



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา

Improvement of Lateritic Soil by Bottom ash

นามผู้วิจัย นายวิเศษ แจ่มจิตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา

Improvement of Laterlitic Soil by Bottom ash

โดย

นายวิเศษ แจ่มจิตร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2552

พิเศษ แจ่งจิตร 2552: การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา ปรินญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng. 74 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง เพื่อพัฒนาคุณภาพของวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างทาง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาซึ่งได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน ปริมาณของเถ้าก้นเตา และอายุการบ่ม ซึ่งตัวอย่างของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบนี้ นำมาจากแหล่งดินในจังหวัดกาญจนบุรี โดยนำมาร่อนแยกและนำเม็ดดินแต่ละขนาดมาผสมกันให้ได้การกระจายขนาดตามที่กำหนดไว้ โดยแบ่งเป็นสองเกรดได้แก่ เกรดผสม B และเกรดผสม D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยเถ้าก้นเตาที่ใช้ในการทดสอบเป็นเถ้าก้นเตาบิหมินัสจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี โดยผสมกับดินในอัตราส่วน 5, 10, 15, 20% และ 10, 20, 25, 30% โดยน้ำหนักแห้งในดินลูกรังเกรดผสม B และ เกรดผสม D ตามลำดับ

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตามากขึ้น ค่า 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 ผสมเถ้าก้นเตาที่บ่มนานมากขึ้น แต่ในดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตามีค่าสูงขึ้น ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีค่าสูงขึ้นในช่วงตั้งแต่ 2-10 เท่าทั้งในดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D

สรุปได้ว่า เถ้าก้นเตามีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังเมื่อผสมในสัดส่วนที่เหมาะสม

Wiset Jangjit 2009: Improvement of Lateritic Soil by Bottom ash. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prateep Duangdeun, M.Eng. 74 pages.

The main object of this research is to evaluate the performance of lateritic soil improved by bottom ash for highway construction material. This research emphasizes on the effects of grain size distribution of the lateritic soil, the amount of the bottom ash and curing times on engineering properties of the improved lateritic soil. Two sets of lateritic soil specimens with different gradations, including B gradation and D gradation, were prepared by conforming to the Subbase Standard Specification of the Highway Department of Thailand. The bottom ash obtained from BLCP power plant was mixed with the lateritic soil at various proportions, including 5, 10, 15, and 20 percents of dry weight for B gradation lateritic soils, and 10, 20, 25, and 30 percents of dry unit weight for D gradation lateritic soil.

According to the research results, the plasticity index and maximum dry density of the improved lateritic soils with B and D gradation tend to decrease due to increase of the percent of bottom ash in the specimens. However, an increase in bottom ash of the improved lateritic soils were increased the optimum water content. The test results also indicate that the improved lateritic soils, both with B gradation and 0-10 percents of the bottom ash and with D gradation and 25 percents of the bottom ash, give the maximum CBR. values. The comparison of the improved lateritic soils with the same proportion of the bottom ash shows that curing time increased, the CBR. values of the improved lateritic soils increased. The coefficient of permeability of the improved lateritic soils for immediately tests was decrease about 2-10 times for 0 days curing time. However at 28 day of curing time, the values were increased about 2-10 times

Bottom ash can be used to stabilize the lateritic soil if it was mixed with the appropriate portion.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสุดต่อ รศ.ประทีป ดวงเดือน ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการประสิทธิประสาทวิชาความรู้ เพื่อให้เกิดวิทยานิพนธ์
เล่มนี้ขึ้นมาพร้อมทั้งคณะกรรมการที่ปรึกษาประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. ก่อโชค จันทวาง
กูร กรรมการวิชาเอก ที่กรุณาให้ความรู้คำแนะนำ ตลอดจนเสนอแนะแนวทางในการดำเนินงานจน
วิทยานิพนธ์นี้แล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ คุณหัสณีย์ ลิ้มเจริญบริษัทและBLCP
POWER จำกัด ที่ให้ความเอื้อเฟื้อข้อมูล, แก่กันเตาและให้ทุนอุดหนุน ด้วยดีตลอดมาจนการวิจัยนี้
สำเร็จ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์หมอ และ ที่กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนช่วยอำนวยความสะดวก
ในด้านสถานที่และเครื่องมือในการทดลอง รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ที่ให้คำ
ชี้แนะ ข้อมูล แนวทาง การทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี
และฐานราก และเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยฯ ทุกท่าน ในการช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกต่าง ๆ
รวมทั้งรุ่นพี่และรุ่นน้องปริญญาโทวิศวกรรมปฐพีทุกท่าน ซึ่งมีอาจกล่าวนามลงใน
กิตติกรรมประกาศได้ครบที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ สนับสนุนและเป็นแรงใจในการทำวิจัยครั้งนี้
เสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และความปรารถนาดีของทุกท่าน จึงขอขอบพระคุณ
ด้วยความเคารพอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยสนับสนุนส่งเสริมในด้านการศึกษาและ
เป็นกำลังใจในการเรียนมาโดยตลอด หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวม ผู้วิจัย
ขอขอบคุณดีที่เกิดขึ้นให้แก่ บิดามารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยส่งเสริมให้ผู้วิจัยมีความรู้
ความสามารถและประสบความสำเร็จในการศึกษา

วิเศษ แจ่มจิตร

เมษายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	66
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	74

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณซิลิกาและเซสควออกไซด์ของดินลูกรังในประเทศไทย	11
2	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในประเทศไทย	12
3	การแจกแจงขนาดกละสำหรับวัสดุชั้นพื้นทาง	14
4	การแจกแจงขนาดกละสำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทาง	14
5	องค์ประกอบทางเคมีในถ้ำกั้นเตาเปรียบเทียบกับถ้ำลอยชั้นคุณภาพ F และ C	20
6	สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกและบ่งบอกดินตัวอย่าง และผลการทดสอบต่างๆ	33
7	การกระจายขนาดของเม็ดดินที่ใช้ในการทดสอบ	35
8	องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของโลหะในถ้ำกั้นเตา	41
9	ผลการทดสอบ Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรดผสม B, D และถ้ำกั้นเตา	42
10	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรดผสม B, D และถ้ำกั้นเตา	43
11	ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรดผสม B, D และถ้ำกั้นเตา	44
12	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรดผสม B เกรดผสม D และถ้ำกั้นเตา	45
13	ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรดผสม B ผสมถ้ำกั้นเตา	47
14	ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรดผสม D ผสมถ้ำกั้นเตา	47
15	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรดผสม B และ D	51
16	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR. ของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ผสมถ้ำกั้นเตา	54
17	ผลการทดสอบ soaked CBR. ของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ผสมถ้ำกั้นเตา	55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรดผสม B ผสมแฉ่ำกัน	63
19	ปริมาณแฉ่ำกันเตาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานสำหรับดินลูกรังเกรดผสม B และ D	67

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	บริเวณที่พบดินลูกรังในประเทศไทย	10
2	ขั้นตอนการวิจัย	32
3	การกระจายขนาดของเม็ดดินแต่ละเกรดที่ใช้ในการทดสอบ	34
4	การกระจายขนาดของเม็ดดินของตัวอย่างดินลูกรังที่เก็บมาจากสนาม	37
5	การกระจายตัวและขนาดของอนุภาคเถ้าก้นเตา	38
6	ขนาดและลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้าก้นเตา	39
7	ลักษณะพื้นผิวอนุภาคของเถ้าก้นเตา	39
8	การกระจายขนาดของเถ้าก้นเตาที่ใช้ในงานวิจัย	40
9	กราฟระหว่าง intensity และ theta จากการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD	41
10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรดผสม B, D และเถ้าก้นเตา	43
11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินกลุ่มต่างๆ	45
12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณเถ้าก้นเตาและอายุการบ่มของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาในเกรดผสม B	48
13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณเถ้าก้นเตาและอายุการบ่มของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาในเกรดผสม D	49
14	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของเถ้าก้นเตาและดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วนผสมต่างๆ	52
15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณเถ้าก้นเตาของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาเกรดผสม B และเกรดผสม D	53
16	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณเถ้าก้นเตาของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาเกรดผสม B และเกรดผสม D	53
17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตา	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตา	57
19	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมเถ้าก้นเตา	57
20	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตา	58
21	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตา	58
22	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมเถ้าก้นเตา	59
23	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณเถ้าก้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม B	59
24	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณเถ้าก้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม B	60
25	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR. กับปริมาณเถ้าก้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม B	60
26	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณเถ้าก้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม D	61
27	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณเถ้าก้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม D	61
28	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR. กับปริมาณเถ้าก้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม D	62
29	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณเถ้าก้นเตาของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาเกรดผสม B และ D ทันทีที่บดอัด	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณไถ่กันเตาของดิน ลูกรังผสมไถ่กันเตาเกรดผสม B พื้นที่ที่บดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน	64
31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณไถ่กันเตาของดิน ลูกรังผสมไถ่กันเตาเกรดผสม D พื้นที่ที่บดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน	65
32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณไถ่กันเตาของดิน ลูกรังผสมไถ่กันเตาเกรดผสม B และ D พื้นที่ที่บดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน	65

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา

Improvement of Laterlitic Soil by Bottom ash

คำนำ

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกันอย่างมากมาย เช่น ในการผลิตกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมที่ใช้หม้อไอน้ำ เมื่อมีการนำถ่านหินเหล่านี้มาใช้ประโยชน์แล้ว สิ่งที่เป็นผลตามมาจากการเผาไหม้ถ่านหินคือ เถ้าหนัก ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และในปัจจุบันนี้ประเทศไทยได้มีการนำเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์อย่างมาก ดังนั้นการนำเถ้าหนักไปใช้ประโยชน์จะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างมาก โดยในต่างประเทศได้มีการนำเถ้าก้นเตาไปผสมในดินเพื่อทำเป็นดินคันทางแต่่ายังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก

ในงานก่อสร้างทางโดยทั่วไปจะมีการนำดินจากในท้องถิ่นนั้น ๆ มาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างทาง แต่ว่าวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นนั้นมีความแปรปรวนของวัสดุค่อนข้างสูง ทำให้ความสามารถในการรับแรงต่ำกว่าเกณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนวัสดุที่มีคุณภาพในการก่อสร้าง จึงต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้เถ้าก้นเตา โดยทำการผสมและบดอัดกับดินแต่ในประเทศไทยยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากขาดความรู้ความเข้าใจถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างงานดิน

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization) ด้วยเถ้า
ก้นเตา
2. ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณของเถ้าก้นเตา และอายุการบ่มต่อความเหนียว (Plasticity)
ของดิน
3. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา อันได้แก่
 - 3.1 การกระจายขนาดของเม็ดดิน
 - 3.2 ปริมาณของเถ้าหนัก
 - 3.3 อายุการบ่ม
4. พิจารณาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาที่มีขนาดละเอียด
แตกต่างกัน ในช่วงอายุของการบ่มและปริมาณเถ้าก้นเตาที่ผสมในสัดส่วนต่าง ๆ กัน
5. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าก้นเตามาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังเพื่อ
เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะด้านวิศวกรรมทางต่อไป

ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้นำมาจาก อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี
2. สารผสมเพิ่มที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เถ้าก้นเตาที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดของบริษัท
BLCP POWER จำกัด จากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
3. ตัวอย่างดินลูกรังที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมนั้นนำมา
จากการเตรียมตัวอย่างดินให้อยู่ในช่วง Grade B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของวัสดุ
มวลรวมตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

4. ใช้อัตราส่วนผสมแฉ่ำกันเตาต่อดินรื้อยละ 5, 10, 15, 20 ของน้ำหนักรีดแห้ง โดยเพิ่มไปเรื่อยๆ รื้อยละ 5 ต่อครั้ง จนกว่าจะได้ค่าความหนาแน่นแห้งที่สูงที่สุด

5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเหนียวของดินลูกรังผสมแฉ่ำกันเตาที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยทำการทดสอบหาค่า Liquid Limit และ Plastic Limit เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเหนียวของดินทันทีหลังผสมเสร็จและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับดินลูกรังกลุ่มเดียวกันที่ไม่ได้ผสมแฉ่ำกันเตา

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

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

8. การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของตัวอย่างดินลูกรังและดินลูกรังผสมแฉ่ำกันเตาซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น โดยตัวอย่างดินลูกรังผสมแฉ่ำกันเตานี้จะทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

การตรวจเอกสาร

ดินลูกรัง

ดินลูกรังเกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศร้อนหรือกึ่งร้อนซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นสูง มีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือสามารถแข็งตัวได้เมื่อทิ้งไว้ในอากาศ และมักมีสีแดงเพราะมีออกไซด์ของเหล็กปะปนอยู่ คุณสมบัติของดินลูกรังขึ้นอยู่กับชนิดของหินต้นกำเนิด ส่วนประกอบทางเคมี และสภาพภูมิอากาศ ดินลูกรังเมื่อนำมาบดอัดจะสามารถรับแรงเค้นได้สูงขึ้นและมักนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานทาง เป็นดินถมคันทาง ดินถมงานเขื่อนและงานฐานราก

คำจำกัดความของดินลูกรัง

คำจำกัดความตามคุณสมบัติการแข็งตัว Buchanan (1807) เป็นผู้ริเริ่มใช้คำว่า “laterite” เรียกดินที่พบในมาลาบาร์ ประเทศอินเดียซึ่งหมายถึง ดินที่มีสีเหลืองอ่อนเนื่องจากมีเหล็กผสมอยู่ในปริมาณสูง มีความพรุน ไม่แบ่งชั้น มีความอ่อนตัวพอที่จะตัดเป็นแผ่นขนาดเท่าอิฐได้ และเมื่อขุดพบจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อทิ้งไว้ในอากาศ ดังนั้น จึงนิยมนำมาทำเป็นอิฐ เพื่อใช้ในการก่อสร้าง

คำจำกัดความทางเคมี Mallet (1883) เป็นผู้ริเริ่มให้ความหมายดินลูกรัง (Lateritic Soils) ว่าหมายถึงดินที่ตามธรรมชาติจะมีสีแดงเนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม จากนั้น Bauer (1898) ได้ให้ความหมายของดินลูกรังว่าหมายถึงวัสดุที่มีสารประกอบของซิลิกาและปริมาณของอลูมิเนียมในรูปของไฮดรอกไซด์สูงเมื่อเทียบกับปริมาณของ bauxite จากนั้น Fermor (1911) ได้พัฒนาการเรียกชื่อลูกรังตามธาตุพื้นฐานที่ประกอบในลูกรังซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณของซิลิกา ธาตุพื้นฐานที่ประกอบในลูกรังได้แก่ เหล็ก, อลูมิเนียม, โพแทสเซียมและแมกนีเซียม ในเวลาต่อมา Lacroix (1913) ได้จำแนกชนิดของลูกรังตามปริมาณของออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบได้แก่

1. True laterite มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบมากกว่าร้อยละ 90
2. Silicate laterite มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบกว่าร้อยละ 50-90

3. Laterite Clay มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบกว่าร้อยละ 10-50

ซึ่งต่อมา Martin และ Doynne (1927) ได้แบ่งชนิดของดินลูกรังตามอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา ดังนี้

1. True laterite มีส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ น้อยกว่า 1.33
2. Lateritic Soils หรือดินลูกรัง มีส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ระหว่าง 1.33-2.00
3. Non-lateritic tropically weathered-soil มีส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มากกว่า 2.00

คำจำกัดความทาง Morphology Alexander และ Cady (1962) ได้รวบรวมงานวิจัยทางด้าน morphology ฟิสิกส์และเคมีที่เกี่ยวข้องกับลูกรังโดยให้ความหมายไว้ดังนี้

Laterite หรือลูกรัง หมายถึงดินที่เกิดจากกระบวนการทำลายในอัตราค่อนข้างสูงมี Secondary oxide ของเหล็กหรืออลูมิเนียมในปริมาณสูง โดยปราศจากความเป็นด่าง และ Primary Silicate ในบางครั้งอาจมีแร่ควอตซ์และคาโอลิไนท์ในปริมาณสูงและมีคุณสมบัติที่แข็งตัวเมื่อกระทบอากาศ

Lateritic Soil หรือดินลูกรัง หมายถึงดินสีแดงที่มีออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมผสมอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการ laterization มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เองและมี laterite rock หรือ laterite gravel ผสมอยู่

Laterite rock หรือหินลูกรัง หมายถึงดินลูกรังที่เกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ มีความเหนียวและความแข็ง จะแสดงคุณสมบัติของหินมากกว่าดิน เช่น หินศิลาแลงเป็นต้น

Phinthisite เป็นรูปแบบหนึ่งของหินลูกรังที่สามารถตัดด้วยเครื่องตัดโลหะได้ ในขณะที่อยู่ใต้ดินเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดการแข็งที่ไม่คืนสู่สภาพเดิม

Laterite gravel หรือกรวดลูกรัง ประกอบด้วยวัสดุเม็ดหยาบซึ่งเป็นเม็ดเล็กๆ มีความแข็งแตกต่างกัน บางทีอาจจะยัดเกาะเป็นมวลก้อนใหญ่ หรืออาจสึกกร่อนจนกลายเป็น silty หรือ clayey lateric soil

Self-hardening-property หมายถึง คุณสมบัติของการแข็งตัวได้เองเมื่อสูญเสียความชื้นในตัวยและคุณสมบัตินี้จะไม่กลับสู่สภาพเดิม ถึงแม้ได้รับความชื้นอีก

Sesquioxide หมายถึง Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ TiO_2 ซึ่งเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของลูกรัง

กระบวนการเกิดดินลูกรัง Primary Minerals และ Secondary ในดินลูกรัง

Primary Minerals ในดินลูกรัง

กระบวนการทำลายในเขตร้อนเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ฟิสิกส์หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปของ primary rock-forming minerals เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างแบบ 1:1 และสารประกอบลูกรังซึ่งได้แก่ เหล็ก, อลูมิเนียม, ไทเทเนียม และแมงกานีส สะสมอยู่เป็นจำนวนมากโดยแบ่งขั้นตอนในการเกิดลูกรังออกเป็น 3 ช่วงดังนี้

1. Decomposition เป็นขบวนการทางเคมีฟิสิกส์ในการทำลาย Primary minerals ในหินออกไซด์ต่างๆ ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O และอื่นๆ ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปของอนินทรีย์สาร

2. Laterization จะเกิดการชะล้างภายใต้สภาวะการระบายที่เหมาะสม เกิดการรวมตัวของซิลิกา, ด่าง และสารพวกออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ของเซสควิออกไซด์ (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Ti_2O_3) ส่วนสารอื่นๆ จะถูกระบายหรือรวมตัวกันขึ้นกับความเป็นกรด ด่าง ของน้ำในดินและสภาวะการระบาย

Mohr และ Van Baren (1954) ได้กล่าวว่ากระบวนการ Laterization เกิดขึ้น เนื่องจากสภาวะทางธรรมชาติและการเกิดกระบวนการทำลายทางเคมีของหินเดิมภายใต้สภาวะทางเคมีและการเปลี่ยนรูปที่ต่ำกระบวนการทำลายทางเคมี-ฟิสิกส์ จะไม่ดำเนินต่อไปในช่วงของการเปลี่ยนรูป

แร่ดินเหนียวและมีแนวโน้มที่จะเกิดแร่ดินเหนียวพวกคาโอลิไนท์หรือไฮเดรทหรือแอนไฮดรัส ออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมต่อมา Remillion (1967) ได้กล่าวว่าภายใต้สภาวะการเกิด กระบวนการทำลายทางเคมีฟิสิกส์ที่ยาวนานนี้แร่ดินเหนียวจะถูกชะล้างเหลือสารที่มีออกไซด์ของ อลูมิเนียม เช่น gibbsite หรือไฮดรอกไซด์ของเหล็ก เช่น ลิโมนைต์หรือเกอร์ไทท์

3. Dehydration หรือ Desiccation จะเกิดไฮเดรชันในบางส่วนหรือทั้งหมดของเซสควิ- ออกไซด์ และ secondary mineral ซึ่งบางครั้งทำให้เกิดการแข็งตัวเกิดความเข้มข้น เกิดการตกผลึก ของ amorphous iron colloids ไปเป็น dense crystalline iron mineral ได้แก่ ไลมอนไนต์ ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) เกอร์ไทท์ ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และเฮมาไทต์ (Fe_2O_3)

สรุปได้ว่าการแข็งตัวในดินลูกรังเกิดขึ้นเนื่องจากออกไซด์อิสระของเหล็ก 3 ชนิด ได้แก่ เฮมาไทต์, ไลมอนไนต์และเกอร์ไทท์เคลือบบนอนุภาคดิน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเฮมาไทต์ กระบวนการ Laterization จะทำให้ออกไซด์อิสระของเหล็กในรูปของเฮมาไทท์ที่เคลือบอยู่บนอนุภาคดินมีความหนาเพิ่มขึ้น

