



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Improvement of Lateritic Soil using Bottom ash, Lime Powder and Sodium Hydroxide Solution

นามผู้วิจัย

นางสาวอุมพร ปฏิพันธ์ภูมิสกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนันทน์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(.....รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.....)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Improvement of Lateritic Soil using Bottom ash, Lime Powder and Sodium Hydroxide Solution

โดย

นางสาวอุมพร ปฏิพันธ์ภูมิสกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุมพร ปฏิพันธุ์ภูมิสกุล 2553: การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขา
วิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng 110 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาใช้ในการ
ปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างทาง โดยศึกษาผลกระทบที่มีผลต่อคุณสมบัติของดินลูกรัง
ได้แก่ ปริมาณของเถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและอายุการบ่ม สำหรับสารผสมเพิ่มที่ใช้คือ เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาว
ผสมกันตามอัตราส่วน 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 และ 9:1 โดยน้ำหนักแห้งของสารผสมเพิ่ม และสารผสมเพิ่มอัตราส่วน
10, 20, 30, 40% และ 50% โดยน้ำหนักแห้งผสมกับดินลูกรังเกรด B และ D ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอก
ไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์ทุกอัตราส่วนผสม เพื่อนำวัสดุเถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดร
อกไซด์มาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม ผสมลงในดินลูกรังเกรด B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทาง
ของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

ผลการศึกษาแสดงว่าสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินคืออัตราส่วน 3:7 และ 9:1 ซึ่ง
เป็นสารผสมเพิ่มที่ต่ำลงมากที่สุดและผ่านเกณฑ์เพื่อใช้เป็นชั้นมาตรฐานรองพื้นทางตามลำดับ ค่าดัชนี
ความเหนียวมีค่าลดลงเหลือเท่ากับร้อยละ 4 ถึง 6 โดยดินลูกรังเกรด B มีค่าลดลงเหลือประมาณร้อยละ 4 ส่วน
ดินลูกรังเกรด D มีค่าลดลงเหลือประมาณร้อยละ 6 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินที่ปรับปรุงลดลง,
ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าแคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซ (CBR) แบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำ ที่
อัตราสารผสมเพิ่มเดียวกันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสารผสมเพิ่มและอายุการบ่ม ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้น
น้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ปรับปรุงมีค่าลดลง (เทียบน้ำ) เมื่อสารผสมเพิ่มเพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ความ
ชื้นน้ำของดินลูกรังปรับปรุงเกรด B จะมีค่าลดลงมากที่สุดประมาณ 77 เท่า สำหรับปริมาณสารผสมเพิ่ม 30%
และดินลูกรังปรับปรุงเกรด D จะมีค่าลดลงมากที่สุดประมาณ 33 เท่า สำหรับปริมาณสารผสมเพิ่ม 50%

สรุปจากผลการศึกษาได้ว่า สารผสมเพิ่มทั้งสองอัตราส่วนคือ 3:7 และ 9:1 สามารถใช้ปรับปรุง
คุณภาพของดินลูกรังเกรด B และ D ได้ ซึ่งค่าแคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซ (CBR) ผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับใช้
เป็นชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Umaporn Patipanpoomsakul 2010: Improvement of Lateritic Soil using Bottom ash, Lime Powder and Sodium Hydroxide Solution. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prateep Duangduan, M.Eng. 110 pages.

This research attempted to study the improvement of lateritic soil by bottom ash, lime powder and sodium hydroxide solution. The improved soil is expected to use for road embankment construction. The study focuses on the effects of parameters such as curing times and quantity of bottom ash and lime powder on engineering properties of the improved lateritic soil. The ratios by weight of bottom ash and lime powder 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 and 9:1 were mixed with 5 molars sodium hydroxide for use as the stabilizers. The proportions between the stabilizers and soil included 10, 20, 30, 40 and 50 percents by dry weight of the soil. This study aimed to improve the soil for use as B and D graded soils according to the standard and specification of the Department of Highways, Thailand (DOH)

Experimental results show that the proportions 3:7 and 9:1 were achieve for maximum strength and for use as subbase for road, respectively. Plasticity index of the improved lateritic soils decrease to 4-6%. Maximum dry density and optimum moisture content of the improved soils increase at the same proportion of the stabilizers and curing time soaked and unsoaked CBR. of the improved lateritic soils increase. The coefficient of permeability of the improved lateritic soils with B and D gradation test were decrease about 77 times and 33 times, respectively.

Therefore, the stabilizers at the proportions 3:7 and 9:1 can be used to improve the lateritic soil grade B and D. Result of the California Bearing Ratio (CBR) of the improved soil quality for use as subbase and base for road according to the standard and specification of the Department of Highways, Thailand (DOH).

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ประทีป ดวงเดือน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักเป็นอย่างสูง ที่ให้การประสิทธิประสาทวิชาความรู้และคำปรึกษา เพื่อให้เกิดแนวความคิดและความเข้าใจใน วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ศุภกิจ นนทนันทน์ ที่กรุณาให้ความรู้และ คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ ที่สำคัญขอขอบพระคุณ คุณหัตถ์ชัย ลิ้มเจริญ และบริษัท BLCP POWER จำกัดที่เอื้อเฟื้อวัสดุและทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่พร่ำสอนและให้ความรู้แก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณพี่ๆ ที่ศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานรากที่เอื้อเฟื้อข้อมูลรวมไปถึงพี่นกวรรณ พี่ ศราวุธ อาจารย์หม้อและเจ้าหน้าที่เทคนิคทุกท่านที่ประจำ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี ที่เอื้อเฟื้อด้านสถานที่ เครื่องมือและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดีจนงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้งานวิจัยจะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่ง พ่อ แม่และพี่สาวที่ให้การส่งเสริมในด้านการศึกษาและเป็นกำลังใจในการเรียนมาโดยตลอด หากวิทยานิพนธ์นี้สามารถก่อให้เกิดประโยชน์ต่อบุคคลหรือส่วนรวมไม่มากนักน้อย ผู้วิจัยขอขมาความ ดีนี้ให้แก่ พ่อแม่ พี่สาวและคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยส่งเสริมจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

อุมพร ปฏิพันธ์ภูมิสกุล

เมษายน 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	38
อุปกรณ์	38
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	99
สรุป	99
ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	103
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	110

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณซิลิกาและเซสควออกไซด์ของดินลูกรังในประเทศไทย	12
2	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในประเทศไทย	12
3	การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุพื้นทาง	14
4	การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุรองพื้นทาง	15
5	การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุพื้นทางในประเทศไทย	16
6	องค์ประกอบทางเคมีในถ้ำกันเตาเปรียบเทียบกับถ้ำลอยชั้นคุณภาพ F และ C	23
7	องค์ประกอบทางเคมีในเศษปูนขาวเปรียบเทียบกับปูนขาวมาตรฐาน	25
8	มาตรฐานการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์	30
9	การกระจายขนาดของเม็ดดินที่ใช้ทดสอบ	43
10	สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกและบ่งบอกดินตัวอย่าง และผลการทดสอบต่างๆ ดังนี้	44
12	องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของโลหะในวัสดุทดสอบ	50
13	ผลการทดสอบ Liquid Limit, Plastic Limit และ Plastic Limit ของวัสดุทดสอบ	51
14	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุทดสอบ	52
15	ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของวัสดุทดสอบ	53
16	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุทดสอบ	54
17	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วนต่างๆ	55
18	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR. ของสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วนต่างๆ	57
19	ค่า Liquid Limit, Liquid Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B ผสมปริมาณสารผสมเพิ่ม 20% (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7)	60
20	ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด D ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 25% (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7)	60
21	ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
22	ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ	64
23	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ปริมาณต่างๆ	71
24	ผลการทดสอบกำลังรับแรง (CBR.) แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำของดินลูกรัง เกรด B ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) ที่ปริมาณ 20%	74
25	ผลการทดสอบกำลังรับแรง (CBR.) แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำของดินลูกรัง เกรด D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) ที่ปริมาณ 25%	76
26	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสม เพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ปริมาณต่างๆ ตามอายุการบ่ม	77
27	ผลการทดสอบ Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ปริมาณต่างๆ ตามอายุการบ่ม	78
28	ค่า Unsoaked CBR. และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณ สารผสมเพิ่มของดินลูกรังเกรด B และ D	88
29	ค่า Unsoaked CBR. และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR. กับอายุการ บ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม 10% ของน้ำหนัก ดินแห้ง	89
30	ลักษณะการใช้งานของดินลูกรังที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่ม ต่างๆ	91
31	การพิจารณาด้านราคา เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง	94
32	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (อัตราส่วนสารผสมเพิ่ม 3:7) ที่ปริมาณสารผสม 20% และ 25% ตามลำดับ	96
33	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ	96

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	บริเวณที่พบดินลูกรังในประเทศไทย	11
2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Intensity และ Theta จากการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD ของเถ้าก้นเตา	22
3	การกระจายตัวและขนาดของอนุภาคเถ้าก้นเตา	22
4	กลไกสมบัติของปูนขาวเมื่อผสมดิน	29
5	ระยะเวลาในการทำวิจัย	41
6	ขั้นตอนการวิจัย	42
7	การกระจายขนาดของเม็ดดินลูกรังเกรด B และ D ที่ใช้ในการทดสอบ	44
8	การกระจายขนาดเม็ดดินของตัวอย่างดินลูกรังที่เก็บจากสนาม	48
9	การกระจายขนาดของเถ้าก้นเตาที่เก็บจากสนาม	49
10	การกระจายขนาดของเศษปูนขาวที่เก็บจากสนาม	50
11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของวัสดุทดสอบ	52
12	ค่าความสัมพันธ์ความชื้นน้ำของวัสดุทดสอบ	54
13	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของสารผสมเพิ่ม BA:TL	56
14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดิน (CBR.) กับอัตราส่วนของสารผสม	57
15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่ม 20% (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) กับอายุการบ่ม	61
16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด D ผสมสารผสมเพิ่ม 25% (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) กับอายุการบ่ม	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่มกับอายุการบ่ม	62
18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ	65
19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ	65
20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ	66
21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ	66
22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ	67
23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ	68
24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ	68
25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ	69
26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่มของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ	69
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ	71
29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรด D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ	72
30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B และ D	72
31	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B และ D	73
32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดินกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) ของดินลูกรังเกรด B	74
33	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดินลูกรังเกรด B ที่ผสมสารผสมเพิ่ม 20% กับอายุการบ่ม	75
34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดินกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) ของดินลูกรังเกรด D	75
35	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดินลูกรังเกรด D ที่สารผสมเพิ่ม 25% กับอายุการบ่ม	76
36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ	79
37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ	79
38	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่อายุการบ่มต่างๆ	80
39	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ	81
41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ	81
42	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่อายุการบ่มต่างๆ	82
43	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ	82
44	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ	83
45	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ	83
46	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ที่อายุการบ่มต่างๆ	84
47	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 10% ทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ	84
48	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 20% ทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ	85
49	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 30% ของทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 40% ของทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ	86
51	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 50% ของทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ	86
52	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่มที่อายุการบ่มต่างๆ	97
53	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20 และ 25% ตามลำดับ	97
54	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ	98
55	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ	98

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Improvement of Lateritic Soil using Bottom ash, Lime Powder and Sodium Hydroxide Solution

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีงานก่อสร้างและปรับปรุงสาธารณูปโภคพื้นฐานต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะการก่อสร้างและปรับปรุงถนนหนทางซึ่งจะพบเห็นได้เกือบทั่วทุกภูมิภาคอันมีสาเหตุมาจากอัตราการขยายตัวของเศรษฐกิจและความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยี ทำให้มีการใช้วัสดุ เช่น หิน ดิน ทราย เพื่อเป็นวัสดุพื้นทางและรองพื้นทางของถนนเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดปัญหาขาดแคลนวัสดุ ดังนั้นเพื่อให้ได้วัสดุที่คืออาจจำเป็นต้องขนส่งมาจากแหล่งหินหรือดินที่อยู่ห่างไกล ทำให้ราคาของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างมีราคาแพงหรือในบางกรณีเมื่อไม่สามารถหาวัสดุที่มีคุณภาพดีได้ อาจจำเป็นต้องนำวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เช่น การใช้ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ผสมลงในดินเพื่อให้ดินมีคุณภาพดีขึ้น จัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาได้

ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าภายในประเทศมีการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย เช่น ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าคือ เถ้าถ่านหิน เป็นถ่านหินที่บดละเอียดแล้วนำมาเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตาจึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตรจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิตเพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า ซึ่งปริมาณเถ้าถ่านหินที่เหลือจากกระบวนการเผาถ่านหินเกิดขึ้นในอัตราส่วนเถ้าลอย (Fly Ash) ร้อยละ 80 ต่อปี สามารถใช้เป็นสารทดแทนปูนซีเมนต์ได้และเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ร้อยละ 20 ต่อปี แต่ยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่

การก่อสร้างโดยเฉพาะงานทางจะต้องนำวัสดุในท้องถิ่นนั้นๆ มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง แต่เนื่องจากในบางครั้งวัสดุที่ได้มีคุณภาพต่ำและไม่เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ดังนั้นเมื่อจำเป็นต้องใช้วัสดุเหล่านี้จึงต้องดำเนินการปรับปรุงคุณภาพอาจจะทำได้โดยการหาวัสดุเชื่อมประสานช่วยให้เม็ดดินยึดเกาะกันในครั้งนี้ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นความสำคัญของเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายสารปอชโซลาน จึงได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยผสมเถ้าก้นเตา (Bottom Ash), เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วใช้เทคนิคการบดอัดดินควบคู่ไปด้วย ซึ่งการปรับปรุงโดยใช้วิธีการผสมสารนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาทำให้เกิดขาดความรู้ความเข้าใจในการนำวัสดุเหลือทิ้งชนิดนี้มาใช้ประโยชน์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นต่างๆ ทางวิศวกรรมของดินลูกรัง เพื่อเป็นข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งาน
2. ศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization) ด้วยเถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมโยธา
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังอันได้แก่ ปริมาณของเถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอายุการบ่ม
4. พิจารณาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังและดินลูกรังที่ผสมสารผสมเพิ่ม ในช่วงอายุของการบ่มและปริมาณสารผสมเพิ่มในอัตราส่วนต่างๆ กัน

ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้นำมาจาก อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี
2. สารผสมเพิ่มที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ
 - ก. เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดของบริษัท BLCP POWER จำกัด จากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
 - ข. เศษปูนขาว (Lime Powder) ที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียด จากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
 - ค. สารเคมีคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) บริสุทธิ์ชนิดเกล็ด ความเข้มข้นร้อยละ 98

3. ตัวอย่างดินลูกรังที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมนั้นนำมาจากการเตรียมตัวอย่างดินให้ให้อยู่ในช่วง Grade B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของวัสดุมวลรวมตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

4. ทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่ม ในอัตราส่วนต่างๆ โดยเพิ่มสารผสมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10, 20, 30,... เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่ให้ค่าสูงมากที่สุดของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่ม

5. การทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการจะทดสอบตามมาตรฐานของ Modified Proctor Compaction Test โดยใช้พลังงานในการบดอัด 56,000 ปอนด์-ฟุต/ลูกบาศก์ฟุต

6. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเหนียวของดินลูกรังผสมแก็กันเตาที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยทำการทดสอบหาค่า Liquid Limit และ Plastic Limit เพื่อการเปลี่ยนแปลงความเหนียวของดินทันทีหลังผสมเสร็จและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับดินลูกรังกลุ่มเดียวกันที่ไม่ได้ผสมแก็กันเตา

7. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทดสอบโดยวิธี California Bearing Ratio แบบ Unsoaked CBR. และ Soaked CBR. ของตัวอย่างดินลูกรังและดินลูกรังผสมแก็กันเตาซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) เท่านั้น โดยตัวอย่างดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มจะทำการทดสอบที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ

8. การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของตัวอย่างดินลูกรังและดินลูกรังผสมแก็กันเตาซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น โดยตัวอย่างดินลูกรังผสมแก็กันเตานี้จะทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

การตรวจเอกสาร

ดินลูกรังเกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศร้อนหรือร้อนชื้น มีอุณหภูมิและความชื้นสูง มักพบได้ในภูมิภาคเอเชีย การผุพังในกระบวนการเกิดดินลูกรังส่วนมากเป็นการผุพังทางเคมี ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสภาพของแร่ที่ประกอบอยู่ในหิน โดยอาจมีการผุพังทางกลศาสตร์จากการแตกหักของหินต้นกำเนิดร่วมด้วย ดังนั้นดินลูกรัง จึงมีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละแหล่ง แต่มีลักษณะทั่วไปที่เด่นชัด คือมีปริมาณแร่เหล็กและอลูมิเนียมที่เกิดจากการผุพังมาก มีสารอินทรีย์น้อยมาก อาจมีหรือไม่มีแร่ควอตซ์ก็ได้ มีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับอากาศ จากการศึกษาการผุพังและการเกิดสีแดงของหินในประเทศสหรัฐอเมริกาของ Russel (1989) พบว่าความชื้นสูงและอุณหภูมิที่ร้อนมีอิทธิพลต่อการผุพังของหินมากกว่าอุณหภูมิที่เย็นและความชื้นต่ำ Holland (1930) ได้สนับสนุนว่าที่อุณหภูมิและความชื้นสูง หรือในสภาพภูมิอากาศแบบเขตร้อนจะเกิดกระบวนการกัดเซาะทางเคมีขึ้น โดยสารพวกซิลิกา Alkaline และ Alkaline Earth สลายตัว เกิดการสะสมของสารพวกอลูมินาและออกไซด์ของเหล็ก

1. คำจำกัดความของดินลูกรัง

Buchanan (1807) เป็นผู้ริเริ่มใช้คำว่า “laterite” โดยคำว่า laterite มาจากรากศัพท์ภาษาละตินว่า later ซึ่งแปลว่า “อิฐ” โดยใช้เรียกดินที่พบในมาลาบาร์ ประเทศอินเดียซึ่งมีสีแดงและความแข็งคล้ายอิฐ (brick-red rock) เนื่องจากมีเหล็กผสมอยู่ในปริมาณสูงและเมื่อขุดพบจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศ ดังนั้นจึงนิยมนำมาทำเป็นอิฐเพื่อใช้ในการก่อสร้าง

Mallet (1883) เป็นผู้ให้คำจำกัดความทางเคมีของดินลูกรัง (Laterite Soils) ว่าหมายถึงดินที่ตามธรรมชาติจะมีสีแดง เนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม จากนั้น Fermor (1911) ได้พัฒนาการเรียกชื่อลูกรังตามแร่พื้นฐานที่ประกอบในลูกรังซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณของซิลิกา แร่พื้นฐานที่ประกอบในลูกรังได้แก่ เหล็ก, อลูมิเนียม, โพแทสเซียม และแมกนีเซีย ต่อมา Lacroix (1913) ได้จำแนกชนิดของลูกรังตามปริมาณของไฮดรอกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบดังนี้

1. True Laterite มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบมากกว่า 90 %
2. Silicate Laterite มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบ 50-90 %

3. Laterite Clay มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบ 10-50 %

Martin and Doyne (1927) แบ่งชนิดของดินลูกรังตามอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา ดังนี้

1. True Laterite มีอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ น้อยกว่า 1.33
2. Lateritic Soil หรือดินลูกรัง มีอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ระหว่าง 1.33-2.00
3. Non-Lateritic Soil มีอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ มากกว่า 2.00

ดินลูกรังความหมายตามพจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยาได้ให้คำนิยาม คือ ดินที่มีการสลายตัวและพัฒนาเป็นระยะเวลานานภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น มีเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณสูงอันเป็นผลมาจากกระบวนการเกิดลูกรัง (Laterization) ส่วนใหญ่เป็นดินสีแดง น้ำตาล หรือเหลือง มักพบเม็ดลูกรังและเม็ดกรวดผสมปนอยู่ Alexander and Cady (1962) ได้รวบรวมงานวิจัยทางด้านธรณีฐาน ฟิสิกส์และเคมีในเทอมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับลูกรัง โดยให้ความหมายในเทอมต่างๆ ดังนี้

Laterite หรือลูกรัง หมายถึง ดินที่เกิดจากกระบวนการสลายตัวของหินตามธรรมชาติ ในอัตราค่อนข้างสูงและมีคุณสมบัติที่แข็งตัวเมื่อสัมผัสอากาศ กล่าวคือมี Secondary Oxide ของเหล็กหรืออลูมิเนียมในปริมาณสูง โดยที่ปริมาณความเป็นกรดค้างและ Primary Silicate มีน้อยมาก ในบางครั้งอาจมีแร่คาโอลิไนท์ (Kaolinite) และควอตซ์ (Quartz) ในปริมาณสูง

Laterite Soil หรือดินลูกรัง หมายถึง ดินสีแดงที่มีออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมผสมอยู่เป็นจำนวนมากเป็นผลมาจากกระบวนการ Laterization โดยดินดังที่กล่าวจะมีคุณสมบัติแข็งตัว (self hardening) ได้เองและมี Laterite Rock หรือ Laterite Gravel ผสม

Laterite Rock หรือหินลูกรัง หมายถึง ดินลูกรังที่เกิดการแข็งตัวเองอย่างสมบูรณ์ มีความเหนียวและความแข็งแรง จะแสดงคุณสมบัติของหินมากกว่าดิน เช่น หินศิลาแลง เป็นต้น

Laterite Gravel หรือกรวดลูกรัง หมายถึง วัสดุเม็ดหยาบซึ่งเป็นเม็ดเล็กๆ มีความแข็งแตกต่างกัน บางทีอาจจะยึดเกาะกันเป็นมวลก้อนใหญ่ หรืออาจผุกร่อนจนกลายเป็น Silty หรือ Clayey Lateritic Soil

Phinthisite หมายถึง หินลูกรังที่สามารถตัดด้วยเครื่องตัดโลหะได้ ในขณะที่อยู่ใต้ดินเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดการแข็งที่ไม่กลับคืนสู่สภาพเดิม

Sesquioxide หมายถึง ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของลูกรังซึ่งได้แก่ Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ TiO_2

Self-hardening-property หมายถึง คุณสมบัติในการแข็งตัวของดินได้เองเมื่อสูญเสียความชื้น คุณสมบัตินี้จะไม่กลับสู่สภาพเดิม แม้ได้รับความชื้นเดิมเข้าไปมากเท่าไรก็ตาม

2. กระบวนการเกิดดินลูกรัง (Laterization)

เกิดจากกระบวนการสลายตัวตามธรรมชาติในเขตร้อน (Tropical Weathering) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและเคมีฟิสิกส์ โดยเกิดการเปลี่ยนรูปของ Primary Rock-Forming Minerals เป็นสารประกอบลูกรัง (Primary Minerals) ซึ่งได้แก่ เหล็ก, อลูมิเนียม, โพแทสเซียม, แมงกานีส และ แร่ดินเหนียว (Secondary Minerals) สะสมอยู่เป็นจำนวนมากโดยแบ่งขั้นตอนในการเกิดลูกรังออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

Primary Minerals ในกระบวนการเกิดดินลูกรัง

1. Decomposition เป็นขบวนการสลายตัวทางเคมีฟิสิกส์ในการทำลาย Primary Minerals ในหินเกิดเป็นสารใหม่ในรูปออกไซด์ต่างๆ ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O โดยจะปรากฏอยู่ในรูปของอนินทรีย์สาร

2. Laterization เป็นขบวนการก่อกำเนิดลูกรังโดยจะเกิดการชะล้างภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเกิดการรวมตัวของซิลิกา, ด่าง และสารพวกออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ของเซสควออกไซด์ (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Ti_2O_3) ส่วนสารอื่นๆ จะถูกระบายหรือรวมตัวกันขึ้นกับความเป็นกรด

ต่าง ของน้ำในดินและสภาวะการระบาย ต่อมา Remillion (1967) กล่าวว่าภายใต้สภาวะการเกิดกระบวนการทำลายทางเคมีฟิสิกส์นี้แร่ดินเหนียวจะถูกชะล้างเหลือสารเคมีที่มีออกไซด์ของอลูมิเนียม เช่น Gibbsite หรือ ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก เช่น ไลโมนาइट (Limonite) หรือเกอร์ไทท์ (Gertite)

3. Dehydration หรือ Dessication เป็นขบวนการสูญเสียน้ำโดยจะเกิดไฮดรอกไซด์ในบางส่วนหรือทั้งหมดของเซสควิออกไซด์ (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Ti_2O_3) และ Secondary Mineral ซึ่งบางครั้งทำให้เกิดการแข็งตัว

จากการศึกษากระบวนการเกิดดินลูกรังพบว่าการแข็งตัวในดินลูกรังเกิดขึ้น เนื่องจากออกไซด์อิสระของเหล็ก ได้แก่ ไลโมนาइट (Limonite) เกอร์ไทท์ (Gertite) และเฮมาไทท์ (Hematite) เคลือบบนอนุภาคดิน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเฮมาไทท์ กระบวนการ Laterization จะทำให้ออกไซด์อิสระของเหล็กในรูปของเฮมาไทท์ที่เคลือบอยู่บนอนุภาคดินมีความหนาเพิ่มขึ้น

Secondary Mineral ในกระบวนการเกิดดินลูกรัง

การเกิด Secondary Mineral ในดินลูกรังได้แก่ แร่ดินเหนียวคาโอลิไนท์ (Kaolinite), ฮาลลอยไซต์ (Halloysite), อิลไลต์ (Illite), มอนท์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite) และอื่นๆ ขึ้นกับอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิประเทศ พืชที่ปกคลุมและสภาพการระบายน้ำ ชนิดของ Secondary Minerals ในดินลูกรังมีประโยชน์มากในทางวิศวกรรมปฐพีเพราะสามารถคาดการณ์ถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังได้ เช่น ดินลูกรังที่มีมอนท์โมริลโลไนท์ และ อิลไลต์สูงจะมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ ความดันน้ำในโพรงสูง และบวมตัวได้ง่ายกว่าดินลูกรังที่มีคาโอลิไนท์และคลอไรต์เป็นส่วนประกอบเป็นต้น วิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาแร่และธาตุในดินได้แก่

1. การวิเคราะห์ x-ray diffraction
2. การวิเคราะห์ differential Thermal Analysis (DTA)
3. การวิเคราะห์ scanning electron microscope

3. คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดินลูกรัง

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) จากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของลูกรังพบว่ามีความเป็นกรด-ด่าง (pH) ประมาณ 1-6 โดยค่าดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ว่าดินลูกรังจะพบในบริเวณที่มีสภาวะเป็นกรด)

ปริมาณสารอินทรีย์ Newill (1959) กล่าวว่า ดินลูกรังที่มีเม็ดละเอียดปนจะมีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่าดินลูกรังที่มีเม็ดหยาบโดยทั่วไปแล้วดินลูกรังจะมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำโดยจะมีค่าน้อยกว่า 1.0 % ที่ชั้นผิวดิน

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต จากการศึกษาพบว่าดินลูกรังจะมีปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและพืชพันธุ์ โดยปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตจะลดลงเมื่อเกิดกระบวนการ Laterization และการชะล้าง (Leaching) มากขึ้น

การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน จากการศึกษาพบว่าดินลูกรังส่วนใหญ่มีการกระจายขนาดของเม็ดดินดี กล่าวคือมีขนาดคละกันดี (Well Grade Soil)

ความถ่วงจำเพาะของดิน จากการศึกษาพบว่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังมีค่าอยู่ระหว่าง 2.67-3.46 โดยจะมีค่าน้อยหรือมากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กออกไซด์ในดินลูกรัง กล่าวคือถ้ามีปริมาณของเหล็กออกไซด์น้อยจะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำและถ้ามีปริมาณของเหล็กออกไซด์มากจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูง

ดัชนีพลาสติก จากการศึกษาพบว่าค่าพลาสติกชี้ของดินลูกรัง ขึ้นอยู่กับปริมาณของดินเหนียว ดังนั้น จึงมีค่าไม่แน่นอนขึ้นกับกระบวนการชะล้างและกระบวนการ Laterization กล่าวคือถ้ามีการชะล้างและเกิดกระบวนการ Laterization สูง ปริมาณของดินเหนียวจะยังผลให้ค่าพลาสติกชี้ลดลง เนื่องจาก แร่ดินเหนียวถูกเคลือบด้วยเซสควออกไซด์ ทำให้ Surface Activity ของแร่ดินเหนียวถูกขจัด

กำลังรับแรงเฉือน ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังขึ้นกับอิทธิพลขององค์ประกอบทางโครงสร้าง, ชนิดของหินเดิมและองค์การที่เกิดกระบวนการผุพัง ซึ่งหมายถึงองค์การที่เกิดกระบวนการ Decomposition, Laterization และ Dessiccation นอกจากนั้นแล้วการทดลองต่างชนิดกันทำให้

ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่างกันโดย Lambe (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลขององศาที่เกิดขบวนการผุพัง (Decomposition) ที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน พบว่าดินลูกรังที่มีความลึกต่างๆ ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต่างกันและจากการศึกษาของ Baldovin (1969) พบว่า ดินลูกรังที่มีองศาที่เกิดขบวนการ Laterization สูงจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูง

ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังขึ้นกับชนิดของหินดั้งเดิม ลักษณะตามธรรมชาติของดิน, ขนาดของเม็ดดิน, อัตราส่วนโพรงช่องว่างและวิธีการเตรียมตัวอย่าง ความชื้นและความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างซึ่งเหล่านี้จะส่งผลอย่างมากต่อค่าความชื้นผ่านของตัวอย่างดินลูกรัง

4. ดินลูกรังในประเทศไทย

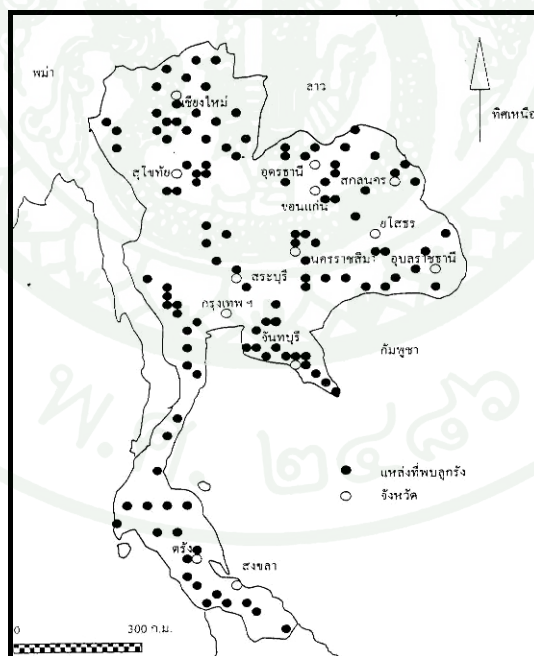
ดินลูกรังเป็นวัฏศุธรรมชาติเกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศร้อนหรือร้อนชื้น มีอุณหภูมิและความชื้นสูง สำหรับในประเทศไทยนั้นมีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นมีฤดูร้อนและฤดูฝนสลับกันเป็นระยะเวลาดังกล่าวเหมาะแก่การเกิดดินลูกรัง โดยจะพบดินลูกรังมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคเหนือ เนื่องมาจากหินต้นกำเนิดเดิมส่วนใหญ่เป็นหินทราย หินบะซอลท์ และหินดินดาน

Hongsnoi (1969) พบว่า ในประเทศไทยนั้นสามารถแบ่งลูกรังออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการเกิดดังนี้

Primary Lateritic Soils หมายถึง ดินลูกรังซึ่งมีเหล็กเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ และเกิดอยู่กับที่เหนือหินเดิม เหล็กที่เป็นส่วนประกอบได้จากแร่พวกเฟอร์โรแมกนีเซียมที่มีอยู่ในหินชั้นล่างๆ ลึกลงไป และเคลื่อนขึ้นมาสะสมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินในแต่ละฤดูน้ำฝน ซึ่งมีออกซิเจนและกรดอินทรีย์ต่างๆ ละลายอยู่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินนี้สามารถออกซิไดซ์ธาตุพวกเฟอร์โรแมกนีเซียมในดินเป็นเหล็กออกไซด์ มีสีแดง ในประเทศไทยมักเกิดเป็นชั้นๆ จากผิวดินจนถึงชั้นของหินเดิม จากการศึกษาพบว่า จีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์เกอร์ จะมีค่าต่ำสุดที่ชั้นดินลูกรังและเพิ่มมากขึ้นตามความลึกจนถึงชั้นหินเดิมที่ผุพัง โดยปกติส่วนในสุดของเม็ดดินลูกรังเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ที่อ่อน ผิวนอกเป็นเหล็กออกไซด์ที่แข็งแกร่งกว่าความหนาของเหล็กออกไซด์จะมากหรือน้อยขึ้นกับสภาพแวดล้อม

