength of Fly Ash Concretes. **Cement and Concrete Reserch.** 20(2): 632.

Jambor, J. 1963. Relation between Phase Composition, Overall Porosity and Strength of Hardened Lime Pozzolana Pastes. **Magazine of Concrete Research.** 15: 131-147.

Minnick, L.J., W.C. Webster and E.J. Prudy. 1970. **Prediction of Fly Ash Performance.** Proc. Fly Ash Utilization Conference, Bureau of Mines Information Circular 8488.

Ruenkrairergsa, T. 1982. **Principle of soil stabilization**, น. 27. อ้างใน ชีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ สุเชษฐ์ เอี่ยมเชย. **ความคงทนของดินซีเมนต์**. กองวิเคราะห์วิจัย, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

Sherard, J.L., L.P. Punning and R.S. Decker. 1977. **Some engineering problems with dispersive clays.** A Symposium Presented at the Seventy-ninth Annual Meeting, 27 June – 2 July 1976., ASTM Special Technical Publication. 486 p.

Watt, J.D. and D.J. Thorne. 1965. Composition and Pozzolanic Properties of Pulverized Fuel Ashes: II. Pozzolanic Properties of Fly Ashes as Determined by Crushing Strength Tests on Lime Mortar. **Journal of Applied Chemitry.** 15: 595-604.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อสกุล	นายกิจจา เกษปรีชาสวัสดิ์
เกิดวันที่	17 กุมภาพันธ์ 2529
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดสิงห์บุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(โยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-