Secondary mineral ในดินลูกรัง

วิธีการหา secondary minerals ในดินลูกรัง ได้แก่ การวิเคราะห์ x-ray diffraction, การวิเคราะห์ differential Thermal Analysis (DTA) และการวิเคราะห์ scanning electron microscope

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดินลูกรัง

ความเป็นกรด-ด่าง จากการศึกษพบว่าความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังเปลี่ยนแปลงตามความลึก แต่จะมีค่าอยู่ระหว่าง 4-8 แสดงว่าดินลูกรังจะเกิดในบริเวณที่มีสภาวะเป็นกรด

สารอินทรีย์ Newill (1959) กล่าวว่าดินลูกรังที่มีเม็ดละเอียดจะมีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่าดินลูกรังที่มีเม็ดหยาบโดยทั่วไปแล้วดินลูกรังจะมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำโดยจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1.0 ที่ชั้นผิวดิน

Secondary minerals ในดินลูกรัง ได้แก่ แร่ดินเหนียว คาโอลิไนท์, ฮาลลอยไซด์, อิลไลต์, มอนต์โมริลโลไนท์ และอื่นๆ การเกิด Secondary mineral ในดินลูกรังขึ้นกับอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ พืชที่ปกคลุมและสภาพการระบายน้ำ ชนิดของ secondary minerals ในดินลูกรังมีประโยชน์อย่างมากในทางวิศวกรรมปฐพีเพราะสามารถคาดการณ์ถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังได้

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินลูกรังจะมีปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและพืชพันธุ์ ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตจะลดลงเมื่อเกิดการชะล้างและกระบวนการ laterization มากขึ้น

การกระจายของเม็ดดิน ดินลูกรังส่วนใหญ่มีการกระจายขนาดของเม็ดดินดี กล่าวคือ มีขนาดคละกันดี

ความถ่วงจำเพาะ ค่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังอยู่ระหว่าง 2.67-3.46 จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กออกไซด์ในดินลูกรัง กล่าวคือ ถ้ามีปริมาณของเหล็กออกไซด์มาก จะมีความถ่วงจำเพาะสูง

ดัชนีพลาสติก ค่าพลาสติกซิติของดินลูกรังขึ้นอยู่กับปริมาณของดินเหนียว ดังนั้น จึงมีค่าไม่แน่นอนขึ้นกับกระบวนการชะล้างและกระบวนการ laterization กล่าวคือถ้ามีการชะล้างและเกิดกระบวนการ laterization สูง ปริมาณของดินเหนียวจะยังผลให้ค่าพลาสติกซิติลดลง เนื่องจากแร่ดินเหนียวถูกเคลือบด้วยเซสควิออกไซด์ ทำให้ surface activity ของแร่ดินเหนียวถูกขจัด

กำลังรับแรงเฉือน ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังขึ้นกับอิทธิพลขององค์ประกอบทาง genetic ชนิดของหินเดิมและองศาที่เกิดกระบวนการทำลาย ซึ่งหมายถึงองศาที่เกิดกระบวนการ decomposition, laterization และ desiccation นอกจากนั้นแล้วการทดลองต่างชนิดกันให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่างกัน โดย Lambe (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลขององศาที่เกิดกระบวนการ decomposition ที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินพบว่าดินลูกรังที่มีความลึกต่างๆ ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต่างกัน และจากการศึกษาของ Baldovin (1969) พบว่า ดินลูกรังที่มีองศาที่เกิดกระบวนการ laterization สูงจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูง

สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน การซึมผ่านของดินลูกรังขึ้นกับชนิดของหินเดิม ลักษณะตามธรรมชาติของดิน อัตราส่วนโพรงและวิธีการเตรียมตัวอย่าง ความชื้นและความหนาแน่นแห้งมีผลอย่างมากต่อการซึมผ่านของดินลูกรัง

ดินลูกรังในประเทศไทย

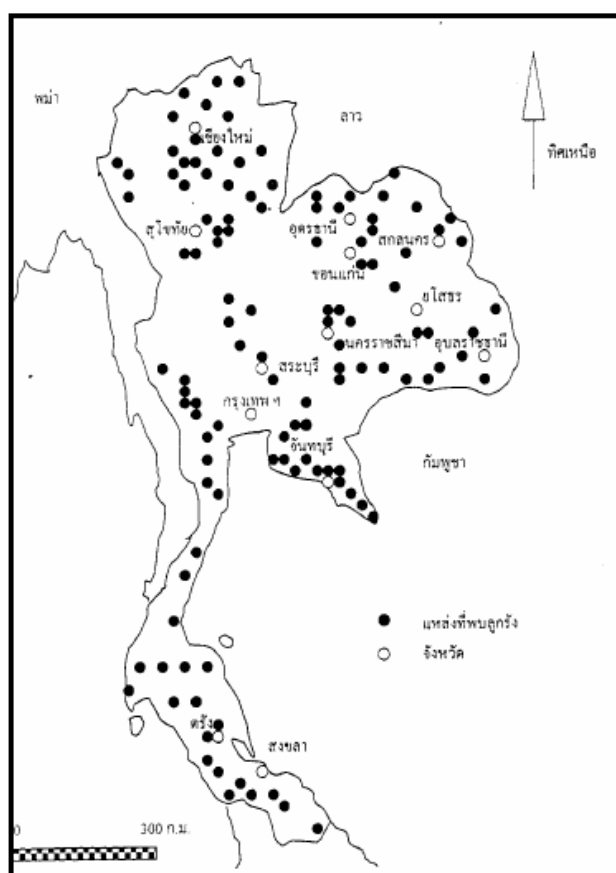
ประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น กล่าวคือมีฤดูร้อนและฤดูฝนสลับกันเป็นระยะเวลาก่อนข้างยาวนาน สภาพภูมิอากาศเหมาะแก่การเกิดดินลูกรัง จะพบดินลูกรังมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคเหนือ หินเดิมส่วนใหญ่เป็นหินทราย หินบะซอลต์ และหินดินดาน บริเวณที่พบดินลูกรังในประเทศไทยแสดงไว้ในภาพที่ 1

Hongsnoi (1969) กล่าวว่า ในประเทศไทยพบดินลูกรัง ซึ่งดินลูกรังนี้สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทตามวิธีการเกิดดังนี้

Primary lateritic soils หมายถึง ดินลูกรังซึ่งมีเหล็กเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ และเกิดอยู่กับที่เหนือหินเดิม เหล็กที่เป็นส่วนประกอบได้จากธาตุพวกเฟอร์โรแมกนีเซียมที่มีอยู่ในหินชั้นล่างๆลงไป และเคลื่อนขึ้นมาสะสมมากขึ้นในชั้นดิน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินในแต่ละฤดู น้ำฝนซึ่งมีออกซิเจนและกรดอินทรีย์ต่างๆ ละลายอยู่จะออกซิไดส์ธาตุพวกเฟอร์โรแมกนีเซียมในดินเป็นเหล็กออกไซด์ ซึ่งมีสีแดง การเกิดดินลูกรังประเภทนี้ในประเทศไทยมักเกิดเป็นชั้นๆ จากผิวดินจนถึงชั้นของหินเดิม ดังนี้

1. ชั้นผิวดิน
2. ชั้นดินลูกรังที่เป็นเม็ดกลมแข็งและแข็ง เกิดจากการเกาะกันของเฮมาไทต์เป็นเม็ดเล็กๆ และมีดินเหนียวปนบ้างเล็กน้อย
3. ชั้นดินเหนียวที่มีขนาดเล็กและแข็งจำนวนมาก และมีดินลูกรังที่เป็นเม็ดกลมจากการเริ่มแข็งตัวของลิโมนาท์
4. ดินเหนียวอ่อน ชุ่มชื้น และมีเหล็กออกไซด์ มีขนาดเม็ดต่างๆ

5. ชั้นดินเหนียวสีเทา มีลิโมนาที่ปนหรือแทรกตามรอยแตก
6. ชั้นหินเดิมที่ผุพัง เป็นพวกกรวด ทราย และดินเหนียว
7. ชั้นหินเดิม



ภาพที่ 1 บริเวณที่พบดินลูกรังในประเทศไทย

ที่มา: สุภาพร (2528)

ขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก จะมีค่าต่ำสุดที่ชั้นดินลูกรังและเพิ่มมากขึ้นตามความลึกจนถึงชั้นหินเดิมที่ผุพัง โดยปกติส่วนในสุดของเม็ดดินลูกรังเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ที่อ่อน ผิวนอกเป็นเหล็กออกไซด์ที่แข็งแกร่งกว่าความหนาของเหล็กออกไซด์จะมากหรือน้อยขึ้นกับสภาพแวดล้อม

Secondary lateritic soils หมายถึง ดินลูกรังที่เกิดขึ้นโดยการเคลื่อนย้ายมาจากหินเดิม น้ำใต้ดินที่ไหลผ่านจะทำให้ออกไซด์ที่อยู่ในดินแข็งตัวขึ้นและออกไซด์เหล็กในบริเวณนั้นด้วยดินลูกรังประเภทนี้โดยทั่วไปจะไม่แบ่งชั้น เหล็กออกไซด์สีแดงที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณต่าง ๆ กัน ขึ้นกับสภาพแวดล้อมต่างๆ และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชั้นดินที่ทับถม เหล็กออกไซด์ในดินลูกรังประเภทนี้กระจายมากกว่าดินลูกรังประเภทแรก มักเกิดล้อมรอบกวาดหรือชั้นส่วนของหินที่แตกหัก ทำให้ดินลูกรังประเภทนี้ขนาดเม็ดใหญ่ มีความแข็งที่แตกต่างกันปรากฏชั้นของเฮมาไทต์, ลิโมนาइट และดินเหนียวเด่นชัดกว่าดินลูกรังประเภทแรก นอกจากนี้จะปรากฏขึ้นระหว่างดินลูกรังกับหินเดิมค่อนข้างชัดเจน จีดจำกัดอัตราส่วนของดินลูกรังประเภทนี้มีค่าต่ำกว่าประเภทแรก

Pendleton and Sharasuvana (1946) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดินลูกรังในประเทศไทย โดยสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณซิลิกาและเซสควิออกไซด์ของดินลูกรังในประเทศไทย

เขตพื้นที่	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	อัตราส่วนของ SiO ₂ /R 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 material of mix origin	31.3	40.0	17.7	1.4
Unknown parent material	37.9	40.1	11.9	2.1

ที่มา: Pendleton and Sharasuvana (1946)

Morrison (1965) ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในประเทศไทย โดยสรุปไว้ในตารางที่ 2

วุฒิชัย (2526) ศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังจากแหล่งต่าง ๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่าดินลูกรังส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่ม A-2 ตามการจำแนกดินของ AASHTO ซึ่งเป็นกรวดปนดินตะกอนหรือกรวดปนทรายแป้งและดินเหนียว (Silty or Clayey Gravel) ซึ่งจัดเป็น

วัสดุที่มีคุณภาพดีสำหรับใช้เป็นชั้นรองพื้นทางของถนน และหากจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จะได้เป็นประเภท GW/GP และ SW/SP ส่วนประกอบของดินลูกรังส่วนใหญ่จะประกอบด้วยเคโอลิไนต์ปริมาณมาก และอิลไลต์ปริมาณพอสมควร นอกจากนี้อาจพบมอนต์โมริลโลไนต์, เวอร์มิคิวไลต์, คลอไรต์, เกอไทต์และควอร์ตปนอยู่ด้วย ปัญหาที่มักพบบ่อยสำหรับดินลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย คือ ดินมีค่า Liquid Limit และ Plasticity Index มากกว่ามาตรฐานที่กำหนด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในประเทศไทย

คุณสมบัติ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
น้ำหนักที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	0.00	66.00
Liquid Limit , %	18	97
Plasticity Index , %	NP	51
การจำแนกดินตามระบบ AASHTO	A-1-a	A-7-6
Group Index	0	10
ความถ่วงจำเพาะ	2.59	3.20
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ปอนด์ต่อลบ.ฟุต)	118.00	144.50
ความชื้นที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด , %	7.00	13.40
California Bearing Ratio , %	7.00	60.00
การบวมตัว , %	0.10	55.00

ที่มา: Morrison (1965)

มาตรฐานของวัสดุที่นำมาใช้ในงานทาง

กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532) ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุสำหรับชั้นพื้นทางไว้
ดังนี้

1. Liquid limit ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์หรือตามที่ระบุในแบบ
2. ดัชนีพลาสติกไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์หรือตามที่ระบุในแบบ
3. เปอร์เซ็นต์การขัดสีไม่เกินร้อยละ 40
4. Lab CBR. ไม่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์หรือตามที่กำหนดในแบบ

การแจกแจงขนาดกละสำหรับวัสดุชั้นพื้นทางกำหนดไว้ในตารางที่ 3

สำหรับชั้นรองพื้นทางมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. liquid limit ไม่เกิน 35 เปอร์เซ็นต์หรือตามที่ระบุในแบบ
2. ดัชนีพลาสติก ไม่เกิน 11 เปอร์เซ็นต์หรือตามที่ระบุในแบบ
3. เปอร์เซ็นต์การขัดสี ไม่เกินร้อยละ 60
4. Lab CBR. ไม่น้อยกว่า 25-30 เปอร์เซ็นต์หรือตามที่กำหนดในแบบ

การแจกแจงขนาดกละสำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทาง แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 การแจกแจงขนาดคละสำหรับวัสดุชั้นพื้นทาง

ขนาดช่องตะแกรง	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรง %			
	เกรด A	เกรดผสม B	เกรด C	เกรดผสม 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	25-50	40-70
No.40 (0.425 มม.)	8-20	15-30	15-30	25-45
No.200 (0.075 มม.)	2-8	5-20	5-15	5-20

ที่มา: กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532)

ตารางที่ 4 การแจกแจงขนาดคละสำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทาง

ขนาดช่องตะแกรง	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรง %				
	เกรด A	เกรดผสม B	เกรด C	เกรดผสม D	เกรด 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	25-50	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	5-15	5-20	6-20

ที่มา: กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2532)

อนึ่ง ข้อกำหนดการแจกแจงขนาดผลของวัสดุชั้นรองพื้นทางในเกรด A, B, C และ D นี้ เหมือนกับข้อกำหนดของวัสดุชั้นพื้นทางทุกประการ

วุฒิชัย (2526) ได้ดำเนินการศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังจากแหล่งต่างๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่าดินลูกรังส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่ม A-2 ตามระบบการจำแนกดินของ AASHTO ซึ่งเป็นกรวดปนดินตะกอนหรือกรวดปนทรายแป้งและดินเหนียว (Silty or Clayey Gravel) ซึ่งจัดเป็นวัสดุที่มีคุณภาพดีสำหรับใช้เป็นชั้นรองพื้นทางของถนน และจัดเป็นประเภท GW, GP และ SW, SP ตามระบบการจำแนกดินแบบ Unified Soil Classification โดยส่วนประกอบของดินส่วนใหญ่จะประกอบด้วย เคโอลิไนต์ปริมาณมาก และอิลไลต์ปริมาณพบสมควร นอกจากนี้อาจพบมอนต์โมริลโลไนต์ เวอร์มิคิวไลต์ คลอไรต์ เกอไทต์ และควอร์ตปนอยู่ ซึ่งปัญหาที่พบบ่อยสำหรับตัวอย่างดินลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยคือ มีค่า Liquid Limit และ Plasticity Index มากกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้

วรศักดิ์ และ สมหวัง (2538) ได้ดำเนินการศึกษาพบว่า ดินลูกรังสามารถใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง ไหล่ทาง พื้นทางของถนนที่มีปริมาณการจราจรสูงปานกลาง และสามารถใช้เป็นผิวทางชั่วคราวของถนนที่ไม่ได้ลาดยาง เพราะเมื่อดินลูกรังจะไม่แตกเป็นเม็ดละเอียดเมื่อกู้น้ำหรือความชื้นในอากาศ แหล่งดินลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มักพบชั้นดินลูกรังหนาประมาณ 1.4-2.0 เมตร ค่า Liquid Limit และ Plasticity Limit ของดินลูกรังส่วนมากจะสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวง และถ้านำดินลูกรังผสมกับซีเมนต์จะมีคุณสมบัติใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้เป็นอย่างดี

การปรับปรุงคุณภาพของดิน

การปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นกระบวนการที่ทำให้ดินตามธรรมชาติมีความทนทานต่อการสึกกร่อน สามารถรับน้ำหนักหรือการจราจรภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ โดยอาจใช้การบดอัด การทำให้แน่นด้วยเทคนิคเฉพาะ การควบคุมการทดลอง หรือการใช้สารผสมเพิ่มซึ่งอาจอยู่ในรูปของของเหลวหรือเป็นผงมาเติมลงในดิน ซึ่งปัจจัยหลักที่เราต้องพิจารณาคือ ขนาดผลและปริมาณความชื้นในมวลดินที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Hogentoger, 1938)

การปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี

Mitchell (1982) ได้กล่าวไว้ว่า การใช้สารเคมีผสมลงในดิน มีวัตถุประสงค์โดยทั่วไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินได้แก่ ควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาณซึ่งพิจารณาได้จากการบวมตัว และการหดตัวของดิน ปรับปรุงคุณสมบัติในการรับน้ำหนัก หรือพฤติกรรมของ Stress-Strain ของดิน ปรับปรุงการไหลซึมของน้ำที่ผ่านดิน และเพิ่มความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

สารเคมี หรือสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ ปูนขาว ซีเมนต์ ยิปซัม หรือเถ้าลอย เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ดินมีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย สำหรับความเหมาะสมของการเลือกใช้สารเพิ่มเสถียรภาพนั้น จะต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ในการทำงาน การจัดเก็บรักษาและต้องมียอดประกอบที่ไม่มีพิษ รวมทั้งต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี

1. คุณสมบัติของดิน (Soil Properties) ดินตามธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเฉพาะตัว ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดยสามารถวิเคราะห์ได้จาก ทฤษฎีทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics) อาจกล่าวสรุปได้ว่า การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle Size Distribution) สารอินทรีย์ สารประกอบอื่นๆ เช่น เกลือซัลเฟต หรือคลอไรด์ และ องค์ประกอบทางเคมี จัดเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดิน

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

3. น้ำ (Water) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอันหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี เพราะน้ำจะเป็นตัวควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการเพิ่มกำลังของดิน ปริมาณ

ความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยา จะยังคงเหลือกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่แข็งตัวแล้วและเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้ค่ากำลังของดินต่ำกว่าความเป็นจริง

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

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ

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

2. การจับตัวกันของเม็ดดิน (Flocculation – agglomeration) การเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงไปในดินจะทำให้อนุภาคดินเหนียว เกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น กล่าวคือ อออนบวกจากสารเพิ่มเสถียรภาพเมื่อเข้าไปในมวลดิน จะเข้าไปจับตัวบนผิวอนุภาคของดินเหนียว สารซิลิกาจะละลายเข้าสู่โพรงน้ำก่อให้เกิดสารเชื่อมประสาน ส่งผลให้เม็ดดินมีโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อความเข้มข้นของอออนสูงขึ้น จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดินเหนียว ซึ่งจะทำให้อิออน Double Layer หดตัวแคบเข้า อนุภาคดินเหนียวจะเกิดการดึงดูดกันเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ อนุภาคของเม็ดดินจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น และ Plasticity Index ลดลง โครงสร้างของดินจะมีความมั่นคงขึ้น

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

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

คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงไป

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

2. คุณสมบัติทางการบดอัด (Compaction) เมื่อผสมสารเพิ่มเสถียรภาพลงไปในดินจะทำให้คุณสมบัติของดินทางการบดอัดเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) ลดลง และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของดินเดิมที่ใช้

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

เอ้ากันเตา

ขั้นตอนการเกิดเอ้ากันเตา

ถ่านหินจะถูกโม่บดจนเป็นผงละเอียด (Pulverized) ก่อนป้อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ในเตา เพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นจะถูกส่งไปยังเตาเผาไหม้ถ่านหินเพื่อใช้

ในการเป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า ภายหลังจากการเผาไหม้ถ่านหินแล้วจะเกิดเถ้า 2 ชนิด คือเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) กับเถ้าลอย (Fly Ash) คิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 20:80 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน ชนิดของเตาเผา กระบวนการเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยเถ้าก้นเตาจะตกลงกันถึง

คุณลักษณะโดยทั่วไปของเถ้าก้นเตา

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า เถ้าก้นเตา คือ กากหรือตะกอนที่มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด มีลักษณะคล้ายกับทราย ซึ่งได้จากการเผาไหม้ถ่านหินตามกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าก้นเตาทั่วไปจะมีสีเทาถึงดำ หรือสีน้ำตาล อนุภาคของเถ้าก้นเตานั้นมีขนาดแตกต่างกันไปโดยอนุภาคส่วนใหญ่จะมีลักษณะพื้นผิวเป็นแบบขรุขระและมีเหลี่ยมคมเมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะป่นเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตา

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาโดยวิธี X- Ray Diffraction พบว่าเถ้าก้นเตาประกอบด้วยสารหลายชนิด ซึ่งเมื่อเทียบกับกราฟของสารมาตรฐานคาดว่า เถ้าก้นเตานี้มีองค์ประกอบของสารประเภทซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ quartz, cristobalite และ mullite และจากการทดสอบโดยเครื่อง scanning electron microscope พบว่าเถ้าก้นเตามีลักษณะโครงสร้างอนุภาคนั้นมีขนาดที่แตกต่างและรูปร่างที่แตกต่างกันไป

สำหรับเถ้าก้นเตานั้น ยังไม่มีข้อกำหนดขององค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐานแต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกับเถ้าลอยซึ่งมีข้อกำหนดขององค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยจะใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ โดยแบ่งออกเป็นชั้นคุณภาพของเถ้าลอยออกเป็นชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F โดยที่ชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F ซึ่งมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับเป็นไปตามตารางที่ 5 ทั้งนี้การกำหนดองค์ประกอบดังกล่าวเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างเพียงพออย่างน้อยเพียงใดนอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะเวลาอีกด้วย

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีในถ้ำก้นเตาเปรียบเทียบกับถ้ำลอยชั้นคุณภาพ F และ C

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพถ้ำลอย		ถ้ำก้นเตา
	F	C	
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	>70	>50	44.71
ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO), max %	<10	>10	1.22
ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), max %	-	-	0.66
ปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5.0	5.0	0.10
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0	48.11
ปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (Loss on Ignition, LOI), max %	6.0	6.0	49.25
อัลคาไลน์ในรูปของไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5	0.15

ที่มา: ASTM C618-92a (1994)

สำหรับปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณซัลเฟตมีผลต่อการพัฒนาความสามารถในการรับน้ำหนัก/แรงอัด และเวลาในการก่อตัวได้ ทั้งยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย อย่างไรก็ตามยังมีส่วนช่วยเสริมในการเกิด Sulfate Attack

สำหรับปริมาณความชื้นไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน (Handling Difficulty) และสำหรับชั้นคุณภาพ C แล้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าของน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผาไหม้ไม่ให้เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ หากมีค่าของน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผาไหม้จะทำให้ความต้องการน้ำในคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่าของน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผาดำกว่าร้อยละ 6 ส่วนปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของไดโซเดียมออกไซด์มาก

ที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 เนื่องจากมีปริมาณปูนขาวอิสระสูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali Aggregate ขึ้นได้ อย่างไรก็ตามถ้าล้อยที่มีปริมาณของไฮดรอกไซด์มากกว่าร้อยละ 1.5 จะนำมาใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาได้ก็ต่อเมื่อผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพของดิน

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการใช้เถ้าก้นเตา

ในปี 2004 R.Forteza และคณะ ได้มีการนำเอาเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเผาถ่านหิน มาใช้ผสมลงในดินเพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางและรองพื้นทางในการก่อสร้างถนนในประเทศสเปน ปรากฏว่าสามารถทำให้ค่า CBR. มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเดิม และ Chandler และคณะ(1997) ได้ทำการทดสอบหาค่า CBR. ปรากฏว่าดินที่ผสมเถ้าก้นเตา ให้ค่า CBR. ที่สูงขึ้น แต่ว่ามีข้อมูลสนับสนุนผลการวิจัยน้อยเกินไป

Bumjoo Kim และ Monica Prezzi (2006) ได้ศึกษาหาอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าล้อยและเถ้าก้นเตาเพื่อทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าล้อยขึ้นเรื่อยมา กว่าเถ้าก้นเตา จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่ามากขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าล้อย

อนิรุทธิ์ และ สุเทพ (2530) ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังในกลุ่ม GC, GP-GM และดินทรายปนดินเหนียวด้วยเถ้าล้อยแม่เมาะพบว่า การผสมเถ้าล้อยในตัวอย่างดินเม็ดละเอียดจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดลดลง ส่วนในดินเม็ดหยาบนั่นจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดลดลง ส่วนกำลังอัดของดินผสมเถ้าล้อยจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าล้อยที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด โดยอัตราส่วนผสมสูงสุดจะอยู่ในช่วงระหว่าง 15–25 % เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกำลังอัดของดินผสมเถ้าล้อยกับดินผสมซีเมนต์ และปูนขาว พบว่า กำลังอัดของดินผสมเถ้าล้อยจะมีค่าต่ำกว่าดินที่ผสมปูนซีเมนต์ แต่สูงกว่าดินที่ผสมปูนขาว

พลาการ (2542) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้ผสมดินลูกรัง โดยใช้ดินลูกรังกลุ่ม SC ที่นำมาจากจังหวัดระยอง และใช้เถ้าลอยลิกไลต์ จากแม่เมาะ จังหวัดลำปาง อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยต่อดินลูกรังเท่ากับ 0:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนักของดิน จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะมีค่าลดลง สำหรับการศึกษาค่า CBR. พบว่าค่า Unsoaked CBR. มีกำลังเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการบ่ม ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และไม่สูญเสียความแข็งแรงเมื่อนำตัวอย่างไปแช่น้ำ แต่ถ้าปริมาณเถ้าลอยลิกไลต์ในดินมากกว่า 1:3 พบว่ากำลังกลับลดลง การบวมตัวจะมีค่าประมาณ 80% เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินลูกรังที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย

วินัย และคณะ (2543) ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในดินลูกรังและอายุการบ่มซึ่งมีผลต่อค่า CBR. ของดินลูกรังโดยอาจสรุปได้ว่า ค่า Unsoaked CBR. ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่าแปรผันกับปริมาณเถ้าลอย และอายุการบ่ม ส่วนค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัด โดยมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับปริมาณเถ้าลอย ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดแปรผกผันกับปริมาณเถ้าลอย คือมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยมากขึ้นทั้งนี้เพราะการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้ส่วนละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเนื่องจากการบดอัดมีค่าลดลง ค่า CBR. ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า CBR. ของดินลูกรังที่ไม่ผสมเถ้าลอย นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบราคาของพื้นที่ทำจากหินคลุกและดินลูกรังผสมเถ้าลอยด้วย พบว่าการใช้ดินลูกรังผสมเถ้าลอยมีราคาถูกกว่าในกรณีที่แหล่งดินลูกรังอยู่ไม่ไกลจากสถานที่ก่อสร้างและระยะทางจากโรงไฟฟ้าไปยังสถานที่ก่อสร้างน้อยกว่า $287.37 + 22.41X$ กิโลเมตร เมื่อ X คือ ระยะทางจากแหล่งวัสดุถึงสถานที่ก่อสร้าง

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

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

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้ปูนขาว

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

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

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้ปูนซีเมนต์

Winterkorn and Chandrasekharan (1951) ศึกษาดินลูกรังหลายประเทศทั่วโลกโดยนำมาปรับปรุงด้วยการผสมซีเมนต์พบว่า ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมที่จะให้กำลังสูงสุดสำหรับดินลูกรังบางประเภทใช้ซีเมนต์สูงถึงประมาณร้อยละ 14 นอกจากนี้ยังได้รายงานว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะให้ผลที่ดีหรือไม่ขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ผสมอยู่ในดินและ Degree of Laterization

Jones and Yimsirikul (1965) ได้ศึกษาดินลูกรังที่มีค่า Plasticity Index อยู่ในช่วง 12–39 มาผสมกับซีเมนต์ แล้วทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่บดอัดแบบมาตรฐาน และทดสอบหาค่า CBR. พบว่า ค่า CBR. จะมีค่ามากกว่า 100 และถ้าเพิ่มพลังการบดอัดมากขึ้นจะทำให้ทั้งค่า CBR. และ UCS ของดินผสมซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณซีเมนต์ที่จะทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าไม่ต่ำกว่า 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อายุการบ่ม 28 วัน คือปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 5 นอกจากนี้ยังหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR. และ UCS ไว้ด้วย

Department of Highways and Siam Cement (1965) ทดลองสร้างถนนตัวอย่างโดยใช้ปูนซีเมนต์ ผสมดินลูกรังในจังหวัดอุบลราชธานี โดยออกแบบให้เป็นชั้นทางกึ่งยืดหยุ่น โดยกำหนดค่า UCS ต้องอยู่ระหว่าง 17.5 ถึง 56.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc.) ที่อยู่การบ่ม 7 วัน โดยอธิบายว่า ถ้ากำลังสูงกว่า 56.6 ksc. จะทำให้ชั้นดินสูญเสียความยืดหยุ่นและเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นวัสดุแข็งเกร็ง ซึ่งอาจก่อปัญหาการแตกร้าวที่ผิวหน้าขึ้นได้ และกำหนดค่า CBR. ของดินซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 120 จากการทดลองพบว่า ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 จะให้ค่า UCS ที่เหมาะสม และการผสมไม่ควรทำข้ามวันเพราะความชื้นในอากาศจะทำให้ดินซีเมนต์เสียคุณภาพไป

Ng (1966) ทดลองนำดินลูกรังจากหัวหิน จันทบุรี และขอนแก่นมาผึ่งแห้งอากาศแล้วนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมซีเมนต์ พบว่าซีเมนต์สามารถปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังได้เป็นอย่างดี ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 4 ถึง 5 กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นในมวลดินและเพิ่มตามปริมาณซีเมนต์และเวลาการบ่ม กำลังจะลดลงมากเมื่อความหนาแน่นจากการบดอัดลดลง

Moh และคณะ (1967) ได้ทดลองดินลูกรังที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 10 เป็นจำนวน 6 แห่ง ในประเทศไทย ได้แก่ จันทบุรี หัวหิน ขอนแก่น เพชรบุรีและสระบุรี พบว่ามีค่า PI ประมาณ 11 ถึง 19 เมื่อนำมาผสมซีเมนต์ร้อยละ 4 ถึง 7 จะทำให้กำลังรับแรงอัดมากกว่า 250 psi ซึ่งเป็นข้อกำหนดของ British Road Research Laboratory ที่ได้ทำการทดลองในแอฟริกาแล้ว โดยค่า UCS สูงสุดจะเกิดขึ้นที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ OMC หรือมากกว่านั้นร้อยละ 2 ถ้าความหนาแน่นลดลงร้อยละ 5 จะทำให้กำลังอัดที่ 7 วัน และ 28 วัน ลดลงร้อยละ 25 และร้อยละ 40 ตามลำดับ การบ่มที่อายุ 1 วันจะทำให้กำลังอัดประมาณร้อยละ 60 ของกำลังอัดที่ 28 วัน และถ้าบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะเพิ่มอัตราการพัฒนากำลังและเพิ่มกำลังในระยะยาว นอกจากนี้ดินซีเมนต์ที่มีค่า UCS สูงกว่า 150 psi. อายุการบ่ม 7 วัน จะมีความคงทนต่อภาวะเปียกสลับกับแห้ง

Woo (1971) ได้ทดลองดินลูกรังในประเทศไทยตั้งแต่ Sad Loam (A-2-4) ถึง clay (A-7-5) ซึ่งมีค่า PI ในช่วง 9 ถึง 35 ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมกับซีเมนต์ พบว่า UCS จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น และปริมาณซีเมนต์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดแบบมาตรฐาน 250 psi.(17.5 ksc) จะอยู่ในช่วงร้อยละ 3 และ 7 ของน้ำหนักดินแห้งแห้ง โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักดินแห้งซึ่งใกล้เคียงกับงานก่อสร้างถนนดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่เคยสร้างในประเทศไทย

ทรงพล (2529) ทดลองนำดินลูกรังผสมซีเมนต์ มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ CBR. และค่า Initial Tangent Modulus(E_t) กับ CBR. โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 1, 3, 5 และ 7 โดยใช้อายุการบ่มเป็นเวลา 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงควรมีค่าร้อยละ 3 ขึ้นไป เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับอนุภาคดินจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดมากกว่าค่า Unsoaked CBR. และการเพิ่มพลังงานในการบดอัดจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

ธีระชาติ และ สุเชษฐ์ (2532) ได้ศึกษาโดยนำดินลูกรังกลุ่ม A-2-7 ในจังหวัดสกลนครมาผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 3, 4, 5, 6 และ 7 ของน้ำหนักดินแห้งแห้งพบว่า ดินลูกรังธรรมชาติเมื่อบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะมีค่า UCS เท่ากับ 7.69 ksc. และค่า Unsoaked CBR. เท่ากับ 67 โดยได้ค่า OMC ร้อยละ 11 และความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อผสมซีเมนต์ค่า OMC จะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด ความสัมพันธ์ของ UCS กับ CBR. จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เหมือนกันและขึ้นกับปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่ม เมื่อทดลองด้วยวิธี Wet and Dry จะมีค่าน้ำหนักสูญเสียมากในช่วง 7 วันแรก โดยให้เหตุผลว่าเป็นเพราะช่วงเวลาดังกล่าวปฏิกริยาไฮเดรชันยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์

ธีระชาติ และ ทรงพล (2534) ทดลองนำดินลูกรังประเภท A-2-7 ในจังหวัดสกลนคร ซึ่งมีค่าความเหนียวสูงผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 1, 3, 5 และ 7 ที่อายุการบ่มต่าง ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า UCS กับ Unsoaked CBR. พบว่า มีความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ทั้งตัวอย่างที่บดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน ทำให้สามารถทำนายค่า Unsoaked CBR. จากค่า UCS ได้ ยกเว้นแต่ปริมาณซีเมนต์ ร้อยละ 1 ซึ่งมีค่าต่ำ ในการวิเคราะห์และกำหนดค่าความสัมพันธ์อัตราการเพิ่มของ UCS และ CBR. ทุกอายุการบ่มจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนที่เท่า ๆ กัน เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น และค่า OMC ของดินลูกรังกับดินลูกรังผสมซีเมนต์มีค่าต่างกันไม่ถึงร้อยละ 1

ศุภกิจ และ อติมนต์ (2544) ได้ทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินลูกรังประเภท Silty Sand หรือ A-2-4 จากจังหวัดสระบุรีผสมกับซีเมนต์ร้อยละ 4 ถึง 7 บดอัดด้วยพลังงานสูงกว่ามาตรฐาน ในช่วงปริมาณความชื้นเท่ากับ $OMC \pm$ ร้อยละ 2 พบว่า ดินลูกรังจะมีกำลังสูงขึ้นมากเมื่อผสมซีเมนต์ โดยกำลังจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ในลักษณะที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และการบีบอัดจะเกิดขึ้นค่าความเค้นต่ำกว่าดินลูกรังที่ไม่ผสมซีเมนต์ โดยการบดอัดในด้านข้างจะให้กำลังสูงสุดสำหรับตัวอย่างที่ทดสอบโดยไม่แช่น้ำ แต่เมื่อดินซีเมนต์อยู่ในสภาพเปียกเป็นเวลานานพอสมควร กำลังจะลดลงมาก ซึ่งการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะช่วยให้ดินซีเมนต์มีกำลังที่ดี และกำลังไม่ลดลงมากนัก

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

ณัฏยาณี และ คุณากร(2549) ได้ดำเนินการศึกษาการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน โดยใช้แคลเซียมผสมลงในดินตัวอย่างในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 แล้วทดสอบ UCS พบว่า เมื่อดำเนินการผสมแคลเซียมร้อยละ 40 จะให้ค่าประมาณ 0.418 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่า Modulus of Elasticity มากที่สุดประมาณ 348.33 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

Okagbue and Yakubu (2000) ได้ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ หินปูนเหลือทิ้งจาก ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์แทนที่การใช้ปูนขาวเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังแบบ GW-GC พบว่าเมื่อผสมสารลงในดินจะทำให้ Liquid Limit Plastic Limit เพิ่มขึ้นส่วนค่า Plasticity Index ลดลง ค่า Shrinkage Limit ลดลงตามปริมาณของสารที่ใช้ จากการทดสอบการบดอัดดินพบว่าค่า Maximum Dry Density จะลดลงส่วนปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดจะสูงขึ้นในส่วน ของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน(CBR.) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นโค้งคว่ำที่ปริมาณสารผสมเพิ่มร้อยละ 6 โดยจะให้ค่า CBR. สูงที่สุดโดยมีค่า CBR. แบบ Unsoaked เท่ากับ 90% และแบบ Soaked เท่ากับ 70% ในส่วนของการทดสอบ Unconsolidation Undrain Triaxial test พบว่าปริมาณผสมสารเพิ่มขึ้น ค่า Cohesion จะเพิ่มขึ้น ส่วนค่า Angle of Shearing resistance จะมีค่าลดลงตามปริมาณสารที่ เพิ่มขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้วัสดุอื่นๆ

ธาดา และ เสวต (2548) ศึกษาการนำฝุ่นตะกอนหลักที่เป็นเศษเหลือจากการถลุงเหล็กมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง โดยใช้ดินลูกรังจากจังหวัดชลบุรี ผสมฝุ่นตะกอนหลักอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของดิน พบว่าเมื่อนำฝุ่นตะกอนหลัก ผสมลงไปในตัวอย่างดิน ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรืออาจพออนุมานได้ว่าไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับการทดสอบ UCS พบว่าค่า (S_u) ของดินลูกรังผสมฝุ่นตะกอนหลักจะมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนผสมต่างๆ คือร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยจะมีค่า S_u มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 36.751 ตันต่อตารางเมตร ค่า CBR. ของดินลูกรังผสมฝุ่นตะกอนหลัก จะมีค่าร้อยละ CBR. เพิ่มขึ้นโดยจะมีค่าร้อยละ CBR. มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ผู้วิจัยยังได้สรุปอีกว่าเนื่องจากฝุ่นตะกอนมีความแข็งกว่าเม็ดดินลูกรังจึงทำให้รับแรงหรือน้ำหนักบรรทุกได้ดีกว่าดินลูกรังไม่ผสมฝุ่นตะกอนหลัก

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

กรวิศว์ และคณะ (2546) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลท์คอนกรีตเก่าผสมลูกรัง โดยได้นำเอาแอสฟัลท์คอนกรีตเก่าจากถนนสาย วังน้อย-อยุธยา มาผสมกับลูกรังในอัตราส่วน 15, 30, 45, 60, 75 และ 90% โดยน้ำหนักของดินแห้ง และทำการทดสอบ Unconfined Compression Test และ CBR. พบว่า แอสฟัลท์คอนกรีตเก่าผสมลูกรัง 90% จะให้ค่า UCS มากกว่า 8 ksc. ซึ่งสามารถใช้เป็นชั้นรองพื้นทางได้ ส่วนค่า CBR. ของแอสฟัลท์เก่าผสมลูกรัง 90% จะให้ค่า

Soaked CBR. เท่ากับ 70 ทั้งนี้ในการศึกษาพบว่าจำเป็นต้องใช้ปริมาณลูกรังที่ใช้ค่อนข้างสูง เพราะในผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตเก่ามียางมะตอยผสมอยู่

จุฑามาศ และ บุญมา (2547) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังและดินเหนียวด้วยโพลีเมอร์และซีเมนต์ โดยทดสอบ UCS พบว่า การผสมโพลีเมอร์และซีเมนต์ ลงในดินลูกรังและดินเหนียวช่วยให้ลดน้ำหนักของดิน แต่การรับกำลังต้านทานแรงเฉือนน้อยกว่าดินเหนียวและดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ผสมโพลีเมอร์ ส่วนผลการทดสอบกำลังแรงดึงโดยทางอ้อม (Indirect Tensile Test) พบว่าการผสมโพลีเมอร์ที่ 0%, 0.1%, 0.2% และ 0.3% มีการรับกำลังอัดต้านทานแรงเฉือนได้ดีที่สุด ปัญหาที่พบในการทดสอบ คือ การผสมโพลีเมอร์ให้เข้ากันกับดินและซีเมนต์ทำได้ยาก เนื่องจากโพลีเมอร์น้ำหนักเบาเกิดการฟุ้งกระจาย ผู้วิจัยยังให้ข้อเสนอว่าหากต้องนำไปใช้ในงานจริงควรมีการออกแบบเครื่องป้องกัน การฟุ้งกระจายของส่วนผสมให้เหมาะสมต่อไป

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 อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี
2. เถ้าหนักที่ใช้ในการผสมดินลูกรังได้มาจากการเผาถ่านหิน จากบริษัท BLCP POWER นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
3. น้ำ ที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำประปา

วิธีการ

ขั้นตอนการวิจัย

1. เก็บตัวอย่างดินและทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินธรรมชาติ ได้แก่
 - 1.1 Natural Water Content (ASTM D 2216-92)
 - 1.2 การกระจายขนาดของเม็ดดิน (ASTM D 422-63)
 - 1.3 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (ASTM D 854-98)
 - 1.4 Atterberg 's Limits Test (ASTM D 2216-80 , D 4318-98)
 - 1.5 จำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification (ASTM D2487-69)
 - 1.6 ความสึกกร่อนของเม็ดดิน (ASTM D 131-96)
2. เตรียมตัวอย่างดินลูกรังโดยร่อนแยกขนาดของดินธรรมชาติออกเป็นแต่ละขนาดตามต้องการเพื่อนำกลับมาผสมกันใหม่ให้ได้ตามมาตรฐานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง
3. ผสมเข้าหนักลงไปดินที่เตรียมไว้ในข้อที่ 2 ในอัตราส่วนส่วนผสมเข้ากันเตาต่อดิน ร้อยละ 5, 10, 15, 20 ของน้ำหนักดินแห้ง โดยเพิ่มไปเรื่อยๆร้อยละ 5 ต่อครั้ง จนกว่าจะได้ค่าความหนาแน่นแห้งที่สูงที่สุด
4. ทดสอบหาค่า Liquid Limit และ Plastic Limit ทันทีหลังผสมและดินอีกส่วนหนึ่งค่อยๆพรมน้ำจนมีความชื้นที่เหมาะสม บ่มจนครบอายุ 3 , 7 ,14 และ 28วัน แล้วจึงนำไปทดสอบหาค่า Liquid Limit และ Plastic Limit เปรียบเทียบกับดินลูกรังกลุ่มเดียวกันที่ไม่ได้ผสมเข้ากันเตา
6. ทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม
7. ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยวิธี California Bearing Ratio แบบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของตัวอย่างดินลูกรังและดินลูกรังผสมเข้ากันเตาซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

เท่านั้น โดยตัวอย่างดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาจะทำการทดสอบที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ

8. ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของตัวอย่างดินลูกรังและดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาซึ่งบดอัดแล้ว โดยทดสอบเฉพาะที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น โดยตัวอย่างดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตานี้จะทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

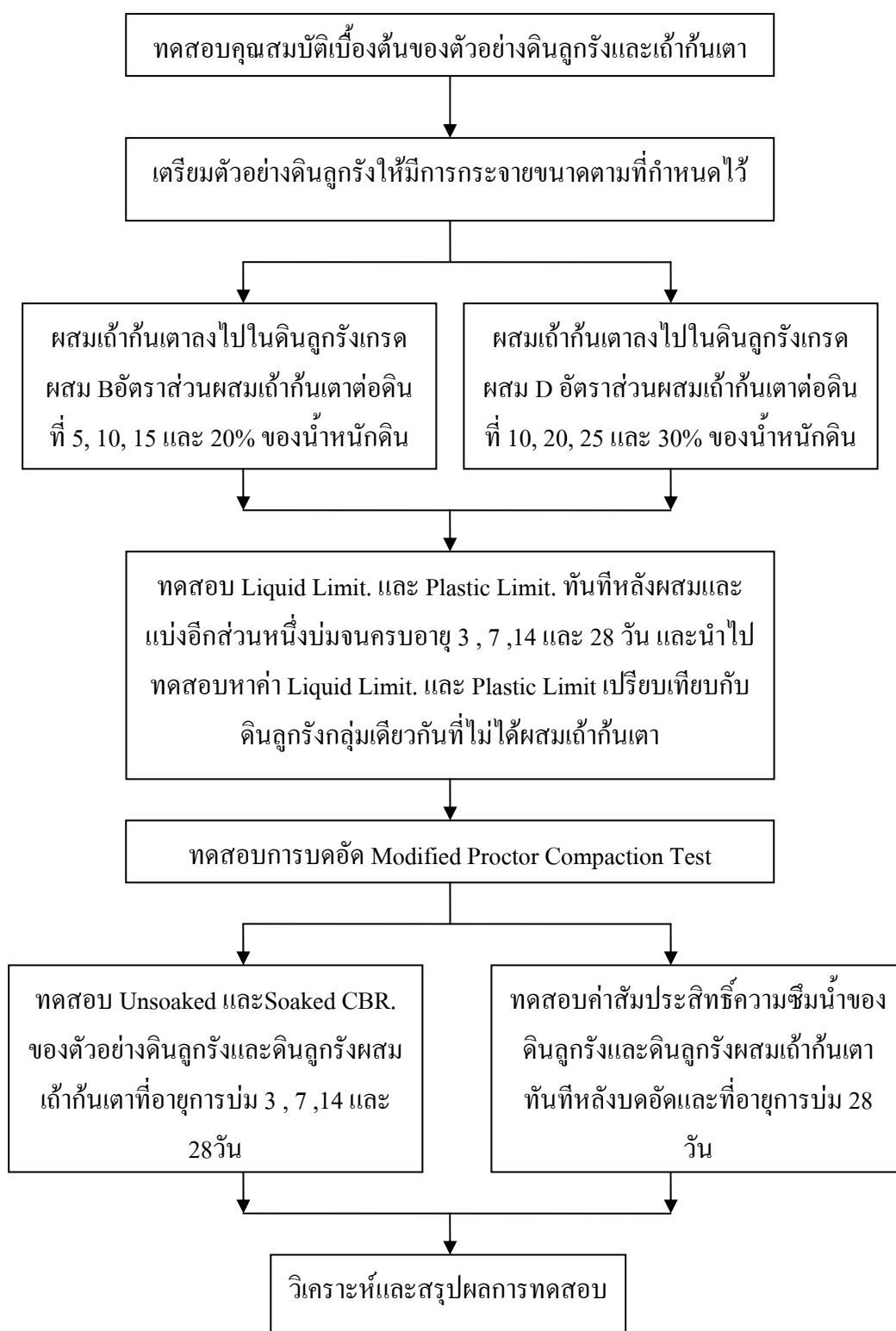
9. ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลาในการทำวิจัย

เริ่มเตรียมตัวอย่างดินและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งทำการทดสอบ ตั้งแต่เดือนมกราคม 2551 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2552



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างและการเรียกชื่อตัวอย่างดิน

1. นำดินลูกรังที่ได้มาทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด $3/4''$, $3/8''$, #10, #40 และ #200 นำดินที่ค้างตะแกรงแต่ละเบอร์มาเก็บไว้เพื่อใช้ผสมเตรียมตัวอย่างอีกครั้ง
2. นำดินที่แบ่งไว้จากข้อ 1 มาเตรียมดินในเกรดผสม B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยให้มีการกระจายขนาดของเม็ดดินและการจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification System ตามภาพที่ 3 และตารางที่ 7
3. นำดินที่เตรียมไว้มาทำให้มีสภาพแห้งในอากาศเพื่อจำลองสภาพให้เหมือนการบดอัดในสนาม

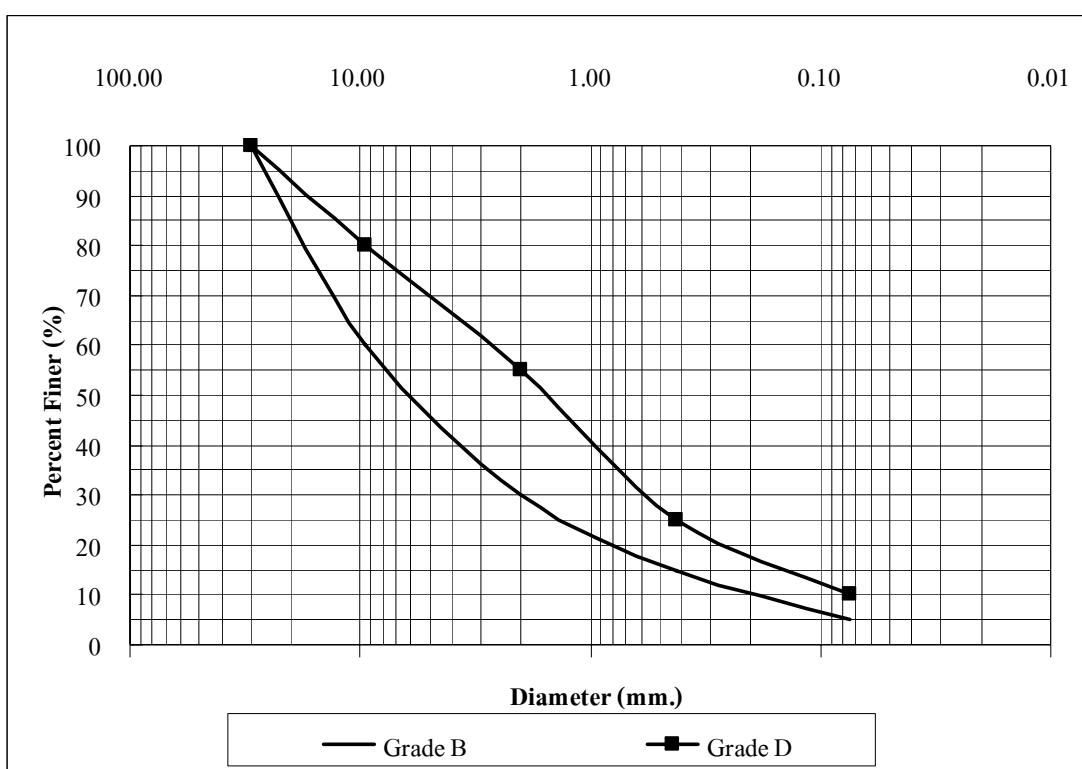
สำหรับการเรียกชื่อตัวอย่างดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตานั้น มีวิธีการเรียกชื่อดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6 สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกและบ่งบอกดินตัวอย่าง และผลการทดสอบต่างๆ มีดังนี้

สัญลักษณ์	ความหมาย
B_0%	ดินลูกรังเกรดผสม B ไม่ผสมเถ้าก้นเตา
B_5%	ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตา 5%
B_10%	ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตา 10%
B_15%	ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตา 15%
B_20%	ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตา 20%
D_0%	ดินลูกรังเกรดผสม D ไม่ผสมเถ้าก้นเตา
D_10%	ดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตา 10%
D_20%	ดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตา 20%
D_25%	ดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตา 25%
D_30%	ดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตา 30%
BA	เถ้าก้นเตา
ZAV	Zero air void curve (เส้นแสดงปริมาณอากาศเป็นศูนย์)

ตารางที่ 6 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
Un	การทดสอบ CBR, แบบไม่แช่น้ำ
So	การทดสอบ CBR, แบบแช่น้ำ



ภาพที่ 3 การกระจายขนาดของเม็ดดินแต่ละเกรดที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 7 การกระจายขนาดของเม็ดดินที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดช่องตะแกรง	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรง %	
	B	D
3/4" (19.0 มม.)	100	100
3/8" (9.5 มม.)	60	80
No.10 (2.00 มม.)	30	55
No.40 (0.425 มม.)	15	25
No.200 (0.075 มม.)	5	10

ผลและวิจารณ์

คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินธรรมชาติ

ตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้จากการสุ่มตัวอย่างดินจากบ่อลูกรังใน อำเภอกำมะนา จังหวัดกาฬสินธุ์ จากการศึกษาดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบพบว่าดินลูกรังส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลแดงอิฐ เมื่อดินธรรมชาติมีรูปร่างค่อนข้างเป็นเหลี่ยมและมีปริมาณของดินเม็ดละเอียดปนค่อนข้างมากพิจารณาจากลักษณะเม็ดดินที่มีดินเหนียวปน จากการสุ่มตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ผลดังนี้

1. ผลการทดสอบ Atterberg's Limits มีดังนี้

1.1 Natural Moisture Content มีค่าอยู่ระหว่าง 3.42 - 4.50%

1.2 Liquid Limit มีค่าอยู่ระหว่าง 31.05 – 36.39%

1.3 Plastic Limit มีค่าอยู่ระหว่าง 16.41 – 21.80%

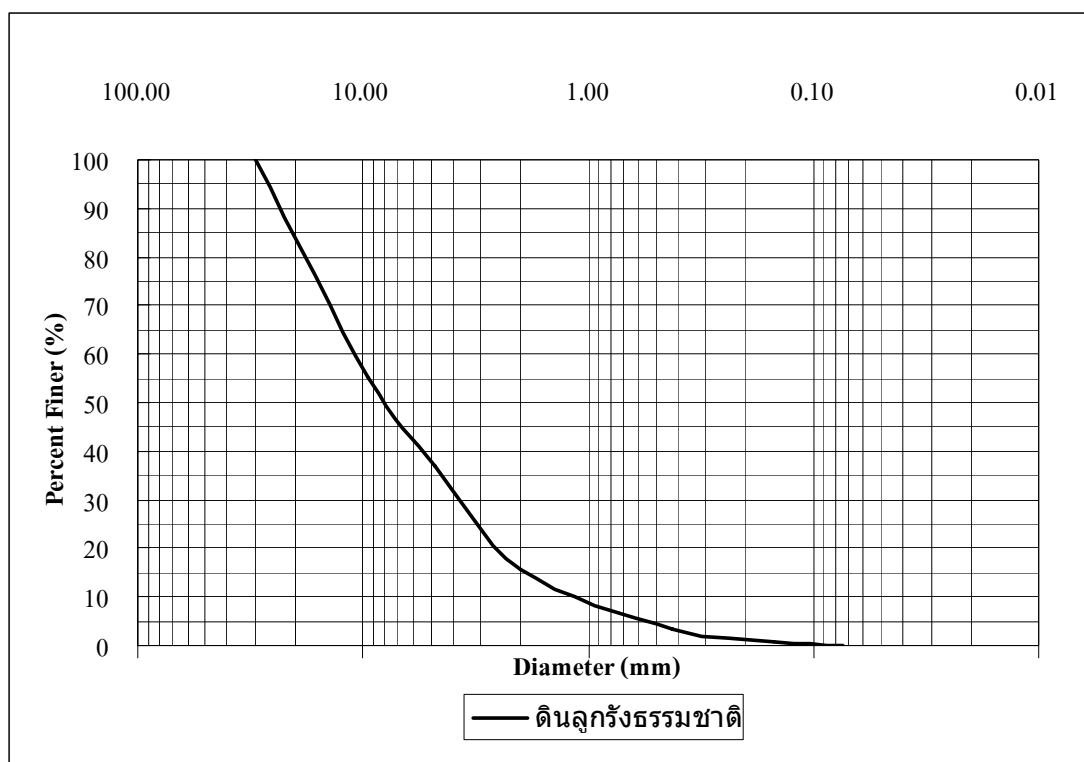
1.4 Plasticity Index มีค่าอยู่ระหว่าง 11.11 – 19.98%

2. ความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังมีค่าอยู่ระหว่าง 2.79 – 2.81

3. ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดินได้แสดงไว้ดังภาพที่ 4 ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของเม็ดดินเป็นแบบมีขนาดคละกันดี (Well-graded)

4. การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification และ AASHTO พบว่าตัวอย่างดินลูกรังจัดอยู่ในกลุ่ม GW-GC และ A-1a(0)

5. จากการทดสอบการสึกกร่อนโดยวิธี Los Angeles Abrasion Test พบว่าตัวอย่างดินลูกรังมีเปอร์เซ็นต์ความสึกกร่อน เท่ากับ 22.76 %

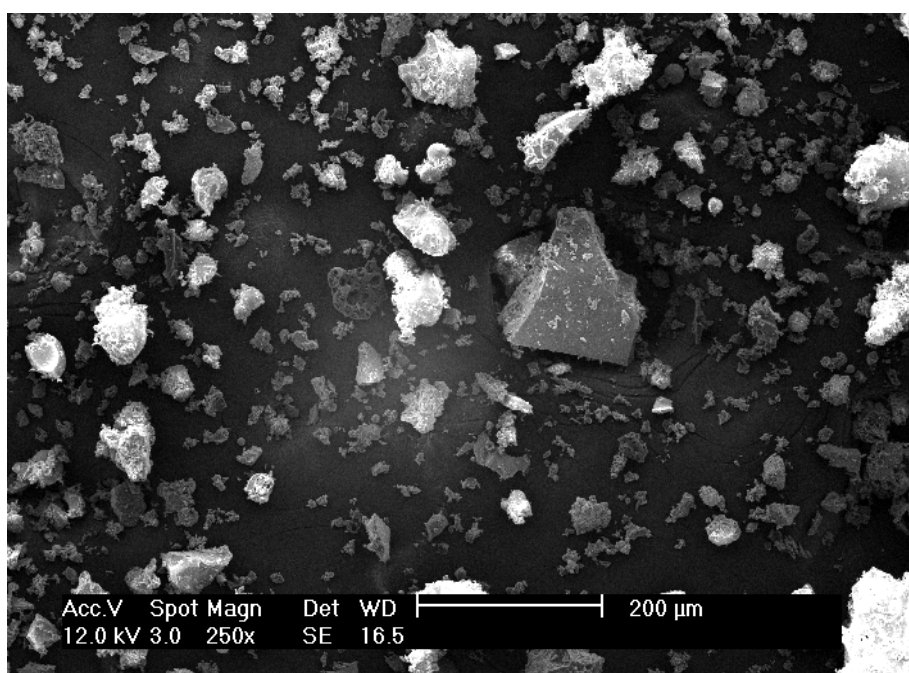


ภาพที่ 4 การกระจายขนาดของเมล็ดดินของตัวอย่างดินลูกรังที่เก็บมาจากสนาม

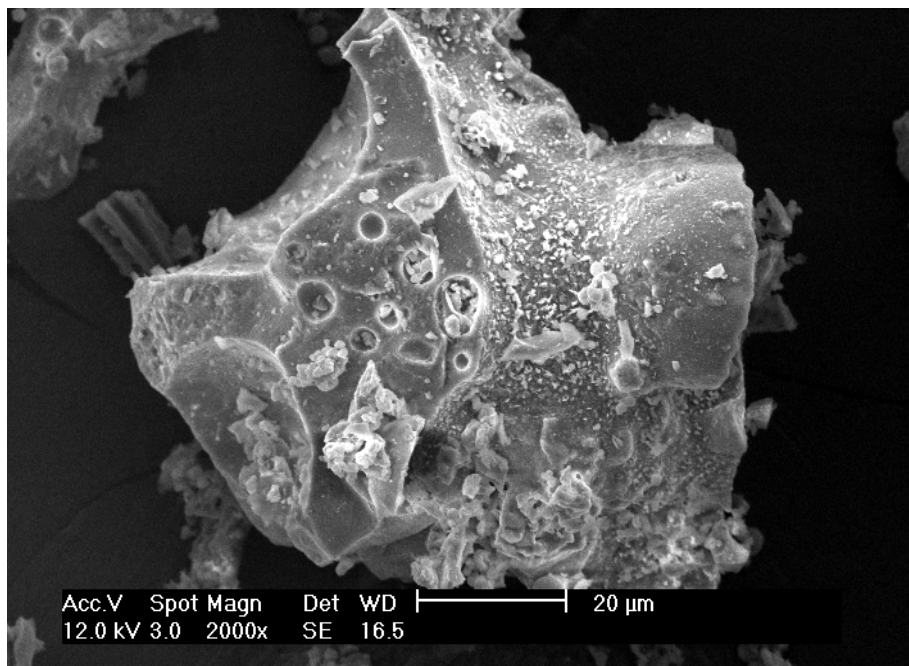
คุณสมบัติของถ้ำก้นเตา

คุณสมบัติทางด้านกายภาพของถ้ำก้นเตา

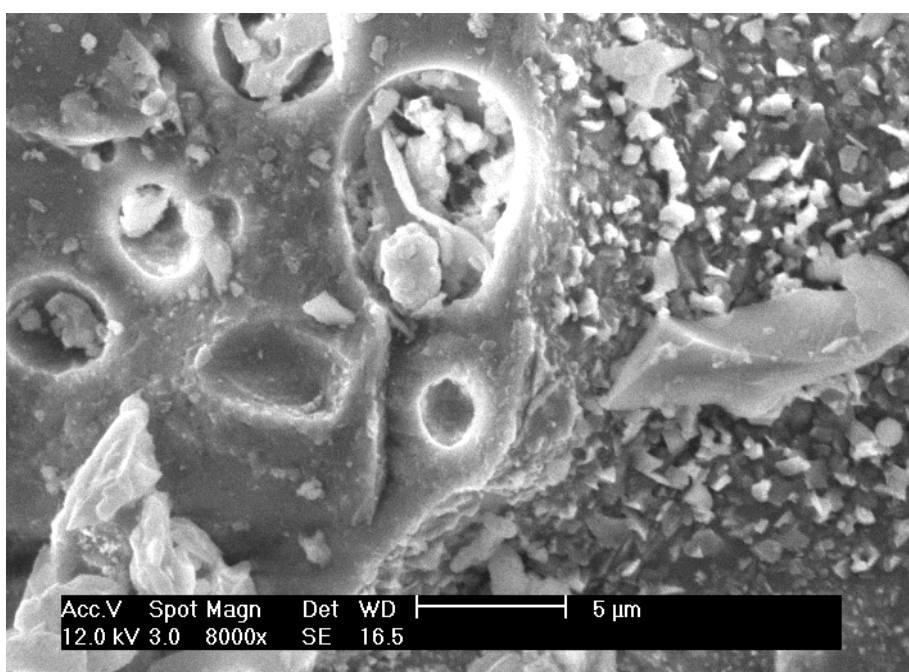
ถ้ำก้นเตาที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นถ้ำก้นเตาหินปูนที่ไม่ได้ปรับปรุงความละเอียดจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด มีลักษณะคล้ายกับทราย มีสีเทาถึงดำ หรือสีน้ำตาล อนุภาคของถ้ำก้นเตานั้นมีขนาดแตกต่าง และฟุ้งกระจายได้ง่าย จากตัวอย่างภาพถ่ายถ้ำก้นเตาจากการใช้เครื่อง scanning electron microscope ตรวจสอบที่กำลังขยายแตกต่างกัน จะพบว่าอนุภาคของถ้ำก้นเตานั้นมีขนาดที่แตกต่าง และรูปร่างที่แตกต่างกันไปโดยจะมีลักษณะพื้นผิวทั้งที่เรียบและที่เป็นเป็นแบบขรุขระและมีลักษณะความเป็นเหลี่ยมคม ที่มุมของอนุภาค ตัวอย่างภาพถ่ายถ้ำก้นเตาจากการใช้เครื่อง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5-7