Secondary Lateritic Soils หมายถึง ดินลูกรังที่เกิดขึ้นโดยการเคลื่อนย้ายมาจากหินเดิม น้ำใต้ดินที่ไหลผ่านจะทำให้เหล็กออกไซด์ที่อยู่ในดินแข็งตัวขึ้นและออกไซด์เหล็กในบริเวณนั้นด้วย ดินลูกรังประเภทนี้โดยทั่วไปจะไม่แบ่งเป็นชั้น เหล็กออกไซด์สีแดงที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณต่างๆ กัน ขึ้นกับสภาพแวดล้อมต่างๆ และสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของชั้นดินที่ทับถม เหล็กออกไซด์ในดินลูกรังประเภทนี้อยู่กระจายมากกว่าดินลูกรังประเภทแรก มักเกิดล้อมรอบกรวดหรือชิ้นส่วนของหินที่แตกหัก ทำให้ดินลูกรังประเภทนี้มีขนาดเม็ดใหญ่ มีความแข็งที่แตกต่างกันปรากฏชั้นของเฮมาไทต์, ไลโมไนต์ และดินเหนียวเด่นชัดกว่าดินลูกรังประเภทแรก ชีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ของดินลูกรังประเภทนี้มีค่าต่ำกว่าประเภทแรก

Pendleton and Sharasuvana (1946) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดินลูกรังในประเทศไทย โดยสรุปไว้ในตารางที่ 1 และ Morrison (1965) ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในประเทศไทย โดยสรุปไว้ในตารางที่ 2 จากนั้น Vallergera and Rananand (1969) ได้ศึกษาดินลูกรังในประเทศไทย พบว่าดินลูกรังประกอบด้วย กรวด ทราย ดินตะกอน และดินเหนียว โดยมีแร่เหล็กในปริมาณสูง ซึ่งบริเวณที่พบดินลูกรังในประเทศไทยได้แสดงไว้ในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 บริเวณที่พบดินลูกรังในประเทศไทย

ที่มา: สุภาพร (2528)

ตารางที่ 1 ปริมาณซิลิกาและเซสควิออกไซด์ของดินลูกรังในประเทศไทย

เขตพื้นที่	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %	อัตราส่วนของ SiO ₂ / Al ₂ O ₃
Sandy soil	47.0	30.1	12.7	3.2
Basaltic country rock	23.6	39.9	21.8	0.9
Parent materrial of mix original	31.3	40.0	17.7	1.4
Unknown parent material	37.9	40.1	11.9	2.1

ที่มา: Pendleton and Sharasuvana (1946)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในประเทศไทย

คุณสมบัติ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	0.00	66.0
พิกัดเหลว, (%)	18	97
พิกัดพลาสติก, (%)	NP	51
การจำแนกดินตามระบบ AASHTO	A-1-a	A-7-6
ดัชนีกลุ่ม	0	10
ความถ่วงจำเพาะ	2.59	3.20
ความแน่นแห้งสูงสุด (ปอนด์/ลบ.ฟุต)	118.00	144.50
ความชื้นที่ความแน่นแห้งสูงสุด, (%)	7.00	13.40
California Bearing Ratio, (%)	7.00	60.00
การบวมตัว, (%)	0.10	55.00
ค่าความสึกหรอ โดยวิธี Los Angeles Abrasion (%)	20	60

ที่มา: Morrison (1965)

ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับดินลูกรังที่ใช้ในงานทาง

ในประเทศไทยเพื่อให้การก่อสร้างงานทางมีมาตรฐานเดียวกันได้มีหน่วยงานที่กำหนดมาตรฐานต่างๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างซึ่งหน่วยงานที่สำคัญได้แก่ กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยคุณสมบัติของวัสดุชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง มีข้อกำหนดดังนี้

กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532) ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุสำหรับพื้นทางดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์ค่าความสึกหรอน้อยกว่า 40 %
2. เปอร์เซ็นต์ของมวลที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่เกิน $\frac{2}{3}$ ของเปอร์เซ็นต์ของมวลที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40
3. มีขนาดผลตามวิธีการหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง และต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามที่กำหนด
4. Liquid Limit ไม่เกิน 25 %
5. ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ไม่เกิน 6 %
6. ค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80 ที่การบดอัด 95 %ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด

วัสดุสำหรับพื้นทาง ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532) แบ่งออกเป็น 4 เกรด ตามการแจกแจงขนาดอนุภาค ดังในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุพื้นทาง

ขนาดช่องตะแกรง	น้ำหนักรที่ผ่านตะแกรง			
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D
2 " (50.0 มม.)	100	100	-	-
1 " (25.0 มม.)	-	-	100	100
3/8 " (9.5 มม.)	30-65	40-75	50-85	60-100
No.10 (2.00 มม.)	15-40	20-45	20-50	40-70
No.40 (0.425 มม.)	8-20	15-30	15-30	25-45
No.200 (0.075 มม.)	2-8	5-20	5-12	5-20

ที่มา: กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532)

กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532) ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุสำหรับรองพื้นทางดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์ค่าความสึกหรอ ไม่เกิน 60 %
2. มีขนาดผลตามวิธีการหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง และต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตามที่กำหนด
- 3 Liquid Limit ไม่เกิน 35 %
4. ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) ไม่เกิน 11 %
5. มีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 25-30 %

วัสดุสำหรับรองพื้นทาง ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532) แบ่งออกเป็น 5 เกรด ตามการแจกแจงขนาดอนุภาค ดังในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุรองพื้นทาง

ขนาดช่องตะแกรง	น้ำหนักรที่ผ่านตะแกรง				
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D	Grade E
2 " (50.0 มม.)	100	100	-	-	-
1 " (25.0 มม.)	-	-	100	100	100
3/8 " (9.5 มม.)	30-65	40-75	50-85	60-100	-
No.10 (2.00 มม.)	15-40	20-45	20-50	40-70	40-100
No.40 (0.425 มม.)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
No.200 (0.075 มม.)	2-8	5-20	5-12	5-20	6-20

ที่มา: กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532)

Vallerga and Rananand (1969) ได้ดำเนินการศึกษาดินลูกรังในประเทศ พบว่า ดินลูกรังที่พบมักจะมีลักษณะเป็นกรวด ทราย ดินตะกอน และดินเหนียว มีเหล็กออกไซด์ปนอยู่ในปริมาณสูง ไม่ค่อยพบลูกรังที่เกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ความแข็งแรงของดินลูกรังอาจเพิ่มขึ้นหลังจากขุดขึ้นมาตากไว้เพราะดินลูกรังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศ การที่ดินลูกรังเปียกและแห้งสลับกัน จะช่วยให้ออกซิเจนแทรกซึมเข้าไปในเม็ดดินลูกรังและเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องอันทำให้เม็ดดินลูกรังแข็งแรงขึ้นทั้งนี้ยังได้เสนอข้อกำหนดของวัสดุสำหรับพื้นทางและรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2509) เพื่อให้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีคุณภาพสูงไม่มาก เช่น ดินลูกรังไว้ดังนี้คือ พื้นทาง มีข้อกำหนดขนาดกละและคุณสมบัติของวัสดุพื้นทาง สำหรับวัสดุพื้นทาง ในประเทศไทย ซึ่งปรับปรุงโดย Vallerga and Rananand (1969) แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุพื้นทางในประเทศไทย

ขนาดช่องตะแกรง	พื้นทางชั้นที่ 1		พื้นทางชั้นที่ 2	
	น้ำหนักรที่ผ่านตะแกรง (%)		น้ำหนักรที่ผ่านตะแกรง (%)	
2 "	100	-	100	-
1 "	90-100	-	90-100	-
1 "	-	100	-	100
3 / 4 "	50-85	90-100	50-100	90-100
No.4	30-55	35-55	25-45	35-55
No.30	10-25	10-30	10-25	10-30
No.200	2-9	2-9	2-12	2-12

ที่มา: Vallerga and Rananand (1969)

วุฒิชัย (2526) ได้ดำเนินการศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังจากแหล่งต่าง ๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่าดินลูกรังส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่ม A-2 ตามระบบการจำแนกดินของ AASHTO ซึ่งเป็นกรวดปนดินตะกอนหรือกรวดปนทรายแป้งและดินเหนียว (Silty or Clayey Gravel) จัดเป็นวัสดุที่มีคุณภาพดีสำหรับใช้เป็นชั้นรองพื้นทางของถนน และจัดเป็นประเภท GW, GP และ SW, SP ตามระบบการจำแนกดินแบบ Unified Soil Classification โดยส่วนประกอบของดินส่วนใหญ่จะประกอบด้วย คาโอไลไนต์ปริมาณมาก และอิลไลต์ปริมาณพอสมควร นอกจากนี้อาจพบ มอนต์โมริลโลไนต์, เวอร์มิคิวไลต์, คลอไรต์ เกอไทต์ และควอร์ตปนอยู่ ซึ่งปัญหาที่พบบ่อยสำหรับตัวอย่างดินลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย คือ มีค่า Liquid Limit และ Plasticity Index มากกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้

วรศักดิ์ และ สมหวัง (2538) ได้ดำเนินการศึกษาพบว่า ดินลูกรังสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง ไหล่ทาง พื้นทางของถนนที่มีปริมาณการจราจรสูงปานกลาง และสามารถใช้เป็นผิวทางชั่วคราวของถนนที่ไม่ได้ลาดยาง เพราะเมื่อดินลูกรังจะไม่แตกเป็นเม็ดละเอียดเมื่อก้อนน้ำหรือความชื้นในอากาศ แหล่งดินลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มักพบชั้นดินลูกรังหนาประมาณ

1.4-2.0 เมตร ค่า Liquid Limit และ Plasticity Limit ของดินลูกรังส่วนมากจะสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวง และถ้านำดินลูกรังผสมกับซีเมนต์จะมีคุณสมบัติใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้เป็นอย่างดี

การปรับปรุงคุณภาพดิน

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

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization)

เป็นการใช้สารเคมีผสมลงในดินเพื่อให้มีคุณภาพดีขึ้น เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดการบวมตัวหรือการหดตัวและปรับปรุงคุณสมบัติในการรับน้ำหนัก หรือพฤติกรรมของความเค้นความเครียด (Stress-Strain) ของดิน ปรับปรุงการไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน และเพื่อเพิ่มความทนทานของวัสดุ

สารผสมเพิ่มหรือสารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน คือ ซีเมนต์ ปูนขาว ยิปซัม หรือเถ้าลอย เป็นต้น โดยสารเพิ่มเสถียรภาพเหล่านี้ทำให้ดินมีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และสามารถนำไปใช้งานในการก่อสร้างต่าง ๆ ได้ โดยต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ในการทำงาน การจัดเก็บรักษาและต้องมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นพิษเป็นภัยกับสิ่งแวดล้อม และต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการปรับปรุงเสถียรภาพอีกด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี

1. คุณสมบัติของดิน (Soil Properties) ดินตามธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเฉพาะตัว โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีทางปฐพีกลศาสตร์ อาจกล่าวสรุปได้ว่า การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle Size Distribution) สารอินทรีย์ สารประกอบอื่นๆ เช่น เกลือ ซัลเฟต หรือคลอไรด์ และองค์ประกอบทางเคมี จัดเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณภาพดิน

Lu *et al.* (1957) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของดินที่เลือกมาปรับปรุงคุณภาพพบว่าดินที่เหมาะสมที่จะใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาว คือ ดินประเภท Clayey Soil และ Silty Soil

Hilt and Davidson (1960) อธิบายในทำนองเดียวกันว่า ดินที่มีส่วนประกอบของแร่ดินเหนียวชนิด Montmorillonite และ Kaolinite จะให้ผลดีในการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวมากกว่า Illite

Broms (1986) อธิบายว่า การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาวจะมีประสิทธิภาพเมื่อดินที่ปรับปรุงมีค่า Clay Content ไม่น้อยกว่า 20% และค่า Plasticity Index ต้องไม่น้อยกว่า 10%

Treadwell and Davidson (1961) ได้อธิบายว่า หากดินมีอัตราส่วนของมวลคละที่ไม่ดี กล่าวคือมีขนาดมวลเท่าๆ กัน (Uniformly Grade) จะทำให้ผลในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนขาว ค่อยกว่าดินที่มีส่วนคละที่ดี (Well Grade)

2. สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizers) ทัวไปแล้ว สารเพิ่มเสถียรภาพชนิดเดียวกันที่ผสมในปริมาณที่มากกว่าจะให้กำลังมากกว่าภายใต้เงื่อนไขตัวแปรอื่นๆ ที่คงที่และดินนั้นมีความชื้นเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ในทางตรงกันข้ามสารเพิ่มเสถียรภาพต่างชนิดกันย่อมมีผลต่อการพัฒนากำลังของดินด้วยอัตราที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเชื่อมประสาน (Cementitious Compounds) รวมทั้งชนิดและปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อสารเพิ่มเสถียรภาพนั้นทำปฏิกิริยากับดิน

Laguros *et al.* (1956) อธิบายว่า หากใช้ปริมาณปูนขาวไม่เกิน 3% ผสมกับดินเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน Calcitic Quicklime จะทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินได้ดีกว่า Calcitic Hydrated Lime และยิ่งพบอีกว่า Dokomitic Lime ทั้งสองประเภท จะให้ความสามารถในการรับน้ำหนักมากกว่า Calcitic Lime เมื่อบ่มที่อุณหภูมิไม่เกิน 70 องศาฟาเรนไฮต์ ยกเว้นดินที่มีแร่ดินเหนียวชนิด Kaolinite ผสมอยู่ในปริมาณมาก ให้ความสามารถในการรับน้ำหนักที่เท่ากัน

3. น้ำ (Water) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี เพราะน้ำจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการเพิ่มกำลังของดิน ปริมาณความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาคำเนินไปได้ไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยา จะยังคงเหลือกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่

แข็งตัวแล้วและเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้ค่ากำลังของดินต่ำกว่าความเป็นจริง

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

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ

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

2. การจับตัวกันของเม็ดดิน (Flocculation-agglomeration) การเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงไปในดินจะทำให้อนุภาคดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น กล่าวคือ ไอออนบวกจากสารเพิ่มเสถียรภาพเมื่อเข้าไปในมวลดิน จะเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคของดินเหนียว สารซิลิเกตจะละลายเข้าสู่โพรงน้ำก่อให้เกิดสารเชื่อมประสาน ส่งผลให้เม็ดดินมีโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อความเข้มข้นของไอออนสูงขึ้น 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 ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$) ในสารเพิ่มเสถียรภาพจะทำปฏิกิริยา

กับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 หรือ $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้มีผลเพียงเล็กน้อยในการปรับปรุงคุณภาพ แต่ก็ไม่ควรให้เกิดขึ้นมากเนื่องจากจะทำให้การทำปฏิกิริยาอื่นๆ ลดน้อยลง

คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลง

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

2. คุณสมบัติทางด้านการบดอัด (Compaction) เมื่อผสมสารเพิ่มเสถียรภาพลงไปในดินจะทำให้คุณสมบัติของดินทางด้านการบดอัดเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของดินเดิมที่ใช้

3. คุณสมบัติทางด้านการกำลัง (Compressive Strength) กำลังของส่วนผสมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ชนิดของดิน ปริมาณ และชนิดของสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช้ ความหนาแน่นของการบดอัด ปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการบ่ม และปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น

เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

ขั้นตอนการเกิดเถ้าก้นเตา

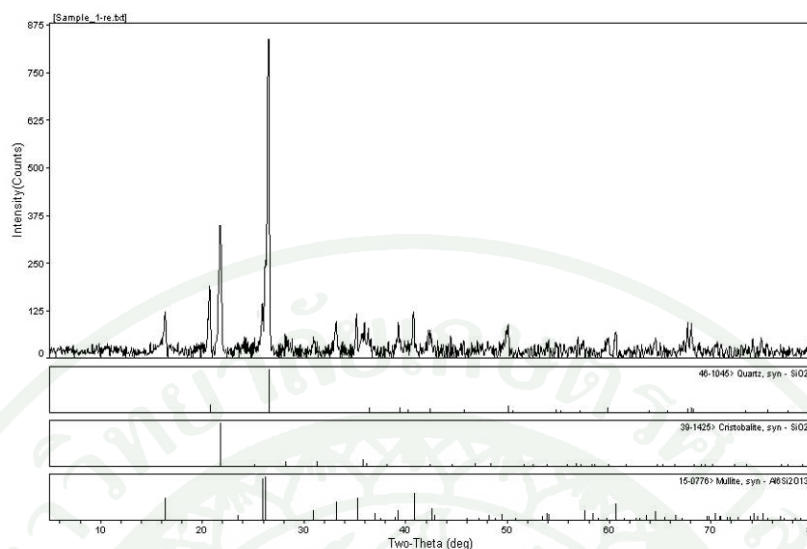
ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยเป็นถ่านหินของแร่บิทูมินัส ถ่านหินเหล่านี้จะถูกลำเลียงเข้าสู่โรงไฟฟ้าด้วยสายพานลำเลียงส่งต่อไปยัง Pulverizer เพื่อบดถ่านจนเป็นผงละเอียดก่อนที่จะถูกส่งเข้าไปยังหม้อไอน้ำ เมื่อถ่านหินเกิดการเผาไหม้ก็จะคายพลังงานความร้อนออกมาและถ่ายเทให้น้ำ เมื่อน้ำได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ก็จะมีอุณหภูมิสูงจนเดือดและน้ำบางส่วน จะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำนี้จะทำให้แกนกังหันหมุนและต่อไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) กระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินจะเกิดเถ้าขึ้นหลังจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ ส่วนที่มีน้ำหนักมากจะตกลงสู่ด้านล่างของเตาเผาซึ่งเรียกว่าเถ้าก้นเตา เถ้าส่วนที่มีน้ำหนักน้อยจะลอยขึ้นไปกับอากาศเรียกว่าเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับฝุ่นระบบไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator ,ESP)

คุณลักษณะโดยทั่วไปของเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตา คือ กากหรือตะกอนที่มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและละเอียดปะปนกัน ซึ่งได้จากการเผาไหม้ถ่านหินตามกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้คุณภาพรองจากแร่แอนทราไซต์ มีเนื้อแข็ง สีน้ำตาลถึงดำลักษณะมันวาว มีเหลี่ยมคม มีปริมาณซิลเฟอร์ต่ำ พื้นผิวเป็นแบบขรุขระ คล้ายกับทราย ไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค

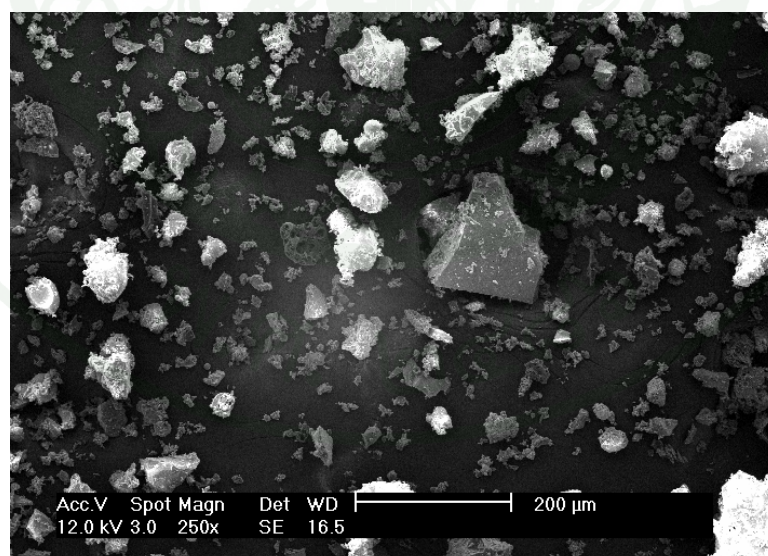
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาโดยวิธี X-ray diffraction (XRD) นิพนธ์ (2552) พบว่าเถ้าก้นเตาประกอบด้วยสารหลายชนิด มีองค์ประกอบของสารประเภทซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ quartz, cristobalite และ mullite และจากการทดสอบโดยเครื่อง scanning electron microscope พบว่าเถ้าก้นเตามีลักษณะโครงสร้างอนุภาคนั้นมีขนาดที่แตกต่างและรูปร่างที่แตกต่างกันไป ดังภาพที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Intensity และ Theta จากการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD ของแก้วกันตะ

ที่มา: นิพนธ์ (2552)



ภาพที่ 3 การกระจายตัวและขนาดของอนุภาคแก้วกันตะ

ที่มา: นิพนธ์ (2552)

การศึกษาขั้นต้นทำให้ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะโครงสร้างของเถ้าก้นเตา แล้วจึงนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบในรูปของออกไซด์โดยวิธีการ X-ray fluorescence spectrometer เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกับเถ้าลอย ซึ่งมีข้อกำหนดขององค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยจะใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์โดยแบ่งออกเป็นชั้นคุณภาพของเถ้าลอยออกเป็นชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F มีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เป็นไปตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีในเถ้าก้นเตาเปรียบเทียบกับเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F และ C

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพเถ้าลอย		เถ้าก้นเตา
	F	C	
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	>70	>50	91.87
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), max %	<10	>10	2.00
ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), max %	-	-	0.97
ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5.0	5.0	0.07
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0	36.00
ปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (Loss on Ignition, LOI), max %	6.0	6.0	ไม่มีข้อมูล
อัลคาไลน์ในรูปของไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5	0.45

ที่มา: ASTM C618-92a (1994)

วิเศษ (2552) สำหรับปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณซัลเฟตมีผลต่อการพัฒนาความสามารถในการรับน้ำหนัก/แรงอัด และเวลาในการก่อตัวได้ ทั้งยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย อย่างไรก็ตามยังมีส่วนช่วยเสริมในการเกิด Sulfate Attack

สำหรับปริมาณความชื้นไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน (Handling Difficulty) และสำหรับชั้นคุณภาพ C แล้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าของน้ำหนักระหว่างที่สูญหายเนื่องจากการเผาไหม้ไม่ให้เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ หากมีค่าของน้ำหนักระหว่างที่สูญหายเนื่องจากการเผามากจะทำให้ความต้องการน้ำในคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้าปล่อยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่าของน้ำหนักระหว่างที่สูญหายเนื่องจากการเผามากกว่าร้อยละ 6 ส่วนปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของไฮดรอกไซด์ออกไซด์มากที่สุดไม่ควรเกินร้อยละ 1.5 เนื่องจากมีปริมาณปูนขาวอิสระสูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali Aggregate ขึ้นได้ อย่างไรก็ตามถ้าปล่อยที่มีปริมาณของไฮดรอกไซด์ออกไซด์มากกว่าร้อยละ 1.5 จะนำมาใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาได้ก็ต่อเมื่อผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

เศษปูนขาว (Typical Lime A)

การนำเศษปูนขาวซึ่งมี CaO เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังควบคู่ไปกับการบดอัดดินนั้นยังมิได้มีการศึกษาทั้งในประเทศและต่างประเทศมากนัก ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานตลอดจนถึงการนำไปใช้งานอย่างจริงจังต่อไปในอนาคต

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของเศษปูนขาวโดยวิธีการ X-ray fluorescence spectrometer มีองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณดังตารางที่ 7 มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ประมาณ 2.97 ลักษณะทางกายภาพของเศษปูนขาวเป็นผงสีเทาขาว

คุณลักษณะโดยทั่วไปของเศษปูนขาว

เศษปูนขาว คือ กากหรือของเหลือทิ้งที่มีลักษณะเป็นละเอียดค่อนข้างสม่ำเสมอ มีเทาหรือขาวขุ่น มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานตามธรรมชาติ เนื่องจากประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะเป็นผงร่วนไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำในปริมาณที่เหมาะสมและอายุการบ่มมากขึ้นจะแข็งตัวได้ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่แข็งตัวได้นี้เนื่องมาจากเศษปูนขาวมีปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) ปนอยู่มากพอที่จะทำปฏิกิริยา

กับน้ำจนกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไปกับซิลิกาและอลูมินาจนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งแรงได้ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีในเศษปูนขาวเปรียบเทียบกับปูนขาวมาตรฐาน

คุณลักษณะ	คุณลักษณะทางเคมีและฟิสิกส์ของปูนสุก			เศษปูนขาว
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	ชั้นคุณภาพ 3	
แคลเซียมออกไซด์ ไม่น้อยกว่า	90	88	85	55.99
ซิลิกอนไดออกไซด์ ไม่เกิน	1.0	1.5	2.0	15.25
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	2.86
- แมกนีเซียมออกไซด์	1.8	2.0	2.0	0.11
ปริมาณสารที่ไม่ละลายน้ำ ไม่เกิน	7.0	9.0	12.0	—

ที่มา: มอก. 319 เล่ม 1-2551

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการผสมปูนขาว

เศษปูนขาวเป็นรูปแบบหนึ่งของปูนขาวโดยมีส่วนประกอบทางเคมี อันประกอบด้วย CaO ร้อยละ 56 ซึ่งอาจอยู่ในรูปของปูนขาวไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เมื่อมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องจะทำปฏิกิริยาไม่รุนแรง และเกิดสารผลิตภัณฑ์ซึ่งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น

ปฏิกิริยาเคมีของดินหลังผสมแคลเซียมออกไซด์ประกอบด้วยปฏิกิริยา อันได้แก่ ปฏิกิริยา Hydration และ Flocculation ในช่วงเริ่มต้น และปฏิกิริยาในระยะยาว อันได้แก่ Cementation และ Carbonation ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระยะยาว (Hausmann,1990)

1. Hydration ปูนขาวในรูปของแคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำในดินทันทีที่ถูกผสมก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และสร้างรูปร่างโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกันมากบ้างน้อยมากตามขนาดผลของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ปรับปรุงแล้วยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างในมวลดิน ทำให้ลดการซึมน้ำและการบวมตัวของมวลดินรวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะ การเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบ ๆ อีกด้วย การทำปฏิกิริยาเช่นนี้จะมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงคุณภาพดินที่มีความชื้นสูง ในการผสมจะทำให้เกิดความร้อน ซึ่งความร้อนที่แผ่ออกไปจะมีผลต่อการทรุดตัวของดินอีกด้วย

2. Flocculation หรือขบวนการจับตัวกันของเม็ดดิน (Agglomeration) หลังจากเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงในดิน ทำให้อนุภาคขนาดเท่าดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้นกล่าวคือ อีออนบวกจากสารเพิ่มเสถียรภาพเมื่อเข้าไปในมวลดิน จะเข้าไปจับตัวบนผิวของอนุภาคขนาดเท่าดินเหนียว สารซิลิกาจะละลายเข้าสู่โพรงน้ำก่อให้เกิดสารเชื่อมประสานส่งผลให้เม็ดดินมีโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อความเข้มข้นของอีออนสูงขึ้น จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดินเหนียว ทำให้ Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น และ Plasticity Index ลดลง โครงสร้างของดินจะมีความมั่นคงขึ้น

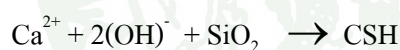
Diamond and Kinter (1965) กล่าวว่าเนื่องจากน้ำที่อยู่ชั้น Double layer บางลงจึงทำให้เกิดการ Flocculation และเกิดการรวมตัวของเม็ดดิน (Agglomeration) ซึ่งมีผลทำให้ค่า Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น และ Plasticity Index ลดลง ปฏิกิริยา Flocculation และ Agglomeration นี้มีผลต่อค่า Plasticity Index, Shrinkage Limit และ Workability ของดิน Cation Exchange และ Flocculation-Agglomeration นี้ไม่ได้เป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้กำลังของดินผสมปูนขาวพัฒนาขึ้นมากนัก

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้ จะทำให้ความเหนียวของดินเหนียวลดลงซึ่งทำให้ดินร่วนขึ้น ดังนั้นปูนขาวจึงมีประโยชน์ที่จะนำมาใช้กับวัสดุที่มีความเป็นพลาสติกสูงๆ และดินที่มี

ปริมาณน้ำมาก ซึ่งยากต่อการใช้งานเพราะบดอัดได้ลำบาก ซึ่งเมื่อผสมปูนขาวจะทำให้บดอัดง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ปูนขาวในการลดค่าความเหนียวของดินอีกด้วย

3. Cementation (Pozzolan Reaction) หรือการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาในช่วงนี้มักจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ใหม่สารซิลิกา (SiO_2) และ/หรืออลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งจะก่อให้เกิดคุณสมบัติเชื่อมประสานตัวซึ่งกันและกัน กล่าวคือในขบวนการของการเติมปูนขาวภายหลังการเติมลงดิน ค่าความเป็นด่างจะสูงขึ้นที่สภาวะ pH สูงเช่นนี้การชะละลายของ Silica และ Alumina ในดินเพิ่มมากขึ้น โดย Silicate ที่สลายตัวออกจากโครงสร้างของอนุภาคดินมาทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} แล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ ได้แก่ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งเป็นสารที่จะแข็งตัวตามเวลาและเชื่อมประสานเม็ดดินเข้าด้วยกันส่งผลให้ดินมีกำลังสูงขึ้น

Diamond and Kinter (1965) พบว่าปฏิกิริยาระหว่างดินกับปูนขาวนั้น นอกจากจะได้สารประกอบ CSH แล้วยังได้สารประกอบประเภท Calcium Aluminate Hydrate (CAH) อีกด้วย ดังสมการ



สาร CSH ที่เกิดขึ้นจากดินผสมปูนขาวเป็นสารชนิดเดียวกันกับสารที่เกิดในดินผสมซีเมนต์ แต่แตกต่างกันที่สาร CSH ในดินผสมปูนขาวเกิดจากปฏิกิริยา Pozzolan ระหว่าง Ca^{2+} กับซิลิกาในดิน ส่วนสาร CSH ในดินผสมซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์กับน้ำ

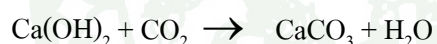
ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด CAH โดยพื้นฐานแล้วจะเกิดขึ้นทันที และจะเกิดที่จุดต่อระหว่างขอบและผิวหน้าของดินเดิม สำหรับสารประกอบ CSH จะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า แรงยึดเกาะซึ่งเกิดจากสารประกอบ CAH จะไม่มีความแข็งแรงเหมือนแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ของสารประกอบ CSH

Ruenkairergsa (1982) กล่าวว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดินความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอาจจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เต็มที่ หากมีสารประกอบอื่นๆ อยู่ในมวลดินนั้นด้วย เช่น สารอินทรีย์

และซัลเฟต จะทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง โดยจะแบ่ง Ca^{2+} มาจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction ทำให้อัตราการเพิ่มของความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง สารประกอบของเหล็ก เช่น Fe_2O_3 ที่เคลือบอยู่ในโครงสร้างของดินก็สามารถหน่วงการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลงได้เช่นกัน

ปฏิกิริยา Cementation เป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่จำกัดค่าหนึ่ง ถ้ามีการใช้ปูนขาวเพิ่มมากขึ้นกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับซิลิกาในดิน ปูนขาวที่เพิ่มขึ้นนี้จะไม่ทำให้กำลังเพิ่มขึ้น และอาจทำให้กำลังลดลงด้วย

4. การเกิดสารประกอบคาร์บอเนต (Lime Carbonation) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ในสารเพิ่มเสถียรภาพจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 หรือ $3\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) กับน้ำ ดังสมการ



CaCO_3 ที่เกิดขึ้นจะทำให้ Ca อีออนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา Pozzolanic ลดลง ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate ให้ช้าลงอันเป็นผลให้กำลังของดินผสมปูนขาวช้าลงกว่าปกติ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้มีผลเพียงเล็กน้อยแต่ก็ไม่ควรให้เกิดขึ้นมากเนื่องจากจะทำให้การทำปฏิกิริยาอื่นๆ ลดน้อยลง

Croft (1964) ได้อธิบายว่าปูนขาวซึ่งทำปฏิกิริยากับแร่ดินหรือวัสดุ Pozzolan จะทำให้เกิดสารละลาย Calcium Silicate ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนเจลห่อหุ้มเม็ดดินมีคุณสมบัติในการเชื่อมยึดเม็ดดินให้เกาะติดกันและเป็นตัวปิดกั้นทางเดินของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินดังภาพที่ 4 ซึ่งคล้ายปฏิกิริยา Hydration ของปูนซีเมนต์



ภาพที่ 4 กลไกสมบัติของปูนขาวเมื่อผสมดิน

ที่มา: Ingles (1970)

จากปฏิกิริยาข้างต้น เห็นได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังอาจมีคุณสมบัติบางประการใกล้เคียงกับส่วนผสมดินซีเมนต์ ซึ่งมีอยู่หลายมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 8 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 ชั่วโมง จะต้องมีย่าน้อยกว่า 17.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) สำหรับพื้นทางดินซีเมนต์หรือมีค่าไม่น้อยกว่า 689 กิโลพาสคัล สำหรับรองพื้นทางดิน

ตารางที่ 8 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)

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide Solution)

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ สารละลายเบสที่ละลายในน้ำ (เบสเป็นตัวละลาย น้ำเป็นตัวทำละลาย) ซึ่งสามารถแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เมื่อละลายน้ำ ในงานทางวิศวกรรมได้มีการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารละลายเบสเข้มข้นเร่งปฏิกิริยาสารปอซโซลานทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน

คุณลักษณะโดยทั่วไปของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) มีชื่อทั่วไปเรียกว่า Caustic Soda หรือ โซดาไฟ ลักษณะเป็นของแข็งสีขาว สามารถละลายน้ำได้ เมื่อสัมผัสจะลื่นมือมีจุดเดือดที่ $1,390^{\circ}\text{C}$ องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวที่ 318°C องศาเซลเซียส และสามารถนำไฟฟ้าได้

ปฏิกิริยาทางเคมีของโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. ทดสอบกับกระดาษลิตมัส ถ้าใช้กระดาษลิตมัสสีแดงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษลิตมัสจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน แต่ถ้าใช้กระดาษลิตมัสสีน้ำเงินจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงสีของกระดาษลิตมัส

2. ทำปฏิกิริยากับเกลือแอมโมเนีย ธาตุโลหะ เช่น คลอรีน (Cl) ได้เป็นแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) จะได้น้ำและแอมโมเนีย (NH_3) เป็นผลิตภัณฑ์เสมอ เช่น ปฏิกิริยาของด่างคลี (NaOH, โซเดียมไฮดรอกไซด์) กับเกลือแอมโมเนียมคลอไรด์

3. ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะ ยกเว้น อะลูมิเนียม (Al) ที่เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะได้แก๊สไฮโดรเจน (H_2)

4. ผสมกับน้ำมันหรือไขมัน จะได้สบู่และกลีเซอรอล เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (saponification reaction)

5. ทำปฏิกิริยากับกรดได้เกลือและน้ำ

Lambe and Moh (1957) ได้รายงานผลการทดสอบการใช้สารผสมเพิ่มจำนวน 29 ชนิดในกลุ่ม Dispersants, Synthetic resins, Waterproofing agents, Alkalis และเกลือ ในดินซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 และปริมาณสารผสมเพิ่มร้อยละ 0.5-1.0 ดินที่ใช้ทำการทดสอบได้แก่ดินตะกอนจากรัฐ New Hampshire ดินเหนียวปนดินตะกอนจากรัฐ Massachusetts และดินฝุ่นแข็งพูนจากเมือง Vicksburg พบว่ามีสารผสมเพิ่ม 4 ชนิด ที่เพิ่มความแข็งแรงถึงร้อยละ 100-150 ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต, โซเดียมไฮดรอกไซด์, โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโซเดียมซิลิเฟต

อุบลลักษณ์ และ ปริญญ์ (2551) การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุอิโพลิเมอร์จากถั่วลยและถั่วคันเตา ซึ่งได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง โดยบดถั่วคันเตาให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับถั่วลย และเตรียมอิโพลิเมอร์พอสต์ได้จากการผสมถั่วถ่านหินกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่ศึกษาคือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

คือ 10 โมลาร์ ผลการทดลองพบว่าปริมาณของสารประกอบซิลิกาและค่ากำลังอัดขึ้นกับอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ และสำหรับค่าที่เหมาะสมที่สุดของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ คือ ช่วง 1.0 และ 1.5 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่สูงสุดที่ได้จากจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยคือ 350 กก./ซม.²

การชะละลาย

เมื่อสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์, NaOH มาผสมลงดินหรือเถ้าถ่านหินจะเกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ โดยอลูมินา (Al_2) และซิลิกอน (Si_2) จะถูกชะละลายออกมาเนื่องจากเป็นสารหลัก เมื่อเกิดการชะละลายที่ผิวทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิวและสารละลายจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น Davidovits (1999) เมื่อปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นการเชื่อมโยงของเม็ดดินจะเกิดมากขึ้น และหนาแน่นมากขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นและสามารถรับแรงได้

อุบลลักษณ์ และ ปริญญา (2551) ศึกษาการชะละลายของสารประกอบออกไซด์ขณะทำการเตรียมผสมวัสดุจีโอโพลิเมอร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยศึกษาที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์ พบว่าการชะละลายของอลูมินา (Al_2) และซิลิกอน (Si_2) เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นแต่ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์มีอัตราการชะละลายออกมาปริมาณมากที่สุด ซึ่งเป็นผลดีสำหรับการผสมจีโอโพลิเมอร์เฟลสต่อไป

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยการใช้สารผสมเพิ่มต่างๆ

การปรับปรุงคุณสมบัติของดินเป็นการนำเอาวิธีการทางด้านฟิสิกส์ และเคมีมาใช้ผสมกับดินเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติที่ดีสำหรับงานด้านวิศวกรรม (Winterkorn, 1955) เช่น มีความสามารถในการรับน้ำหนักได้ดีขึ้นและทนทานต่อการสึกหรอ วิธีการปรับปรุงอาจเป็นการบดอัดให้แน่นหรือการใช้สารผสมเพิ่มลงในดิน ซึ่งอาจจะเป็นของเหลวหรือเป็นผงก็ได้ (Hogentogler, 1938) ในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีนักวิจัยและหน่วยงานต่างๆ ได้มีการนำสารเพิ่มเสถียรภาพและวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ มาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง โดยอาจกล่าวพอเป็นสังเขป ดังนี้

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้เถ้าก้นเตา

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

Chandler *et al.* (1997) ได้ทำการทดสอบหาค่า CBR. ปรากฏว่าดินที่ผสมเถ้าก้นเตา ให้ค่า CBR. ที่สูงขึ้น แต่ว่ามีข้อมูลที่น่าสนับสนุนผลการวิจัยน้อยเกินไป

R.Forteza *et al.* (2004) ได้มีการนำเอาเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาถ่านหินมา ใช้ผสมลงในดิน เพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางและรองพื้นทางในการก่อสร้างถนนในประเทศสเปน ปรากฏว่าสามารถทำให้ค่า CBR. มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเดิม

Bunjoo Kim and Monica Prezzi (2006) ได้ศึกษาหาอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยและเถ้า ก้นเตาเพื่อทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยขึ้นเรื่อย ๆ มาก ว่าเถ้าก้นเตา จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดต่ำลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่ามากขึ้น

นิรชร (2539) ได้ศึกษาในส่วนของคุณสมบัติของซีเถ้าก้นเตา จากโรงงานไฟฟ้าพลังงาน ความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยศึกษาคุณสมบัติด้าน ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าการคงตัว (Soundness) ค่าเทียบเท่าทราย (Sand Equivalent) และขนาดคละ เพื่อศึกษาแนวทางการนำซีเถ้าก้น เต่าใช้เป็นมวลละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติในเรื่องค่าการคงตัว เท่านั้นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนด ซึ่งสามารถชดเชยโดยการพิจารณาแทนที่ซีเถ้าในมวลรวม ละเอียดเพียงบางส่วน ทั้งนี้ในส่วนคุณสมบัติทางเคมีของซีเถ้าก้นเตา พบว่ามีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ คุณสมบัติของการศึกษาเถ้าลอย ซึ่งเป็นสารปอซโซลาน

มนตรี และคณะ (2543) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าถ่านหินบิทูมินัส ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ามาบตาพุด จ.ระยอง และลูกรัง จากจังหวัดนครราชสีมา และจังหวัดระยองโดยผสมในอัตราส่วนผสม ดินลูกรัง:เถ้าถ่านหิน บิทูมินัส 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 ค่ากำลังอัดก่อนทดสอบจะมีค่าต่ำลงเมื่อผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสมากขึ้น ส่วนก่อนทดสอบที่ผสมเถ้าถ่านหินบิทูมินัสที่ต่ำกว่า 30% จะให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่จะสูงมากที่สุดที่อัตรา 30%

วิเศษ (2552) ได้ศึกษาปริมาณเถ้าถ่านหินที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินมากขึ้นค่า 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 ผสมเถ้าถ่านหินมากขึ้น แต่ในดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าสูงขึ้น ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีค่าสูงขึ้นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2-10 เท่าทั้งในดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D

จุฑาทิพย์ (2552) ได้ศึกษาปริมาณเถ้าถ่านหินที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินทรายและหินคลุก โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน, ปริมาณของเถ้าและอายุการ บ่ม ได้นำหินคลุกผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 20,25 และ 30% และดินทรายผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 10,20 และ 30% จากปัจจัยดังกล่าวพบว่า หินคลุกผสมเถ้าถ่านหินและทรายผสมเถ้าถ่านหินมีการพัฒนาค่า CBR สูงขึ้นทั้งแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อผสมเถ้าถ่านหินที่ 25% ของน้ำหนักดินแห้ง และพัฒนาค่า CBR เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ปูนขาว

Wang (1963) ได้ทำการวิจัยและแนะนำว่าควรใช้ปูนขาว 2-5% ในการปรับปรุงดินที่มีขนาดเม็ดหยาบ และควรใช้ปูนขาว 3-7% ในการปรับปรุงดินเม็ดละเอียด

Woo (1971) ได้ศึกษาวิจัยการใช้ปูนขาวผสมดินลูกรังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณปูนขาวมากขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลง ค่าปริมาณความชื้นจะมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Wet Compressive Strength กับปริมาณปูนขาว จะมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งพาราโบลาว่า ปริมาณปูนขาว ชนิด Hydrated Lime ร้อยละ 3 จะให้ค่า Wet Compressive Strength สูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่าง Activity Ratio กับ Wet Compressive Strength เป็นเส้นตรง

Ruenkrairergsa (1982) ได้กล่าวว่า ปริมาณปูนขาวเพียงเล็กน้อยที่เพิ่มเข้าไปในดินที่มี Plasticity Index สูงก่อนที่จะผสมซีเมนต์จะให้ค่า Plasticity Index ของดินลดลงได้มากและทำให้ดินผสมกับซีเมนต์ได้ง่ายขึ้น

Brom (1984) กล่าวว่า เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุงคุณภาพดินในพื้นที่แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นั้น การใช้ซีเมนต์จะมีความเหมาะสมกว่าการใช้ Quicklime เพราะ ซีเมนต์มีราคาถูกกว่า Quicklime อีกทั้งการเก็บรักษา Quicklime ทำได้ยากเพราะสภาพภูมิอากาศมีความชื้น และซีเมนต์สามารถปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติสูงขึ้นอย่างชัดเจนและ Quicklime จะมีขีดจำกัดในการปรับปรุงคุณภาพของดินอยู่

ชนิดาวรรณ และ ชีรเชษฐ์ (2530) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติดินด้วยปูนขาวโดยผสมในปริมาณ 1- 12 % ของน้ำหนักดินแห้ง พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง และค่า UCS เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณปูนขาว 7 % เมื่อเพิ่มปริมาณปูนมากขึ้นค่า UCS ก็จะไม่เพิ่มขึ้นแล้ว

เกษม และคณะ (2531) ได้ศึกษาวิจัยโดยปรับปรุงดินเหนียวด้วย Hydrated Lime พบว่าค่า LL และค่า PI ของดินลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผสมปูนขาว 5% บ่ม 14 วัน ส่วนค่า PL, ค่ากำลังของดิน และค่า CBR จะเพิ่มขึ้นหลังจากบ่ม 14 วันขึ้นไปและยังสรุปว่าควรใช้ปูนขาวผสมที่ 5% เหมาะสมที่สุดเนื่องจากประหยัดและ Workability สูง ซึ่งการนำไปใช้งานถนนได้สรุปความเหมาะสมของดินเมื่อปรับปรุงแล้วได้ดังนี้

- ผสมปูนขาว 5% บ่ม 7 วัน ให้ค่า CBR 10% เหมาะใช้เป็นวัสดุคัดเลือก
- ผสมปูนขาว 7% บ่ม 30 วัน ให้ค่า CBR 25% เหมาะใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง
- ผสมปูนขาว 9% บ่ม 30 วัน ให้ค่า CBR 42% เหมาะใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

บุญเทพ (2539) ได้กล่าวว่าปูนขาวเหมาะกับการผสมดินเหนียวมากกว่าดินทราย และเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีอากาศร้อน ปกติดินเหนียวใช้ปูนขาว 3-7 % โดยน้ำหนักดินแห้ง และดินเม็ดละเอียดใช้ปูนขาว 5-10 % โดยน้ำหนักดินแห้ง

พานิช และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปูนขาว ซิลิกาซีเมนต์ และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ต่อความสามารถในการซึมน้ำของดินกำแพงแสนโดยผสมดินกำแพงแสนด้วยปูนขาว ซิลิกาซีเมนต์ และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ในอัตราส่วน 0% 2% 4% 6% 8% และ 10% โดยน้ำหนัก ด้วยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่อายุการบ่ม 4, 7 และ 28 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินกำแพงแสนที่ผสมปูนขาว ซิลิกาซีเมนต์ และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 จะมีแนวโน้มลดลงตามเปอร์เซ็นต์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 4% ค่า % CBR ของดินที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 จะมีค่ามากกว่า 20 และมากกว่าดินที่ผสมซิลิกาซีเมนต์และปูนขาวตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินที่ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ยังมีค่าต่ำกว่าดินที่ผสมซิลิกาซีเมนต์และปูนขาวตามลำดับ แม้ว่าราคาของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 จะสูงกว่าซิลิกาซีเมนต์ และต่ำกว่าปูนขาวแต่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ก็ยังมีความเหมาะสมกว่าซิลิกาซีเมนต์ และปูนขาว ดังนั้นปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 4% ขึ้นไปจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินกำแพงแสนทั้งในระยะสั้น ระยะยาว และทางเศรษฐศาสตร์

ศิริศักดิ์ (2550) ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวจากบริเวณภาคเหนือตอนล่างด้วยการผสมปูนซีเมนต์หรือปูนขาวในปริมาณต่างๆ (0%, 2%, 5%, 8% และ 10%) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วโดยทำการทดสอบ CBR (soaked) และวัดการบวมตัวหลังแช่น้ำหลังจากถูกบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน พบว่าเมื่อผสมซีเมนต์ในปริมาณ 8% ของน้ำหนักดินแห้ง ดินจะมีคุณสมบัติเป็น Frictional material และเมื่อผสมที่ปริมาณซีเมนต์ 10% ดินจะมีคุณสมบัติเป็น Non frictional material สำหรับการปรับปรุงด้วยการผสมปูนขาวจะมีคุณสมบัติด้านกำลังต่ำกว่าดินที่ผสมซีเมนต์ และมีค่า Stiffness ที่ใกล้เคียงกัน แต่มีคุณสมบัติเด่น คือ สามารถลดการบวมตัวได้ดีและเร็วกว่าดินผสมซีเมนต์

โดยทั่วไปดินทุกชนิดเมื่อนำมาผสมกับปูนขาว จะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ส่วนผสมระหว่างดินกับปูนขาวมีความแข็งแรงขึ้น ส่วนจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของดินและปริมาณปูนขาวที่ผสม

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

Flaherty *et al.* (1962) ได้ศึกษาดิน 3 ชนิดคือ Dune Sand, Friable Loess และ Artificial Sand-Loess Mixer ผสมกับ Fly ash โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งและโซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารผสมเพิ่ม พบว่า Fly ash ให้ Long Term Strength ที่ดีใน Friable Soil-Cement การผสม Fly ash จะหน่วงเวลาการก่อตัวของดินซีเมนต์จึงให้เวลาในการผสมและบดอัดเพิ่มขึ้นการใส่โซเดียมคาร์บอเนตที่ปริมาณซีเมนต์ต่ำ จะดีในระยะเวลาการบ่มช่วงแรก แต่ในระยะยาวจะไม่ดี

Ingles *et al.* (1970) ได้ศึกษาเรื่องกลไกของการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้กรดและด่างพบว่า อีออนลบ 1 และ 2 Valent ของไฮดรอกไซด์ และกรดรุนแรงที่จะกระทำต่อแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้าง 2 และ 3 ชั้น (คาโอลิไนท์และมอนทอร์มิลโลไนท์) ภายใต้สภาวะที่จำลองขึ้นสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน ที่ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นเท่ากับค่าความหนาแน่นสูงสุด ปฏิริยาดำเนินไปเป็นระยะเวลามากกว่า 2 ปี การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงและปริมาตรมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถบอกได้ว่ากลไกสำคัญในการส่งเสริมให้เกิดการปรับปรุงคุณภาพทางอนินทรีย์ (Inorganic Soil Stabilization) ก็คือแรงยึดเหนี่ยวสำหรับสารเคมีที่เพิ่มเข้าไปนั้นจะใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ของดินแห้ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นการปรับปรุงคุณภาพอย่างชัดเจน

Ingles *et al.* (1972) ได้ปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวคาโอลินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า ความแข็งแรงของดินที่ปรับปรุงคุณภาพในช่วง 7 – 14 วันแรกจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าดินที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพฤติกรรมนี้เกิดขึ้นจากในช่วงแรกนั้นแร่ดินเหนียวยังมีช่องโพรงอยู่ ต่อมาลুমินาจะค่อยก่อตัวเป็นผลึกขึ้น ในสภาพที่อัตราส่วน Si / Al สูง ๆ และรอยแตกที่ไม่แน่นอนในแร่ดินเหนียวนั้นทำให้เม็ดดินเปลี่ยนเป็นวัสดุที่แข็งแรงและเม็ดดินที่ถูกเคลือบนั้นก็ไม่สามารถที่จะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มักเกิดจากการที่พื้นผิวเปิด (ช่องว่างขนาดใหญ่ สามารถมองเห็นได้จากกรณีของกรวด) ความแข็งแรงนั้นเกิดขึ้นจากการเคลือบที่โครงสร้างของดิน ปริมาตรที่ขยายขึ้นเนื่องจาก โซเดียมไฮดรอกไซด์เนื่องมาจากการก่อตัวของโซเดียมลุมิโนซิลิเกต ที่ไม่ละลายในสารละลาย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ชุดเครื่องมือทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดิน (มาตรฐาน ASTM D 422-63)
2. ชุดเครื่องมือทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (มาตรฐาน ASTM D 854-98)
3. ชุดเครื่องมือทดสอบ Atterberg 's Limits Test (มาตรฐาน ASTM D 2216-80 , D 4318-98)
4. ชุดเครื่องมือทดสอบการบดอัดดินแบบ Modified Proctor Compaction Test (มาตรฐาน ASTM D 1557-91)
5. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบ California Bearing Ratio (มาตรฐาน ASTM D 1883-94)
6. ชุดเครื่องมือทดสอบความชื้นน้ำของดิน (มาตรฐาน ASTM D 2434-68)
7. ชุดเครื่องมือทดสอบความสึกกร่อนของเม็ดดิน (มาตรฐาน ASTM D 131-96)

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ดินลูกรังจาก ต.เขาคันทรง อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี
2. แก้วกันตาที่ใช้ในการผสมดินลูกรังได้จากการเผาด่านหิน ของบริษัท BLCP POWER นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
3. เศษปูนขาวที่ใช้ในการผสมดินลูกรังได้มา จากบริษัท BLCP POWER นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

4. สารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) ชนิดของแข็ง ความบริสุทธิ์ 98%

5. น้ำ ที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำประปา

วิธีการ

1. เก็บตัวอย่างดิน, ถ้ำก้นเตา เศษปูนขาวและทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่าง
ได้แก่

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

ฉ. ความสึกกร่อนของเม็ดดิน (ASTM D 131-96)

2. เตรียมตัวอย่างดินถูกรังโดยร่อนแยกขนาดของดินธรรมชาติออกเป็นแต่ละขนาดตาม
ต้องการเพื่อนำกลับมาผสมกันใหม่ให้ได้ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง

3. เตรียมตัวอย่างถ้ำก้นเตาโดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 ± 10 องศาเซลเซียส

4. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5 โมลาร์ อย่างน้อย 3
ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ

5. ทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อ
หาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของสารผสมเพิ่ม ซึ่งคือถ้ำก้นเตา
และเศษปูนขาว ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยน้ำหนัก ดังนี้ ถ้ำก้นเตา 10 ต่อเศษปูนขาว 90 และ 30 : 70
50 : 50 , 70 : 30 และ 90 : 10 ตามลำดับ เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังมากที่สุดของสารผสมเพิ่ม

6. ทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่ม ในอัตราส่วนต่างๆ โดยเพิ่มสารผสมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10, 20, 30, ... เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังมากที่สุดของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่ม

7. ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธี California Bearing Ratio แบบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของตัวอย่างดินลูกรังและดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น โดยตัวอย่างดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มจะทำการทดสอบที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ

8. ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของตัวอย่างดินลูกรังและดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาซึ่งบดอัดแล้ว โดยทดสอบเฉพาะที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น โดยตัวอย่างดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาจะทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

9. ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

การกำหนดส่วนผสมของสารผสมเพิ่ม

การศึกษานี้ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยศึกษาการรับน้ำหนัก และความคงทนของวัสดุที่นำมาทำชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุหลักของสารผสมเพิ่ม ดังนั้นการกำหนดส่วนผสมของสารผสมเพิ่มจึงกำหนดโดยน้ำหนักของสารผสมเพิ่มอื่นๆ เทียบกับน้ำหนักของเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ทุกอัตราส่วนผสม

สถานที่ทำการวิจัย

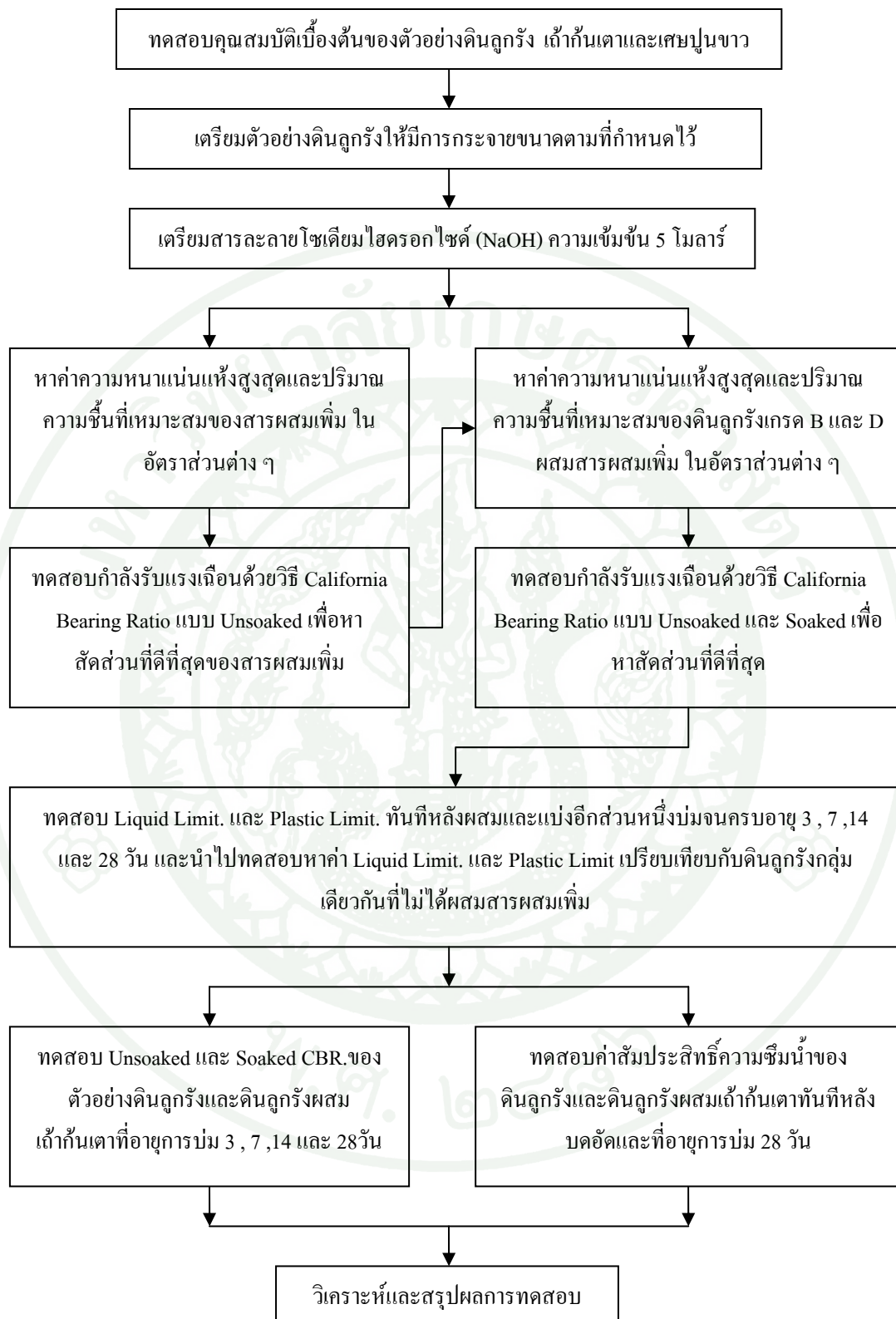
ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลาในการทำวิจัย

เริ่มเตรียมตัวอย่างดินและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งทำการทดสอบ ตั้งแต่เดือน มีนาคม 2552 ถึงเดือนมีนาคม 2553 รวมระยะเวลา 1 ปี

แผนการดำเนินงานวิจัย	2552										2553		
	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.
ตรวจเอกสาร													
จัดหาวัสดุ และ อุปกรณ์													
ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น													
ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม													
วิเคราะห์ผลการวิจัย													
สรุปผลการวิจัย													
จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์													

ภาพที่ 5 ระยะเวลาในการทำวิจัย



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างและการเรียกชื่อตัวอย่างดิน

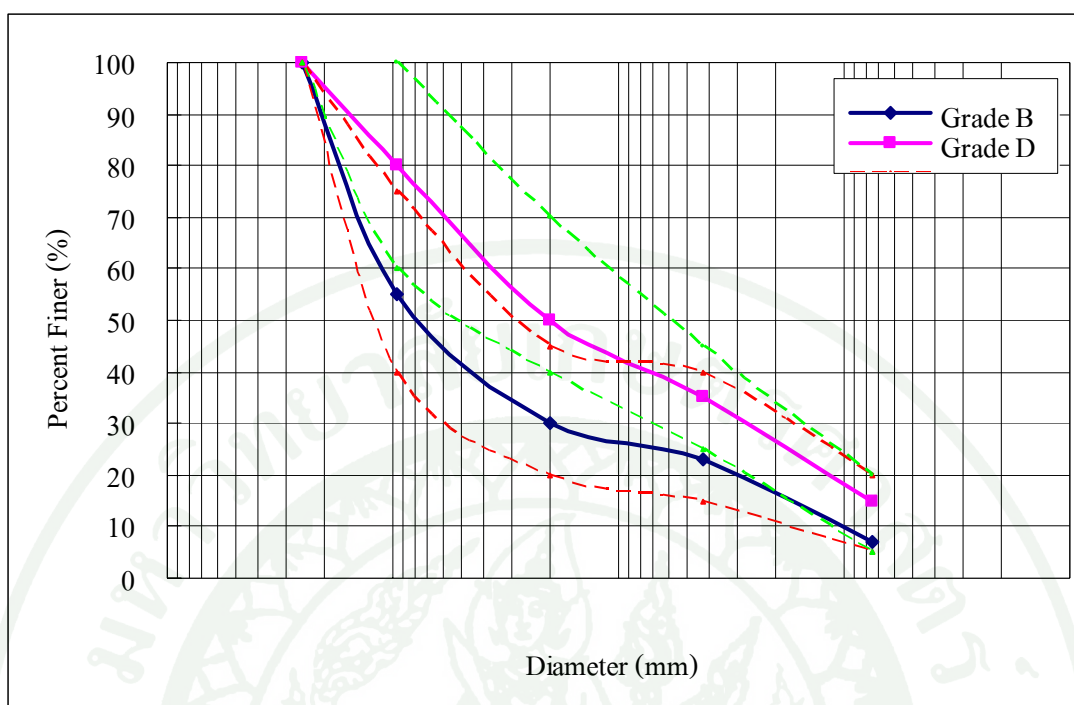
1. นำตัวอย่างดินที่ได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่างมาทำการคัดแยกสิ่งสกปรกอันได้แก่ เศษไม้ รากไม้ และอื่นๆ ออกจากตัวอย่างจากนั้นและทำให้มีสภาพแห้งเพื่อจำลองสภาพให้เหมือนการบดอัดในสนาม

2. นำตัวอย่างดินที่มีสภาพแห้งมาเตรียมตัวอย่างแต่ละขนาด ด้วยการร่อนตะแกรงเบอร์ 3/4 ", 3/8 ", #10, #40, #200 นำตัวอย่างที่ค้างตะแกรงแต่ละเบอร์เก็บไว้เพื่อนำกลับมาผสมกันใหม่ ให้ได้การกระจายตัวของเม็ดดินตามที่กำหนด

3. นำดินที่แบ่งไว้จากข้อ 2 มาเตรียมดินในเกรดผสม B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยให้มีการกระจายขนาดของเม็ดดินและการจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification System ตามภาพที่ 8 และตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การกระจายขนาดของเม็ดดินที่ใช้ทดสอบ

ขนาดช่องตะแกรง	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรง %	
	GradeB	GradeD
1" (25.0 มม.)	100	100
3/8 " (9.5 มม.)	55	80
No.10 (2.00 มม.)	30	50
No.40 (0.425 มม.)	20	35
No.200 (0.075 มม.)	7	15
จำแนกดินอยู่ในกลุ่ม (USCS)	GW-GC	SC



ภาพที่ 7 การกระจายขนาดของเม็ดดินลูกรังเกรด B และ D ที่ใช้ในการทดสอบ

สำหรับการเรียกชื่อตัวอย่างดินลูกรังผสมเข้ากันเดานั้น มีวิธีการเรียกชื่อดังต่อไปนี้

ตารางที่ 10 สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกและบ่งบอกดินตัวอย่าง และผลการทดสอบต่างๆ ดังนี้

สัญลักษณ์	ความหมาย
B	ดินลูกรังเกรดผสม B ไม่ผสมสารผสมเพิ่ม
B+10	ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมสารผสมเพิ่ม 10 % โดยในสารผสมเพิ่ม 10% มี เถ้าก้นเตา 9% และเศษปูนขาว 1%
B+20	ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมสารผสมเพิ่ม 20 % โดยในสารผสมเพิ่ม 20% มี เถ้าก้นเตา 18% และเศษปูนขาว 2%
B+30	ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมสารผสมเพิ่ม 30 % โดยในสารผสมเพิ่ม 30% มี เถ้าก้นเตา 27% และเศษปูนขาว 3%

ตารางที่ 10 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
B+40	ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมสารผสมเพิ่ม 40 % โดยในสารผสมเพิ่ม 40% มี เถ้าก้นเตา 36% และเศษปูนขาว 4%
B+50	ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมสารผสมเพิ่ม 50 % โดยในสารผสมเพิ่ม 50% มี เถ้าก้นเตา 45% และเศษปูนขาว 5%
D	ดินลูกรังเกรดผสม D ไม่ผสมสารผสมเพิ่ม
D+10	ดินลูกรังเกรดผสม D ผสมสารผสมเพิ่ม 10 % โดยในสารผสมเพิ่ม 10% มี เถ้าก้นเตา 9% และเศษปูนขาว 1%
D+20	ดินลูกรังเกรดผสม D ผสมสารผสมเพิ่ม 20 % โดยในสารผสมเพิ่ม 20% มี เถ้าก้นเตา 18% และเศษปูนขาว 2%
D+30	ดินลูกรังเกรดผสม D ผสมสารผสมเพิ่ม 30 % โดยในสารผสมเพิ่ม 30% มี เถ้าก้นเตา 27% และเศษปูนขาว 3%
D+40	ดินลูกรังเกรดผสม D ผสมสารผสมเพิ่ม 40 % โดยในสารผสมเพิ่ม 40% มี เถ้าก้นเตา 36% และเศษปูนขาว 4%
D+50	ดินลูกรังเกรดผสม D ผสมสารผสมเพิ่ม 50 % โดยในสารผสมเพิ่ม 50% มี เถ้าก้นเตา 45% และเศษปูนขาว 5%
BA	เถ้าก้นเตา
TL	เศษปูนขาว (Typical Lime A)
ZAV	Zero air void line (เส้นแสดงปริมาณอากาศเป็นศูนย์)
Un	การทดสอบ CBR, แบบไม่แช่น้ำ
So	การทดสอบ CBR, แบบแช่น้ำ

ผลและวิจารณ์

ผลคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินธรรมชาติ แก่กันเตาและเศษปูนขาว

ตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้จากการสุ่มตัวอย่างดินจากบ่อลูกรังใน อำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี จากการศึกษาดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบพบว่าดินลูกรังส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลอ่อนปนสีน้ำตาลแดง เมื่อดินธรรมชาติมีรูปร่างค่อนข้างเป็นเหลี่ยมและมีปริมาณของดินเม็ดละเอียดปนค่อนข้างมากพิจารณาจากลักษณะเม็ดดินที่มีดินเหนียวปน จากการสุ่มตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ผลดังนี้

1. ผลการทดสอบ Atterberg's Limits มีดังนี้

- 1.1 Natural Moisture Content มีค่าอยู่ระหว่าง $7.13 (\pm 1.00)\%$
- 1.2 Liquid Limit มีค่าอยู่ระหว่าง $23.28 - 25.97\%$
- 1.3 Plastic Limit มีค่าอยู่ระหว่าง $15.50 - 17.51\%$
- 1.4 Plasticity Index มีค่าอยู่ระหว่าง $7.78 - 8.36\%$

2. ความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังมีค่าอยู่ระหว่าง $2.708 (\pm 0.020)$