ภาพที่ 5 การกระจายตัวและขนาดของอนุภาคถ้ำก้นเตา

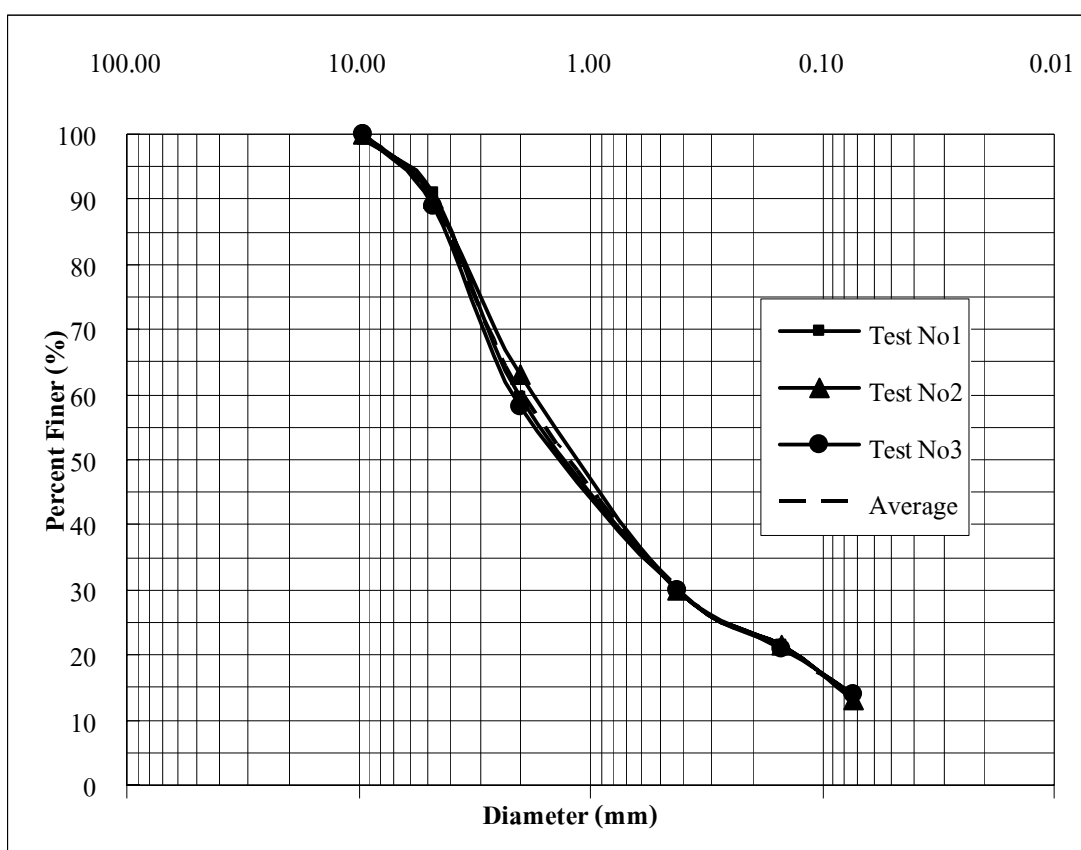


ภาพที่ 6 ขนาดและลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของเถ้านันเตา



ภาพที่ 7 ลักษณะพื้นผิวอนุภาคของเถ้านันเตา

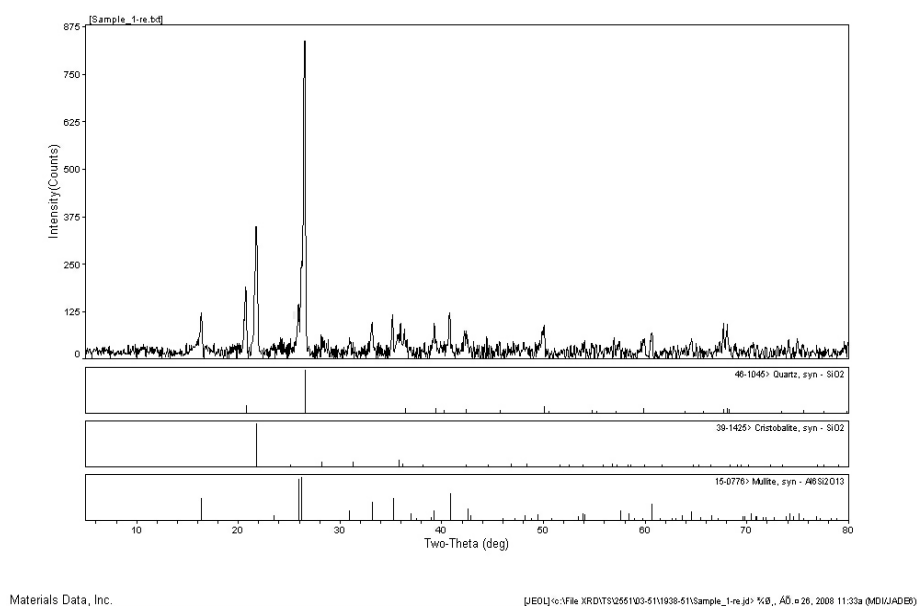
ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเถ้าก้นเตาได้แสดงไว้ดังภาพที่ 8 ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของเถ้าก้นเตาเป็นแบบมีขนาดกะทัดรัด (Well-graded) การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification และ AASHTO พบว่าตัวอย่างเถ้าก้นเตาอยู่ในกลุ่ม SW และ A-3



ภาพที่ 8 การกระจายขนาดของเถ้าก้นเตาที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติทางด้านเคมีของเถ้าก้นเตา

จากผลการวิเคราะห์พบว่า กราฟ XRD ของเถ้าก้นเตาที่ได้มีองค์ประกอบของสารหลายชนิด ซึ่งเมื่อเทียบกับกราฟของสารมาตรฐานคาดว่า เถ้าก้นเตานี้มีองค์ประกอบของสารประเภทซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ quartz, cristobalite และ mullite และเมื่อพิจารณาจากรูปแบบของเส้นกราฟตามภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่าสารที่เป็นองค์ประกอบของเถ้าก้นเตานี้มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นผลึก ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของระนาบผลึกที่มีความเป็นระเบียบ



ภาพที่ 9 กราฟระหว่าง intensity และ theta จากการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง XRD

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของโลหะในเถ้าลอยด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer แสดงไว้ดังตารางที่ 8 พบว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าลอยได้แก่ ซิลิกา ออกไซด์มีค่าร้อยละ 28.96, อลูมินาออกไซด์มีค่าร้อยละ 12.01, เฟอริกออกไซด์มีค่าร้อยละ 3.74 และแคลเซียมออกไซด์มีค่าร้อยละ 1.22 เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเถ้าก้นเตากับประเภทของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าเถ้าก้นเตาที่ใช้ในการทดสอบนี้มีคุณสมบัติทางเคมีไม่ผ่านข้อกำหนดของการแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยในทุกชั้นมาตรฐาน เนื่องจากมีผลรวมของซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์ และเฟอริกออกไซด์ น้อยกว่าร้อยละ 50 และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ น้อยกว่าร้อยละ 10

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของโลหะในเถ้าก้นเตา

Bottom ash	Composition(%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
	28.96	12.01	3.74	1.22	0.66	0.10	0.15

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรดผสม B, D และเถ้าก้นเตา

คุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ซึ่งผลการทดสอบต่างๆ ได้แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบ Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรดผสม B, D และเถ้าก้นเตา

กลุ่มดิน	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

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังเกรดผสม B, D และเถ้าก้นเตา

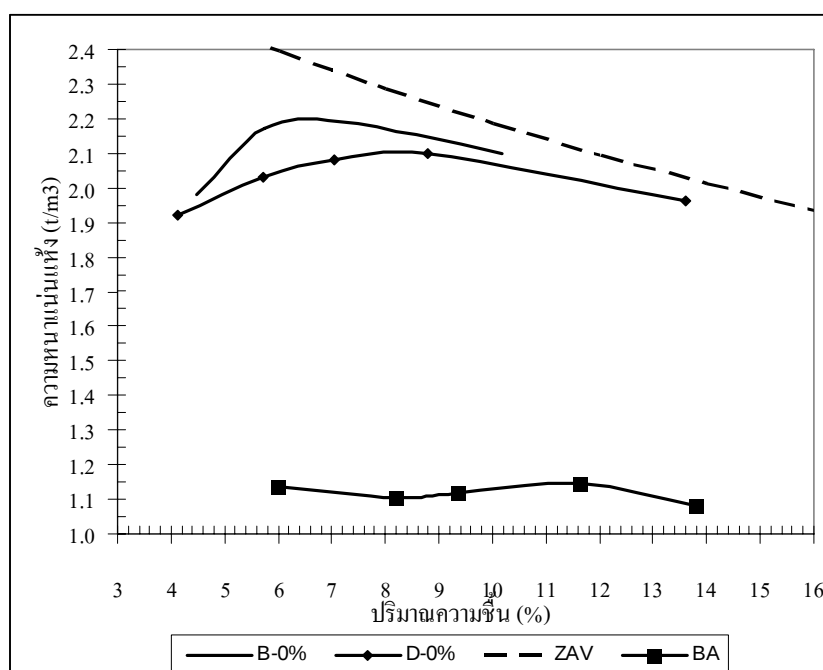
คุณสมบัติด้านการบดอัด

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังกลุ่มเกรดผสม B และเกรดผสม D ที่เตรียมขึ้น โดยการบดอัดด้วย Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว ใช้พลังงานในการบดอัดประมาณ 56000 ปอนด์-ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.-ft./ft.³) แสดงไว้ดังตารางที่ 10 และภาพที่ 10 จากผลการศึกษาพบว่าดินลูกรังเกรดผสม B เกรดผสม D และเถ้าก้นเตา มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ประมาณ 2.20, 2.10 และ 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร (t/m.³) ตามลำดับ ในส่วนของปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) พบว่าดินลูกรังเกรดผสม B เกรดผสม D และเถ้าก้นเตามีปริมาณความชื้นเหมาะสม เท่ากับ 6.4, 8.2 และ 11.4% ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาพิจารณาพบว่าที่ดินลูกรังเกรดผสม B ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดรองลงมาก็ที่ดินลูกรังเกรดผสม D และเถ้าก้นเตาตามลำดับ ในส่วนของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมพบว่าดินลูกรังในกลุ่มเกรดผสม B จะมีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมน้อยที่สุด และในดินลูกรังเกรดผสม D และเถ้าก้นเตาจะมีค่า

ความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะดินลูกรังเกรด B มีปริมาณของกรวดมากแต่มีปริมาณส่วนดินเม็ดละเอียดน้อยทำให้มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดสูงแต่ปริมาณความชื้นเหมาะสมต่ำและในกลุ่มอื่นๆจะมีปริมาณกรวดน้อยลงแต่มีปริมาณส่วนของดินเม็ดละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงแต่ปริมาณความชื้นเหมาะสมกลับสูงขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรดผสม B, D และ ถ้ำก้นเตา

กลุ่มดิน	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	ปริมาณความชื้นเหมาะสม (%)
เกรดผสม B	2.23	6.8
เกรดผสม D	2.13	7.7
ถ้ำก้นเตา	1.15	11.4



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรดผสม B, D และถ้ำก้นเตา

คุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังของดินลูกรังโดยการทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของลูกรังเกรดผสม B และ D ที่เตรียมขึ้นแสดงไว้ดังตารางที่ 11 จากผลการทดสอบพบว่า ดินลูกรังเกรดผสม B จะให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. สูงที่สุดรองลงมาคือลูกรังเกรดผสม D และต่ำกว่าดินตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการบดอัดและลักษณะการกระจายขนาดของเม็ดดินที่มีปริมาณขนาดเม็ดกรวดและทรายผสมอยู่เป็นปริมาณมาก ส่งผลให้ได้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. สูงกว่าดินกลุ่มอื่นๆ

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรดผสม B เกรดผสม D และต่ำกว่า

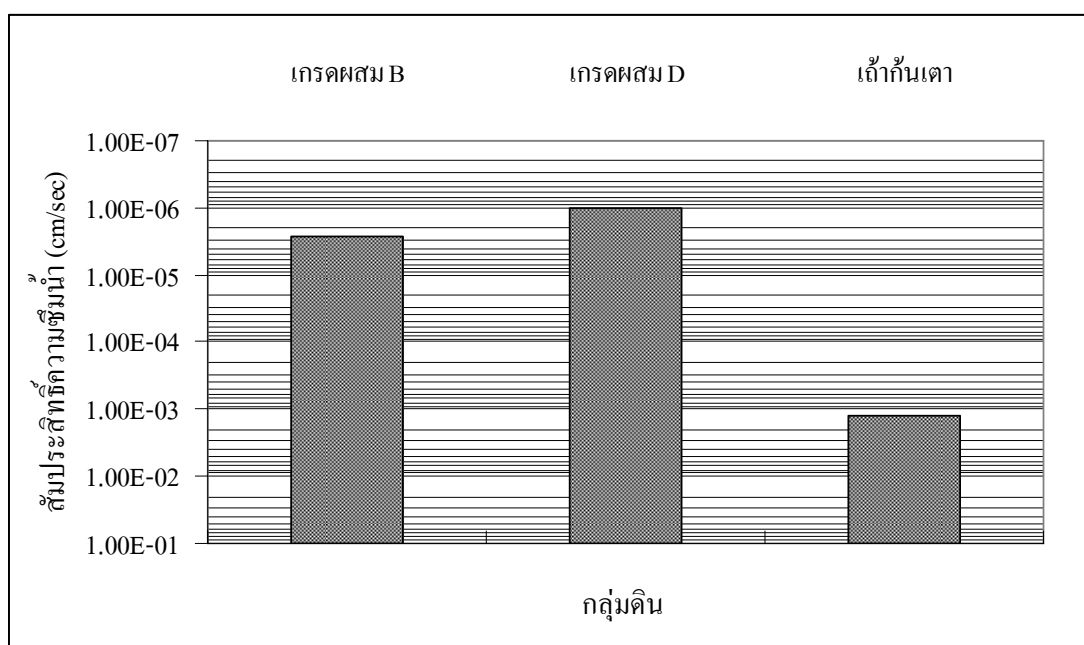
กลุ่มดิน	California Bearing Ratio (CBR.), (%)	
	Unsoaked	Soaked
เกรดผสม B	59	47
เกรดผสม D	48	29
ต่ำกว่า	45	36

คุณสมบัติทางด้านการซึมน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการซึมน้ำของดินลูกรังในกลุ่มเกรด B, และ D ซึ่งทดสอบโดยวิธี Constant Head แบบใช้ความดันเข้าช่วย โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังกลุ่มต่างๆดังแสดงในตารางที่ 12 และภาพที่ 11 พบว่า ดินลูกรังในกลุ่มเกรดผสม B จะมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำสูงสุด ในขณะที่ดินลูกรังกลุ่มเกรดผสม D และต่ำกว่าจะมีค่าลดลงตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำเฉลี่ยของดินลูกรังเกรดผสม B มีค่าสูงกว่าดินลูกรังเกรดผสม D อยู่ประมาณ 2.7 เท่า และต่ำกว่ามีความซึมน้ำสูงที่สุด

ตารางที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรดผสม B, D และถ้ำกั้นเตา

กลุ่มดิน	สัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ(cm./sec.)
เกรดผสม B	2.70E-06
เกรดผสม D	9.93E-07
ถ้ำกั้นเตา	1.27E-03



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินกลุ่มต่างๆ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ผสมถ้ำกั้นเตา

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ที่เตรียมขึ้นผสมถ้ำกั้นเตาในอัตราส่วน 10, 20% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยพิจารณาจากค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังผสมถ้ำกั้นเตา โดยการศึกษาจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ประเด็นคือ 1. พิจารณาอิทธิพลของปริมาณถ้ำกั้นเตาต่อค่า Liquid Limit,

Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาโดยทดสอบทันทีหลังผสม และ 2. อิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาเปรียบเทียบกับดินลูกรังที่ไม่ได้ผสมเถ้าก้นเตา

อิทธิพลของปริมาณเถ้าก้นเตาต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index แสดงไว้ดังตารางที่ 12-13 และ ภาพที่ 12-13 จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตามากขึ้นจะทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย โดยทั้งดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตาค่า Liquid Limit มีค่าลดลงประมาณ 1-4% ในขณะที่ค่า Plastic Limit ในดินลูกรังเกรดผสม B มีแนวโน้มคงที่ ส่วนในดินลูกรังเกรดผสม D มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1-2% ส่งผลทำให้ค่า Plasticity Index มีแนวโน้มลดลงโดยดินลูกรังเกรดผสม B มีค่า Plasticity Index ลดลงประมาณ 1-4% ส่วนดินลูกรังเกรดผสม D มีค่าลดลงประมาณ 2-6% ดังนั้นจากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตามากขึ้นจะส่งผลทำให้ดินลูกรังมีค่าความเหนียวลดลง

เมื่อพิจารณาถึงผลของอายุการบ่มของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาโดยเปรียบเทียบค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาในกลุ่มเดียวกัน ทดสอบทันทีหลังผสมและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงไว้ดังภาพที่ 12-13 พบว่าค่า Liquid Limit ของดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D มีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่ค่า Plastic Limit มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยทั้งในดินลูกรังเกรดผสม B และ D โดย มีค่าลดลงประมาณ 0-2%

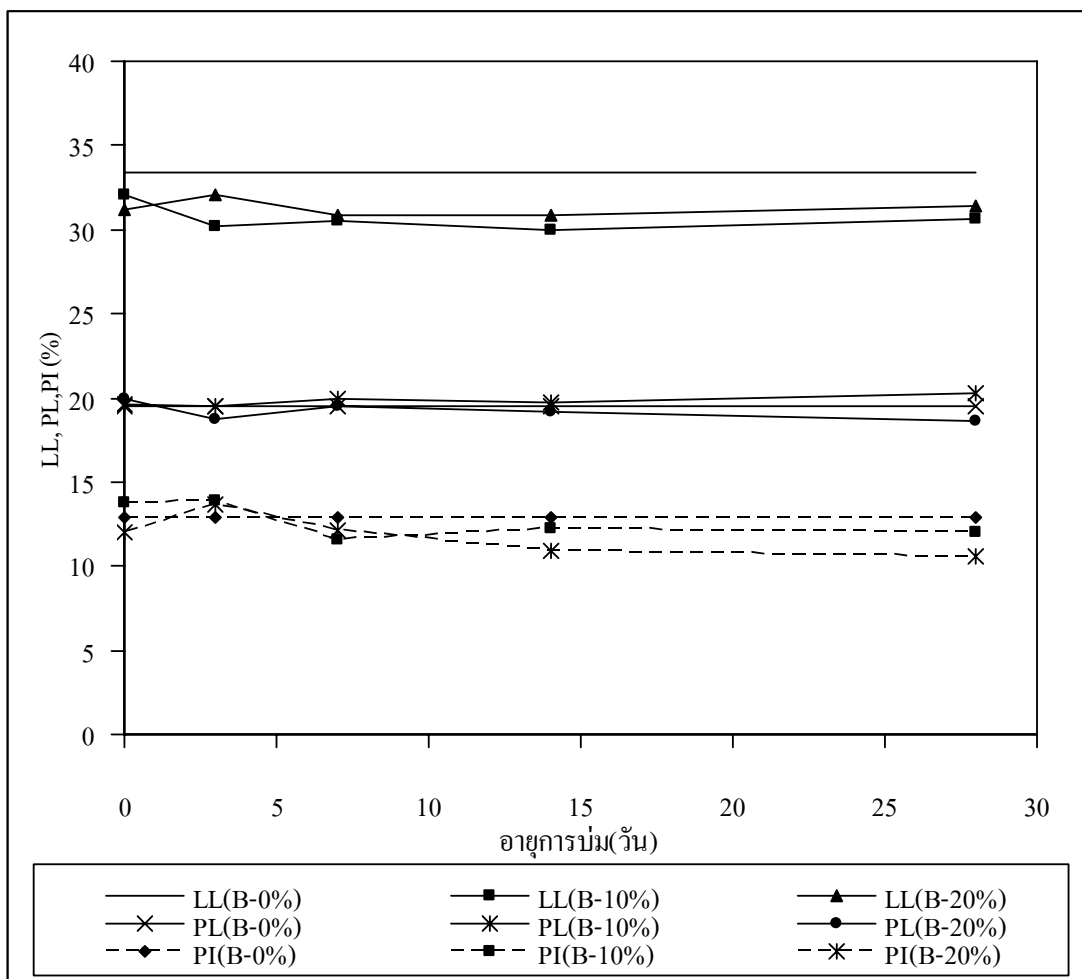
สาเหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเด็นคือ 1. เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่ไม่มีความเหนียว (Non-Plasticity) เมื่อนำมาผสมลงดินจึงทำให้ความเหนียวของดินลดลงและ 2. เกิดการแลกเปลี่ยนประจุและการจับตัวกันของเม็ดดิน (Cation Exchange and Flocculation) ทำให้อนุภาคดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น และ Plasticity Index ลดลง โครงสร้างของดินจะมีความมั่นคงขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่าประเด็นที่ 1 คือสาเหตุหลักที่ทำให้ความเหนียวของดินลดลง