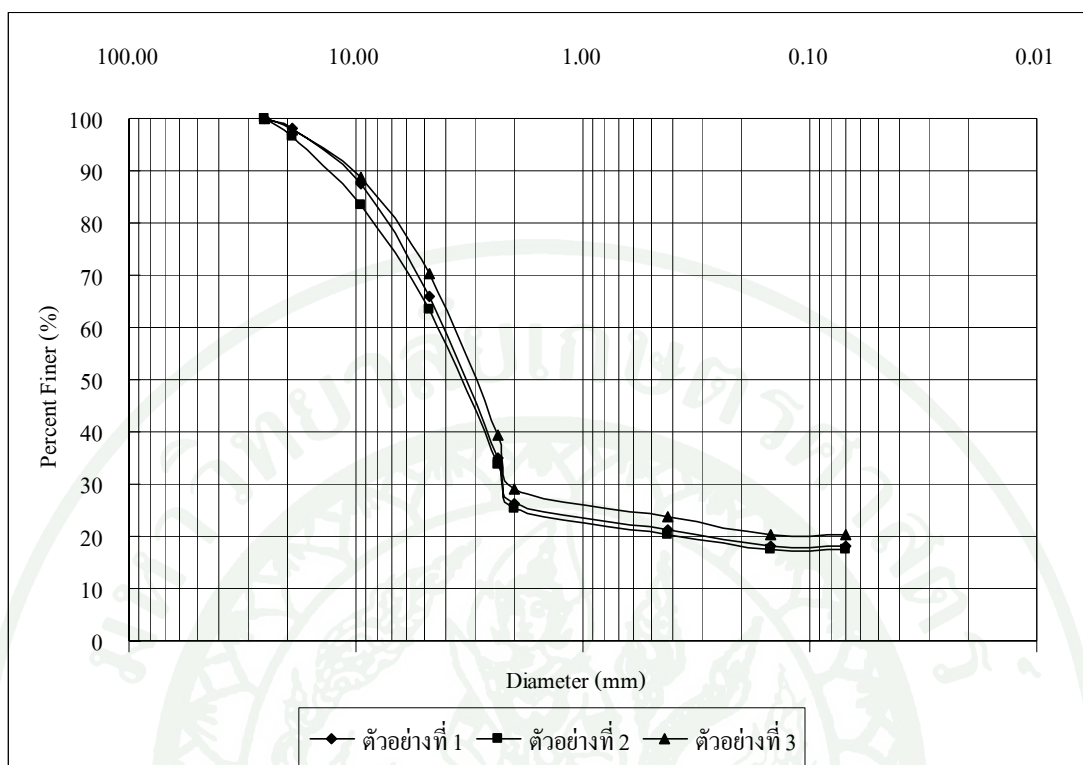
3. ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดินได้แสดงไว้ดังภาพที่ 9 ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของเม็ดดินเป็นแบบมีขนาดคละกันไม่ดี (Gap-grade)

4. การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification และ AASHTO พบว่าตัวอย่างดินลูกรังจัดอยู่ในกลุ่ม SC และ A-2-4 (0)

5. จากการทดสอบการสึกกร่อนโดยวิธี Los Angeles Abrasion Test พบว่าตัวอย่างดินลูกรังที่มีหินหรือกรวดปะปนอยู่มีเปอร์เซ็นต์ความสึกกร่อน เท่ากับ 60.60%

ตารางที่ 11 คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินลูกรัง

คุณสมบัติ	ผลการทดสอบ
องค์ประกอบเนื้อดิน (ระบบ Unified)	
- กรวด (%)	29.28
- ทราย (%)	54.50
- ตะกอนทรายหรือดินเหนียว (%)	16.22
Natural Water Content (%)	7.13 ($\pm$ 1.00)%
Specific Gravity	2.708 ($\pm$ 0.020)
Atterberg's Limit	
- Liquid Limit (%)	23.28 – 25.97%
- Plasticity Limit (%)	15.50 – 17.51%
- Plasticity Index (%)	7.78 – 8.36%
การจำแนกดินระบบ Unified	SC
การจำแนกดินระบบ AASHTO	A-2-4 (0)
Los Angeles Abrasion (%)	60.60



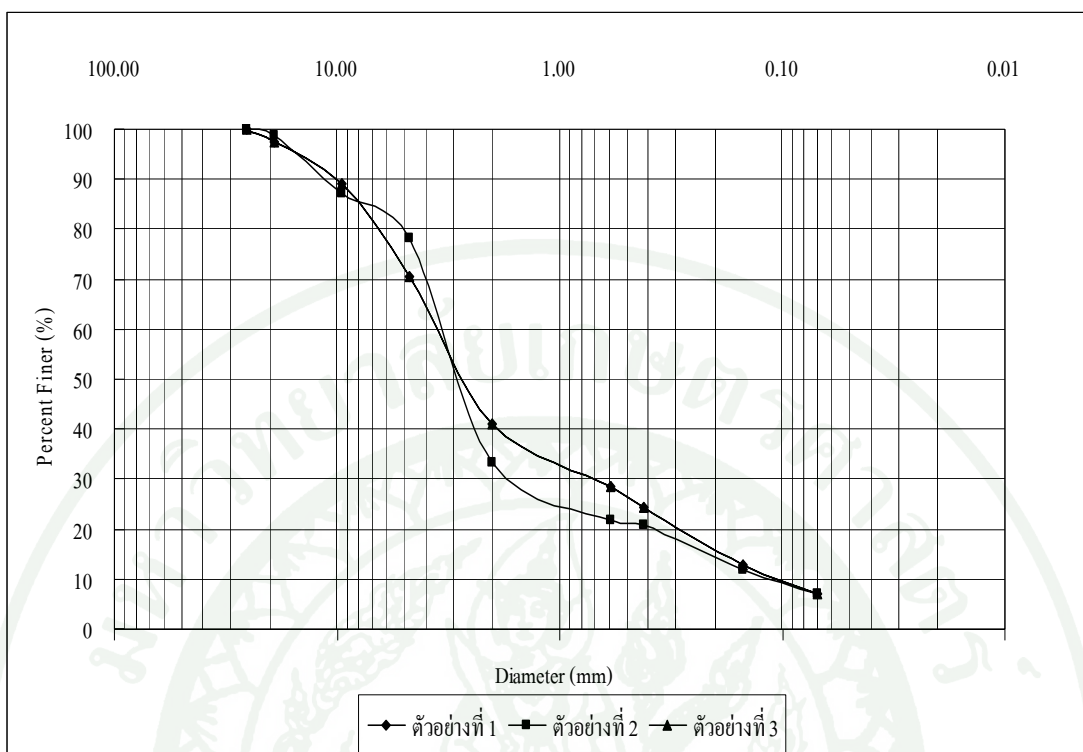
ภาพที่ 8 การกระจายขนาดเม็ดดินของตัวอย่างดินลูกรังที่เก็บจากสนาม

คุณสมบัติของเถ้าก้นเตา

คุณสมบัติทางด้านกายภาพของเถ้าก้นเตา

เถ้าก้นเตาที่นำมาใช้ในการทดสอบมาจากถ่านหินบิทูมินัสที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งเป็นกากหรือตะกอนที่มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและละเอียดปะปนกัน ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินมีเนื้อแข็ง สีนํตาลถึงดำ ลักษณะมันวาว มีเหลี่ยมคม พื้นผิวเป็นแบบขรุขระ คล้ายกับทราย ไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค

ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเถ้าก้นเตาได้แสดงไว้ดังภาพที่ 9 ซึ่งพบว่า การกระจายตัวของเถ้าก้นเตาเป็นแบบมีขนาดคอแคบ (Well-graded) การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification และ AASHTO พบว่าตัวอย่างเถ้าก้นเตาอยู่ในกลุ่ม SP และ A-3

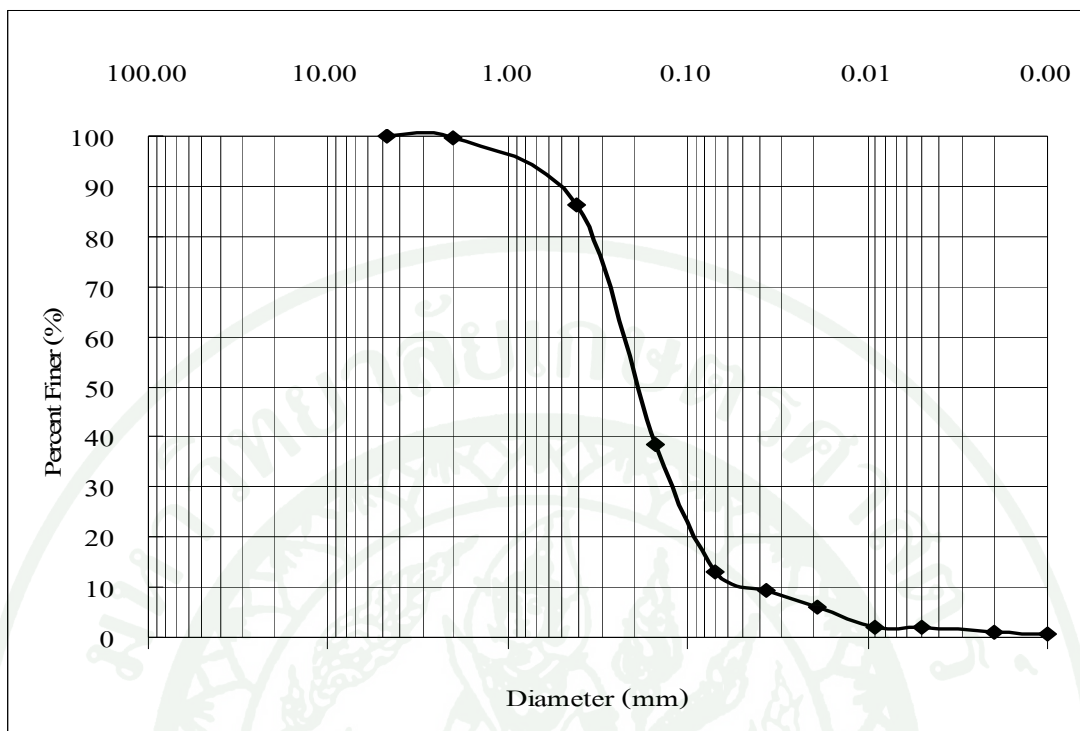


ภาพที่ 9 การกระจายขนาดของเถ้าก้นเตาที่เก็บจากสนาม

คุณสมบัติของเศษปูนขาว

คุณสมบัติทางด้านกายภาพของเศษปูนขาว

เศษปูนขาว คือ กากหรือของเหลือทิ้งที่มีลักษณะเป็นละอียดค่อนข้างสม่ำเสมอ มีเทาหรือขาวขุ่น เนื่องจากประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะเป็นผงร่วนไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำในปริมาณที่เหมาะสมและอายุการบ่มมากขึ้นจะแข็งตัวได้ ทั้งนี้คุณสมบัติดังกล่าวเกิดจากมีปริมาณปูนขาวอิสระปนอยู่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO) ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไปกับซิลิกาและอลูมินาจนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวได้ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH)



ภาพที่ 10 การกระจายขนาดของเศษปูนขาวที่เก็บจากสนาม

และผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรัง เอ้ากันเตาและเศษปูนขาวที่สำคัญอีกการทดสอบหนึ่งคือการทดสอบ X – Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อทราบปริมาณธาตุที่เป็นสารประกอบในรูปออกไซด์ของโลหะดังแสดงในตารางที่ 12 เนื่องจากสารผสมเพิ่มที่ทำการปรับปรุงควรมีคุณสมบัติเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่ดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุง

ตารางที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของโลหะในวัสดุทดสอบ

วัสดุ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃
ดินลูกรัง	0.04	0.70	13.43	73.36	0.05	0.20	3.43
เอ้ากันเตา	0.45	0.97	18.00	64.23	0.07	2.00	9.64
เศษปูนขาว	0.14	1.28	2.86	15.25	12.78	55.99	6.45

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรดผสม B, D, เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาว

คุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ซึ่งผลการทดสอบต่างๆ ได้แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบ Liquid Limit, Plastic Limit และ Plastic Limit ของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	Atterberg's Limits		
	Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity Index
เกรดผสม B	31.05 – 33.36	18.99 – 21.80	11.11 – 12.84
เกรดผสม D	34.03 – 36.39	16.41 – 17.85	16.18 – 19.98
เถ้าก้นเตา	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
เศษปูนขาว	18.75	17.95	0.81

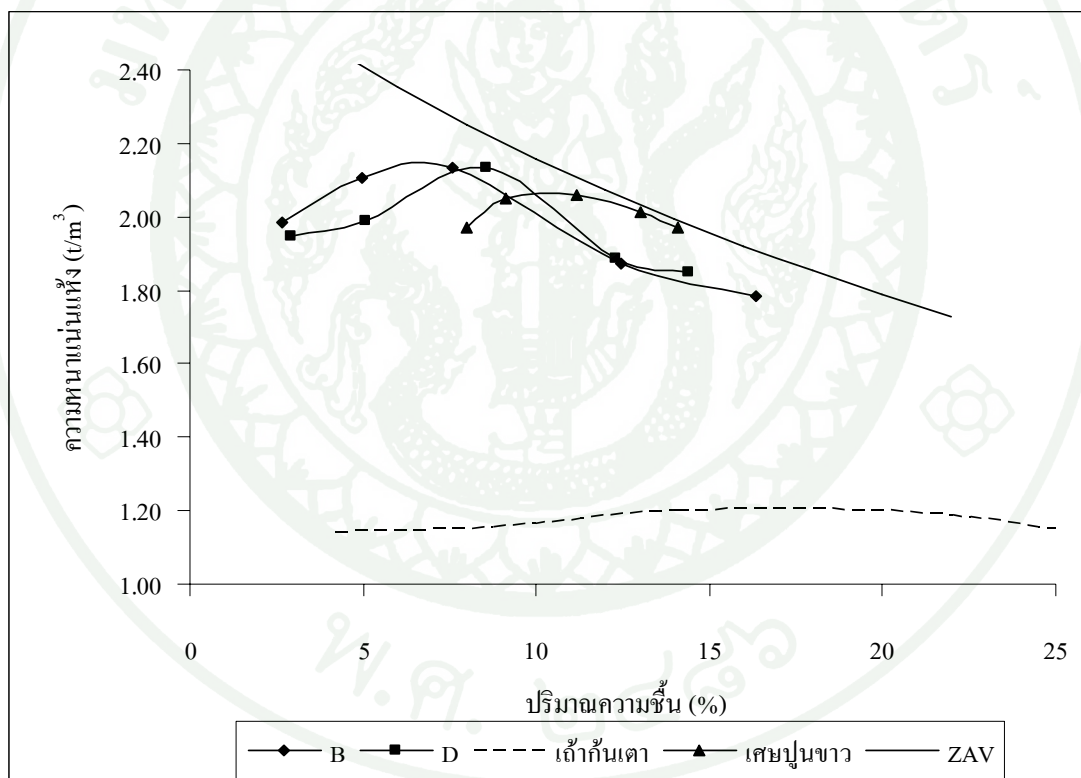
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังเกรดผสม B, D, เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาว

คุณสมบัติด้านการบดอัด

ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.ft/ft³) โดยผลการทดสอบของวัสดุแสดงไว้ดังตารางที่ 14 และภาพที่ 11 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลง ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังเกรดผสม B, D เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากในดินลูกรังเกรดผสม D, เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าดินลูกรังเกรดผสม B มาก พื้นที่ผิวจำเพาะจึงสูงกว่าและสามารถดูดซึมน้ำได้เป็นอย่างดีทำให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอนุภาคดินมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ปริมาณความชื้นเหมาะสม
	(ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	(%)
ดินลูกรังธรรมชาติ	2.22 (± 0.05)	7.78 (± 0.20)
ดินลูกรังเกรดผสม B	2.15 (± 0.20)	7.20 (± 0.20)
ดินลูกรังเกรดผสม D	2.10 (± 0.30)	8.40 (± 0.50)
เถ้าก้นเตา	1.20 (± 0.10)	16.50 (± 0.20)
เศษปูนขาว	2.07 (± 0.05)	10.2 (± 0.20)



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของวัสดุทดสอบ

คุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านการกำลังของวัสดุทดสอบโดยการทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B, D เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวแสดงไว้ดังตารางที่ 15 จากผลการทดสอบพบว่าเศษปูนขาวให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. สูงที่สุด รองลงมาคือดินลูกรังเกรดผสม B และเถ้าก้นเตา ส่วนดินลูกรังเกรดผสม D นั้นให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR ต่ำที่สุด ซึ่งในเศษปูนขาวมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO) จำนวนมาก อาจเกิดกระบวนการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaO) รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยา Cement Hydration ก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และก่อรูปร่างเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงและเศษปูนขาวที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาจะเข้ามาชิดกันโดยจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเป็นหลัก ทำให้คุณสมบัติทางด้านการกำลังดีกว่าวัสดุอื่น ส่วนในดินลูกรังเกรดผสม B, เถ้าก้นเตาและดินลูกรังเกรดผสม D นั้นสอดคล้องกับผลการทดสอบการบดอัดและลักษณะการกระจายขนาดของเม็ดดิน โดยกำลังที่เกิดขึ้น มาจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดินเป็นหลักมีและปริมาณขนาดเม็ดกรวดและทรายผสมอยู่เป็นปริมาณมาก ส่งผลให้ได้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. ลดลงตามลำดับ

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	California Bearing Ratio (CBR.), (%)	
	Unsoaked	Soaked
ดินลูกรังเกรดผสม B	30.55	21.33
ดินลูกรังเกรดผสม D	15.40	12.01
เถ้าก้นเตา	56.64	36
เศษปูนขาว	120	—

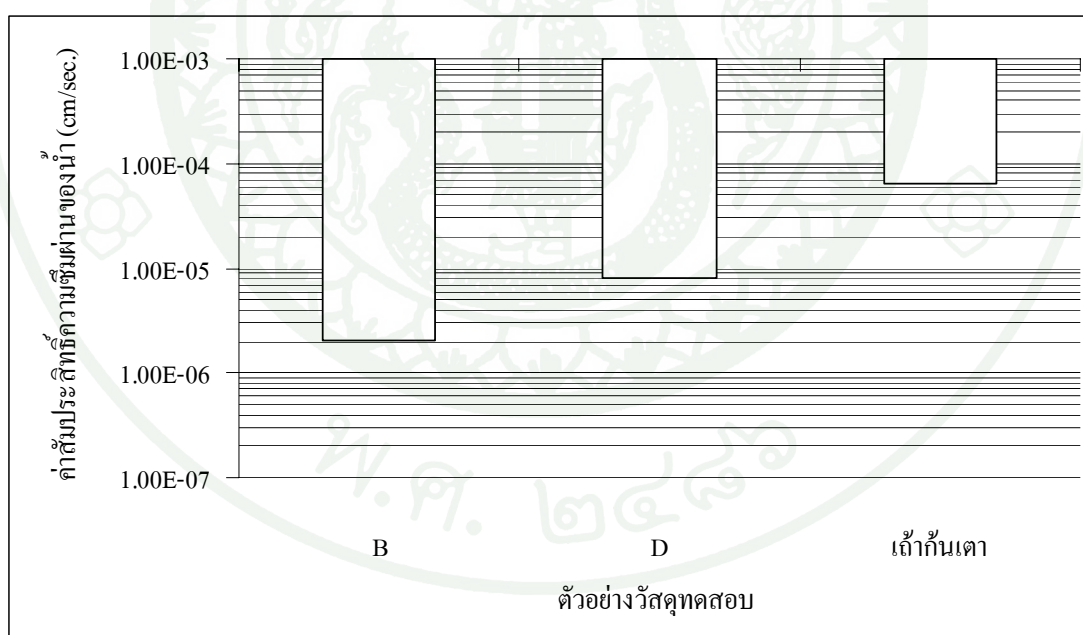
คุณสมบัติทางด้านการซึมน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการซึมน้ำของวัสดุทดสอบได้แก่ดินลูกรังเกรดผสม B, D, เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาว ซึ่งทดสอบโดยวิธี Constant Head แบบใช้ความดันเข้าช่วย โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของวัสดุทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 16 และภาพที่ 12 พบว่า ดิน

ลูกรังในกลุ่มเกรด B มีค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำต่ำที่สุดเนื่องจากการกระจายตัวที่ดี (Well Grade) มีอนุภาคเม็ดดินขนาดเล็กสามารถเข้าไปอุดช่องว่างในมวลดินได้อย่างเต็มที่จึงทำให้ช่องว่างน้อยเป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำต่ำ ในขณะที่ดินลูกรังกลุ่มเกรดผสม D และเถ้าก้นเตาจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินลูกรังเกรด B มีค่าต่ำกว่าดินลูกรังเกรดผสม D อยู่ประมาณ 3.96 และ 31.97 เท่า ซึ่งเถ้าก้นเตามีความชื้นน้ำสูงที่สุด (โปรงน้ำ)

ตารางที่ 16 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	สัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ(cm./sec.)
เกรดผสม B	2.01E-06
เกรดผสม D	7.96E-06
เถ้าก้นเตา	6.43E-05



ภาพที่ 12 ค่าความสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของวัสดุทดสอบ

คุณสมบัติของสารผสมเพิ่ม (เถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์)

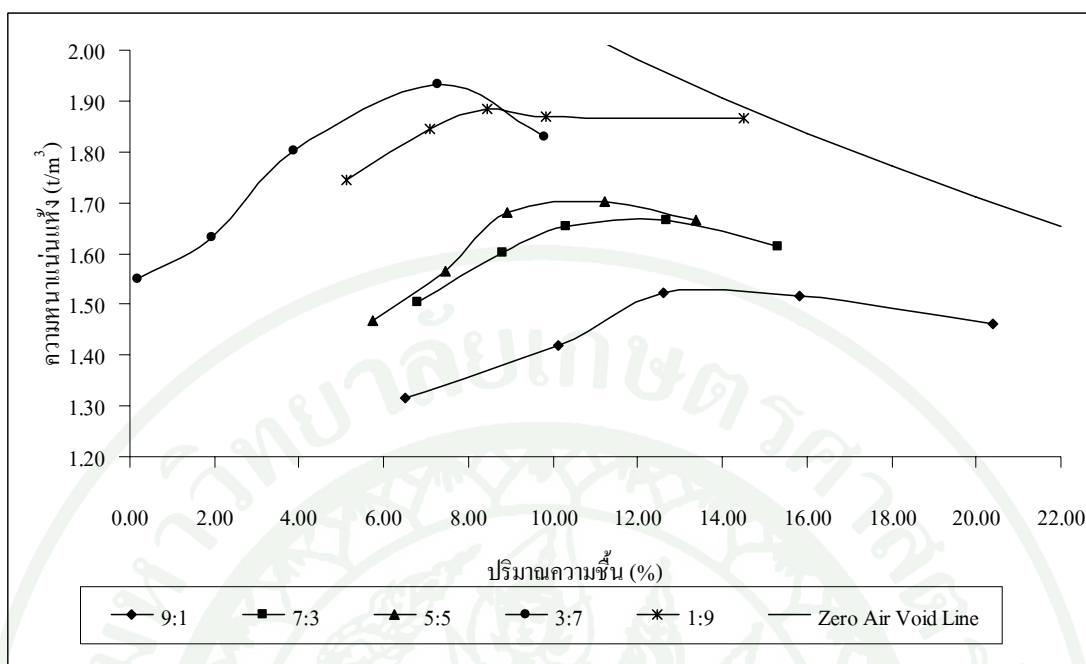
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของสารผสมเพิ่ม

คุณสมบัติด้านการบดอัดของสารผสมเพิ่ม

ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.ft/ft³) แสดงไว้ดังตารางที่ 17 และภาพที่ 13 โดยนำเถ้าก้นเตาที่มีขนาดตามธรรมชาติผสมเศษปูนขาวตามอัตราส่วน 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 และ 9:1 โดยน้ำหนักแห้งของเถ้าก้นเตา นำมาผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์ (สถานะของเหลว) ทุกอัตราส่วนผสม จากการศึกษาพบว่า สารผสมเพิ่มที่อัตราส่วน 3:7 โดยน้ำหนักแห้งของเถ้าก้นเตา มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ประมาณ 1.93 ตันต่อลูกบาศก์เมตร (t/m.³) และอัตราส่วน, 1:9, 5:5, 7:3 และ 9:1 มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) เพิ่มขึ้นโดยเถ้าก้นเตาผสมเศษปูนขาวอัตราส่วน 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 และ 9:1 เท่ากับ 13.50, 12.40, 11.00, 7.20 และ 8.50% ตามลำดับ

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วนต่างๆ

วัสดุทดสอบ โดยน้ำหนักแห้งของสารผสม		ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	ปริมาณความชื้นเหมาะสม
เถ้าก้นเตา (BA), %	เศษปูนขาว (TL), %	(ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	(%)
9	1	1.53	13.50
7	3	1.67	12.40
5	5	1.70	11.00
3	7	1.93	7.20
1	9	1.88	8.50



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของสารผสมเพิ่ม BA:TL

คุณสมบัติด้านกำลังของสารผสมเพิ่ม

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของสารผสมเพิ่มโดยการทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Unsoaked ของสารผสมเพิ่มแสดงไว้ดังตารางที่ 18 และภาพที่ 14 พบว่าเมื่อเอ้ากันเตาเป็นสารผสมเพิ่มหลักและเพิ่มปริมาณของเศษปูนขาวมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น และมีกำลังสูงขึ้นตามปริมาณเศษปูนขาว ซึ่งอัตราส่วนที่ให้กำลังมากที่สุดของสารผสมเพิ่มคือ 3:7 (เอ้ากันเตา 3 % ต่อ เศษปูนขาว 7%) โดยน้ำหนักแห้งของเอ้ากันเตา มีค่าประมาณ 220 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นแห้งลดต่ำลงและค่ากำลังลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณเศษปูนขาวที่เพิ่มมากขึ้น แต่น้ำหรือสารละลายไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างเต็มที่ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้นก็จะไม่มีผลมากต่อการเกิดปฏิกิริยา (Diamond et al., 1964)

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR. ของสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วนต่างๆ

วัสดุทดสอบ โดยน้ำหนักแห้งของสารผสม		California Bearing Ratio (CBR.), (%)
เถ้าก้นเตา (BA), ส่วน	เศษปูนขาว (TL), ส่วน	Unsoaked
9	1	90.09
7	3	140.24
5	5	159.33
3	7	220.00
1	9	125.33



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดิน (CBR.) กับอัตราส่วนของสารผสม

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังของสารผสมเพิ่ม (เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์ทุกอัตราส่วน) พบว่าปริมาณเศษปูนขาวมีผลต่อค่า Unsoaked CBR และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ที่ปริมาณเศษปูนขาวให้ค่ากำลังของสารผสมเพิ่มมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน 3:7 (เถ้าก้นเตา 3% ต่อเศษปูนขาว 7%) จากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณเศษปูนขาวมากขึ้นค่ากำลังของสารผสมเพิ่มก็จะ

ไม่เพิ่มขึ้นแต่จะทำให้กำลังของสารผสมเพิ่มลดลงโดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังภาพที่ 14 เห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการผสมเศษปูนขาวลงในเถ้าก้นเตา พบว่า จะให้ค่า Unsoaked CBR สูงกว่าเถ้าก้นเตาที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ

ดังนั้นจึงเห็นว่าสารผสมเพิ่ม (เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์ทุกอัตราส่วนผสม) สามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังได้เป็นอย่างดี และได้พิจารณาสารผสมเพิ่มออกเป็น 2 ช่วงกำลังคือ 1. พิจารณาอัตราส่วนผสมของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังมากที่สุด (ค่ากำลังของสารผสมเพิ่มมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน 3:7) และ 2. พิจารณาอัตราส่วนผสมของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังน้อยที่สุด (ค่ากำลังของสารผสมเพิ่มมีค่าน้อยสุดที่อัตราส่วน 9:1) เนื่องจากมีปริมาณเศษปูนขาวน้อยที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพดิน

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรด B, D ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่ม

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรดผสม B, D, เถ้าก้นเตา และเศษปูนขาว โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางด้านกำลังโดยการทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Unsoaked และ Soaked CBR ของวัสดุทดสอบ การศึกษาจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ประเด็นคือ

1. พิจารณาอิทธิพลของสารผสมเพิ่มต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มโดยทดสอบทันทีหลังผสม

2. อิทธิพลของปริมาณเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวต่ออายุการบ่มต่อของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มเปรียบเทียบกับดินลูกรังที่ไม่ได้ผสมสารผสมเพิ่ม

และเนื่องจากสารผสมเพิ่มที่นำมาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงกำลังคือ 1. อัตราส่วนของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังมากที่สุด (ซึ่งต่อไปเรียกว่า อัตราส่วน 3:7) และ 2. อัตราส่วนของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังน้อยที่สุด (ซึ่งต่อไปเรียกว่า อัตราส่วน 9:1) ดังนี้

อิทธิพลของปริมาณสารผสมเพิ่มต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index แสดงไว้ดังตารางที่ 19-22 และ ภาพที่ 18-21 สำหรับดินลูกรังเกรด B และภาพที่ 23-25 สำหรับดินลูกรังเกรด D จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อผสมสารผสมเพิ่มทั้ง 2 อัตราส่วนลงในตัวอย่างดินลูกรังเกรด B และ D ทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อยสำหรับสารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7 ส่วนสารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1 ค่า Liquid Limit มีค่าลดลง 2-5% และ 6-8% ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มลดลงต่างกันเนื่องจากสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วน 3:7 อาจทำให้ปฏิกิริยา Hydration และ Flocculation ได้ว่องไวกว่าเมื่อปริมาณเศษปูนขาวมากกว่า (Ca มากกว่า) ส่วนค่า Liquid Limit ที่ลดลงมากในอัตราส่วน 9:1 เนื่องจากเศษปูนขาวจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นเศษปูนขาวมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุและคือน้ำออกจากมวลดิน จึงทำให้เกิดการ Flocculation และเกิดการรวมตัวกันของเม็ดดิน (Agglomeration) ในส่วนค่า Plastic Limit ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพมีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาข้างต้นเช่นเดียวกับค่า Liquid Limit เป็นผลทำให้ค่า Plastic Index มีค่าลดลงโดยดินลูกรังเกรด B มีค่า Plasticity Index ลดลงประมาณ 4% ส่วนดินลูกรังเกรด D มีค่าลดลงประมาณ 6% ดังนั้นจากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ดินลูกรังมีค่าความเหนียวลดลงโดยประมาณ 4-6%

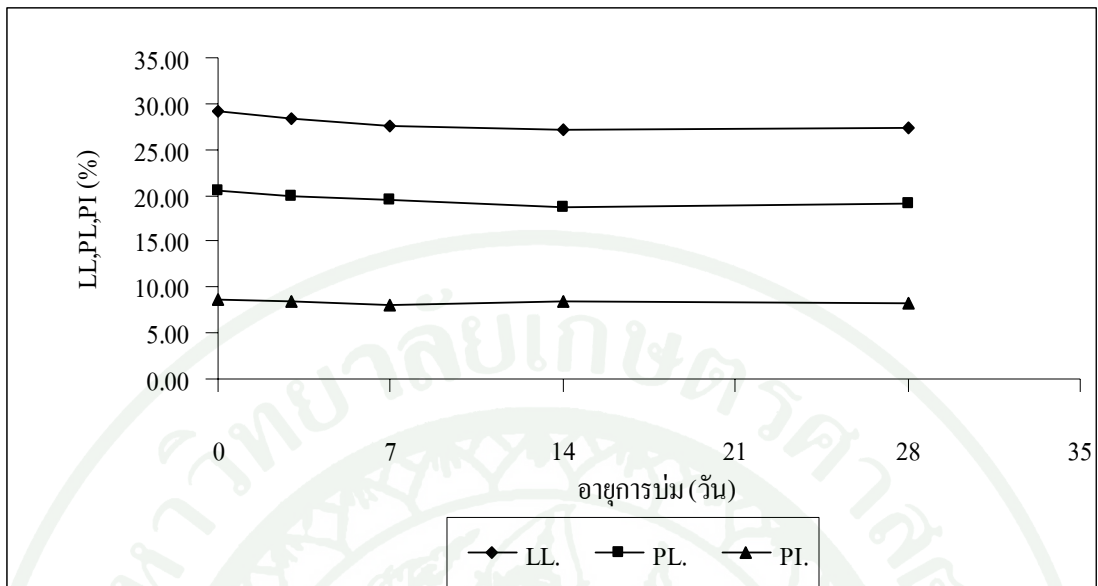
เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอายุการบ่มของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มโดยเปรียบเทียบค่า Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มในกลุ่มเดียวกัน ทดสอบทันทีหลังผสมและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงไว้ดังภาพที่ 22 และ 26 โดยพิจารณาดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มเปรียบเทียบกับดินลูกรังที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพดินที่อายุการบ่ม ต่างๆ พบว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นค่า Liquid Limit ของดินลูกรังเกรด B มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและคงที่ โดยค่าที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2% ในส่วนของดินลูกรังเกรด D มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและคงที่ ในขณะที่ค่า Plastic Limit มีแนวโน้มคงที่ทั้งในดินลูกรังเกรด B และ D ส่งผลให้ค่า Plasticity Index มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 1-2% ในดินลูกรังเกรด B และ D ตามลำดับ จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้ดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นหรือคงที่โดยประมาณ 1-2% แต่ค่าที่เพิ่มขึ้นนี้ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

ตารางที่ 19 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B ผสมปริมาณ
สารผสมเพิ่ม 20% (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7)