ตารางที่ 13 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรดผสม B ผสม
เถ้าก้นเตา

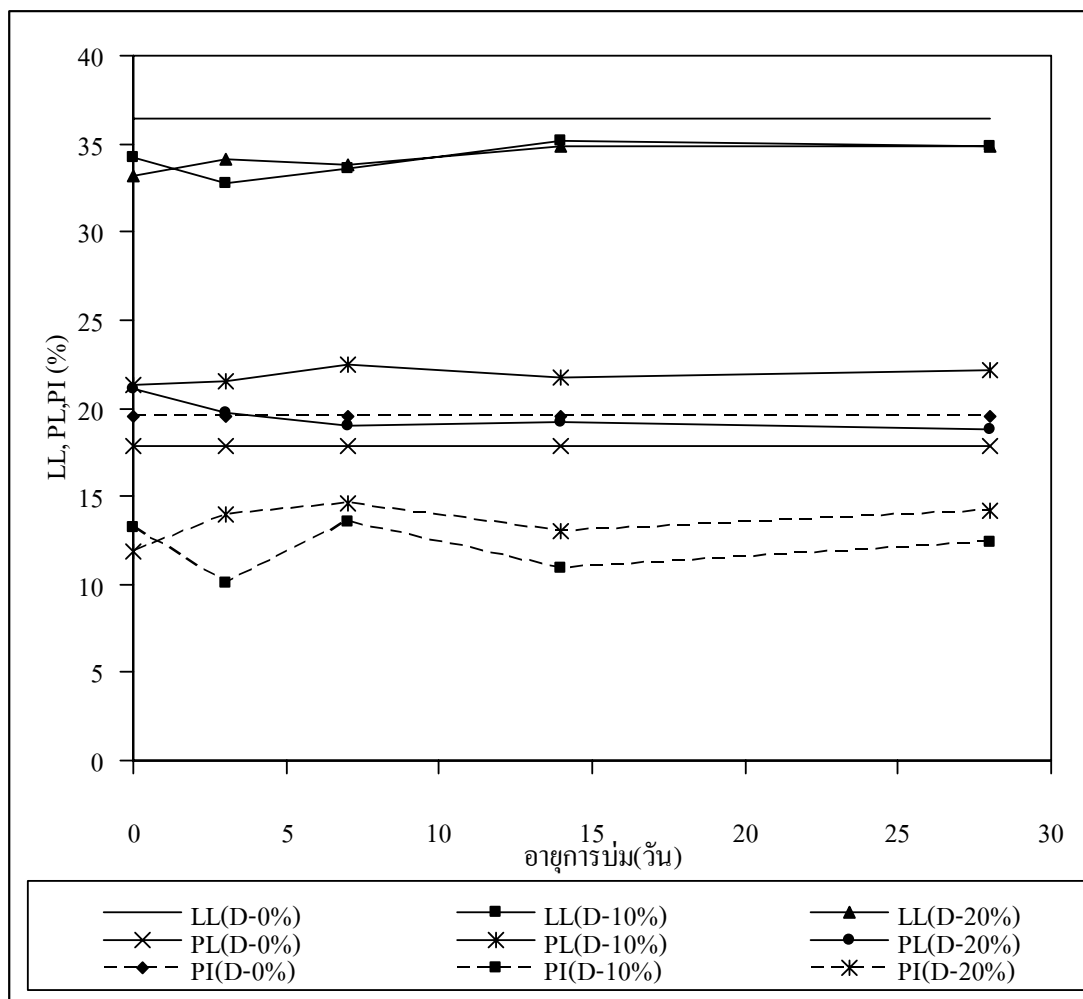
ปริมาณเถ้าก้นเตา	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังผสม	3	7	14	28
Liquid Limit					
10	32.07	30.15	30.53	29.97	30.58
20	31.21	32.10	30.74	30.87	31.43
Plastic Limit					
10	19.61	19.49	19.89	20.25	19.76
20	19.93	18.75	19.47	19.21	18.65
Plasticity Index					
10	13.77	13.89	11.57	12.23	11.97
20	11.97	13.71	12.08	10.89	10.59

ตารางที่ 14 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรดผสม D ผสม
เถ้าก้นเตา

ปริมาณเถ้าก้นเตา	อายุการบ่ม (วัน)				
	หลังผสม	3	7	14	28
Liquid Limit					
10	34.22	32.80	33.62	35.19	34.84
20	33.22	34.07	33.79	34.88	33.54
Plastic Limit					
10	21.32	21.56	22.43	21.78	22.20
20	21.06	19.76	18.96	19.21	18.78
Plasticity Index					
10	13.18	10.10	13.56	10.95	12.36
20	11.84	14.01	14.63	13.07	14.17



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณ
 เถ้าก้นเตาและอายุการบ่มของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาในเกรดผสม B



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณ
 เถ้าก้นเตาและอายุการบ่มของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาในเกรดผสม D

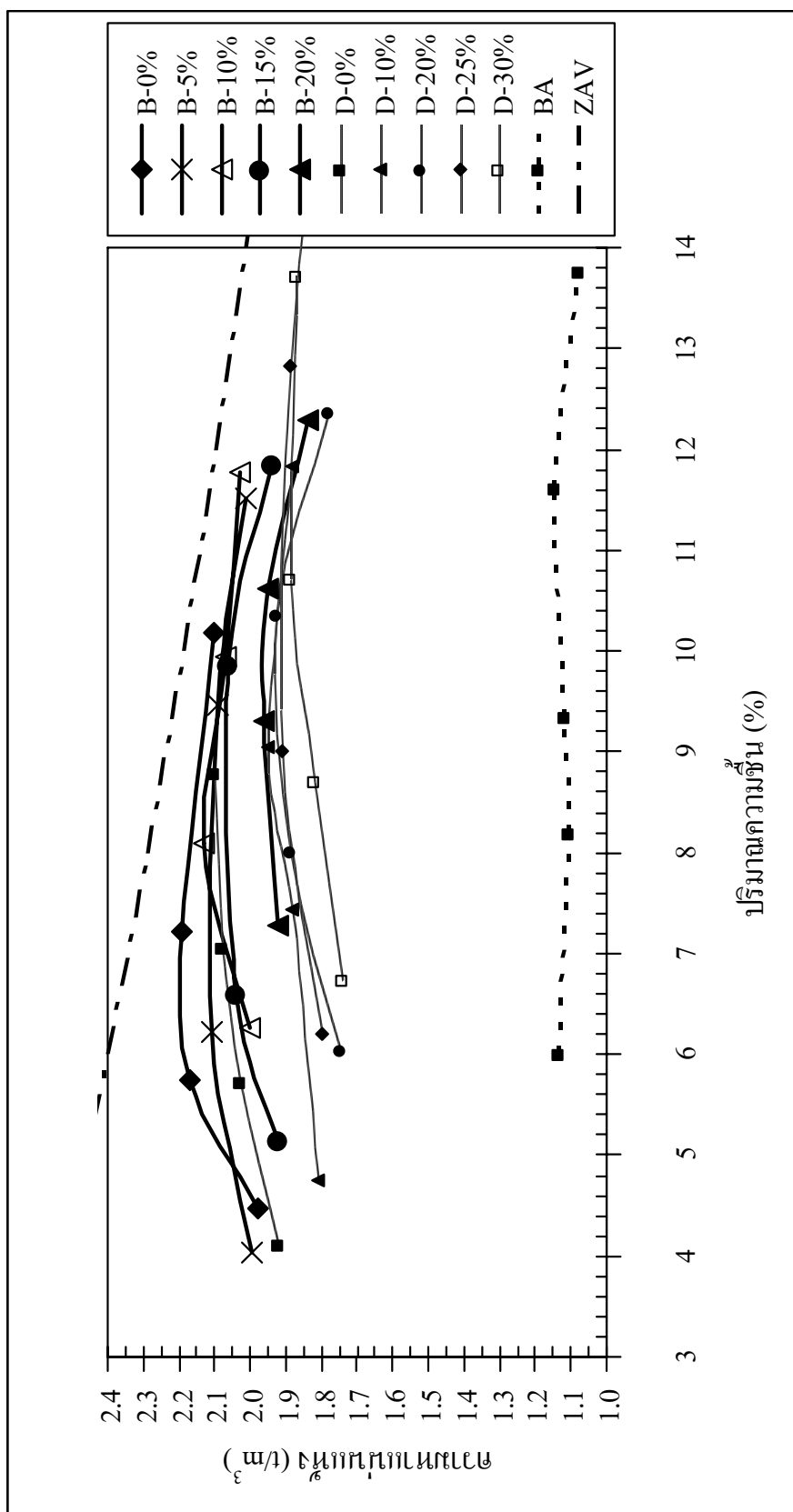
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D ผสมเถ้ากันเตา

คุณสมบัติด้านการบดอัด

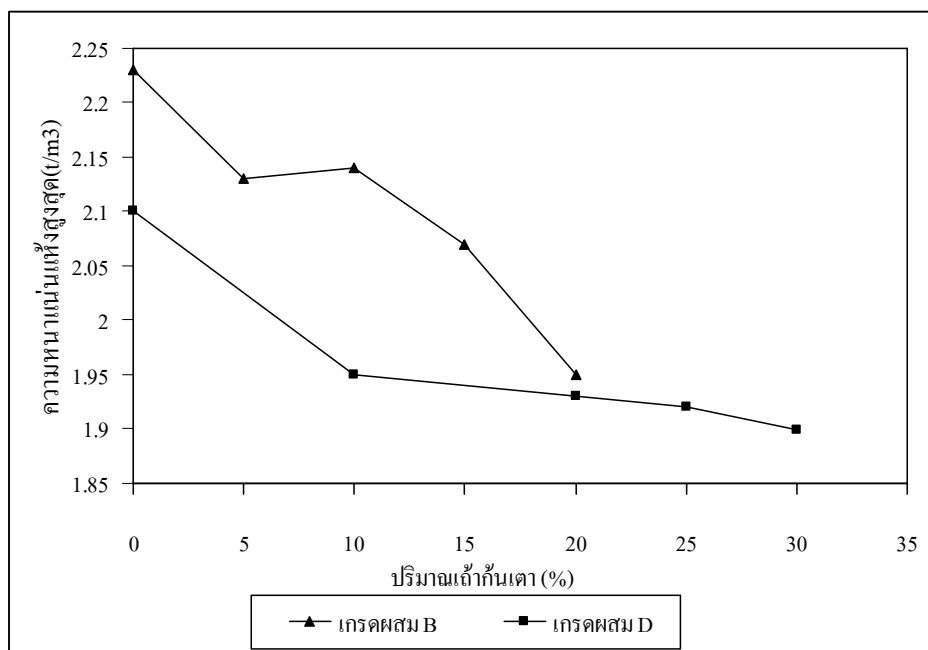
ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต($\text{lb}\cdot\text{ft}/\text{ft}^3$) โดยที่ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้ากันที่อัตราส่วนผสม 5, 10, 15, 20 %โดยน้ำหนักของดินแห้ง และดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้ากันที่อัตราส่วนผสม 10, 20, 25, 30 %โดยน้ำหนักของดินแห้งแสดงไว้ดังตารางที่ 15 และภาพที่ 14-16 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้ากันเตามากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลงทั้งในดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการผสมเถ้ากันเตาที่มีน้ำหนักเบากว่าดินลูกรังลงไปแทนที่จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลง ในส่วนของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังเกรดผสม B และ D มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้ากันเตาเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากเถ้ากันเตาที่ผสมลงในดินลูกรังมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าดินลูกรังมากพื้นที่ผิวจำเพาะจึงสูงกว่าและสามารถดูดซึมน้ำได้เป็นอย่างดีทำให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอนุภาคดินมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรดผสม B และ D

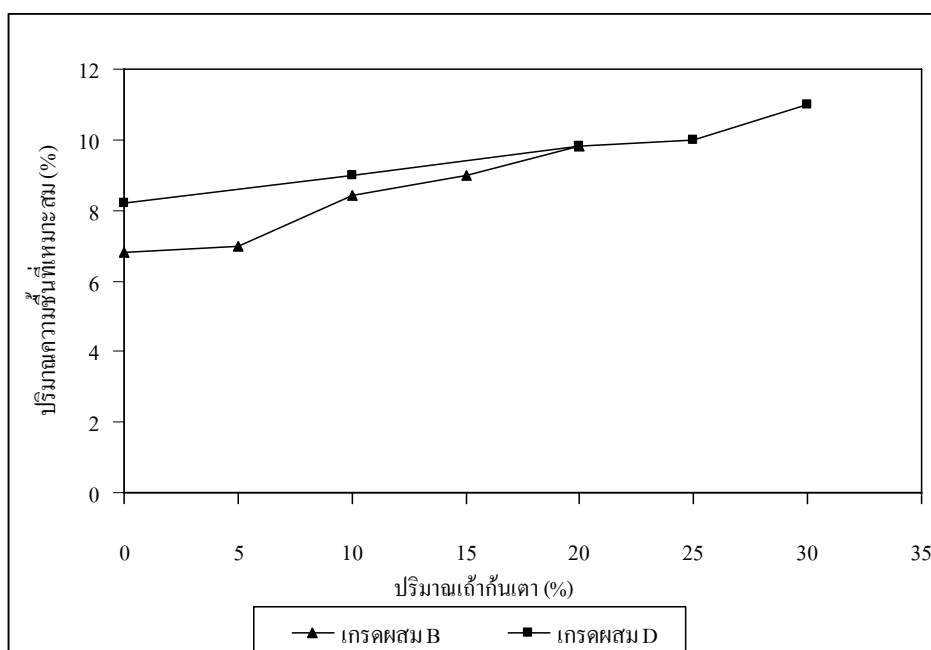
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณเข้ากันเตา (%)	MDD (t/m ³)	OMC (%)
B	0	2.23	6.80
	5	2.13	7.0
	10	2.14	8.4
	15	2.07	9.0
	20	1.95	9.8
D	0	2.10	8.2
	10	1.95	9.0
	20	1.93	9.8
	25	1.92	10.0
	30	1.90	11.0



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของถ้ำกันเทาและดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม B ผสมถ้ำกันเทาที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณน้ำในดินของดินลูกรังผสมน้ำในดินเกรดผสม B และเกรดผสม D



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับปริมาณน้ำในดินของดินลูกรังผสมน้ำในดินเกรดผสม B และเกรดผสม D

คุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR. ของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ที่เตรียมขึ้นผสมเข้ากันเตาโดยที่ดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเข้ากันที่อัตราส่วนผสม 5, 10, 15, 20 % โดยน้ำหนักของดินแห้ง และดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเข้ากันที่อัตราส่วนผสม 10, 20, 25, 30 % โดยน้ำหนักของดินแห้งทดสอบทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 16-17

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR. ของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ผสมเข้ากันเตา

กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณเข้ากันเตา (%)	CBR.(%).				
		อายุการบ่ม (วัน)				
		0	3	7	14	28
เกรดผสม B	5	52	52	56	62	67
	10	29	65	63	64	75
	15	46	50	50	53	49
	20	13	21	25	37	43
เกรดผสม D	10	43	45	51	45	51
	20	61	64	69	69	69
	25	60	69	74	75	83
	30	69	71	73	74	73

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบ soaked CBR. ของดินลูกรังเกรดผสม B และ D ผสมเถ้าก้นเตา

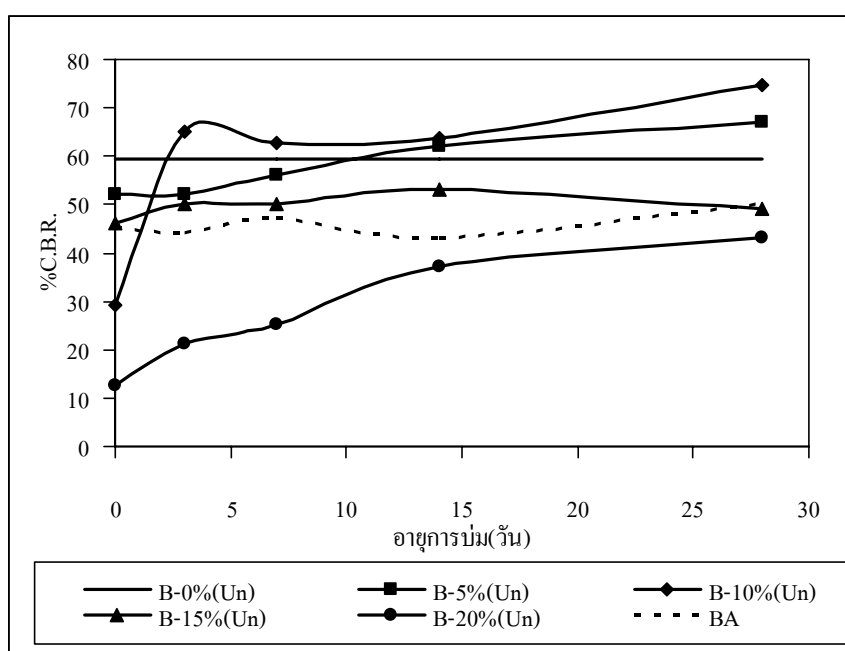
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณเถ้าก้นเตา (%)	CBR.(%).				
		อายุการบ่ม (วัน)				
		0	3	7	14	28
เกรดผสม B	5	23	34	37	42	48
	10	23	42	49	33	44
	15	30	37	37	40	39
	20	12	19	23	26	27
เกรดผสม D	10	33	40	44	43	40
	20	46	51	55	56	51
	25	45	54	62	68	71
	30	57	55	61	59	60

อิทธิพลของปริมาณเถ้าก้นเตาที่มีผลต่อค่า Unsoaked และ Soaked CBR. พบว่า จากการทดสอบในดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตา ค่า CBR. มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ปริมาณเถ้าก้นเตาที่ให้ค่ากำลังของดินมีค่าสูงที่สุดคือ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง และจากการทดสอบในดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตาให้ค่าสูงที่สุดคือ 25% ของน้ำหนักดินแห้งจากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตามากขึ้นกำลังของดินลูกรังก็จะไม่เพิ่มขึ้นแต่จะทำให้กำลังของดินลูกรังลดลงโดยผลการทดสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

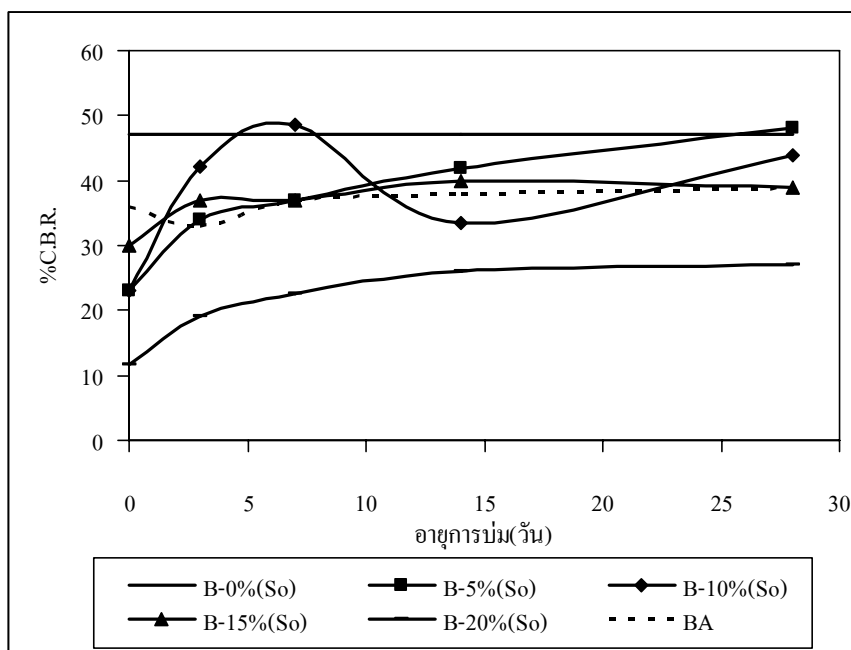
เนื่องจากดินลูกรังเกรดผสม B เป็นดินที่มีขนาดละเอียดก่อนข้างดี เมื่อผสมเถ้าก้นเตาเข้าไปในดินจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดละเอียด โดยที่เมื่อผสมเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วน 5% และ 10% ขนาดละเอียดยังมีความใกล้เคียงกับดินลูกรังเกรดผสม B ทำให้ค่า CBR. ที่ได้ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก แต่เมื่อผสมที่อัตราส่วนผสม 15% และ 20% เถ้าก้นเตาจะเข้าไปแทนที่ดินลูกรังที่มีขนาดละเอียดอยู่แล้ว ทำให้ค่า CBR. มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับดินลูกรังผสมเกรด B ที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตา แต่ในดินลูกรังเกรดผสม D เมื่อผสมเถ้าก้นเตาลงไป เถ้าก้นเตาจะเข้าไปทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้ค่า CBR. สูงขึ้น และเมื่อผสมเถ้าก้นเตาที่อัตราส่วน 25% เถ้าก้นเตาจะเข้าไป