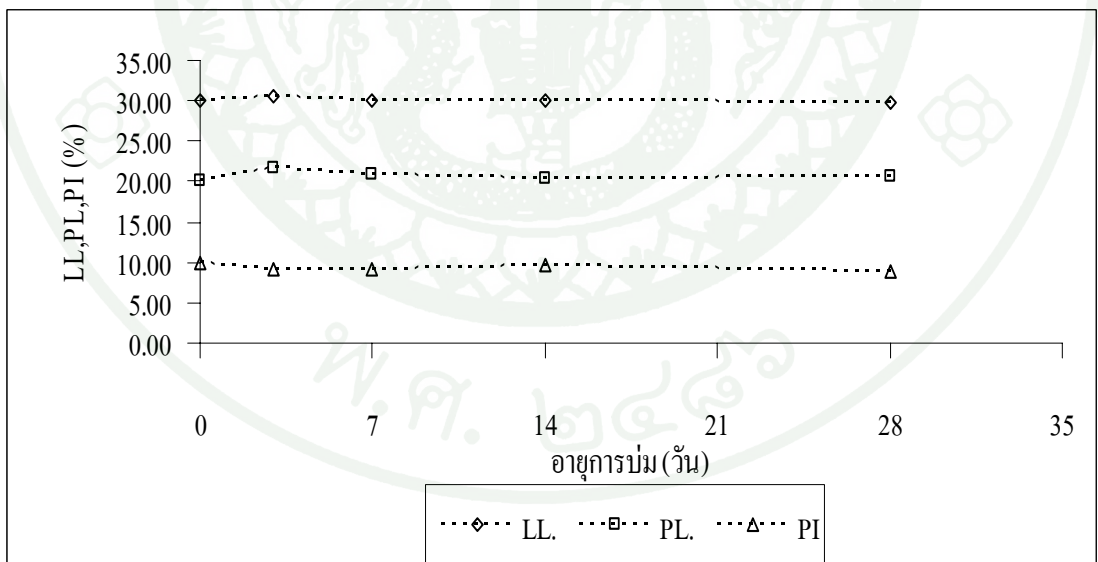
ปริมาณสารผสมเพิ่ม อัตราส่วน 3:7, (%)	อายุการบ่ม(วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
20	Liquid Limit (%)				
	29.09	28.39	27.61	27.19	27.31
20	Plastic Limit (%)				
	20.47	19.97	19.50	18.68	19.03
20	Plasticity Index (%)				
	8.62	8.42	8.11	8.51	8.28

ตารางที่ 20 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด D ที่ปริมาณ
สารผสมเพิ่ม 25% (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7)

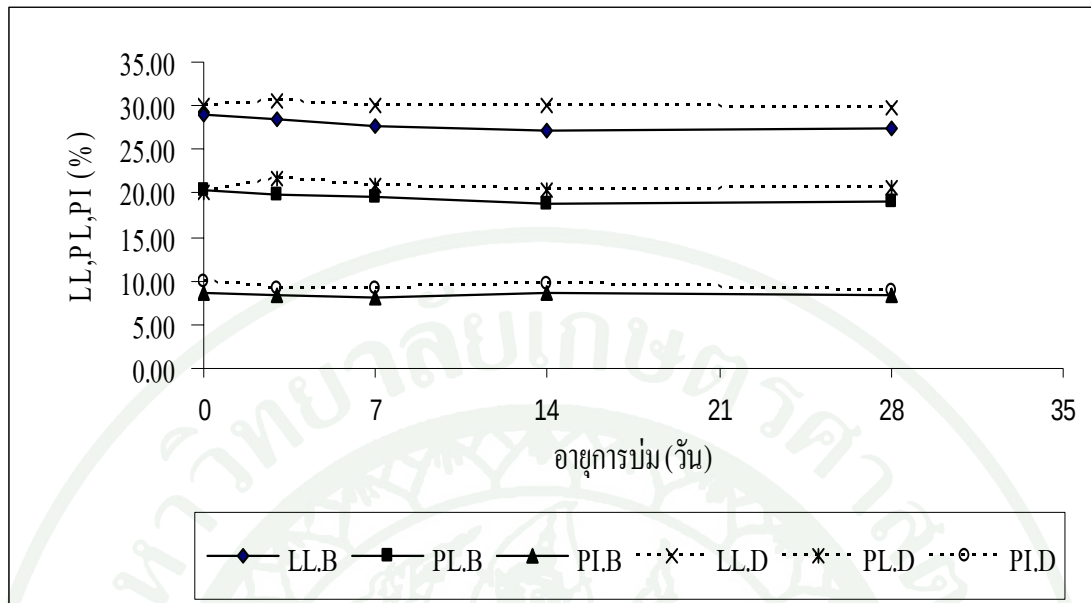
ปริมาณสารผสมเพิ่ม อัตราส่วน 3:7, (%)	อายุการบ่ม(วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
25	Liquid Limit (%)				
	30.10	30.68	30.04	30.05	29.69
25	Plastic Limit (%)				
	20.15	21.63	20.78	20.33	20.74
25	Plasticity Index (%)				
	9.95	9.05	9.26	9.72	8.95



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่ม 20% (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) กับอายุการบ่ม



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด D ผสมสารผสมเพิ่ม 25% (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) กับอายุการบ่ม



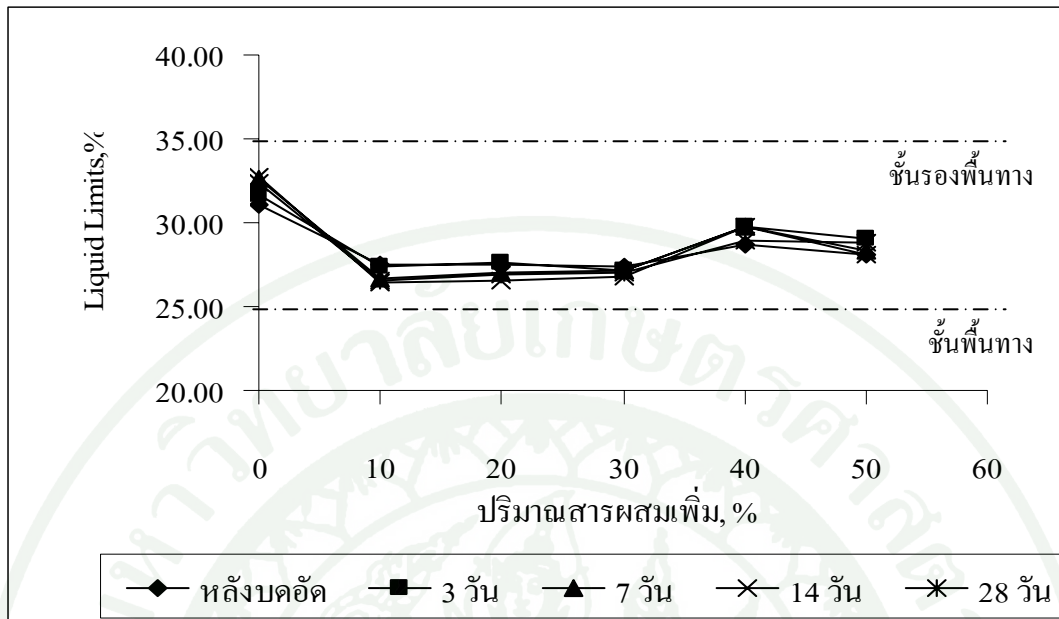
ภาพที่ 17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่มกับอายุการบ่ม

ตารางที่ 21 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ

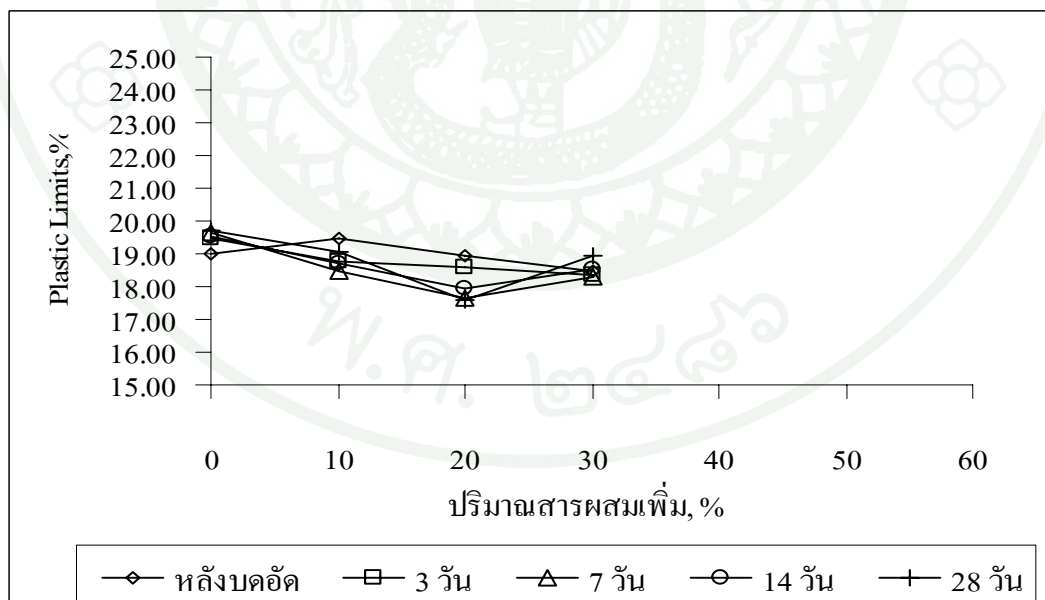
ปริมาณสารผสมเพิ่ม อัตราส่วน 9:1 , (%)	อายุการบ่ม(วัน)				
	0	3	7	14	28
Liquid Limit (%)					
0	31.05	31.68	32.56	32.72	32.43
10	27.48	27.37	26.63	26.48	26.56
20	27.52	27.60	27.04	26.60	26.91
30	27.35	27.09	27.11	26.84	27.01
40	28.73	29.79	29.79	29.79	28.93
50	28.04	29.02	28.28	28.10	28.83
Plastic Limit (%)					
0	18.99	19.49	19.67	19.54	19.71
10	19.47	18.77	18.47	18.68	19.03
20	18.92	18.56	17.65	17.93	17.58
30	18.45	18.33	18.32	18.52	18.95
40	—	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—
Plasticity Index (%)					
0	12.06	12.19	12.89	13.18	12.72
10	8.01	8.60	8.16	7.80	7.53
20	8.60	9.04	9.39	8.67	9.33
30	8.90	8.76	8.79	8.32	8.06
40	—	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—

ตารางที่ 22 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด D ผสมสาร
ผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ

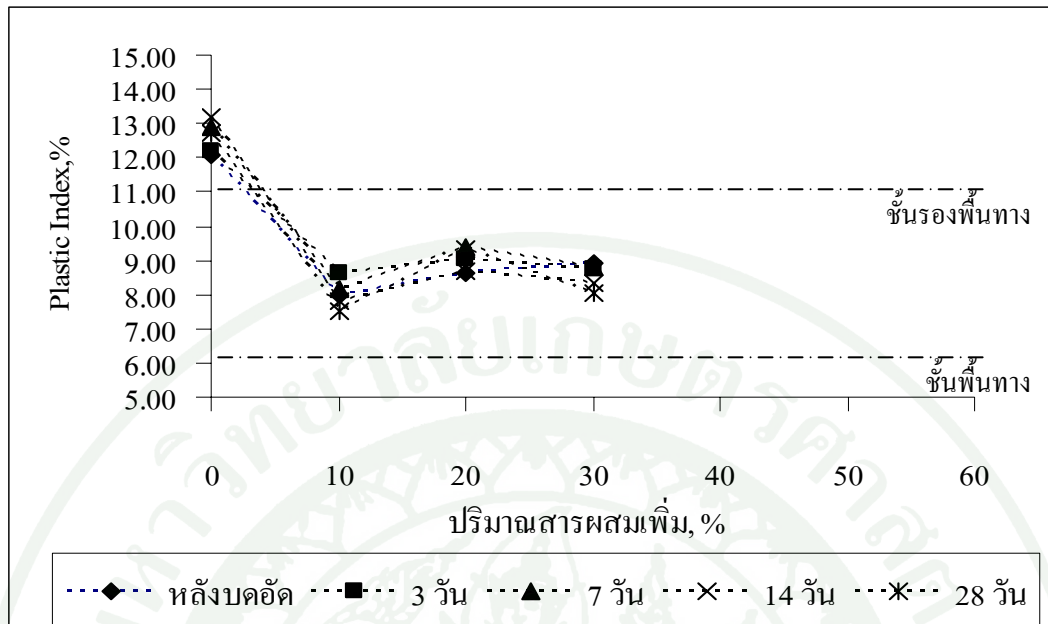
ปริมาณสารผสมเพิ่ม อัตราส่วน 9:1 , (%)	อายุการบ่ม(วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
Liquid Limit (%)					
0	35.90	34.93	36.12	36.01	36.11
10	27.52	27.60	27.60	27.60	27.91
20	27.73	29.79	29.79	29.79	28.93
30	27.94	27.52	27.28	27.10	27.83
40	28.59	28.67	28.47	28.89	28.54
50	28.49	28.19	28.61	28.19	28.31
Plastic Limit (%)					
0	19.68	19.41	18.39	18.84	18.85
10	18.47	18.54	18.32	18.74	18.03
20	18.84	18.71	18.65	18.30	18.58
30	18.55	18.58	18.47	18.42	18.31
40	—	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—
Plastic Index (%)					
0	16.22	15.52	17.73	17.17	17.26
10	9.05	9.06	9.28	8.86	9.88
20	8.89	11.08	11.14	11.49	10.35
30	9.39	8.94	8.81	8.68	9.52
40	—	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—



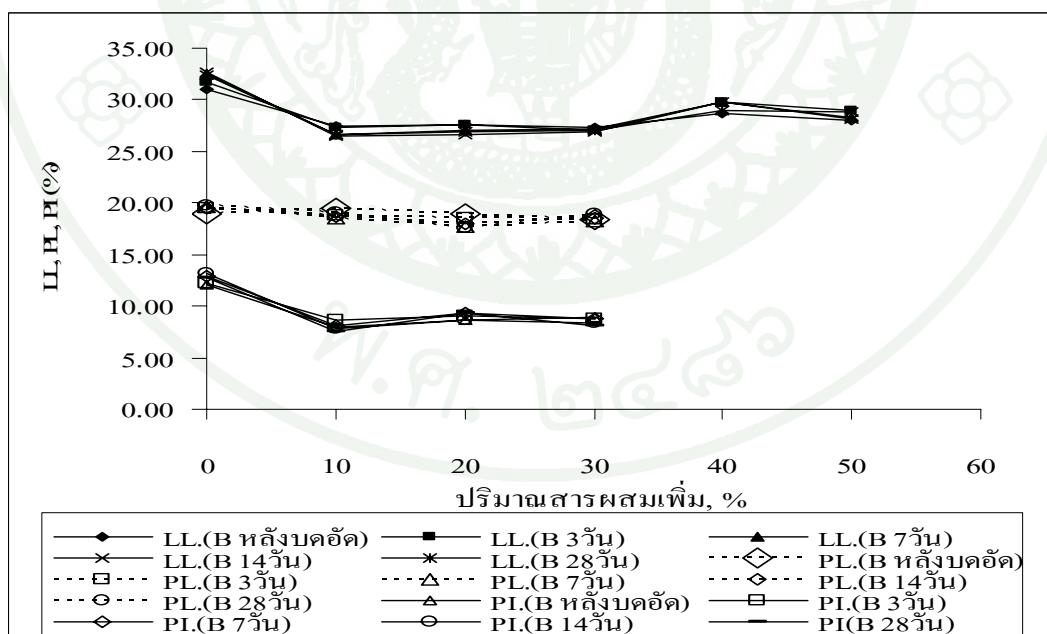
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ



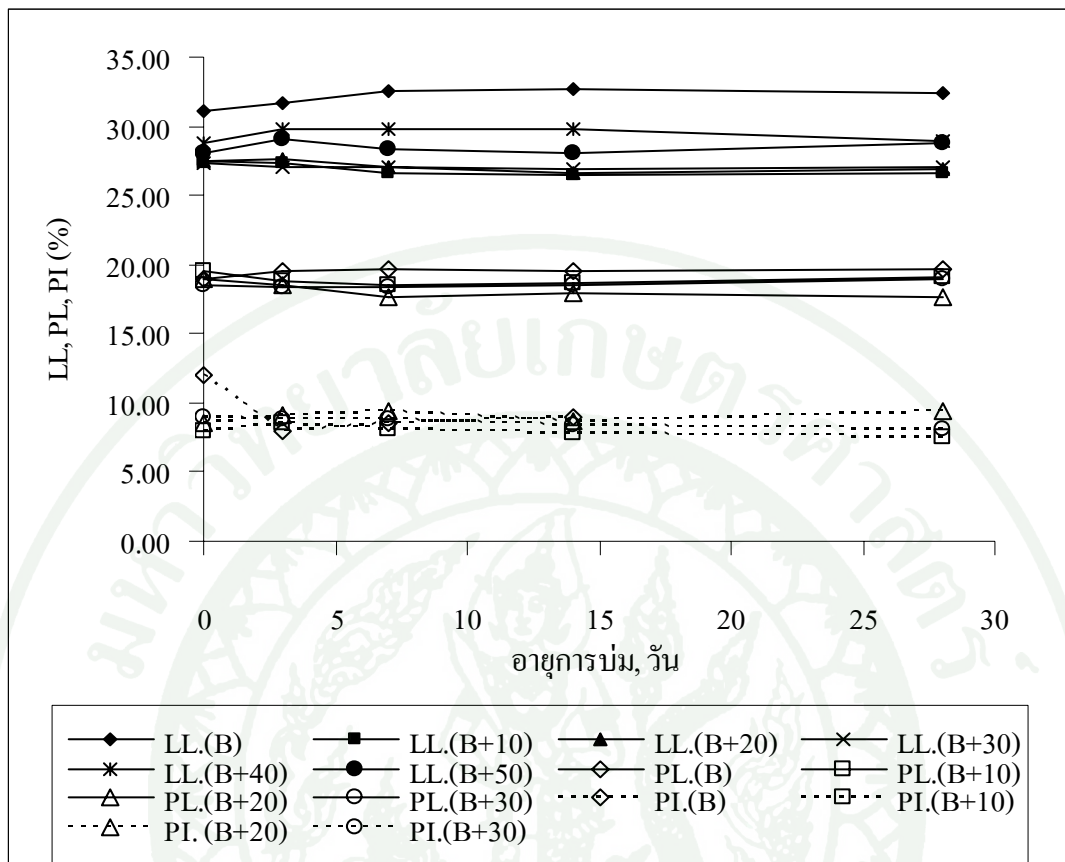
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ



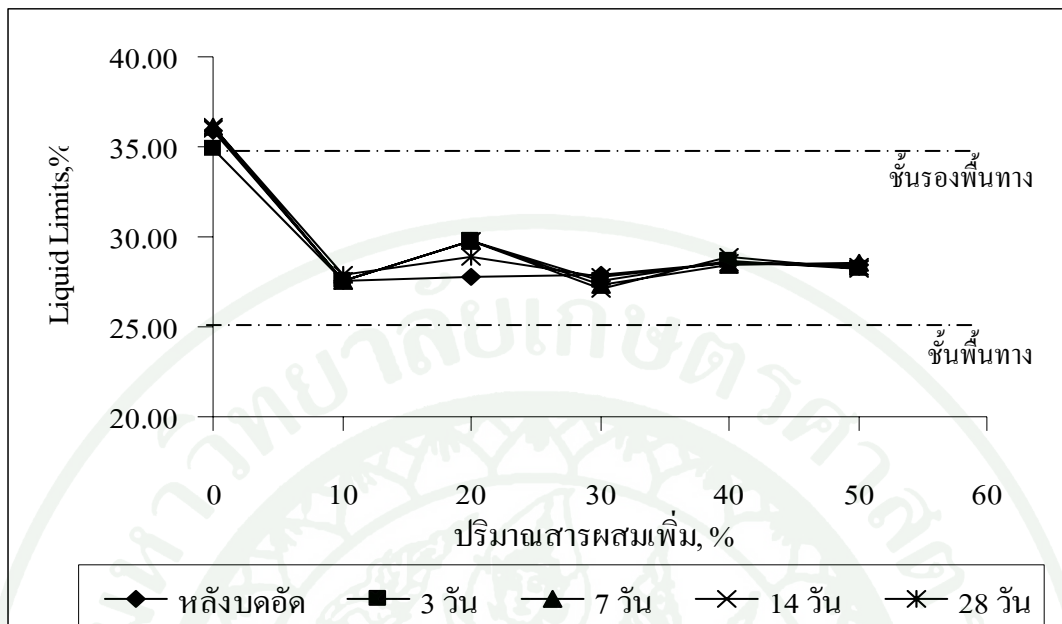
ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ



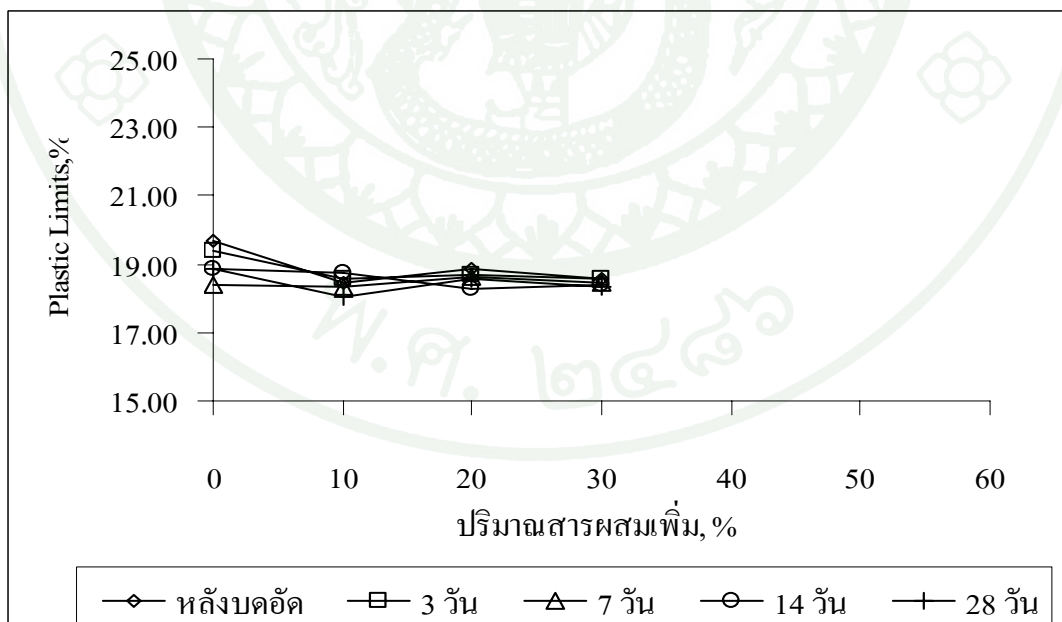
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ



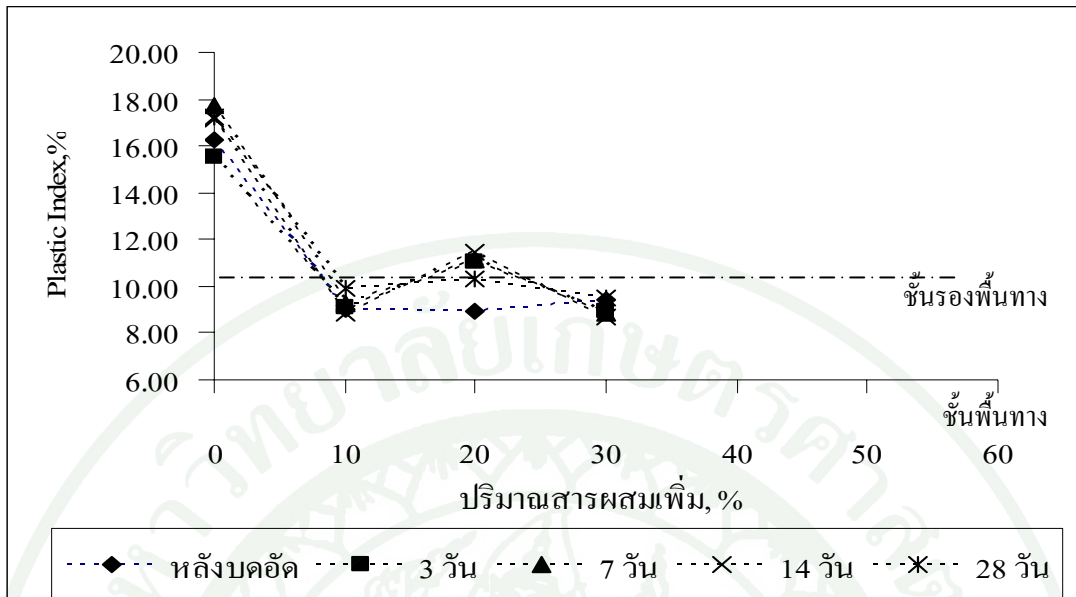
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ



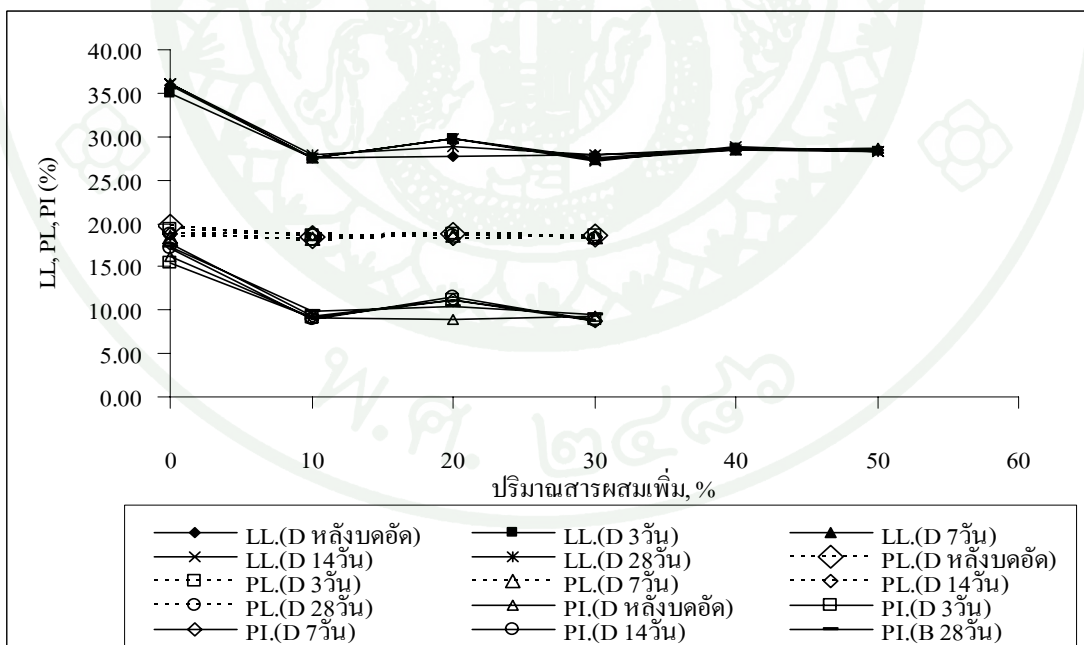
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ



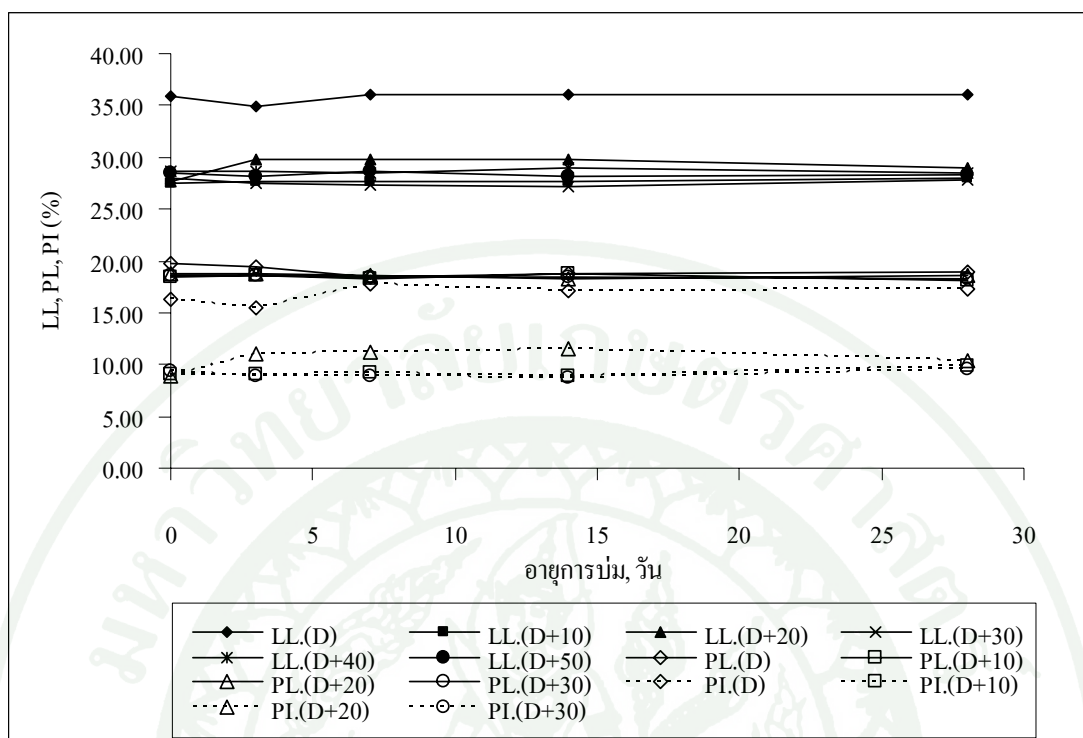
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่มของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ



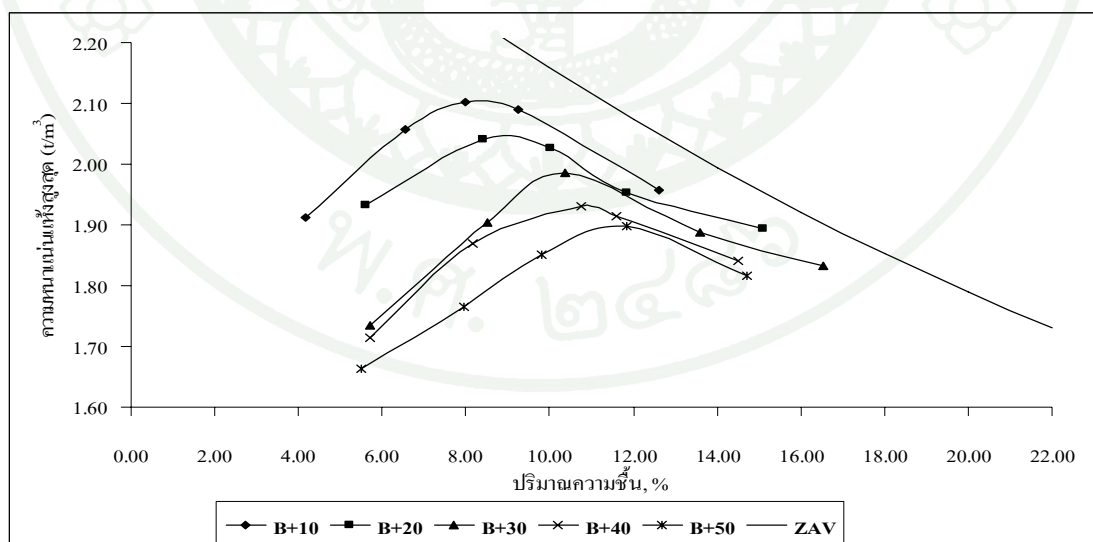
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ

คุณสมบัติด้านการบดอัด

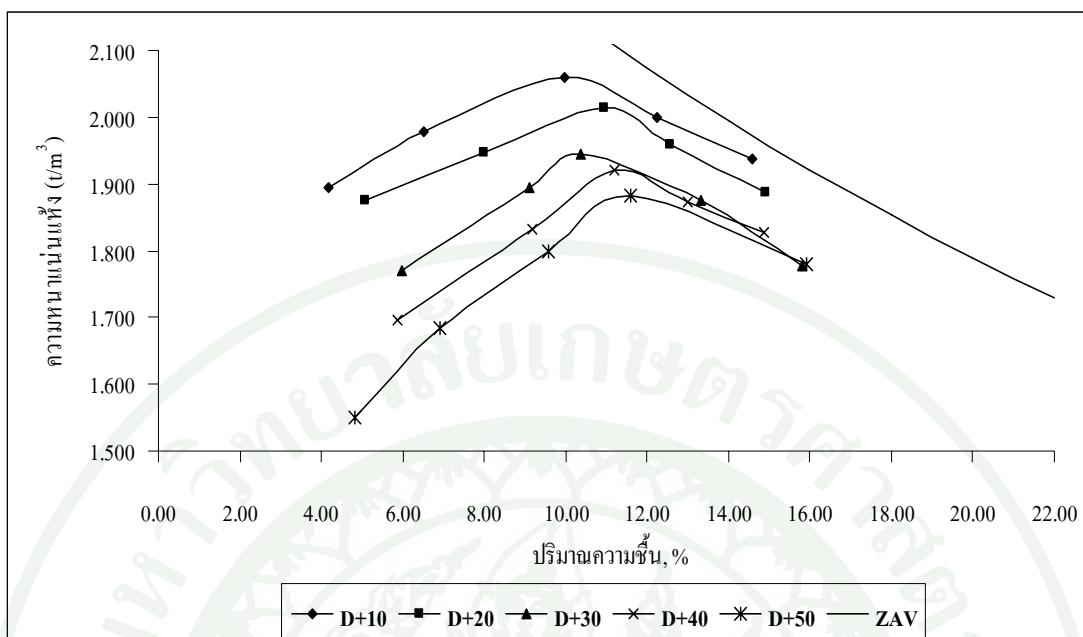
ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.ft/ft³) ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่มที่อัตราส่วนผสม 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยน้ำหนักของดินแห้ง แสดงไว้ดังตารางที่ 23 และภาพที่ 28-31 พบว่าเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าลดลงในดินลูกรังเกรด B และ D สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการผสมเข้ากันเตาและเศษปูนขาวที่มีน้ำหนักเบากว่าลงไปแทนที่ดินลูกรัง จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลง ส่วนของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งนี้ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากสารผสมเพิ่มที่ผสมลงในดินลูกรังมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าดินลูกรังมากพื้นที่ผิวจำเพาะจึงสูงกว่าทำให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอนุภาคดินมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ปริมาณต่างๆ