เติมเต็มช่องว่างได้ดีที่สุด ทำให้ได้ค่า CBR. ที่มากที่สุด และเมื่อทำการผสมเข้ากันเดามากกว่านี้ ค่า CBR. มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเข้ากันเดาที่เพิ่มมากขึ้น

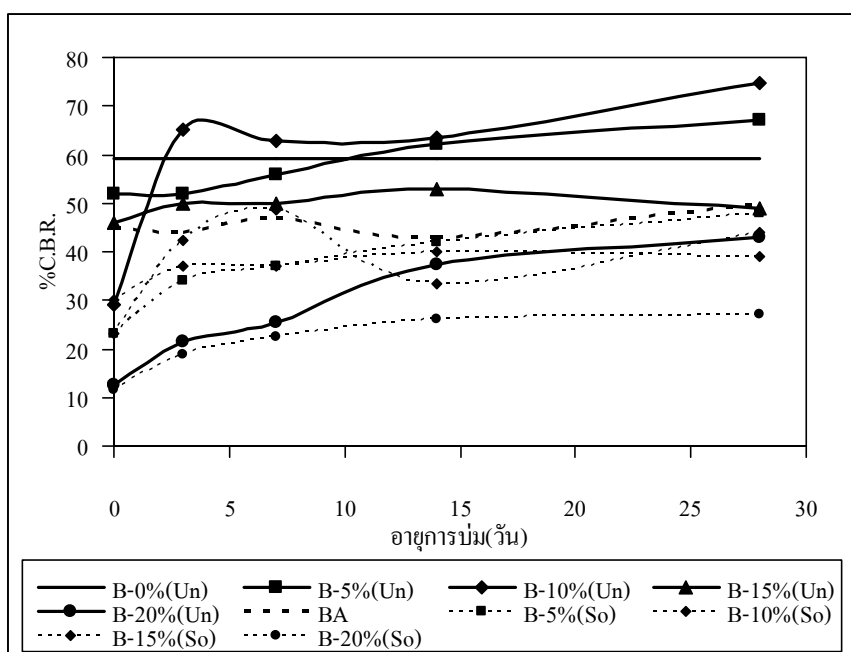
อิทธิพลของอายุการบ่มที่มีต่อค่า CBR. เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 17-25 พบว่าค่า CBR. มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอายุการบ่มในช่วงแรก 3 ถึง 7 วันนั้นค่า CBR. จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นในช่วงอายุการบ่ม 7 ถึง 28 วัน ค่า CBR. จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องช้าๆ



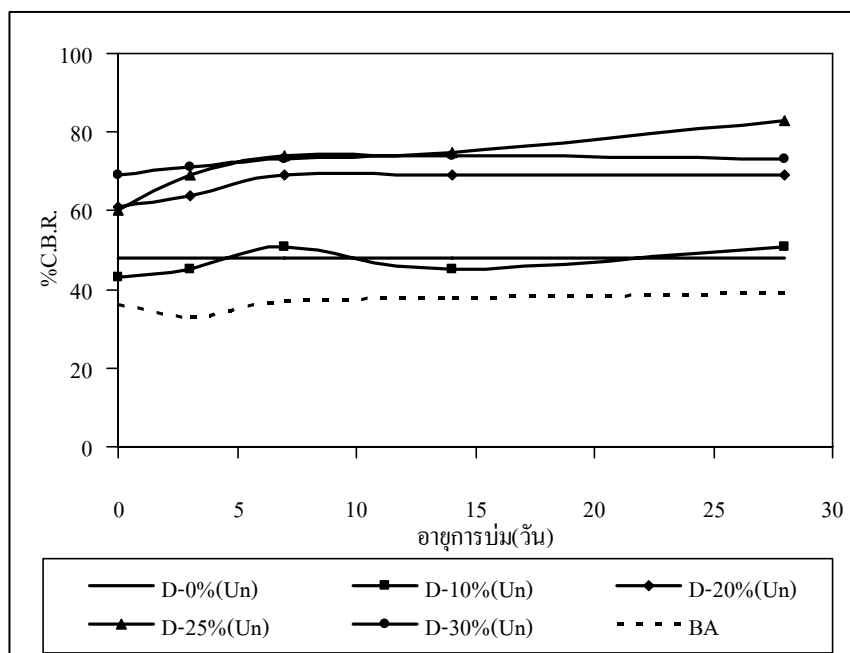
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเข้ากันเดา



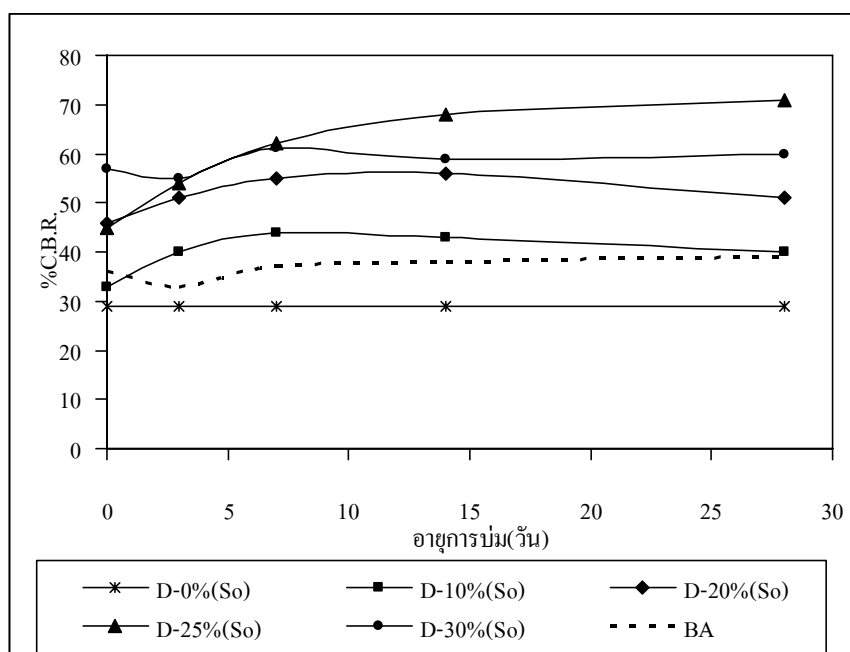
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรดผสม B ผสม
ถ้ำกั้นเตา



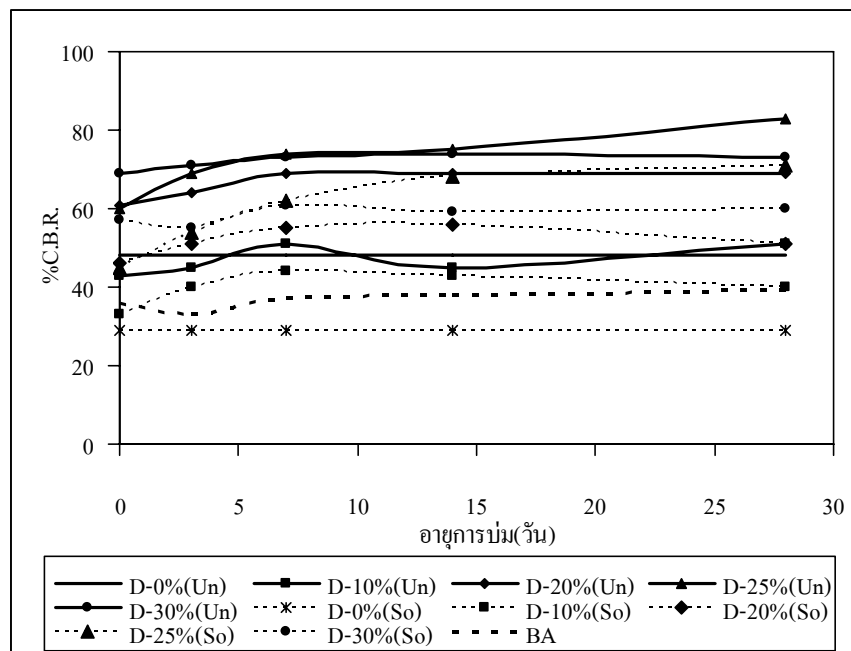
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด
B ผสมถ้ำกั้นเตา



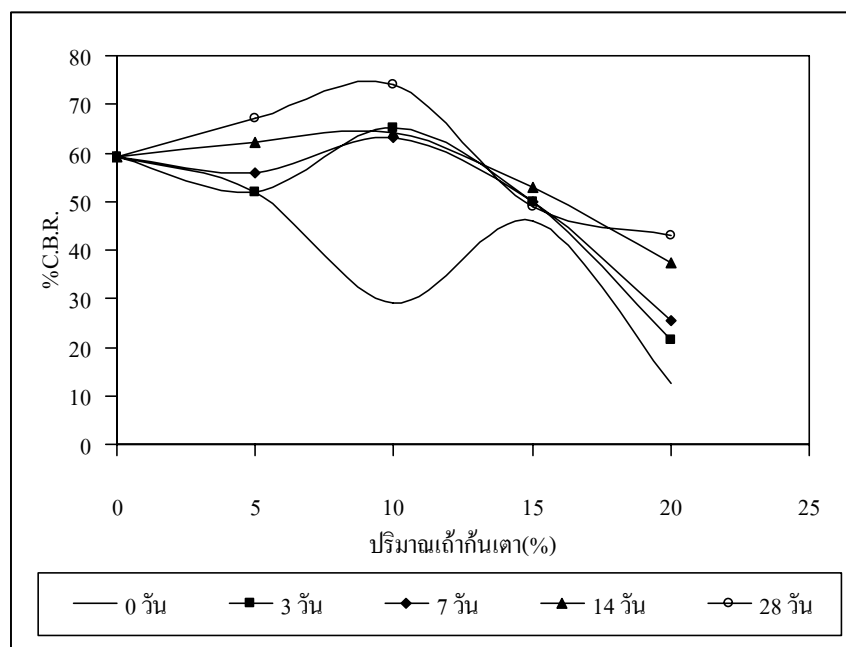
ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรดผสม D ผสม
เก้าก้นเตา



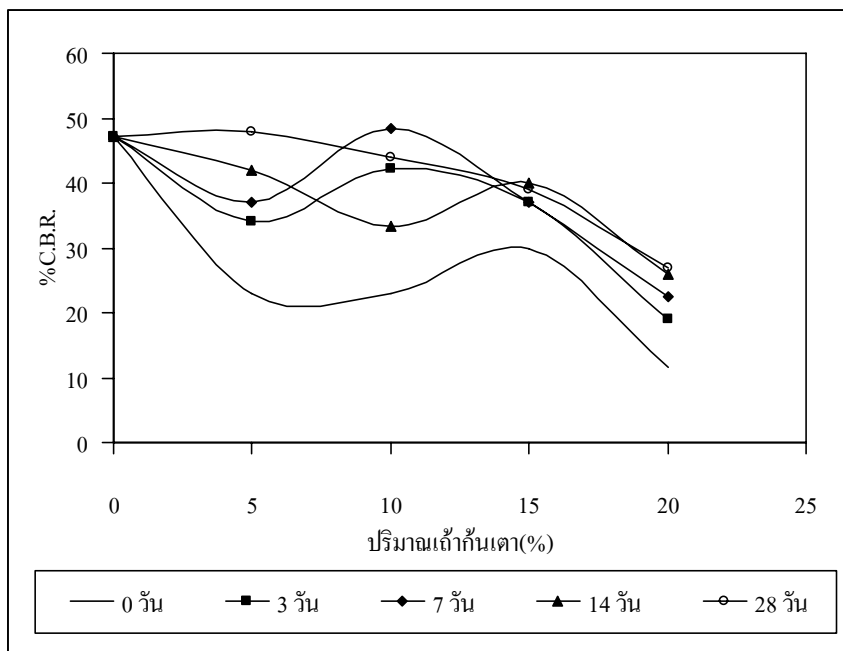
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรดผสม D
ผสมเก้าก้นเตา



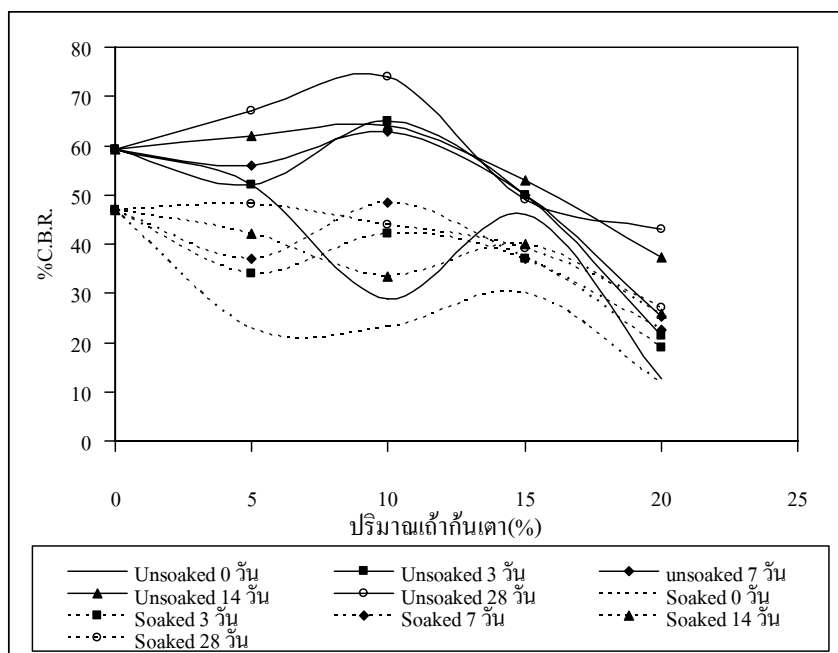
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR. กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมถ้ำกันเตา



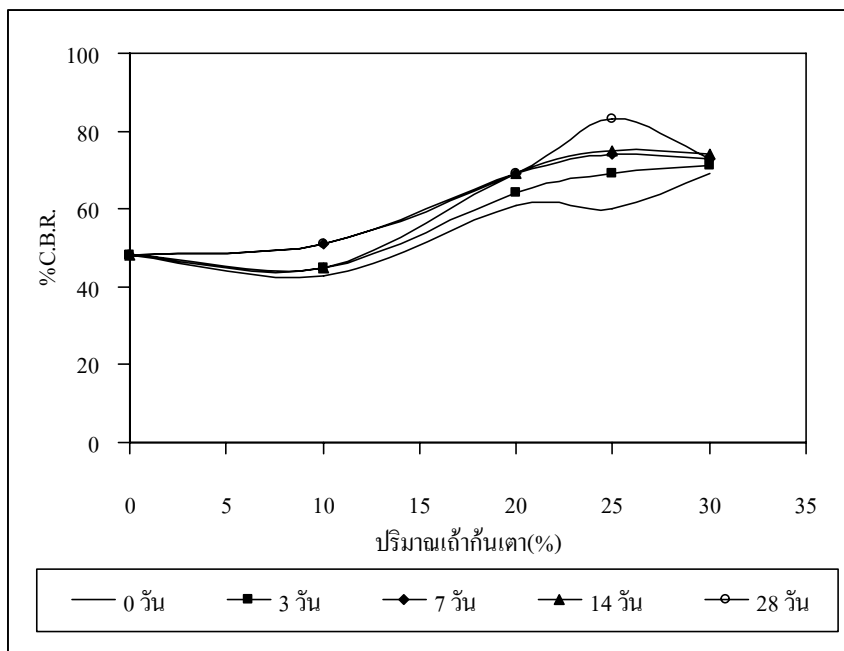
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณถ้ำกันเตาผสมดินลูกรังเกรด ผสม B



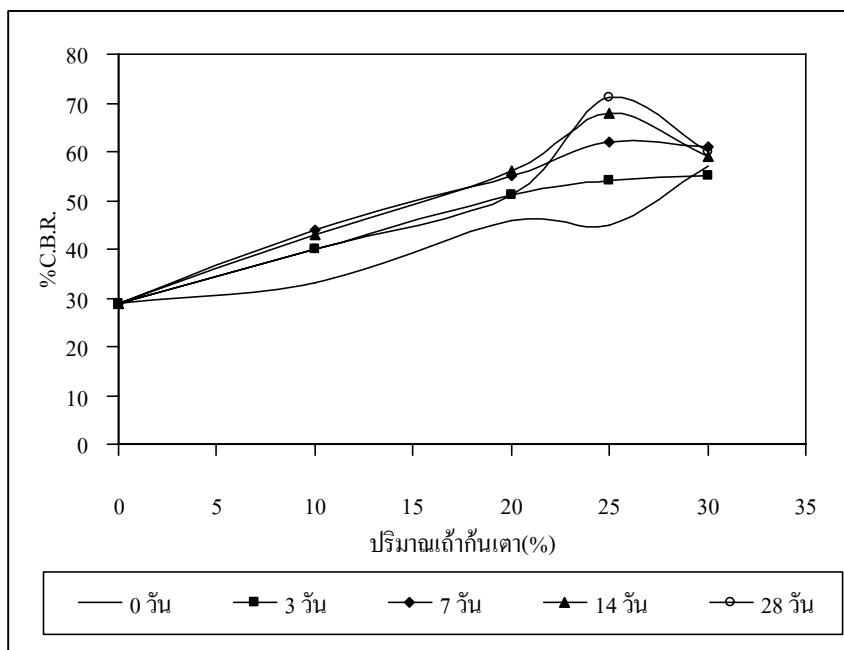
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณเถ้ากั้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม B



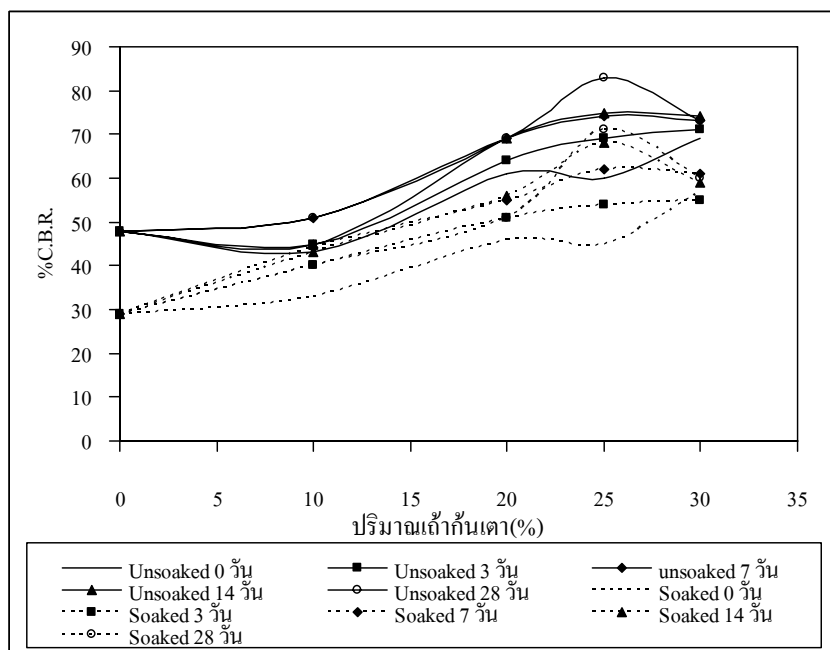
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR. กับปริมาณเถ้ากั้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม B



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR. กับปริมาณเถ้าก้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม D



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR. กับปริมาณเถ้าก้นเตาผสมดินลูกรังเกรดผสม D



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR. กับปริมาณน้ำในดิน
ลูกรังเกรดผสม D