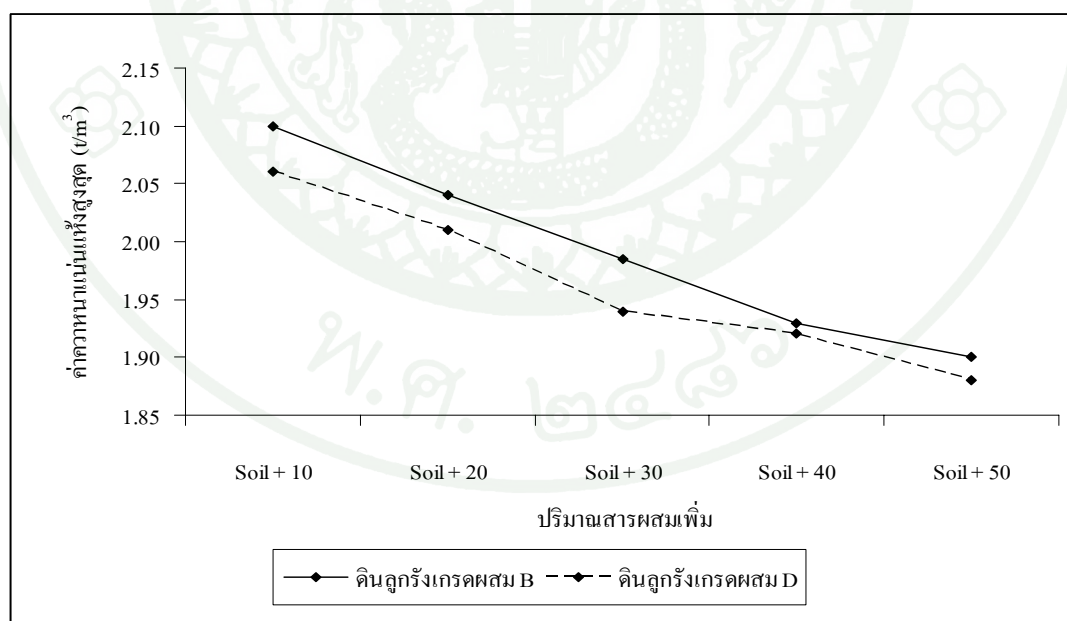
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณเถ้าก้นเตาและเศษปูนขาว อัตราส่วน 9:1 (%)	MDD (t/m ³)	OMC (%)
B	10	2.10	8.00
	20	2.04	8.90
	30	1.98	10.40
	40	1.93	10.60
	50	1.90	11.50
D	10	2.06	9.96
	20	2.01	11.00
	30	1.94	10.20
	40	1.92	11.20
	50	1.88	11.50



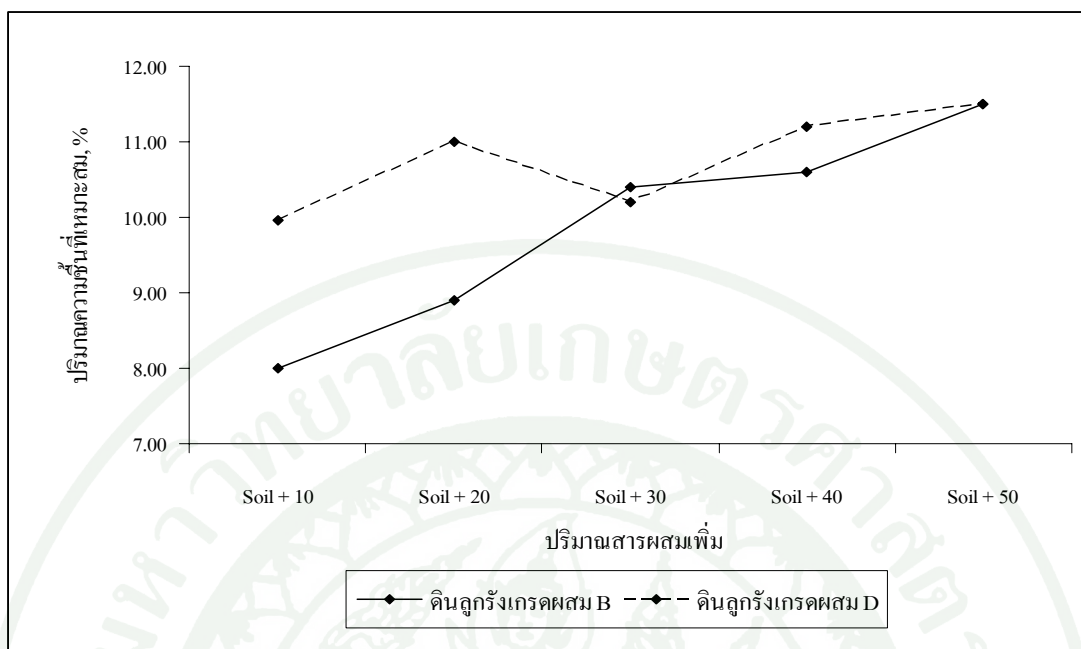
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรด D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ



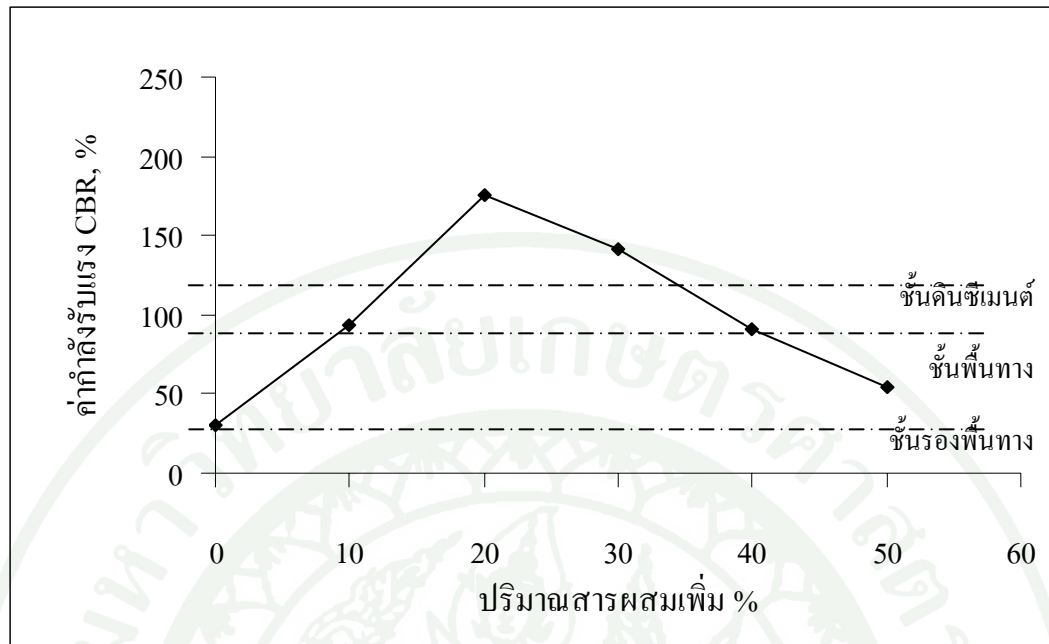
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B และ D



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B และ D

คุณสมบัติด้านกำลัง

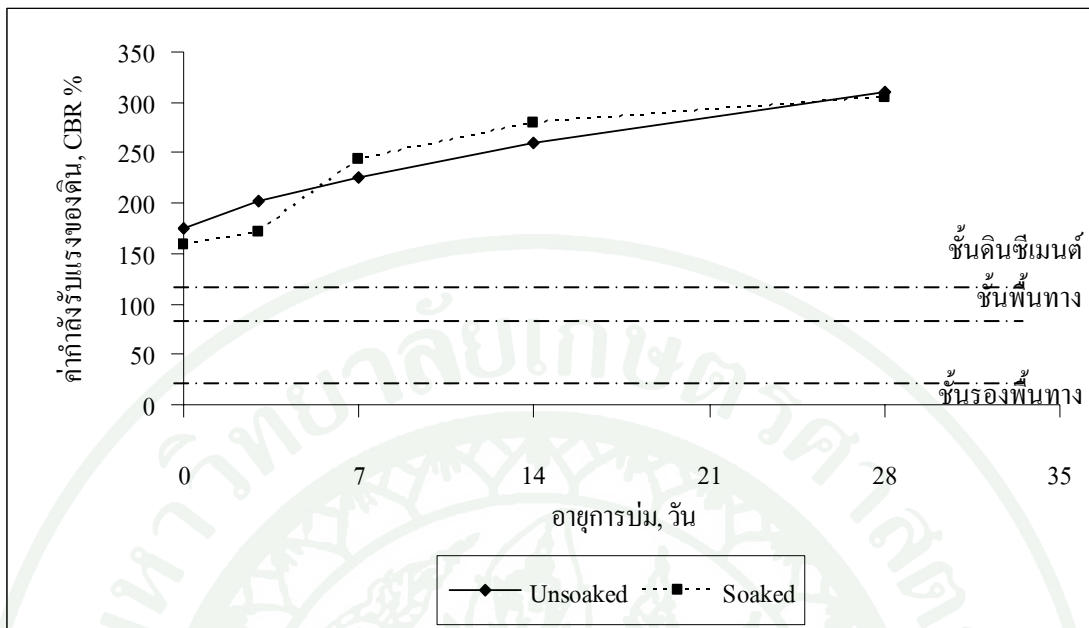
ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ผสมสารผสมเพิ่มโดยที่ดินลูกรังเกรดผสม B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อัตราส่วน 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนักของดินแห้ง และที่ดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (อัตราส่วน 3:7) ที่อัตราส่วนผสม 20 และ 25% ตามลำดับ ทำทดสอบทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 24-25 และภาพที่ 32-35 ส่วนในดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (อัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 26-27 และภาพที่ 36-51



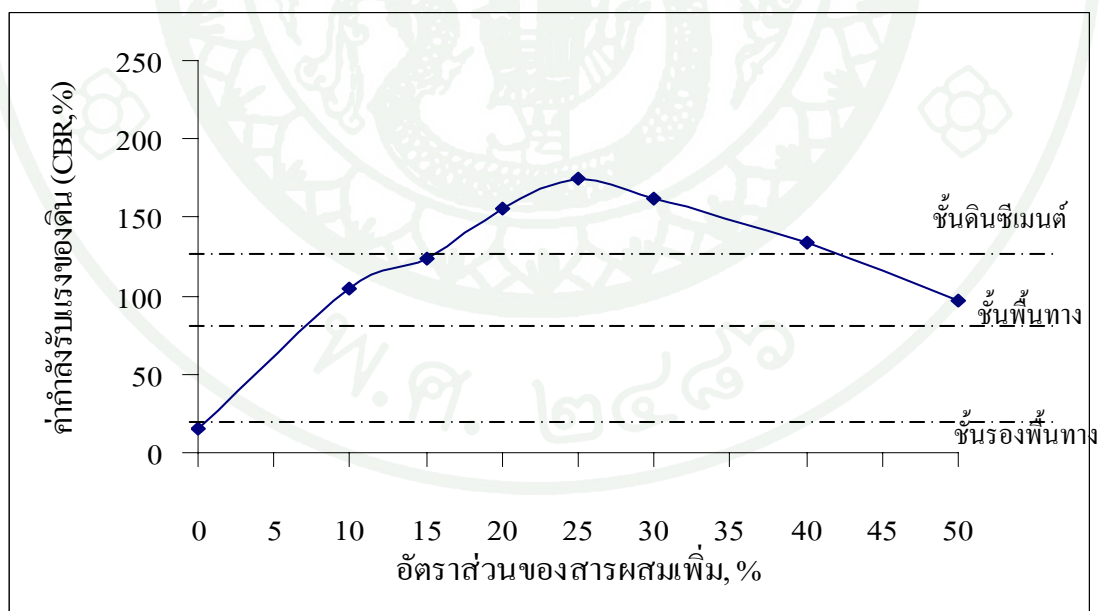
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดินกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) ของดินลูกรังเกรด B

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบกำลังรับแรง (CBR.) แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำของดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) ที่ปริมาณ 20%

กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	CBR (%)				
		อายุการบ่ม (วัน)				
		หลังบดอัด	3	7	14	28
B แบบไม่แช่น้ำ	20	175	203	225	261	311
B แบบแช่น้ำ	20	159	171	243	280	305



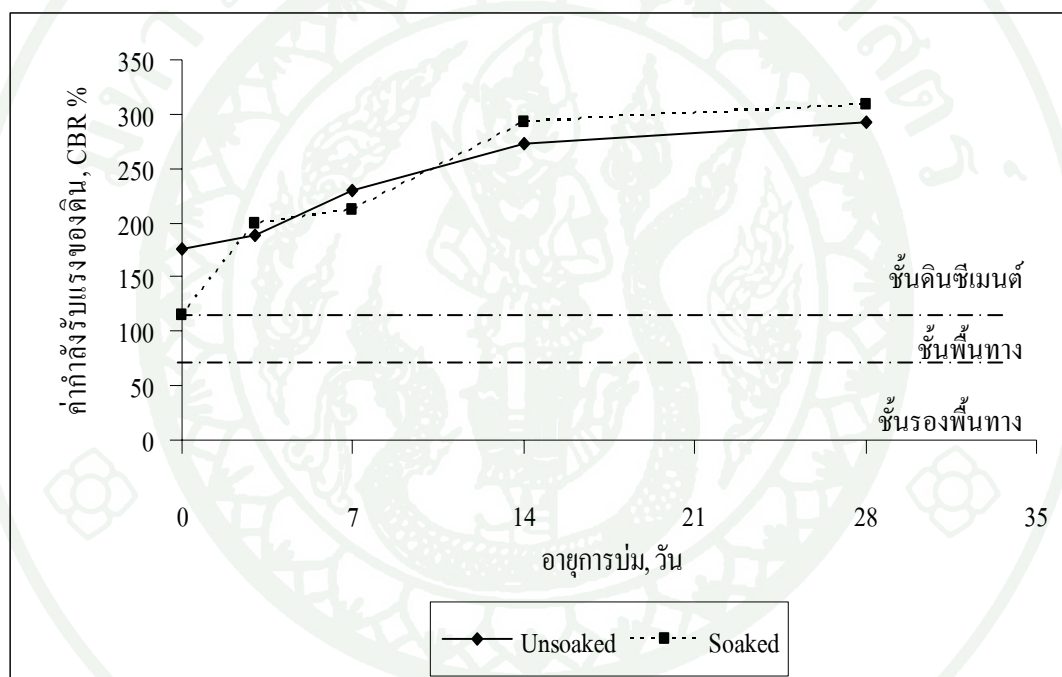
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดินลูกรังเกรด B ที่ผสมสารผสมเพิ่ม 20% กับ อายุการบ่ม



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดินกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่ม อัตราส่วน 3:7) ของดินลูกรังเกรด D

ตารางที่ 25 ผลการทดสอบกำลังรับแรง (CBR.) แบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำของดินลูกรังเกรด D ผสม
สารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 3:7) ที่ปริมาณ 25%

กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	CBR (%)				
		อายุการบ่ม (วัน)				
		หลังบดอัด	3	7	14	28
D แบบไม่แช่น้ำ	25	175	189	229	273	293
D แบบแช่น้ำ	25	115	198	212	293	308



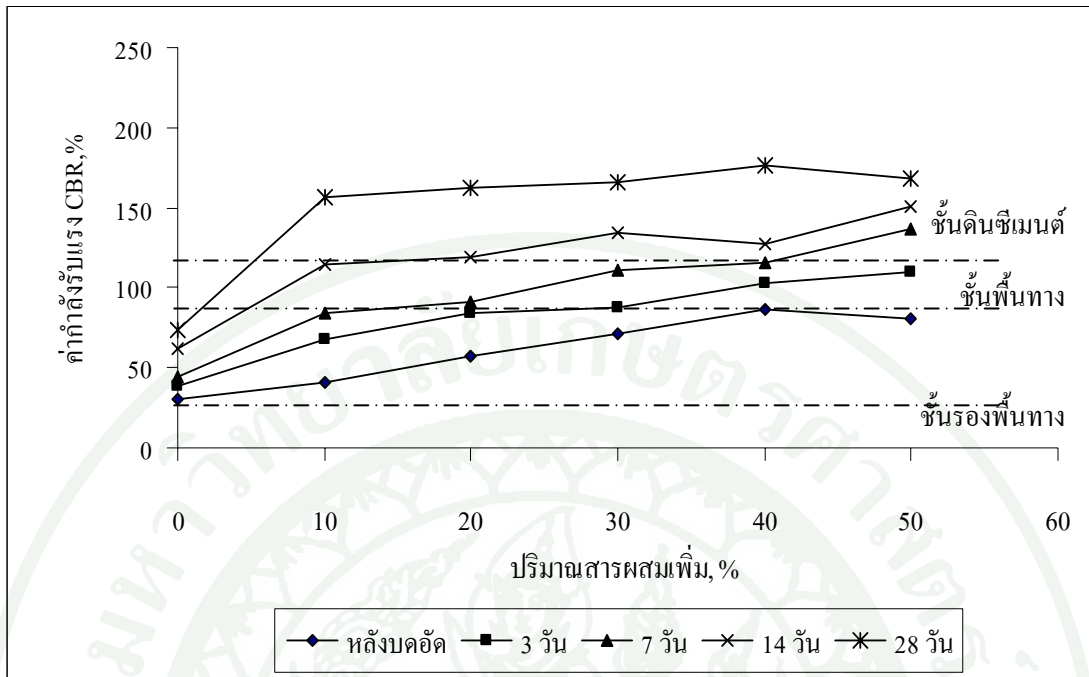
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงของดินลูกรังเกรด D ที่สารผสมเพิ่ม 25% กับอายุการบ่ม

ตารางที่ 26 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ปริมาณต่างๆ ตามอายุการบ่ม

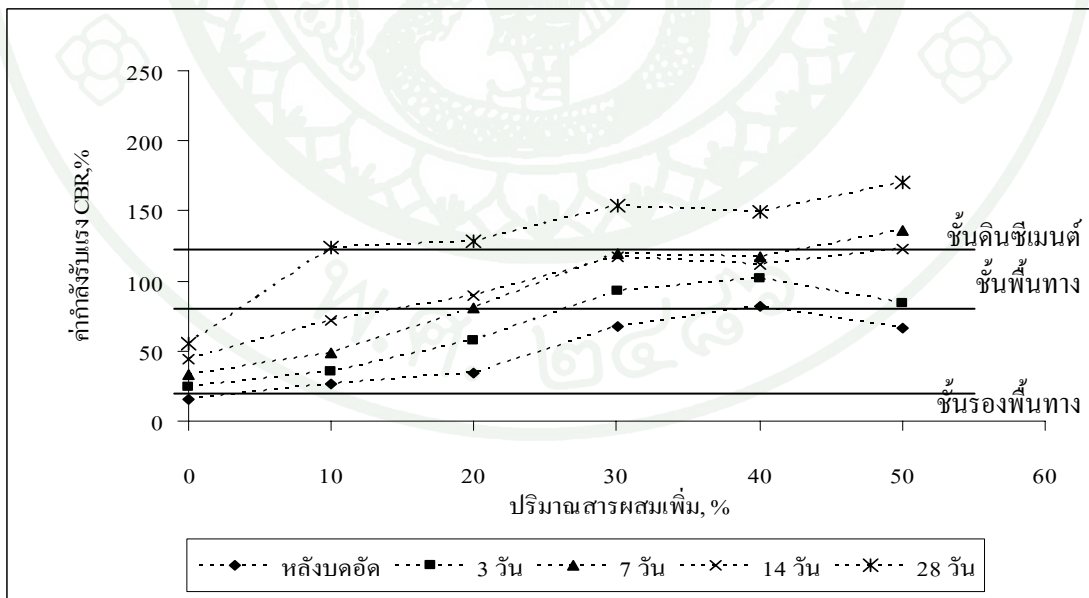
กลุ่มดิน grade	ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Unsoaked CBR (%)				
		อายุการบ่ม (วัน)				
		หลังบดอัด	3	7	14	28
B	0	31	38	45	62	74
	10	41	68	84	115	157
	20	58	84	91	119	162
	30	72	88	111	134	166
	40	87	103	115	127	176
	50	81	110	136	151	168
D	0	15	24	34	44	55
	10	27	36	49	72	124
	20	34	57	81	89	128
	30	67	93	120	117	154
	40	82	102	117	112	149
	50	67	84	136	123	170

ตารางที่ 27 ผลการทดสอบ Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ปริมาณต่างๆ ตามอายุการบ่ม

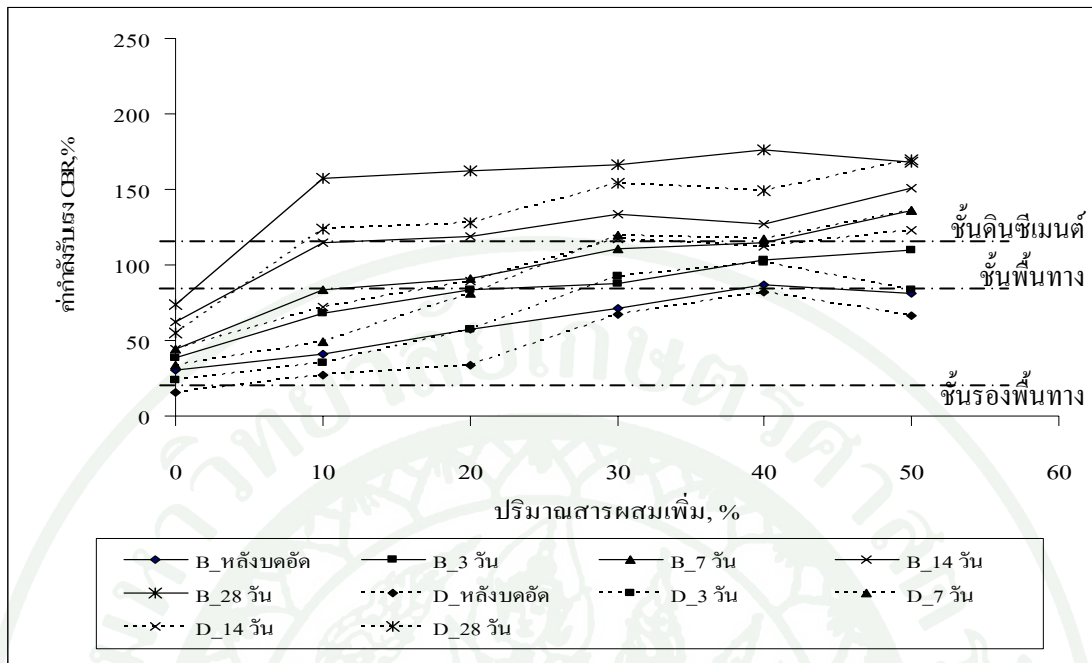
กลุ่มดิน grade	ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	Soaked CBR (%)				
		อายุการบ่ม (วัน)				
		หลังบดอัด	3	7	14	28
B	0	21	27	35	48	57
	10	62	71	98	127	151
	20	65	94	118	131	153
	30	73	77	105	126	158
	40	80	92	102	132	167
	50	82	85	96	141	191
D	0	12	15	27	34	41
	10	48	103	111	131	145
	20	64	87	101	125	141
	30	84	115	155	167	173
	40	99	116	123	146	173
	50	98	108	127	167	196



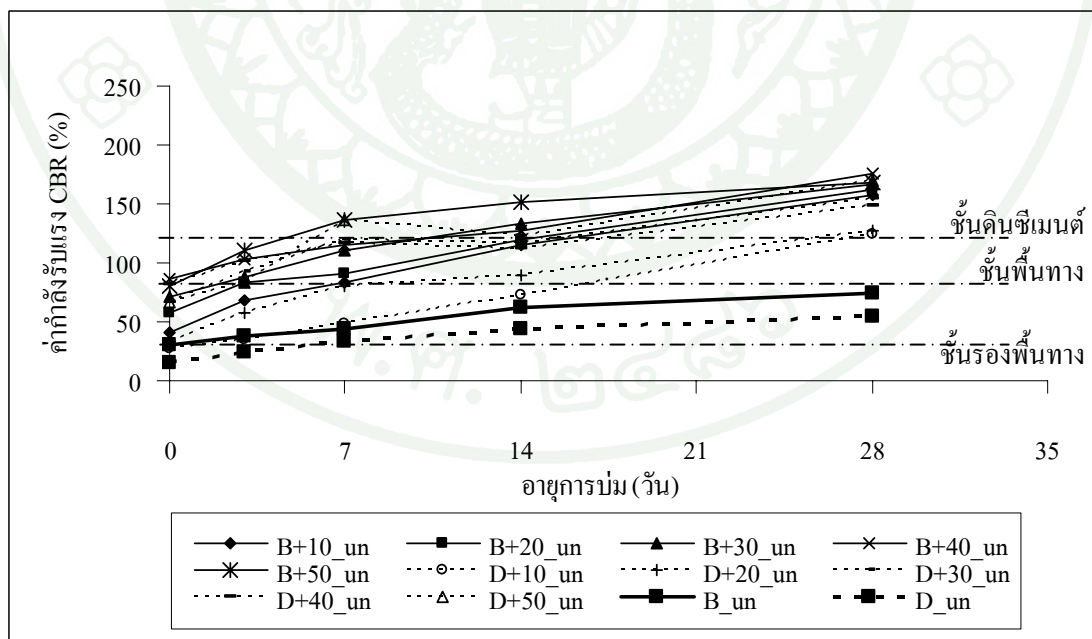
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ



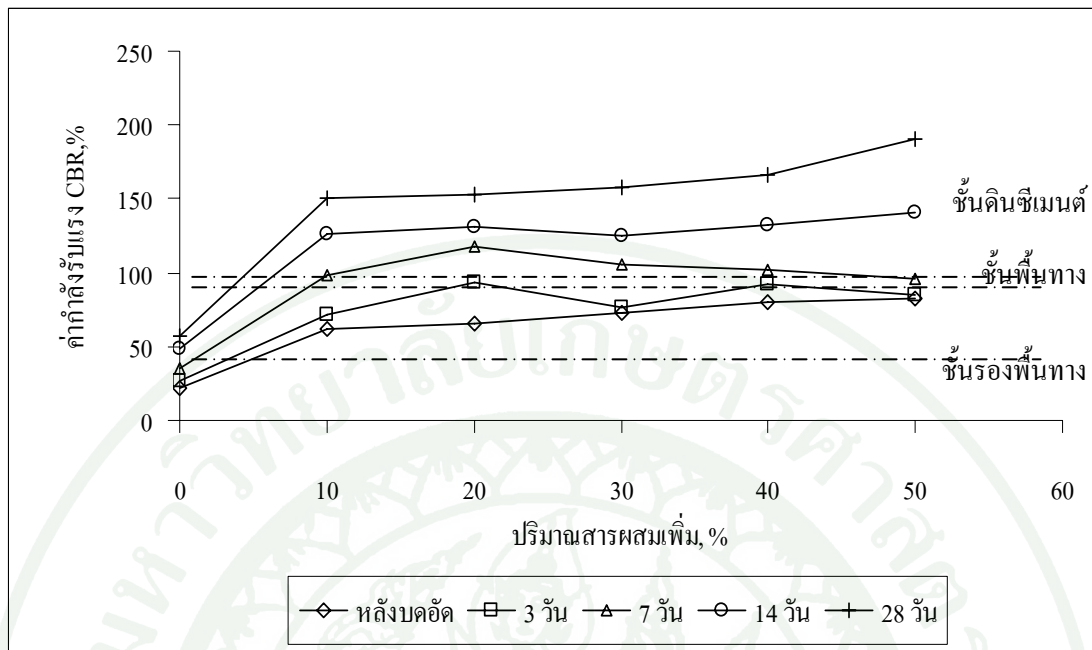
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ



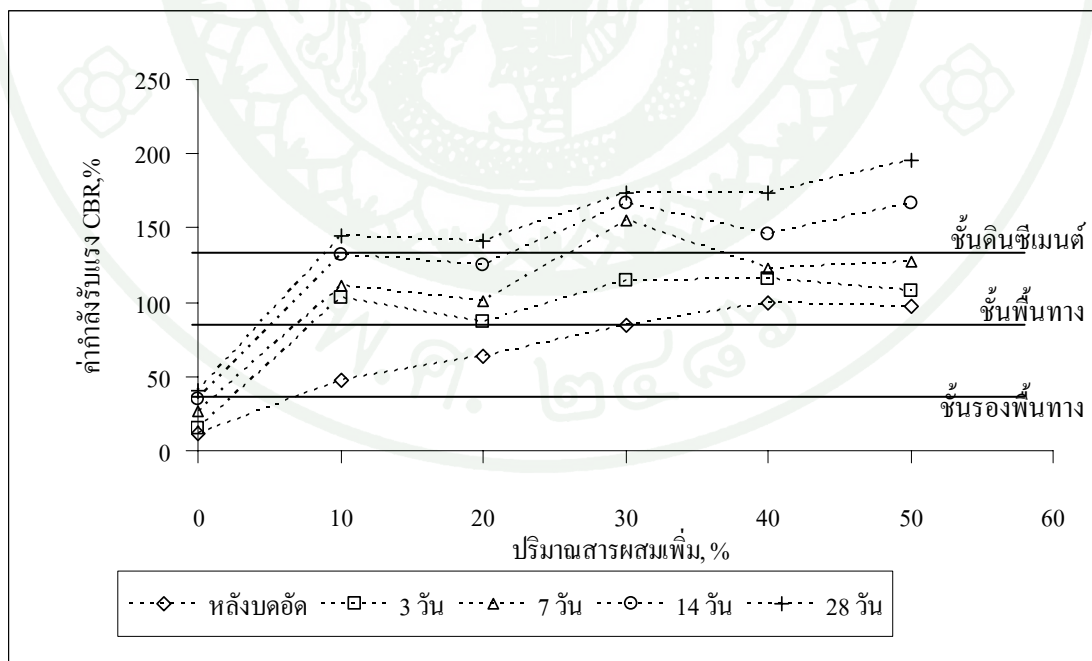
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่อายุการบ่มต่างๆ



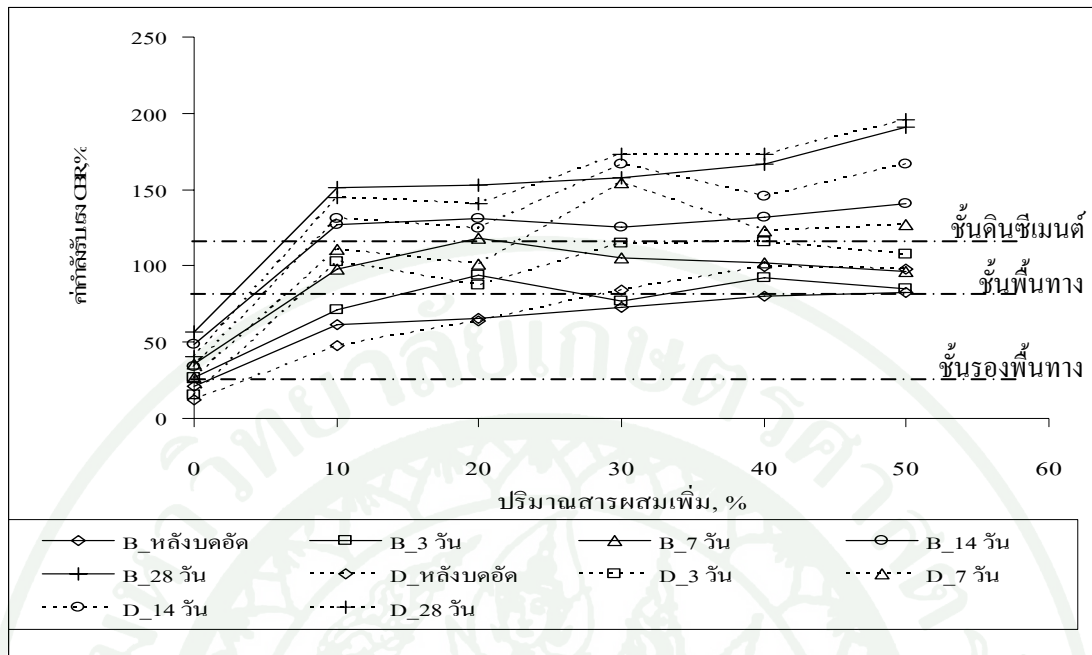
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ



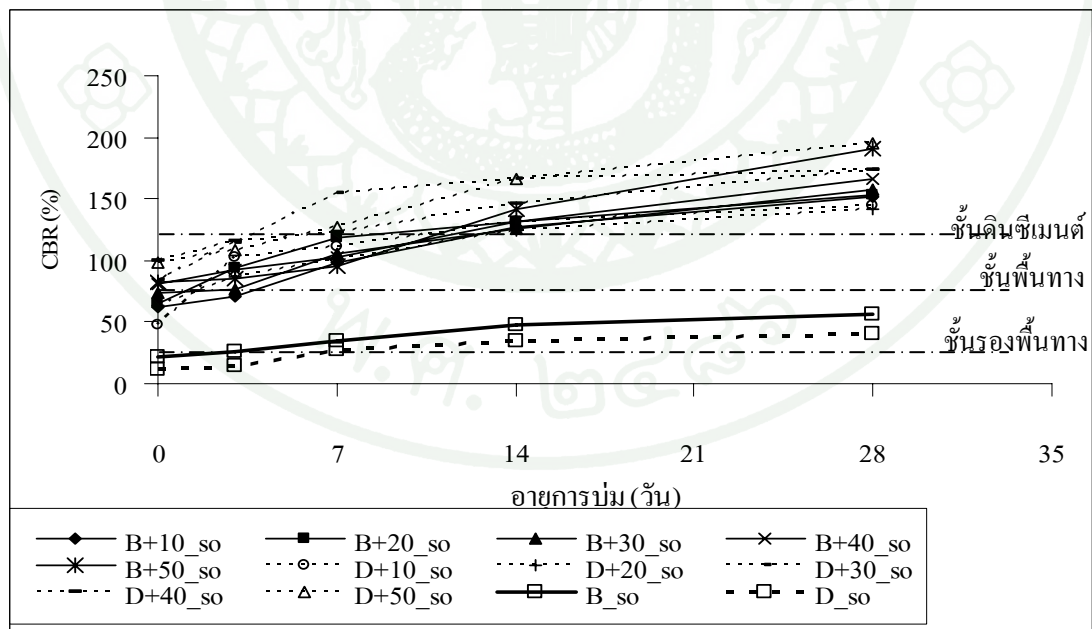
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ



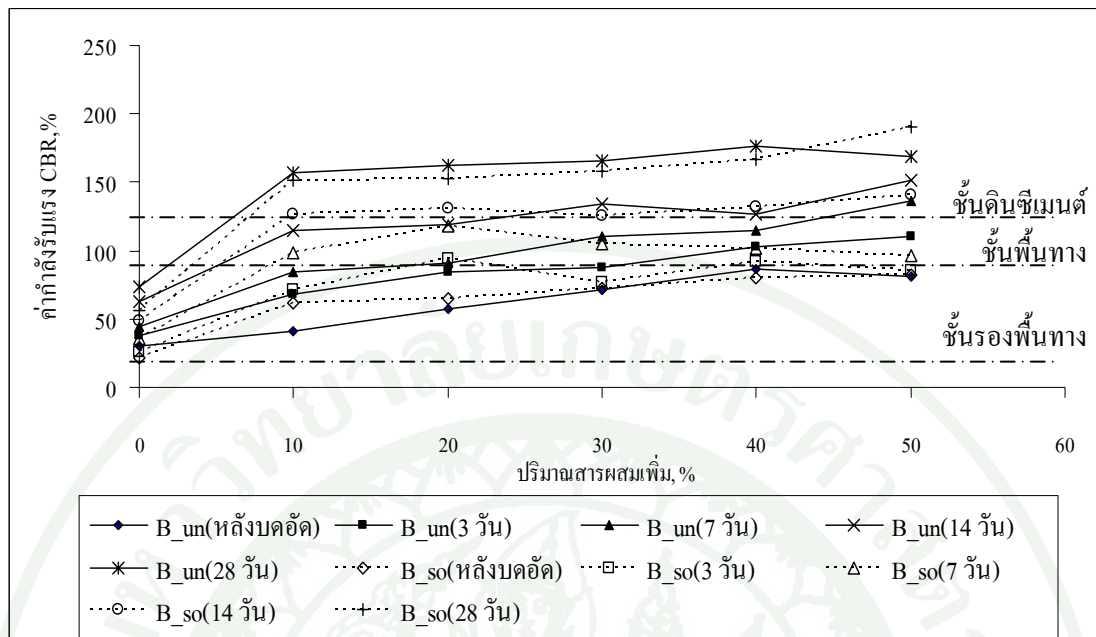
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ



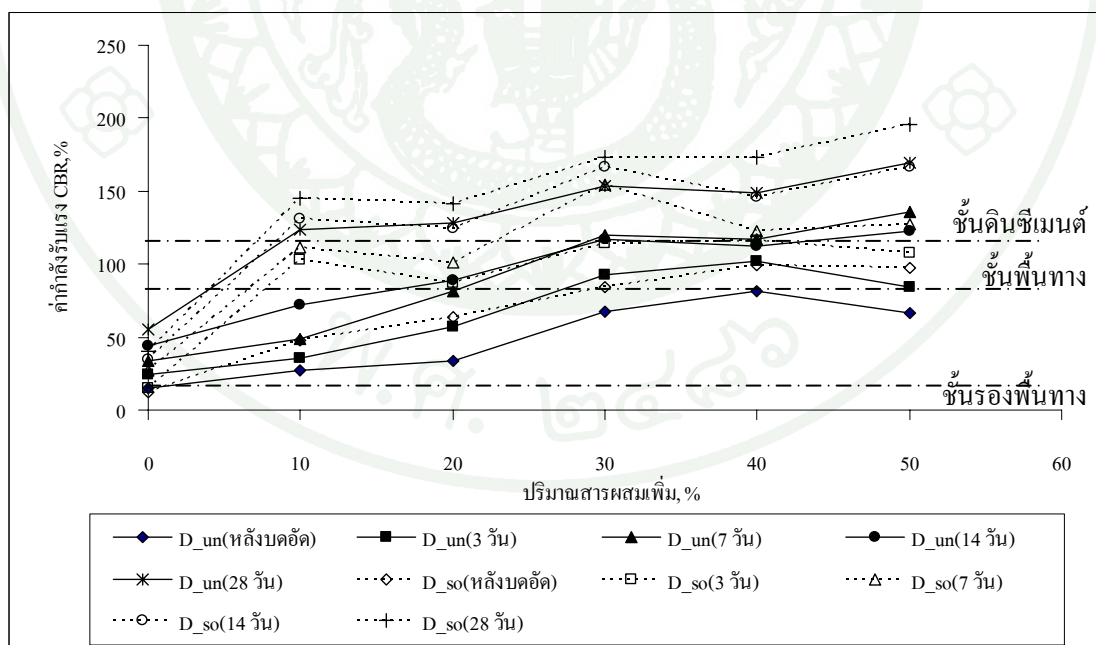
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่อายุการบ่มต่างๆ



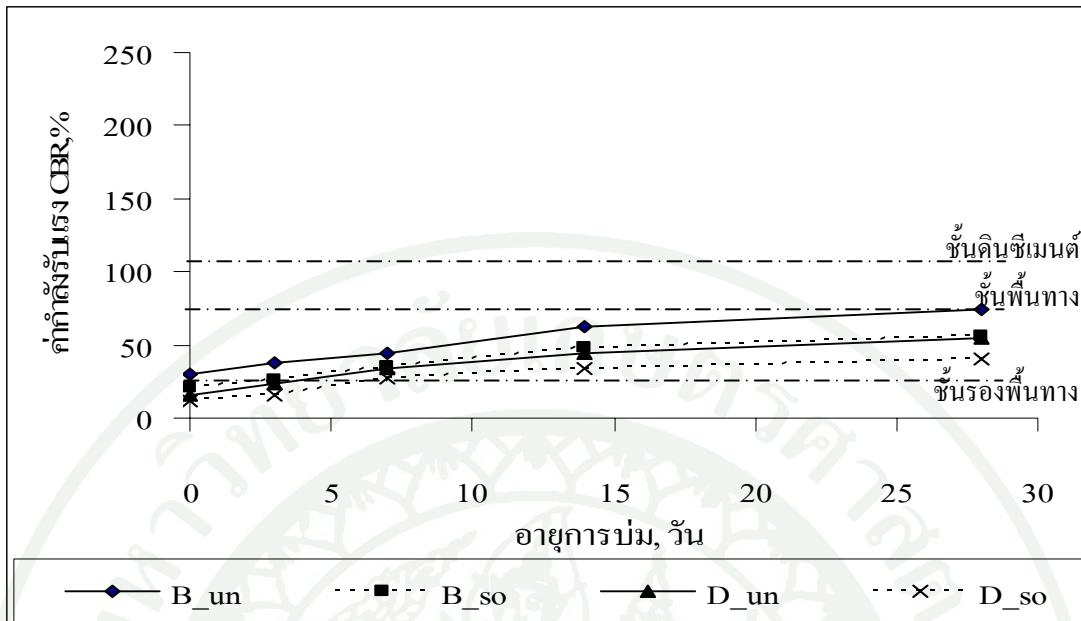
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ปริมาณสารผสมเพิ่มต่างๆ



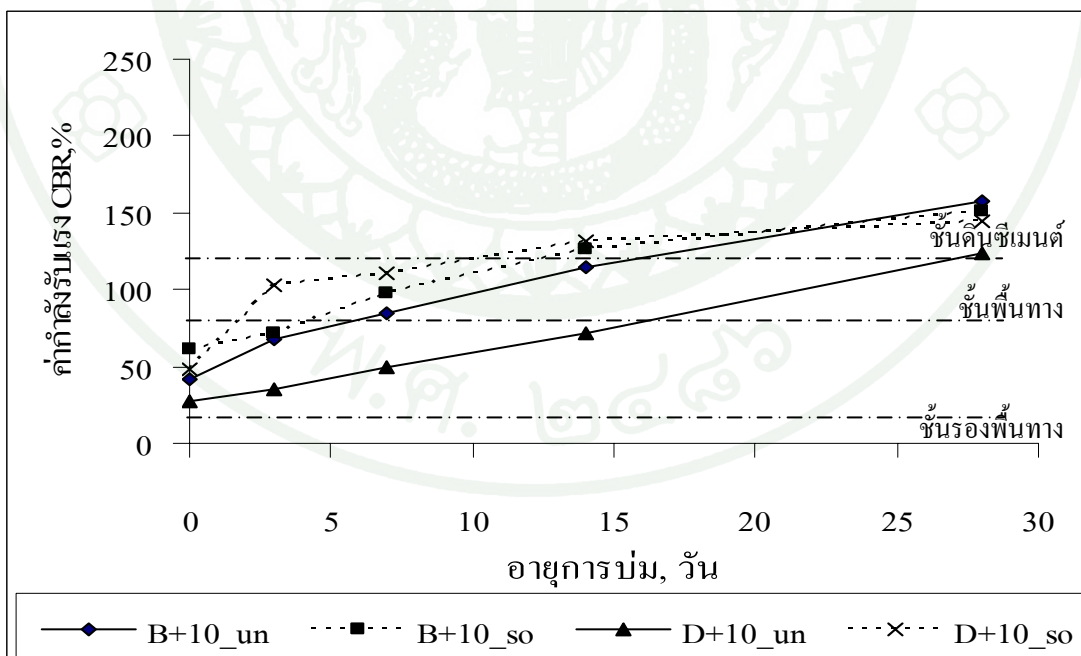
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ



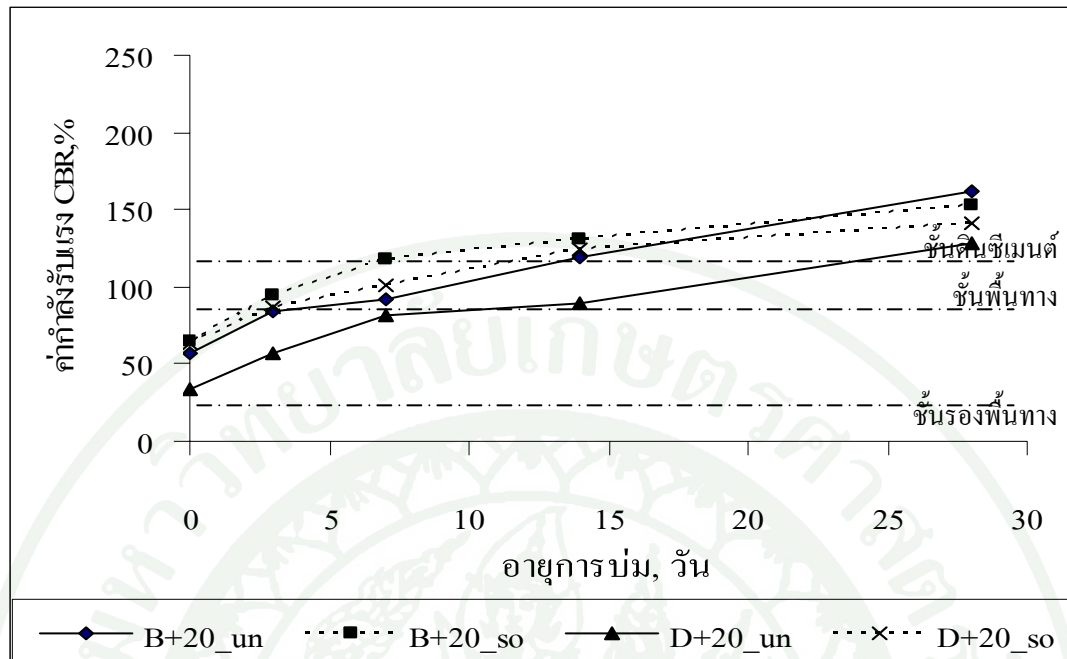
ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. กับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ



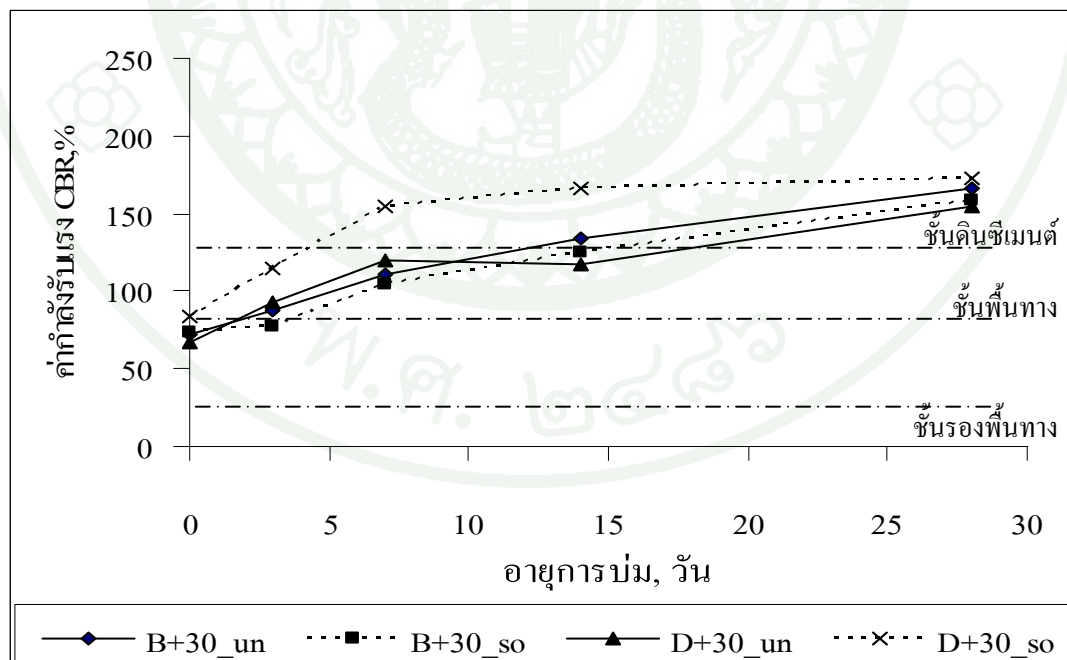
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ที่อายุการบ่มต่างๆ



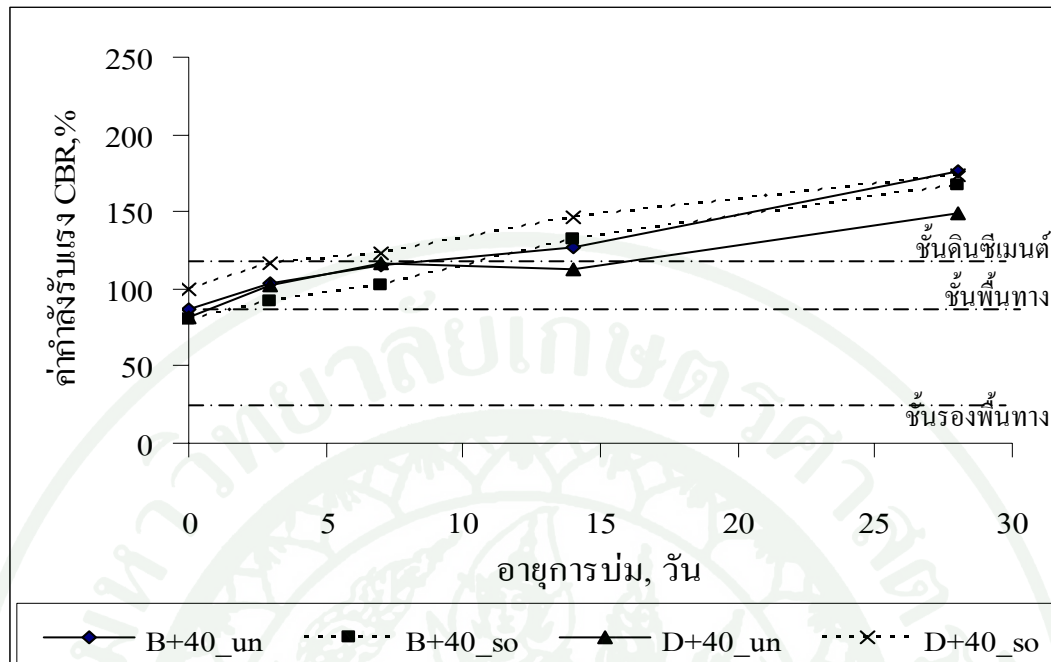
ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 10% ทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ



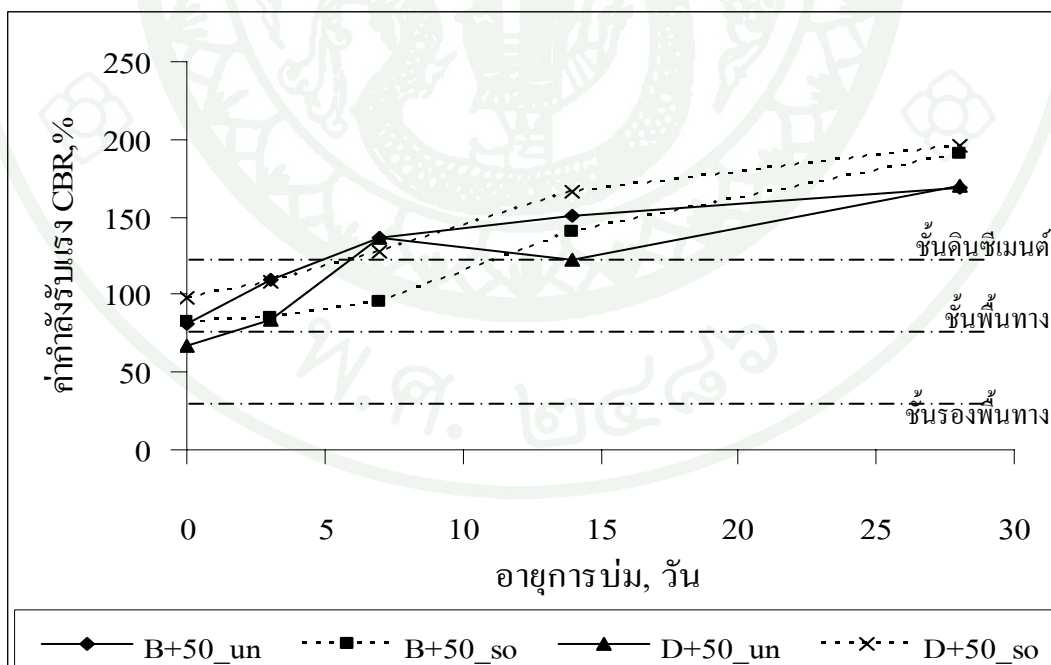
ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 20% ทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 30% ของทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 40% ของทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked - Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรด B และ D โดยผสมสารผสมเพิ่ม 50% ของทั้งสองเกรด (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่อายุการบ่มต่างๆ

จากการทดสอบพบว่า คุณสมบัติด้านกำลังที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่ม (เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์ทุกอัตราส่วนผสม) ทำให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผสมเพิ่มรวมไปถึงอายุการบ่มทำให้ค่ากำลังมีค่าสูงขึ้น

ปริมาณสารผสมเพิ่ม (เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์ทุกอัตราส่วนผสม) มีผลต่อค่า Unsoaked และ Soaked CBR เนื่องจากค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณสารผสมเพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังภาพที่ 35-42 เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่มที่ 10, 20, 30, 40 และ 50% ของน้ำหนักดินแห้ง ทำทดสอบทันทีหลังการบดอัดและอายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า กำลังของดินลูกรังเมื่อได้ทำการปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วนดังกล่าว จะมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 41, 58, 72, 87 และ 81% ตามลำดับเมื่อทดสอบทันทีหลังการบดอัด ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.3, 1.9, 2.4, 2.8 และ 2.7 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Unsoaked CBR ของดินลูกรังที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยสารผสมเพิ่ม ซึ่งมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 30% เห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการผสมสารผสมเพิ่มลงในดินลูกรัง พบว่า จะให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR สูงกว่าดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกอัตราส่วนผสม

เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังเกรด D โดยผสมผสมสารผสมเพิ่มที่ 10, 20, 30, 40 และ 50% ของน้ำหนักดินแห้ง ทดสอบทันทีหลังการบดอัดและอายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า กำลังของดินลูกรังเมื่อได้ทำการปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน 10, 20, 30, 40 และ 50% ของน้ำหนักดินแห้งจะมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 27, 34, 67, 82 และ 61% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.8, 2.3, 4.5, 5.5 และ 4.5 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Unsoaked CBR ของดินลูกรังที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยสารผสมเพิ่ม ซึ่งมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 15% ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณการผสมสารผสมเพิ่มลงในดินลูกรัง พบว่าให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR สูงกว่าดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกอัตราส่วนผสมเช่นเดียวกับดินลูกรังเกรด B โดยค่า Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR กับปริมาณสารผสมเพิ่มที่ทดสอบทันทีหลังการบดอัดของดินลูกรังเกรด B และ D สรุปไว้ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 28 ค่า Unsoaked CBR. และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณสารผสม
เพิ่มของดินลูกรังเกรด B และ D

กลุ่มดิน (Grade)		ปริมาณสารผสมเพิ่ม (%)					
		0	10	20	30	40	50
Grade B	Unsoaked CBR (%)	30	41	58	72	87	81
	อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.0	1.3	1.9	2.4	2.8	2.7
Grade D	Unsoaked CBR (%)	15	27	34	67	82	67
	อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.0	1.8	2.3	4.5	5.5	4.5

ในส่วนของการบ่มซึ่งมีผลต่อค่า CBR เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 39 และ 43 พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยอายุการบ่มจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง โดยทุกปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ผสมดินลูกรังมีแนวโน้มการพัฒนาค่า CBR ไปในแบบเดียวกัน เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า Unsoaked CBR มีค่าเท่ากับ 68, 84 115 และ 157% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.7, 2.0, 2.8 และ 3.8 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Unsoaked CBR ของดินลูกรังเกรด B ผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% ของน้ำหนักดินแห้งหลังบดอัดซึ่งมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 41% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า CBR มีการพัฒนาสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น

เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังเกรด D ผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า Unsoaked CBR มีค่าเท่ากับ 36, 49, 72 และ 124% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.3, 1.8, 2.7 และ 4.6 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Unsoaked CBR ของดินลูกรังเกรด D ผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% ของน้ำหนักดินแห้งหลังบดอัดซึ่งมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 27% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า CBR มีการพัฒนาสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับดินลูกรังเกรด B โดยค่า Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่มที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 10% ของน้ำหนักดินแห้งสรุปไว้ดังตารางที่ 29

ตารางที่ 29 ค่า Unsoaked CBR, และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR, กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม 10% ของน้ำหนักดินแห้ง

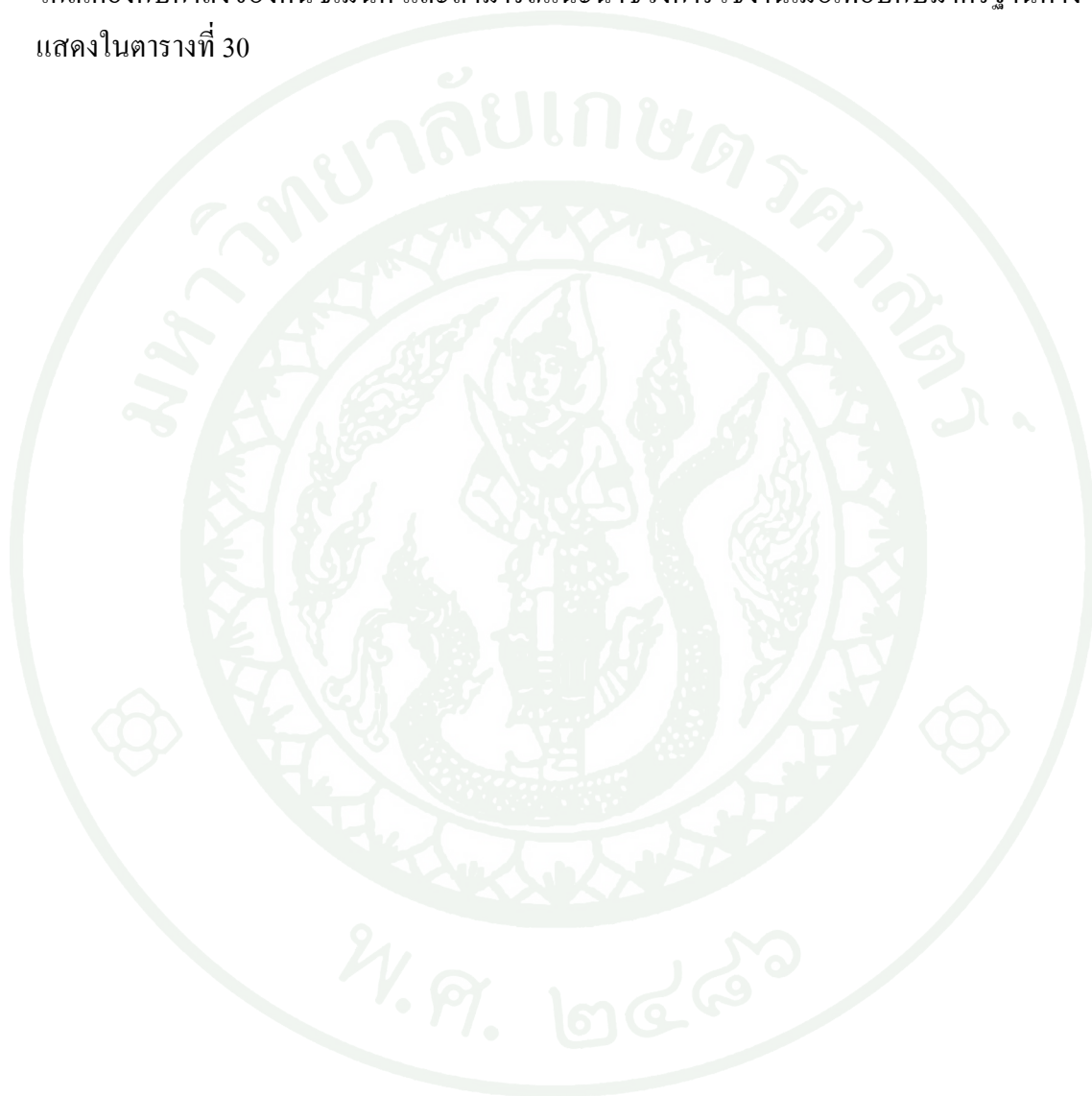
กลุ่มดิน (Grade)		อายุการบ่ม (วัน)				
		หลังบดอัด	3	7	14	28
Grade B	Unsoaked CBR (%)	41	68	84	115	157
	อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.0	1.7	2.0	2.8	3.8
Grade D	Unsoaked CBR (%)	27	36	49	72	124
	อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.0	1.3	1.8	2.7	4.6

การพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก เมื่อผสมปริมาณสารผสมเพิ่มที่มากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration และ Flocculation ก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และสร้างรูปร่างโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกันตามขนาดผลของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ถูกทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกันส่งผลให้กำลังของดินลูกรังเพิ่มขึ้นในทันทีที่มีการผสม

ในส่วนการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มนั้นเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยา Cementation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้กำลังของดินมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นเบส (ด่าง) จะละลายพวก Silicate และ Aluminate ในดินและเถ้าก้นเตา ผสานกับเศษปูนขาวซึ่งเป็นวัสดุปอชโซลานที่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน เป็นสาเหตุทำให้กำลังของดินที่ทำการปรับปรุงคุณภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม

จากผลการทดสอบค่า CBR พบว่าค่ากำลังแบบ Soaked CBR ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าการทดสอบแบบ Unsoaked CBR. เนื่องมาจากปริมาณสารผสมเพิ่ม (เถ้าก้นเตาและเศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์) มีการทำปฏิกิริยา Hydration, Flocculation และ Cementation แต่ในการศึกษาวิธีการบ่มตัวอย่างอาจทำให้น้ำระเหยออกไปบ้าง และเนื่องจากสารผสมเพิ่มมีการเชื่อมประสานคล้ายกันกับที่เกิดในปูนซีเมนต์จึงทำให้มีความต้องการความชื้นมากขึ้นเพื่อรักษาการเกิดปฏิกิริยาให้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเมื่อนำตัวอย่างไปแช่น้ำ (Soaked) ก็จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้เกิดสารเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคมากขึ้นมีการยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่แข็งแรงทำให้มีค่า CBR (Soaked) เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารผสมเพิ่มด้วย

จากการทดสอบและสมมติฐานข้างต้นเห็นได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดจากการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังคือปฏิกิริยา Cementation เป็นหลัก ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าดินลูกรังที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ จัดเป็นวัสดุคล้ายดินซีเมนต์ โดยต้องอาศัยปริมาณสารผสมเพิ่มและอายุการบ่มจึงจะมีคุณสมบัติด้านกำลังใกล้เคียงกับกำลังของดินซีเมนต์ และสามารถแนะนำช่วงการใช้งานเมื่อเทียบกับมาตรฐานต่างๆ แสดงในตารางที่ 30



ตารางที่ 30 ลักษณะการใช้งานของดินลูกรังที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารผสมเพิ่มต่างๆ

กลุ่มดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ										ลักษณะการใช้งาน		
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	อายุการบ่ม (วัน)					วิธีการทดสอบ		กรมทางหลวง		บ.ปูนซีเมนต์ไทย	
		0	3	7	14	28	Un	So	ชั้นรองพื้นทาง 25%	ชั้นพื้นทาง 80%	ชั้นดินซีเมนต์ 120%	
									สัญลักษณ์ ●	สัญลักษณ์ Δ	สัญลักษณ์ □	
B	0	●	●	●	●	●	u	—	●	—	—	
B	10	●	●	Δ	Δ	□	u	—	●	Δ	□	
B	20	●	Δ	Δ	Δ	□	u	—	●	Δ	□	
B	30	●	Δ	Δ	□	□	u	—	●	Δ	□	
B	40	Δ	Δ	Δ	□	□	u	—	สามารถใช้งานได้	Δ	□	
B	50	Δ	Δ	□	□	□	u	—	สามารถใช้งานได้	Δ	□	
D	0	—	—	●	●	●	u	—	●	—	—	
D	10	●	●	●	●	□	u	—	●	Δ	□	
D	20	●	●	●	Δ	□	u	—	●	Δ	□	
D	30	●	Δ	Δ	Δ	□	u	—	●	Δ	□	
D	40	Δ	Δ	Δ	Δ	□	u	—	สามารถใช้งานได้	Δ	□	
D	50	●	Δ	□	□	□	u	—	●	Δ	□	

ตารางที่ 30 (ต่อ)

กลุ่มดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ						ลักษณะการใช้งาน					
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	อายุการบ่ม (วัน)					วิธีการทดสอบ		กรมทางหลวง		บ.ปูนซีเมนต์ไทย
		0	3	7	14	28	Un	So	ชั้นรองพื้นทาง 25%	ชั้นพื้นทาง 80%	ชั้นดินซีเมนต์ 120%
									สัญลักษณ์ ●	สัญลักษณ์ Δ	สัญลักษณ์ □
B	0	—	●	●	●	●	—	s	●	—	—
B	10	●	Δ	Δ	□	□	—	s	●	Δ	□
B	20	●	Δ	Δ	□	□	—	s	●	Δ	□
B	30	●	●	Δ	□	□	—	s	●	Δ	□
B	40	Δ	Δ	Δ	□	□	—	s	สามารถใช้งานได้	Δ	□
B	50	Δ	Δ	Δ	□	□	—	s	สามารถใช้งานได้	Δ	□
D	0	—	—	●	●	●	—	s	●	—	—
D	10	●	Δ	Δ	□	□	—	s	●	Δ	□
D	20	●	Δ	Δ	□	□	—	s	●	Δ	□
D	30	Δ	Δ	□	□	□	—	s	สามารถใช้งานได้	Δ	□
D	40	Δ	Δ	□	□	□	—	s	สามารถใช้งานได้	Δ	□
D	50	Δ	Δ	□	□	□	—	s	สามารถใช้งานได้	Δ	□