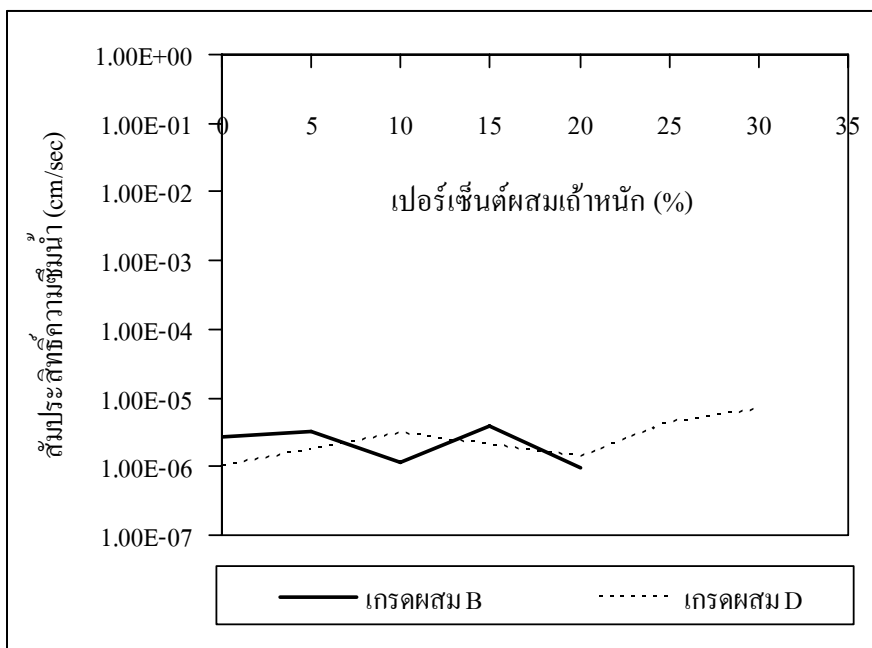
คุณสมบัติด้านความชื้นน้ำ

จากผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังผสมแกล้งดินในดินลูกรังเกรดผสม B และ D โดยวิธี Constant Head แบบใช้ความดันเข้าช่วย ดังแสดงในตารางที่ 18 พบว่าเมื่อปริมาณแกล้งดินเพิ่มขึ้นคุณสมบัติด้านการซึมน้ำของดินลูกรังผสมแกล้งดินมีแนวโน้มที่น้ำมากขึ้น โดยเฉพาะในดินลูกรังเกรดผสม B ผสมแกล้งดิน แต่ในดินลูกรังเกรดผสม D ผสมแกล้งดินกลับมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 26-29 ที่เป็นเช่นนี้เพราะแกล้งดินมีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและผกเลเอียดปนกันอยู่ แต่มีปริมาณเม็ดหยาบมากกว่า เมื่อนำมาผสมกับมวลดินแล้วทำการบดอัดจะทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงไป โดยในดินลูกรังเกรดผสม B อนุภาคของแกล้งดินจะเข้าไปอุดช่องว่างภายในมวลดิน ซึ่งโครงสร้างส่วนมากประกอบไปด้วยดินเม็ดใหญ่ ทำให้ดินมีความหยาบมากขึ้น แต่ในดินลูกรังเกรดผสม D ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นดินเม็ดเล็กค่อนข้างมาก แกล้งดินที่ผสมเพิ่มลงไปจะเข้าไปแทนที่ส่วนที่เป็นดินเม็ดละเอียดทำให้โครงสร้างของดินโปร่งมากขึ้นมากจนเป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีค่าลดลง

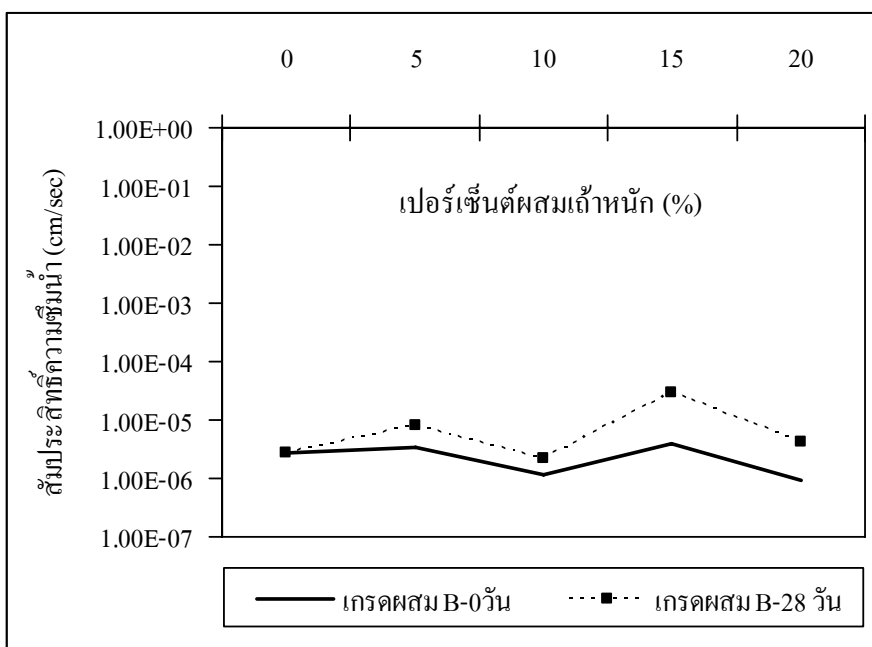
เมื่อทำการบ่มดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาและนำมาทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านโดยวิธี Constant Head แบบใช้ความดันเข้าช่วยเช่นเดียวกัน ผลของอายุการบ่มของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาคือค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้แสดงไว้ในภาพที่ 26-29 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาที่อายุการบ่ม 28 วันกับดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าสูงขึ้นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1-10 เท่า ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่า เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นเป็นผลให้ดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตามีความทึบน้ำลดลงเนื่องจากการแลกเปลี่ยนประจุและการจับตัวกันของเม็ดดิน (Cation Exchange and Flocculation) ทำให้อนุภาคดินเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้น

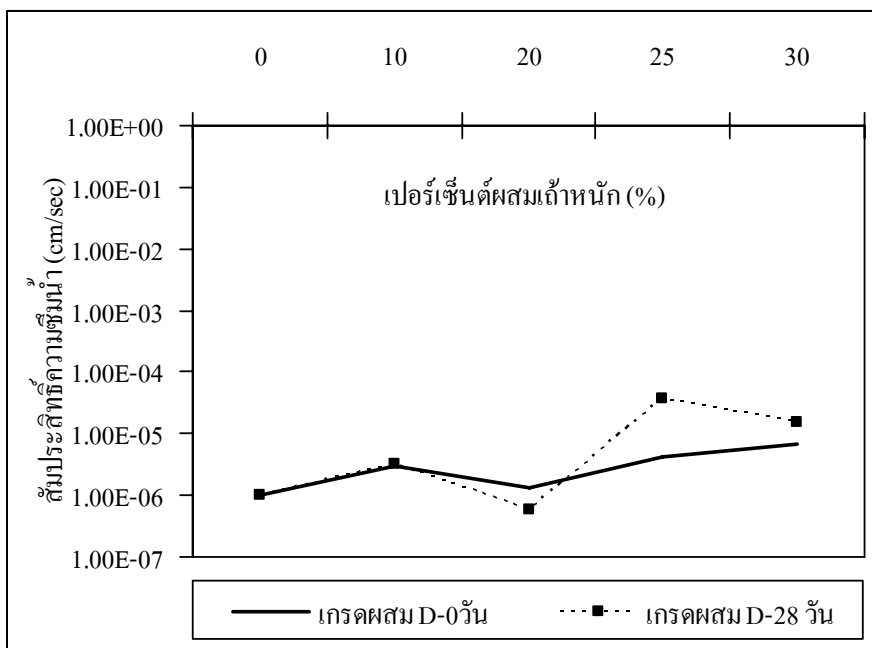
Coefficient of Permeability (cm./sec.)			
กลุ่มดินลูกรัง	ปริมาณเถ้าก้นเตา (%)	อายุการบ่ม	
		ทดสอบทันทีหลังบดอัด	28
เกรดผสม B	0	2.70E-06	2.70E-06
	5	3.34E-06	7.86E-06
	10	1.18E-06	2.26E-06
	15	3.97E-06	2.94E-05
	20	9.30E-07	4.18E-06
เกรดผสม D	0	9.93E-07	9.93E-07
	10	3.01E-06	3.30E-06
	20	1.36E-06	6.02E-07
	25	4.29E-06	3.80E-05
	30	6.72E-06	1.58E-05



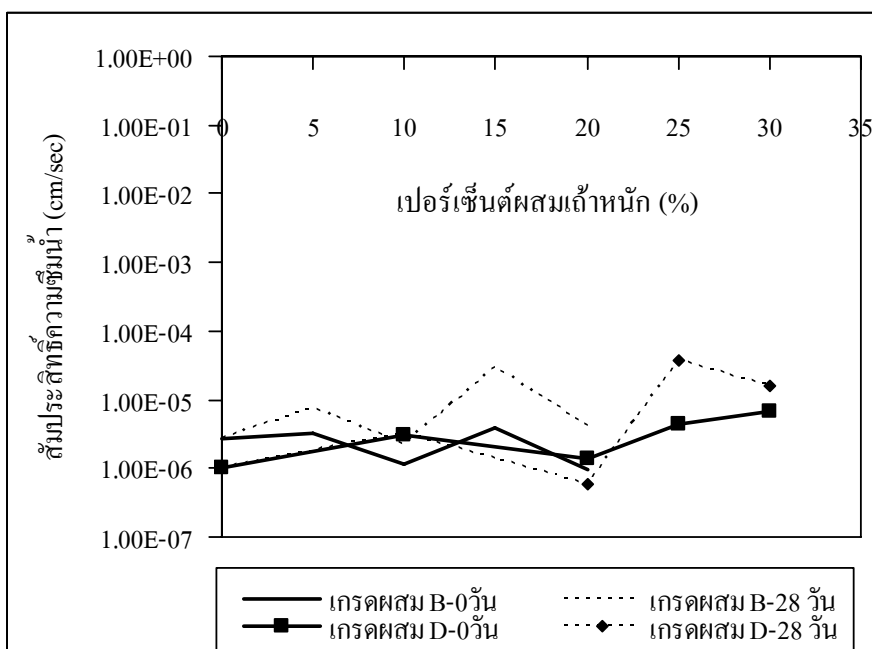
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณไถ่หนักเตาของดินลูกรังผสมไถ่หนักเตาเกรดผสม B และ D ทันทีที่บดอัด



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณไถ่หนักเตาของดินลูกรังผสมไถ่หนักเตาเกรดผสม B ทันทีที่บดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านกับปริมาณเถ้าก้นเตาของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาเกรตผสม D ทันทึบดัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านกับปริมาณเถ้าก้นเตาของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาเกรตผสม B และ D ทันทึบดัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ดินลูกรังที่เก็บมาจากสนามมีคุณสมบัติเบื้องต้นสามารถจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification System ได้เป็นดิน GW-GC หรือจำแนกตามระบบ AASHTO ได้เป็น ดิน A-1(0)
2. แก้วกันเตาปิโตรลีนที่นำมาใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด มีลักษณะคล้าย กับทราย มีสีเทาถึงดำ หรือสีน้ำตาล อนุภาคของแก้วกันเตานั้นมีขนาดแตกต่างกัน และฟุ้งกระจายได้ง่าย จากตัวอย่างภาพถ่ายแก้วกันเตาจากการใช้เครื่อง scanning electron microscope ตรวจสอบที่ กำลังขยายแตกต่างกัน จะพบว่าอนุภาคของแก้วกันเตานั้นมีขนาดที่แตกต่างและรูปร่างที่แตกต่าง กันไปโดยจะมีลักษณะพื้นผิวทั้งที่เรียบและที่เป็นเป็นแบบขรุขระและมีลักษณะความเป็นเหลี่ยมคม
3. ดินลูกรังเกรดผสม B มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด, Unsoaked CBR., Soaked CBR. และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำสูงสุด ในขณะที่ดินลูกรังเกรดผสม D และแก้วกันเตากลุ่มอื่นๆมีค่า ลดลงตามลำดับ ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังเกรดผสม B มีค่าน้อยที่สุดแต่ในดิน ลูกรังเกรดผสม D และแก้วกันเตามีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรัง เกรดผสม D มีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือดินลูกรังเกรดผสม B และแก้วกันเตา
4. เมื่อเพิ่มปริมาณแก้วกันเตามากขึ้นจะทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มลดลงเพียง เล็กน้อย โดยทั้งดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D ค่า Liquid Limit มีค่าลดลงประมาณ 1-4% ในขณะที่ค่า Plastic Limit ในดินลูกรังเกรดผสม B มีแนวโน้มคงที่ ดินลูกรังเกรดผสม D มีค่า เพิ่มขึ้นประมาณ 1-2% ค่า Plasticity Index ลดลงโดยดินลูกรังเกรดผสม B มีค่า Plasticity Index ลดลงประมาณ 1-4% ส่วนดินลูกรังเกรดผสม D มีค่าลดลงประมาณ 2-6%
5. เมื่อปริมาณแก้วกันเตาเพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลงค่าปริมาณ ความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในดินลูกรังเกรดผสม B และเกรดผสม D

6. ค่า Unsoaked และ Soaked CBR. ในดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตา ค่า CBR. มีแนวโน้มคงที่จนถึงจุดหนึ่งแล้วลดลง ที่ปริมาณเถ้าก้นเตาที่ให้ค่ากำลังของดินมีค่าสูงที่สุดคือ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง และในดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตาให้ค่าสูงที่สุดคือ 25% ของน้ำหนักดินแห้งจากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณเถ้าก้นเตามากขึ้นกำลังของดินลูกรังก็จะไม่เพิ่มขึ้นแต่จะทำให้กำลังของดินลูกรังลดลง อิทธิพลของอายุการบ่มที่มีต่อค่า CBR. จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอายุการบ่มในช่วงแรก 3 ถึง 7 วันนั้นค่า CBR. จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นในช่วงอายุการบ่ม 14 ถึง 28 วัน ค่า CBR. จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องช้า ๆ

7. ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเมื่อปริมาณเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรดผสม B ผสมเถ้าก้นเตาที่บ่มน้ำมากขึ้น แต่ในดินลูกรังเกรดผสม D ผสมเถ้าก้นเตามีค่าสูงขึ้น ผลของอายุการบ่มของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาต่อค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาที่อายุการบ่ม 28 วันกับดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาที่ทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าสูงขึ้นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1 – 10 เท่า

8. จากงานวิจัยในครั้งนี้เมื่อพิจารณาในด้านกำลังของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาพบว่าดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตามีคุณสมบัติที่จะนำไปใช้ในงานรองพื้นทางได้อย่างเหมาะสม แต่ยังไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นพื้นทาง เมื่อพิจารณาจากค่า Soaked CBR. ของดินลูกรังผสมเถ้าก้นที่อายุการบ่ม 3 วันมีค่ามากกว่า 25% ซึ่งปริมาณเถ้าก้นเตาที่เหมาะสมสำหรับแต่ละกลุ่มดินแสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 19 ปริมาณเถ้าก้นเตาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานสำหรับดินลูกรังเกรดผสม B และ D

กลุ่มดิน	ปริมาณเถ้าก้นเตาที่เหมาะสม(%)
เกรดผสม B	0-10
เกรดผสม D	25

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาถึงคุณสมบัติด้านกำลังของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาในครั้งนี้ใช้การทดสอบ CBR. เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงควรทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น Unconfined Compressive Strength เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาในดินลูกรังเกรดอื่นๆ และดินชนิดอื่นๆ เช่น ดินเหนียว หรือดินทราย
3. การศึกษากลไกในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆมีความสำคัญเพื่อใช้ในการอธิบายโครงสร้างของดินผสมเถ้าก้นเตาที่เกิดขึ้นอย่างแท้จริง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการพัฒนากำลังของดิน ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาในด้าน Physic-Chemical โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ X – Ray Diffraction (XRD)
4. ควรทำแปลงทดสอบดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาในสนาม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาที่ได้จากการทดสอบในสนาม กับคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต
5. ควรทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิการบ่มต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของดินผสมเถ้าก้นเตา เพราะการทำงานในสนามเราไม่สามารถควบคุมการสูญเสียความชื้นเนื่องจากอุณหภูมิให้คงที่ได้เหมือนอย่างในห้องปฏิบัติการ
6. ควรทำการศึกษาถึงผลของการล่าช้าการบดอัดดินต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของดินผสมเถ้าก้นเตา เพราะการทำงานในสนามนั้น เราไม่สามารถที่จะผสมและบดอัดให้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาสั้นๆได้
7. การศึกษาในครั้งนี้ใช้เถ้าก้นเตาบิหมินัสเป็นสารเชื่อมประสานเพียงชนิดเดียว ดังนั้นควรทำการศึกษาการใช้สารเชื่อมประสานชนิดอื่นๆมาเป็นสารผสมเพิ่มเช่น จีโอโพลีเมอร์ หรือแอนทราไซต์ เพื่อช่วยในการลดมลภาวะและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้คุ้มค่า

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทางหลวง. 2513. รายละเอียดควบคุมการก่อสร้าง. กรมทางหลวงแผ่นดิน, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

ณัฐยาณี บำเพ็ญผล และ คุณากร แพรกทอง. 2549. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้แคลเซียม. ปรินูญานินพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ทรงพล บุญมาดี. 2529. ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR. ของดินลูกรังผสมซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ ทรงพล บุญมาดี. 2534. ความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined Compressive Strength กับ Unsoaked CBR. ของดินลูกรังผสมซีเมนต์. รายงานฉบับที่ วว. 125 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง.

_____ และ สุรเชษฐ์ เอี่ยมเชย. 2532. ความคงทนของดินซีเมนต์ รายงานฉบับที่ วว. 12 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง.

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

นพรัตน์ ท้วมประดิษฐ์. 2543. อิทธิพลของการบดอัดซ้ำที่มีต่อคุณสมบัติของดินลูกรังในการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พลาการ พีรภาคย์. 2542. การปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังโดยวิธีผสมเถ้าลอยลิกไนต์. การศึกษาพิเศษประกาศนียบัตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พิทักษ์พงษ์ ทองยอดอินทร์ และ สุรศักดิ์ โสพศ. 2544. การปรับปรุงดินลูกรังเพื่อใช้เป็นพื้นที่ทาง
โดยใช้เถ้าลอย. ปรินิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วรศักดิ์ ตันติวนิช และ สมหวัง ช่างสุวรรณ. 2538. ธรณีวิทยาแหล่งดินลูกรังบริเวณภาค
ตะวันออกของประเทศไทย รายงานฉบับที่ วว. 134 กองวิเคราะห์และวิจัยกรมทางหลวง.

วรกร ไม้เรียง, จิรพัฒน์ โชติไกร และ ประทีป ดวงเดือน. 2522. ปฐพีกลศาสตร์ทฤษฎีและ
ปฏิบัติการ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

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

วุฒิชัย วัชรวิเชียรติ. 2526. การศึกษาคุณสมบัติและความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินลูกรัง
ในประเทศไทย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า, กรุงเทพฯ.

ศุภกิจ นนทนันทน์. 2537. การปรับปรุงคุณภาพดิน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ศุภกิจ นนทนันทน์ และ อติมนต์ ยุพกรณ์. 2544. อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์และปริมาณน้ำใน
มวลดินที่มีต่อความแข็งแรงของดินลูกรังผสมซีเมนต์, น. GTE 91-97. ใน การประชุม
วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 7. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ

สุภาพร สนิทวงศ์ชัย. 2528. อิทธิพลของพลังงานบดอัดที่มีต่อดินลูกรัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพร ฤทธิวิโรจน์ .2548 . การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อนิรุทธิ์ ธงไชย และ สุเทพ นิ่มนวล. 2530. การใช้ประโยชน์จี้ถ้ำลอยในการเป็นวัสดุสร้างทางหลวง. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

Alexander, L.T. and G. Cady 1962. **Genesis and Hardening of Laterite Soils.** U.S.Dept Agri. Tech. Bull. No. 1282, New York.

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.

Buchanan, F. 1807. **A journey from Madras thorough the countries of Mysore, Canara and Malabor.** 2d ed., East Indian Company, London.

Bumjoo Kim and Monica Prezzi. 2006. Compaction characteristics and corrosivity of Indiana class-F fly and bottom ash mixtures. **Construction and Building Material** 2006

Department of Highways and Siam Cement Company Ltd. **Demonstration Road Using Local Soil With Cement Stabilization.** n.p. Bangkok

Femor, LL 1911. **What is laterite?.** Geol.Mag. 5 (8): 453-566.

Hongnoi, M. 1969. **Effect of method of preparation on the compaction and strength characteristic of lateritic soils.** M.Eng. 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 MD Gidigas. Laterite soil engineering. Elsevier Sci. Pub. Co., New York.
- Lambe, T.W. 1958. The engineering behavior of compacted clays. **J. Soil Mech. Found. Divis. Asce.** 84: 56-67.
- Mallet, F.R. 1883. Laterite and other manganese are occurring at Gosolpur, **Jabalpur distrect. 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.
- Mitchell, J.K. 1982. Soil Improvement-State-of-The-Art. **Report. Proc. X ICSMFE. Rotterdam** 1982 (4): 533-537
- Moh, Z.C., Chin, Y.P. and Ng, S.C. 1967. **Proceeding 3 rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.**
- Morh, F.C.J. and F.A. Van Baren. 1954. **Tropical Soils.** Interscience, London.
- 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
- Ng, S.C. 1966. **Cement Stabilisation of Lateritics Soils.** M.Eng. thesis, Asian Institute of Technology

- Okagbue, C.O. and Yakubu, J.A. Limestone ash waste 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 2004. Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerator for its use in road base. **Waste Management** 2004 (24): 899-909
- Woo, S.M. 1971. **Lime Stabilization of Selected Lateritic Soil**. M.Eng, Thesis, SEATO Graduate School of Engineering, Bangkok, Thailand.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	วิเศษ แจ่มจิตร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	22 พฤษภาคม 2527
สถานที่เกิด	จ. ขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-