การพิจารณานำผลการทดสอบไปใช้ในงานถนน

การพิจารณาเพื่อนำดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มใช้เป็นชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางของถนน ในครั้งนี้ เห็นได้ว่าเมื่อดินลูกรังเกรด B และ D เมื่อได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วสามารถมาใช้เป็นชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางทั้งหมดทุกอัตราส่วนผสม อาจรวมไปถึงชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ด้วย ดังนั้นเพื่อให้สามารถเลือกใช้งานได้สะดวกขึ้นผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1. พิจารณาจากความสามารถในการรับน้ำหนักของดินลูกรังโดยใช้ค่า Soaked CBR เป็นมาตรฐาน และ 2. พิจารณาจากราคาของวัสดุ เป็นมาตรฐาน

ค่า Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม ทดสอบทันทีหลังการบดอัดสามารถใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้ โดยข้อกำหนดสำหรับชั้นรองพื้นทางจะต้องมีค่า Soaked CBR มากกว่า 60% และชั้นพื้นทางจะต้องมีค่ามากกว่า 80% โดยปริมาณสารผสมเพิ่ม (อัตราส่วนแถ้ากั้นเตา 9% และเศษปูนขาว 1%) ที่เหมาะสมสำหรับชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางเท่ากับ 20% โดยน้ำหนักดินแห้ง เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบพบว่า ค่า Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D สำหรับชั้นรองพื้นทางมีค่าประมาณ 65% และ 74% ในส่วนของชั้นพื้นทางนั้นดินลูกรังเกรด B และ D สามารถใช้ปริมาณสารผสมเพิ่มเช่นเดียวกับชั้นรองพื้นทาง แต่ต้องอาศัยการบ่มตัวอย่างเพื่อเพิ่มค่า Soaked CBR โดยมีค่าประมาณ 94% และ 87% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาทางด้านราคาโดยไม่คำนึงถึงค่าขนส่ง รวมถึงแถ้ากั้นเตาและเศษปูนขาว เนื่องจากแถ้ากั้นเตาและเศษปูนขาว เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและต้องการจัดให้ได้มากที่สุดจึงเป็นสาเหตุหลักที่ไม่คิดราคาวัสดุ โดยราคาของดินลูกรัง น้ำประปาและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด โดยพิจารณาถึงกำลังรับน้ำหนักของดินและราคาที่ต่ำสุด พบว่าชั้นพื้นทางสำหรับลูกรัง ปริมาณสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมจะมีเพียงปริมาณเดียว คือ 50% ของน้ำหนักดินแห้ง หรือประมาณ 500 กิโลกรัมต่อดินหนึ่งลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะมีราคาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเท่ากับ 488 บาทต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร และค่า Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D (ทดสอบทันทีหลังการบดอัด) ประมาณ 82% และ 98% ตามลำดับ

ตารางที่ 31 การพิจารณาด้านราคาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง

ปริมาณดิน (ลูกบาศก์เมตร)	ปริมาณสารผสม %	ราคาดิน (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)	น้ำประปา 80 ลิตรต่อดิน 1 ลูกบาศก์เมตร (บาท)	NaOH (บาท) น้ำ 80 ลิตร ใช้ NaOH 16 kg	ราคารวม ต่อลูกบาศก์เมตร (บาท)
1.0	0	80	0.816	368	448.82
0.9	10	72	0.816	368	440.82
0.8	20	64	0.816	368	432.82
0.7	30	56	0.816	368	424.82
0.6	40	48	0.816	368	416.82
0.5	50	40	0.816	368	408.82

หมายเหตุ

1. ราคาน้ำประปาต่อลิตร 1.020 สตางค์ต่อลิตร (การประปาส่วนภูมิภาค)
2. ราคา NaOH ชนิดเกล็ดกิโลกรัมละ 23 บาท (บริษัท ไทยเพียวชาयซ์ จำกัด)
3. ราคาข้างต้นไม่รวมค่าขนส่ง

คุณสมบัติทางด้านการซึมน้ำ

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม โดยพิจารณาสารผสมเพิ่มออกเป็น 2 ช่วงกำลังคือ 1. พิจารณาอัตราส่วนผสมของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังมากที่สุด (ค่ากำลังของสารผสมเพิ่มมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน 3:7) และ 2. พิจารณาอัตราส่วนผสมของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังน้อยที่สุด (ค่ากำลังของสารผสมเพิ่มมีค่าน้อยสุดที่อัตราส่วน 9:1) โดยทดสอบทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน ด้วยวิธี Constant Head โดยใช้ความดันเข้าช่วย

อิทธิพลของปริมาณสารผสมเพิ่ม แสดงไว้ในตารางที่ 32-33 และภาพที่ 52-55 พบว่าเมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มลดลง (เทียบน้ำ) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 30% ประมาณ 77 เท่าและดินลูกรังเกรด D จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 50% ประมาณ 33 เท่าของดินลูกรังที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพทั้ง 2 เกรด สมมติฐานของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังที่ลดลงอาจเป็นเพราะสารผสมเพิ่มที่นำมาปรับปรุงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำต่ำลงจากเศษปูนขาวที่เข้าไปทำปฏิกิริยาและปิดกั้นทางเดินของน้ำ ถึงแม้เถ้าเอนจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำสูงก็ตาม เป็นผลให้ปริมาณสารผสมเพิ่มที่นำมาผสมกับดินลูกรังแล้วทำการบดอัดจะทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงไปพร้อมกับการเชื่อมประสานเพื่ออุดช่องว่างในมวลดิน

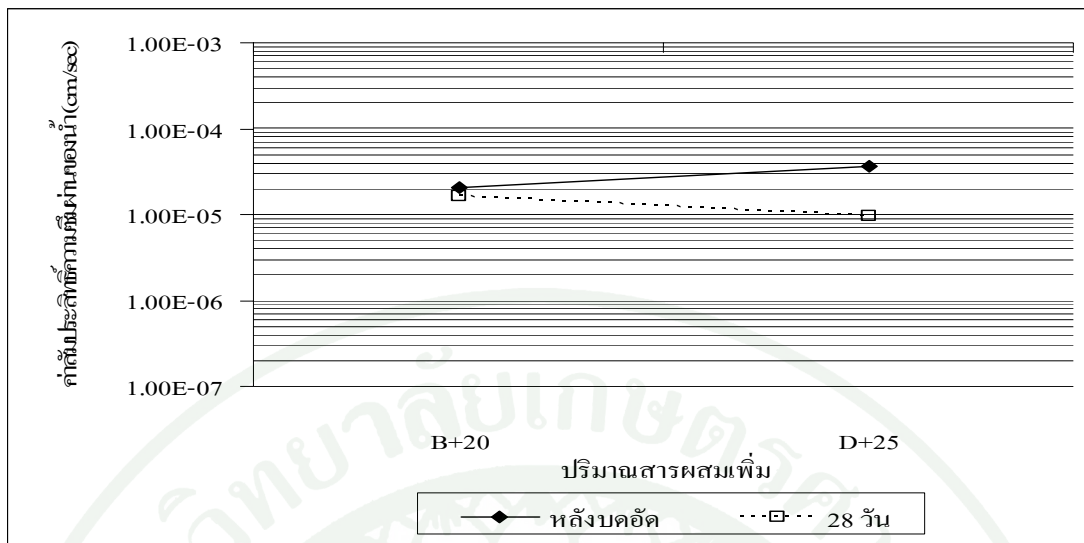
เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ผสมสารผสมเพิ่มปริมาณต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มต่ำลง (เทียบน้ำ) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B จะมีค่าลดลงต่ำสุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 30% ประมาณ 32 เท่า และดินลูกรังเกรด D จะมีค่าลดลงต่ำสุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 50% ประมาณ 18 เท่า สมมติฐานของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังที่ลดลงนี้อาจเป็นเพราะสารผสมเพิ่มที่นำมาปรับปรุงมีขนาดเล็กและเป็นผงเมื่อนำมาผสมกับดินลูกรังแล้วทำการบดอัดจะทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ดินลูกรังมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำต่ำลง

ตารางที่ 32 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (อัตราส่วน สารผสมเพิ่ม 3:7) ที่ปริมาณสารผสม 20% และ 25% ตามลำดับ

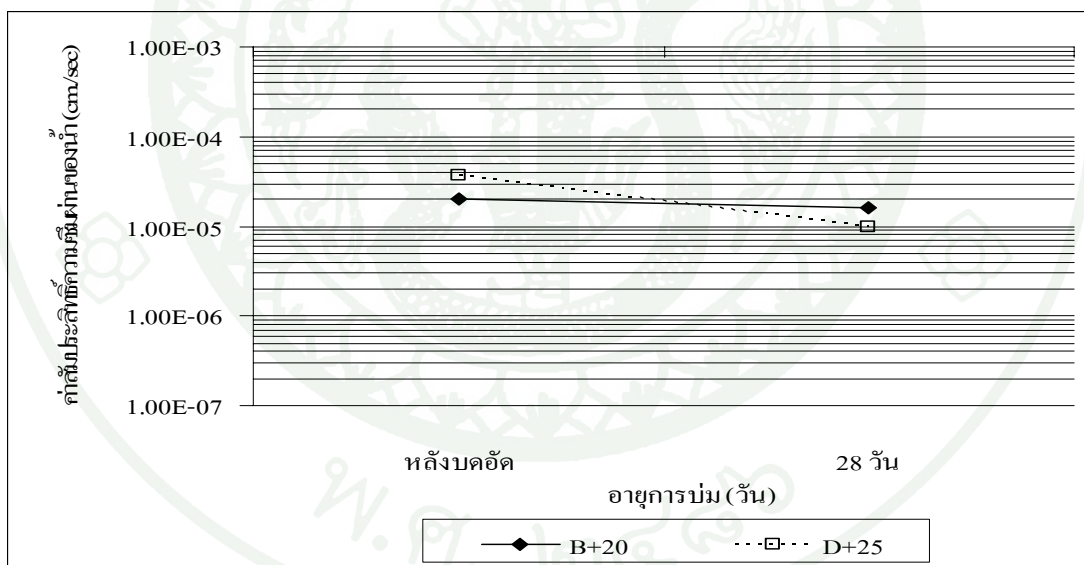
Coefficient of Permeability (cm./sec.)			
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ	
		หลังบดอัด	28 วัน
B	20	2.02E-05	1.62E-05
D	25	3.68E-05	9.68E-06

ตารางที่ 33 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่ม (สารผสม เพิ่มอัตราส่วน 9:1) ที่ปริมาณต่างๆ

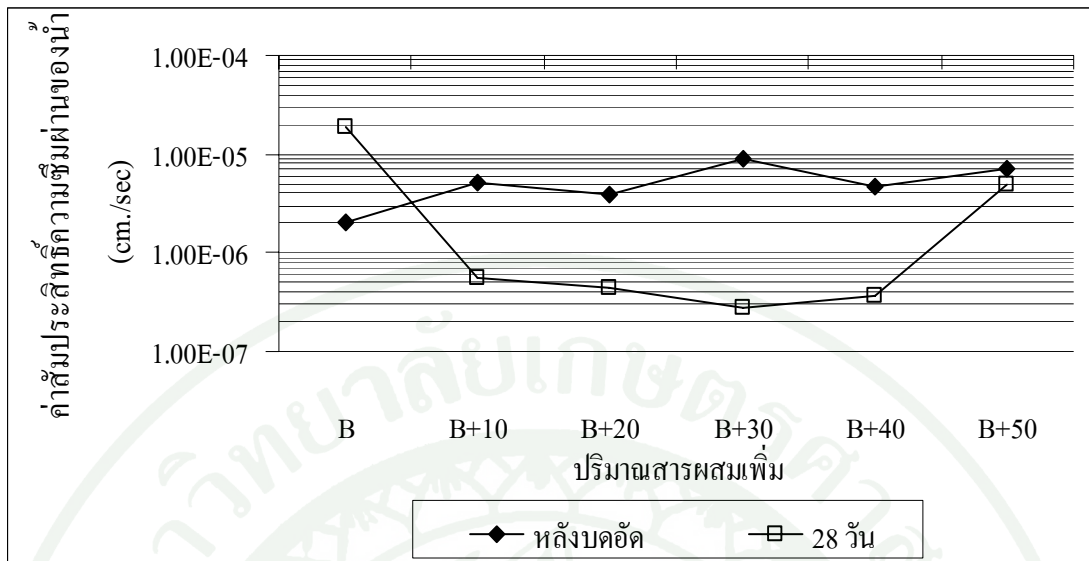
Coefficient of Permeability (cm./sec.)			
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณสารผสมเพิ่ม %	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ	
		หลังบดอัด	28 วัน
B	0	2.01E-06	1.87E-05
	10	5.21E-06	5.67E-07
	20	3.82E-06	4.37E-07
	30	8.86E-06	2.75E-07
	40	4.62E-06	3.60E-07
	50	7.07E-06	4.99E-06
D	0	7.96E-06	2.23E-05
	10	7.24E-07	6.69E-07
	20	5.07E-06	1.76E-06
	30	1.10E-05	6.75E-07
	40	1.46E-06	4.65E-07
	50	1.19E-05	6.50E-07



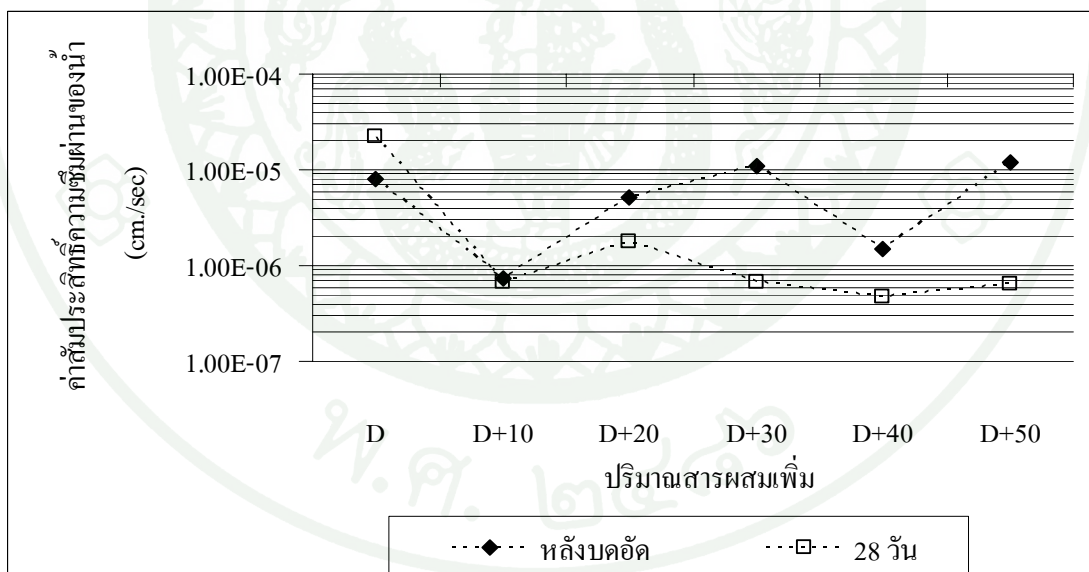
ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดน้ำกับปริมาณสารผสมของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมสารผสมเพิ่มที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดน้ำกับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 20 และ 25% ตามลำดับ



ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด B ที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณสารผสมเพิ่ม (สารผสมเพิ่มอัตราส่วน 9:1) ของดินลูกรังเกรด D ที่อายุการบ่มต่างๆ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ลักษณะเมื่อดินลูกรังส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลอ่อน มีรูปร่างค่อนข้างกลมมน ประกอบด้วยปริมาณของทราย (Sand) และ กรวด (Gravel) เป็นหลัก ประมาณ 83.78% ที่เหลือเป็นตะกอนทราย (Silt) กับดินเหนียว (Clay) มีการกระจายขนาดของเม็ดดินค่อนข้างไม่ดี (Poorly Grade Soil) เนื่องจากเป็นดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Gap Grade) การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในกลุ่ม SC ซึ่งมีลักษณะเป็นทรายมีตะกอนทรายหรือดินเหนียวปน ขนาดค่อนข้างไม่ดีผสมกันและตามระบบ AASHTO อยู่ในกลุ่ม A-2-4 (0) โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลต่างๆ สรุปว่าตัวอย่างดินลูกรังมีคุณสมบัติไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางและชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

2. แก้วกันเตาปิโตรลีนที่นำมาใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด มีลักษณะคล้ายกับทราย มีสีเทาถึงดำ หรือสีน้ำตาล อนุภาคของแก้วกันเตานั้นมีขนาดแตกต่างกัน และฟุ้งกระจายได้ง่ายจากตัวอย่างภาพถ่ายแก้วกันเตาจากการใช้เครื่อง scanning electron microscope ตรวจสอบที่กำลังขยายแตกต่างกัน จะพบว่าอนุภาคของแก้วกันเตานั้นมีขนาดที่แตกต่างและรูปร่างที่ต่างกันไปโดยจะมีลักษณะพื้นผิวทั้งที่เรียบและที่เป็นเป็นแบบขรุขระและมีลักษณะความเป็นเหลี่ยมคม มีการกระจายขนาดของเม็ดดินค่อนข้างดี (Well Grade Soil) การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification และ AASHTO พบว่าตัวอย่างแก้วกันเตาอยู่ในกลุ่ม SP และ A-3

3. เศษปูนขาว นำมาใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นละเอียดค่อนข้างสม่ำเสมอ มีเทาหรือขาวขุ่น มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานตามธรรมชาติ เนื่องจากประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะเป็นผงร่วนไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำในปริมาณที่เหมาะสมและอายุการบ่มมากขึ้นจะแข็งตัวได้

4. ดินลูกรังเกรด B และ D มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ประมาณ 2.15 และ 2.10 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ในส่วนของปริมาณความชื้นเหมาะสมพบว่าดินลูกรังเกรด B และ D มีปริมาณความชื้นเหมาะสม ประมาณ 7.20 และ 8.40% ตามลำดับ, ค่า Unsoaked และ Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B มีค่าสูงกว่าดินลูกรังเกรด D และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินลูกรัง

เกรด B มีค่าต่ำกว่าดินลูกรังเกรดผสม D อยู่ประมาณ 3.96 และ 31.97 เท่าที่ทดสอบหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

5. เมื่อสารผสมเพิ่มซึ่งมีเถ้ากั้นเตาเป็นสารผสมเพิ่มหลักและเพิ่มปริมาณของเศษปูนขาวมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้น และมีกำลังสูงขึ้นตามปริมาณเศษปูนขาว โดยสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังได้เป็นอย่างดี และได้พิจารณาสารผสมเพิ่มออกเป็น 2 ช่วงกำลังคือ 1. พิจารณาอัตราส่วนผสมของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังมากที่สุด (ค่ากำลังของสารผสมเพิ่มมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน 3:7) และ 2. พิจารณาอัตราส่วนผสมของสารผสมเพิ่มที่ให้กำลังน้อยที่สุด (ค่ากำลังของสารผสมเพิ่มมีค่าน้อยสุดที่อัตราส่วน 9:1)

6. เมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มที่ผสมลงในดินลูกรังเกรด B และ D จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ดินลูกรังมีค่าความเหนียวลดลงโดยประมาณ 4-6% ต่อมาพิจารณาถึงอิทธิพลของอายุการบ่มของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มโดยเปรียบเทียบค่า Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index พบว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้ดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นหรือคงที่โดยประมาณ 1-2% แต่ค่าที่เพิ่มขึ้นนี้ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

7. เมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มสูงขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มลดลงและปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

8. ค่า Unsoaked และ Soaked CBR ของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้ง 2 อัตราส่วนคืออัตราส่วน 3:7 (เถ้ากั้นเตา 3% ต่อเศษปูนขาว 7%) และ 9:1 (เถ้ากั้นเตา 9% ต่อเศษปูนขาว 1%) เมื่อทำการปรับปรุง เนื่องจากปริมาณสารผสมเพิ่มและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น มีต่อค่า CBR ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการบ่มภายหลังการบดอัดนั้นค่า CBR จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยทุกปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ผสมดินลูกรังมีแนวโน้มการพัฒนาค่า CBR ไปในแบบเดียวกัน

9. เมื่อปริมาณสารผสมเพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มลดลง (ตื้นน้ำ) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 30% ประมาณ 77 เท่าและดินลูกรังเกรด D จะมีค่าลดลงมากที่สุดที่

ปริมาณสารผสมเพิ่ม 50% ประมาณ 33 เท่าและเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มต่ำลง (ที่บ้น้ำ) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B จะมีค่าลดลงต่ำสุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 30% ประมาณ 32 เท่า และดินลูกรังเกรด D จะมีค่าลดลงต่ำสุดที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 50% ประมาณ 18 เท่า

10. การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้เสนอแนวทางในการนำสารผสมเพิ่มมาใช้ประโยชน์ด้านงานทางโดยใช้เป็นวัสดุงานชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยพิจารณาจากค่า Soaked CBR ซึ่งดินลูกรังที่ได้รับการปรับปรุงด้วยสารผสมเพิ่ม (อัตราส่วนเล็กน้อย 9% และเศษปูนขาว 1%) พบว่า สารผสมเพิ่มที่ผสมกับดินลูกรังเกรด B และ D ที่เหมาะสมสำหรับชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางเท่ากับ 20% โดยน้ำหนักดินแห้ง มีค่าประมาณ 65% และ 74% ในส่วนของชั้นพื้นทางนั้นดินลูกรังเกรด B และ D สามารถใช้ปริมาณสารผสมเพิ่มเช่นเดียวกับชั้นรองพื้นทาง แต่ต้องอาศัยการบ่มตัวอย่างเพื่อเพิ่มค่า Soaked CBR โดยมีค่าประมาณ 94% และ 87% ตามลำดับและเมื่อพิจารณาทางด้านราคาโดยไม่คำนึงถึงค่าขนส่ง พบว่าชั้นพื้นทางสำหรับลูกรัง ปริมาณสารผสมเพิ่มที่เหมาะสมจะมีเพียงปริมาณเดียว คือ 50% ของน้ำหนักดินแห้ง หรือประมาณ 500 กิโลกรัมต่อดินหนึ่งลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะมีราคาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเท่ากับ 408.82 บาทต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรซึ่งเป็นราคาที่ต่ำที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยสารผสมข้างต้น และค่า Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่ทำการปรับปรุงคุณภาพ (ทดสอบทันทีหลังการบดอัด) ประมาณ 82% และ 98% ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาถึงคุณสมบัติด้านกำลังของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มในครั้งนี้ใช้การทดสอบ CBR. เพียงอย่างเดียว ดังนั้นเพื่อให้ดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพเปรียบเทียบกับมาตรฐานเดียวกับดินซีเมนต์จึงควรทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น Unconfined Compressive Strength, Shrinkage Factors และ Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ และสารผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มเพื่อใช้ในการอธิบายโครงสร้างและขั้นตอนการพัฒนาของกำลังของดินที่ได้รับการปรับปรุง อันประกอบด้วย การศึกษา Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อศึกษาในด้าน Physico-Chemical ต่อไป
3. ควรทำแปลงทดสอบดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มในสนาม เพื่อที่จะได้ทราบพฤติกรรมที่แท้จริงในการนำไปใช้ประโยชน์และเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติที่ได้จากในสนามและในห้องปฏิบัติการ
4. ควรการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิการบ่มและความล่าช้าของการบดอัดต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ของดินลูกรังผสมสารผสมเพิ่มในการเติมลงในดินลูกรังเพื่อใช้ในการบดอัดในขณะที่การทำงานจริงในสนามไม่สามารถที่จะควบคุมปริมาณความชื้นและเวลาการทำงานให้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาสั้นได้ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจึงควรศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณความชื้นและความล่าช้าในการบดอัดอย่างละเอียดชัดเจนมากขึ้น
5. การศึกษาในครั้งนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ซึ่งควรทำการศึกษาเพิ่มเติมทางด้านผลภาวะที่จะเกิดต่อสิ่งแวดล้อมและการนำไปใช้ สารละลายชนิดนี้เกิดอันตรายได้เมื่อสัมผัสผิวหนัง
6. การศึกษาในครั้งนี้ใช้ปริมาณเศษปูนขาวมากที่สุดเพียง 7% ซึ่งควรมีการศึกษาปริมาณเศษปูนขาวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยามากที่สุดในสารผสมเพิ่ม ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

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

กรวิศว์ พรหมชาติ, กฤตวิทย์ สรรพคุณ และ อัฒพล เจริญชัยสกุล. 2546. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมลูกรัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เกษม เพชรเกตุ, พินิต ตั้งบุญเดิม และ วิชัย สังวรปทานสกุล. 2531. การปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยใช้ปูนขาว. วิศวกรรมสาร (4): 69-71.

จุฑาทิพย์ เขียวแจ่ม. 2552. การปรับปรุงคุณภาพของหินคลุกและทรายโดยใช้เถ้าก้นเตา วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

จุฑามาศ บัวขาว และ บุญมา นาคอุดม. 2547. การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังและดินเหนียวด้วยโฟมและซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ชนิดาวรรณ อ่ำเอี่ยม และ ชีรเชษฐ์ ศรีวัชพงษ์. 2530. การปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธนัช ชยางกูร ณ อยุธยา. 2544. ผลของการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินที่มีต่อ สมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังบดอัด. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธาดา ดวงแก้ว และ เสวต ช่วยสถิตย์. 2548. การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยฝุ่นตะกอนเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

นิรชร นกแก้ว. 2539. การศึกษาการใช้เถ้าหนักในต้นแทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญเทพ นานะกรังสรรค์. 2539. การปรับปรุงคุณภาพดิน, **Foundation Engineering and Tunneling**. รุ่งแสงการพิมพ์, เชียงใหม่

พลาการ พิรภาคย์. 2542. การปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังโดยวิธีผสมเถ้าลอยลิกไนต์. การศึกษาพิเศษประกาศนียบัตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พานิช วุฒิพฤกษ์, นรินทร์ ศรีดอกไม้, มนตรี ฝ่ายอุปการะ, จตุรงค์ เสาวภาคไพบุลย์. 2547. การศึกษาผลกระทบของปูนขาว ปูนซีเมนต์ซีลิก้า และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อความสามารถในการซึมน้ำของดินก้ำแพงแสน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2547 (2): 37-45.

มนตรี น้ำทิพย์, สมพล ศรีวงษา และ ณัฐพล พาหมวด. 2543. การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าถ่านหินบิทูมินัส. ปรินญาณิพนธ์ปริญญาตรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

วรศักดิ์ ต้นดิวนิช และ สมหวัง ช่างสุวรรณ. 2538. ธรณีวิทยาแหล่งดินลูกรังบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รายงานฉบับที่ วว. 134 กองวิเคราะห์และวิจัยกรมทางหลวง.

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

วิเศษ แจ่มจิตร. 2552. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วุฒิชัย วัชรวิเชียรติ. 2526. การศึกษาคุณสมบัติและความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินลูกรังในประเทศไทย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า, กรุงเทพฯ.

- สมพร ฤดีวิโรจน์. 2548. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สิทธิชัย พราหมเพ็ชร. 2546. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ศราวุธ โกวเครือ. 2551. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ศิริศักดิ์ จินดาผล. 2550. การปรับปรุงคุณภาพของดินในสภาพแช่น้ำด้วยการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว สำหรับการก่อสร้างคันดินทางรถไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อนิรุทธิ์ ธงไชย และ สุเทพ นิ่มนวล. 2530. การใช้ประโยชน์เถ้าลอยในการเป็นวัสดุสร้างทางหลวง. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2551. การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุอิโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 31 (2 เมษายน-มิถุนายน): 371-381.
- Alexander, L.T. and G. Cady. 1962. Genesis and Hardening of Laterite Soils. **U.S.Dept Agri. Tech. Bull.** No. 1282: 56.
- Baldovin, G. 1969. The shear strength of lateritic soils. **Proc. Spec. Session Eng. Properties Lateritic Soils** 1: 129-142
- Broms, B.B. 1984. **Stabilization of soft clay with lime column**, p. 104. Cite by D.T. Bergado, J.C. Chai, M.C. Alfrado and A.S. Balasubramaniam. Improvement Technique of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

- Broms, B.B. 1986. **Stabilization of Soil with Lime Columns**. Department of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Buchanan, F. 1807. **A journey from Madras thorough the countries of Mysore, Canara and Malabor**. 2nd ed., East Indian Company, London.
- Bumjoo, K. and P. Monica. 2006. **Compaction characteristics and corrosivity of Indiana class-F fly and bottom ash mixtures**. Waste Management
- Chandler et al., 1997, **Municipal Solid Waste Incinerator Residues**. **Studies in Environmental Science 67**, The International Ash Working Group (IAWG), Elsevier (1997)
- Croft J.B.. **“The Progresses Involved in The Lime Stabilization of Soils”** Proceeding of Australian Road Research Board.Vol.2, 1964, 1169-1204.
- Davidovits, J. 1999. Chemistry of Geopolymer system. **Terminology in Geopolymer 99 Internationnal Conference**. France.
- Department of Highways and Siam Cement Company Ltd. n.d. **Demonstration Road Using Local Soil With Cement Stabilization**. Bangkok, n.p.
- Diamond, S. and E.B. Kinter. 1945. **A Rapid Method of Prediction The Portland Cement Requirement for Stabilization of Plastic Soil**. Highway Research Board Bull. 198, Nation Research Council, D.C., U.S.A.
- Fermor, L.L. 1911. What is laterite?. **Geol.Mag.** 5 (8): 453-566.
- Flaherty, C.A.O., Manuel and D.T. Davidson. 1962. **Highway Research Board Bulletin 353**. 16 p.

- Hausmann, M.R. 1990. **Engineering Principles of Ground Modification**. McGraw-Hill Publ. Co. Sydney.
- Mitchell, J.K. 1982. Soil Improvement-State-of-The-Art. **Report. Proc. X ICSMFE. Rotterdam.** Vol. 4 (1982): 533-537.
- Hilt, G.H. and D.T. Davidson. 1960. **Lime Fixation in Clay Soils**. Highway Research Record Bull. 266, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C., U.S.A.
- Holland, T.H. 1930. The constitution, origin and dehydration of laterite. **Goel. Mag.** 14(10): 59-69.
- Hongsnoi, M. 1969. **Effect of method of preparation on the compaction and strength characteristic of lateritic soils**. Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Lacroix, A. 1913. **Les Laterites de la guinea et les products d' alte'ration qui leur sont associe's**, pp. 255-356. In M.D. Gidigas. Laterite soil engineering. Elsevier Sci. Pub. Co., New York.
- Laguros, J.G., D.T. Davidson and R.L. Handy. 1961. Evalution of Lime stabilization of loess, pp. 30-42 in **D.T. Davidson and Associates. Soil Stabilization with Lime. Bulletin No. 195**, Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State University, Ames, Iowa, USA.
- Lambe, T.W. 1958. The engineering behavior of compacted clays. **J. Soil Mech. Found. Divis. Asce.** 84 : 56-67.

Lu, L. W., D.T. Davidson, R.L. Handy and J.G. Laguros. 1957. **The Calcium - Magnesium Ratio in Soil Lime Stabilization.** Highway Research Record Bull. 36, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C., U.S.A.

Mallet, F.R. 1883. Laterite and other manganese are occurring at Gosolpur. **Jabalpur district. Rec. Geol. Surv.** 16: 103-118.

Martin, F.J. and H.C. Doyne. 1927. Laterite and lateritic soil in Sierra. **Leone. J. Agri.Sci.** 17: 530-546.

Morrison, H.J. 1965. **Report on research and development program for laterite, lateritic soils and highway construction in the kingdom of Thailand.** J.E. Greiner, Baltimore.

Newill, D. 1959. An investigation into the relation for Ghanian soils between organic matter content content and the strength of soil cement. **Brit. Rd. Res. Lab. Note. No. 3572** 102 p.

Ng, S.C. 1966. **Cement Stabilisation of Lateritics Soils.** M.Eng. thesis, Asian Institute of Technology.

Okagbue, C.O. and J.A. Yakubu. 2000. Limestone ash wste as a substitute for lime in soil improvement for engineering construction. **Bull Eng Geol Env (2000)** 58: 107 -113.

Pendleton ,R.L. and S. Sharasuva. 1946. Analysis of some Siamese lateries. **Soil Sci.** 62(6): 423-440.

R.Forteza and Other. 2547. **Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerator for its use in road base.** Waste Management

Remillon, A. 1967. **Les recherches rontie' res enterprise en Afrique d' expression francaise.**
n.p.

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

Russel, L.C. 1889. Sub aerial decay of rock and origin of the red colour in certain formations.
U.S. Geol. Surv. Bull. No. 52: 65.

Treadwell, M.L. and D.T. Davidson. 1961. Development of Lime and Fly ash Soil Stabilizing
agent in Iowa. Mimeograph Report. Iowa State University, Iowa, U.S.A.

Vallerga, A.A. and N. R. ananand. 1969. **Stabilization of material by compaction.** Papers in
Geotech. Eng.

Wang J.W.H., M. Mateos and D.T. Davidson. 1963. Comparison Effects of Hydraulic, Cacitic
and Dolomitic Limes and Cement in Soil Stabilization, pp. 11-24. **In Annual meeting
of Highway Research Board 32. ed.** Highway Research Abstracts, Washington D.C..

Woo, S.M. 1971. Lime Stabilization of Selected Lateritic Soil. M.Eng. Thesis, SEATO Graduate
School of Engineering, Bangkok, Thailand.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวอุมพร ปฏิพันธุ์ภูมิสกุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 12 สิงหาคม 2527
สถานที่เกิด	อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	—
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	—
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	—
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	—